

ЭНЕРГЕТИКА, ИНФОРМАТИКА, ИННОВАЦИИ – 2025

**(электроэнергетика, электротехника, теплоэнергетика,
математическое моделирование, информационные технологии в
производстве и строительстве)**

**XV МЕЖДУНАРОДНАЯ
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ**

19-20 ноября 2025 г.

СБОРНИК ТРУДОВ

ТОМ 1

СЕКЦИИ 1,2,3, 4

**СМОЛЕНСК
2025**

УДК 621.31+621.3+536+621.1+62.003+621.38
И74

ЭНЕРГЕТИКА, ИНФОРМАТИКА, ИННОВАЦИИ – 2025 (электроэнергетика, электротехника, теплоэнергетика, математическое моделирование, информационные технологии в производстве и строительстве). Сб трудов XV-ой Межд. науч.-техн. конф.. В 3 т. Т 1. – 2025. – 241 с.

ISBN 978-5-91412-557-5

В сборнике публикуются труды участников XV Международной научно-технической конференции «Энергетика, информатика, инновации – 2025», состоявшейся 19-20 ноября 2025 г. в филиале ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» в г. Смоленске, в которых изложены результаты оригинальных научно-технических работ в области энергетики, электротехники, теплоэнергетики, математического моделирования, информационных технологий в производстве и строительстве.

Издание предназначено для научных работников и преподавателей вузов, магистров и аспирантов, осуществляющих исследования в указанных областях.

ISBN 978-5-91412-557-5

©Авторы
©«Универсум»
© филиал ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» в г. Смоленске, 2025

СЕКЦИЯ 1 ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

Е.С. Андреевков, к.т.н., доц.

(Филиал ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» в г. Смоленске)

РАСЧЕТ ТОКОВ ОДНОФАЗНЫХ ЗАМЫКАНИЙ В ЭЛЕКТРОУСТА- НОВКАХ ДО 1 кВ С УЧЕТОМ РАСТЕКАНИЯ ОБРАТНОГО ТОКА В ЗЕМЛЕ

Существует два метода определения тока однофазного КЗ – по точной формуле и приближенной. Расчет выполняется по формуле из ГОСТ 28249–93 [1] методом симметричных составляющих.

$$I_{\text{к}}^{(1)} = \frac{\sqrt{3} \cdot U_{\text{НОМ}}}{\sqrt{(2 \cdot R_{1\Sigma} + R_{0\Sigma})^2 + (2 \cdot X_{1\Sigma} + X_{0\Sigma})^2}}, \quad (1)$$

где:

$U_{\text{НОМ}}$ – номинальное линейное напряжение сети,

$R_{1\Sigma}, X_{1\Sigma}$ – активное и индуктивное сопротивления прямой последовательности цепи до точки КЗ, Ом;

$R_{0\Sigma}, X_{0\Sigma}$ – активное и индуктивное сопротивления нулевой последовательности цепи до точки КЗ, Ом.

Токи нулевой последовательности могут возвращаться к источнику через цепь зануления или защитного заземления и(или) землю (рис. 1). Поэтому при расчетах токов однофазного замыкания необходимо учитывать не только параметры питающего кабеля, но и параметры сторонних проводящих частей и земли, по которым возможно протекание токов нулевой последовательности. Справочные значения сопротивлений нулевой последовательности приводятся в [1] и от способа выполнения цепи зануления и заземления как правило не зависят. Расчёт сопротивлений нулевой последовательности кабелей с пластмассовой изоляцией описывается в [2]. Однако в общем случае методика расчета этих сопротивлений в литературе не раскрывается. Поэтому в инженерной практике, как правило, применяется приближённое выражение, позволяющее использовать замеренные значения сопротивлений цепи, фаза-нуль.

$$I_{\text{к}}^{(1)} = \frac{U_{\text{ф}}}{\frac{Z_{\text{т}}^{(1)}}{3} + Z_{\text{ф-н}}}, \quad (2)$$

где:

$Z_{\text{т}}^{(1)}$ – полное сопротивление силового трансформатора при однофазном замыкании на корпус, Ом;

$Z_{\text{ф-н}}$ – полное сопротивление цепи фаза-нуль, Ом.

$$Z_{\text{ф-н}} = \sqrt{R_{\text{ф-н}}^2 + X_{\text{ф-н}}^2} = \sqrt{(R_{\text{ф}} + R_{\text{н}} + R_{\text{п}})^2 + (X_{\text{ф}} + X_{\text{н}})^2}, \quad (3)$$

где $R_{\text{ф}}$, $R_{\text{н}}$, $X_{\text{ф}}$, $X_{\text{н}}$ – активные и индуктивные сопротивления фазного и нулевого проводов, Ом;

$R_{\text{п}}$ – переходное сопротивление, учитывающее сопротивление дуги, контактов, выключателей, болтовых соединений и т. п., Ом.

В сети с глухозаземленной нейтралью (TN) согласно требованиям актуальных стандартов на вводах в здания рекомендуется выполнять повторное заземление нулевых защитных проводников. Тогда, при наличии на линии промежуточных заземляющих устройств ток замыкания возвращается к источнику не только по цепи зануления, но и через землю (сопротивление X_3 на рис. 1). Учет распределения тока в земле представляет определенные трудности, так как величина тока в земле зависит не только от удельной проводимости грунта, но и в случае ВЛ или кабелей с непроводящей оболочкой от сопротивлений повторных заземляющих устройств (сопротивление R_3 на рисунок 1), сопротивление которых, согласно ПУЭ, не должно превышать 30 Ом.

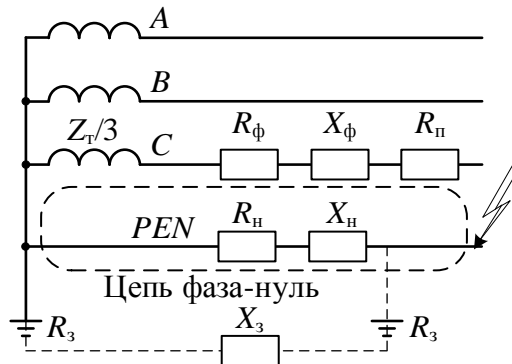


Рисунок 1 – Схема замещения при расчете токов однофазного КЗ

Согласно ГОСТ 28249 для ВЛ с промежуточными заземлениями активное и индуктивное сопротивления петли фаза-нуль ВЛ определяют умножением расчетных сопротивлений на соответствующие поправочные коэффициенты K_R , K_X в зависимости от числа промежуточных заземлений и на коэффициент сезонности $K_{сз}$. Значения поправочных коэффициентов приводятся в ГОСТ 28249. Для линий, выполненных кабелями, растекание тока в земле учитывается в табличных значениях сопротивлений нулевой последовательности. А в справочных данных значений сопротивлений цепи фаза-нуль кабельных линий сопротивление заземлителей и земли не учитываются, что приводит к занижению результатов расчета тока однофазного замыкания данным методом. Поэтому разработка уточненной методики является актуальной.

В работе [2] приводится методика расчета сопротивлений нулевой последовательности с учетом растекания тока в земле для кабелей с пластмассовой изоляцией и непроводящей оболочкой. Однако значения сопротивлений нулевой последовательности нельзя использовать для расчета токов замыкания на землю через сопротивление цепи фаза-нуль.

Расчетные формулы для сопротивлений цепи зануления с учётом растекания обратного тока в земле можно выразить исходя из схемы замещения для однофазного КЗ (рис. 1). Результирующее сопротивление $Z_{\text{H-3}}$ нулевого проводника ($R_{\text{H}} + jX_{\text{H}}$) и сопротивления земли и заземляющих устройств ($R_3 + jX_3$) определяется выражением

$$Z_{\text{H-3}} = \frac{(R_{\text{H}} + jX_{\text{H}})(R_3 + jX_3)}{R_{\text{H}} + jX_{\text{H}} + R_3 + jX_3},$$

где:

$R_{\text{H}}, X_{\text{H}}$ – активное и индуктивное сопротивления нулевого проводника, Ом;
 X_3 – индуктивное сопротивление земли, Ом; R_3 – активное сопротивление заземляющих устройств, Ом.

Путем математических преобразований можно получить следующие выражения для активной и реактивной составляющих результирующего сопротивления цепи зануления

$$\text{Re}(Z_{\text{H-3}}) = R_{\text{H-3}} = \frac{R_{\text{H}}R_3(R_{\text{H}} + R_3) + R_{\text{H}}X_3^2 + R_3X_{\text{H}}^2}{(R_{\text{H}} + R_3)^2 + (X_{\text{H}} + X_3)^2}; \quad (4)$$

$$\text{Im}(Z_{\text{H-3}}) = X_{\text{H-3}} = \frac{X_{\text{H}}X_3(X_{\text{H}} + X_3) + R_{\text{H}}^2X_3 + R_3^2X_{\text{H}}}{(R_{\text{H}} + R_3)^2 + (X_{\text{H}} + X_3)^2}. \quad (5)$$

Полученные значения сопротивлений необходимо подставлять вместо R_{H} и X_{H} в (3) для расчета $Z_{\text{ф-н}}$.

Индуктивное сопротивление земли

$$X_3 = x_3 \cdot L,$$

где x_3 – удельное реактивное сопротивление земли в соответствии с рекомендациями [3] принимают равным 0,6 мОм/м; L – длина линии, м.

Значение удельного реактивного сопротивления нулевой жилы x_{H} для четырехжильного кабеля можно рассчитать по формуле

$$x_{\text{H}} = j\omega L_{\text{H}},$$

где L_{H} – индуктивность в пересчете на одну жилу четырехжильного кабеля, мГн/км, расчёт которой рассматривается в [2].

Полученные выражения позволяют производить расчеты токов однофазного КЗ с учетом растекания тока в земле через сопротивление петли фаза-нуль на этапе проектирования системы электроснабжения (при отсутствии данных замеров).

Литература

1. ГОСТ 28249–93. Короткие замыкания в электроустановках. Методы расчета в электроустановках переменного тока напряжением до 1 кВ. – Введ. 95-01-01. – М.: Стандартинформ, 2006. – 45 с.
2. Каменский М. К. Силовые кабели 1–10 кВ с пластмассовой изоляцией. Расчет активного и индуктивного сопротивлений / М. К. Каменский, С. Д. Холодный // Новости Электротехники. – 2005. – № 4 (34).

3. Холодный С. Д. Расчет токов в оболочках и экранах и их термической стойкости при однофазном двойном замыкании в разветвленной кабельной сети / М. М. Филиппов, В. А. Кричко, И. А. Миронов // Электричество. – 2001. – № 8.

*Л.В. Вайтеленко, ст. преп.; А.А. Лемешева, студ.
(Филиал ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» в г. Смоленске)*

АНАЛИЗ ТЕХНИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ МОЩНОСТИ И ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ НА ОСНОВЕ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Анализ как суммарных, так и отдельных составляющих потерь мощности и электроэнергии в электрических сетях позволяет не только оценить эффективность работы сетей, но и выявить ключевые направления и мероприятия по снижению потерь (МСП).

Для выполнения данного анализа требуется произвести расчет потерь одним в сети из способов: ручным, с использованием специальных программ по расчету потерь или на основе моделирования. С учетом того, что для выбора МСП потребуется выполнение многократных расчетов для различных условий, предпочтительным является использование машинного расчета либо по специальным программам, либо на основе разработанных компьютерных моделей. Исходя из предварительно выполненного анализа [1], в данной работе выбран способ на основе компьютерного моделирования.

На основе разработанной ранее модели [2], которая позволяет рассчитывать технические потери мощности и электроэнергии в отдельных элементах, в программе SimInTech [3] составлена модель распределительной сети 110 кВ, представленная на рисунок 1.

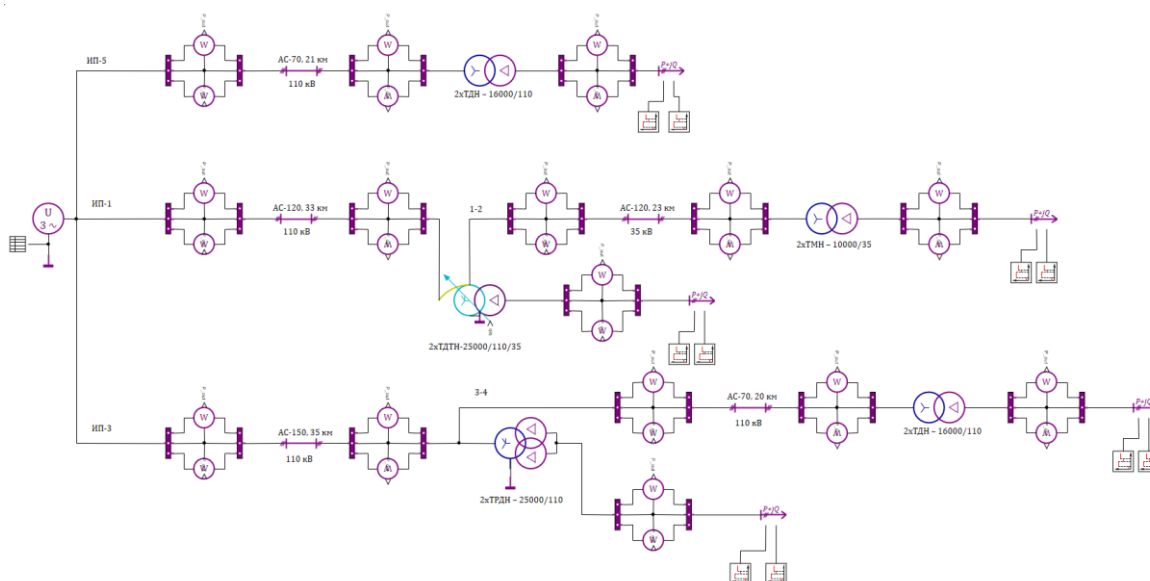


Рисунок 1 – Полная схема распределительной сети в программе SimInTech

Следует отметить, что разработанная модель предназначена для расчета только таких технических потерь, как нагрузочные потери, потери холостого хода и потери на корону, и не учитывает другие составляющие.

Согласно проведенному расчету по модели суммарные потери в сети составляют 2,46% от отпуска электроэнергии. Согласно [4] такой результат является достаточно низким для сетей данного класса напряжения.

Полученная структура потерь по составляющим потерь и отдельным элементам сети представлена на рисунок 2.

Суммарные потери электроэнергии в сети, $\Sigma \Delta W$ Суммарные потери электроэнергии в сети, $\Sigma \Delta W$



Суммарные нагрузочные потери электроэнергии в сети, $\Sigma \Delta W$ Суммарные условно-постоянные потери электроэнергии в сети, $\Sigma \Delta W$

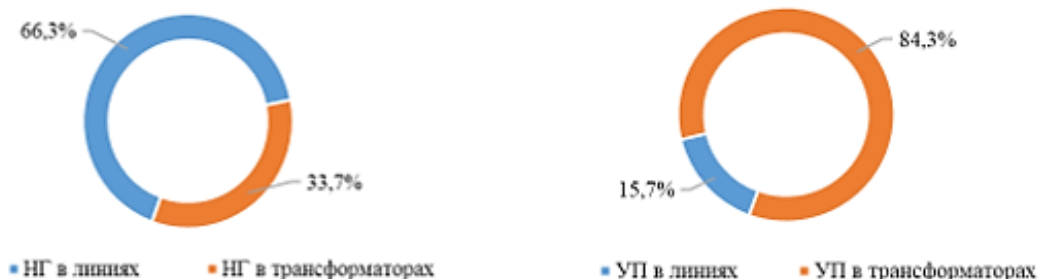


Рисунок 2 – Распределение технических потерь в сети и ее элементах

Полученные показатели доли потерь в различных элементах и в целом по сети соответствуют распределению потерь в реальных сетях рассматриваемого класса напряжения. Преобладающую часть (69,1 %) суммарных потерь в рассматриваемой сети составляют нагрузочные потери. Причем, нагрузочные потери в линиях почти в 2 раза выше, чем в трансформаторах. Поэтому в качестве одного из основных МСП можно рассмотреть повышение напряжения на источнике питания рассматриваемой сети. В качестве технического МСП по снижению нагрузочных потерь можно предложить установку устройств компенсации, но в данной работе БСК уже были приняты к установке на этапе проектирования сети, поэтому в дальнейшем будет рассмотрен обратный эффект при их отключении.

Наибольшие условно-постоянные потери характерны для трансформаторов сети, поэтому можно также предложить МСП по отключению одного из парных трансформаторов на подстанциях.

Для анализа эффективности первого из предложенных МСП в разработанной модели изменялось напряжения на источнике питания в диапазоне от 95% до 105% от номинального значения. Получено, что при повышении напряжения на 5%, несмотря на увеличение условно-постоянных потери (рисунок 3), суммарные потери в сети снизились на 3,86%.

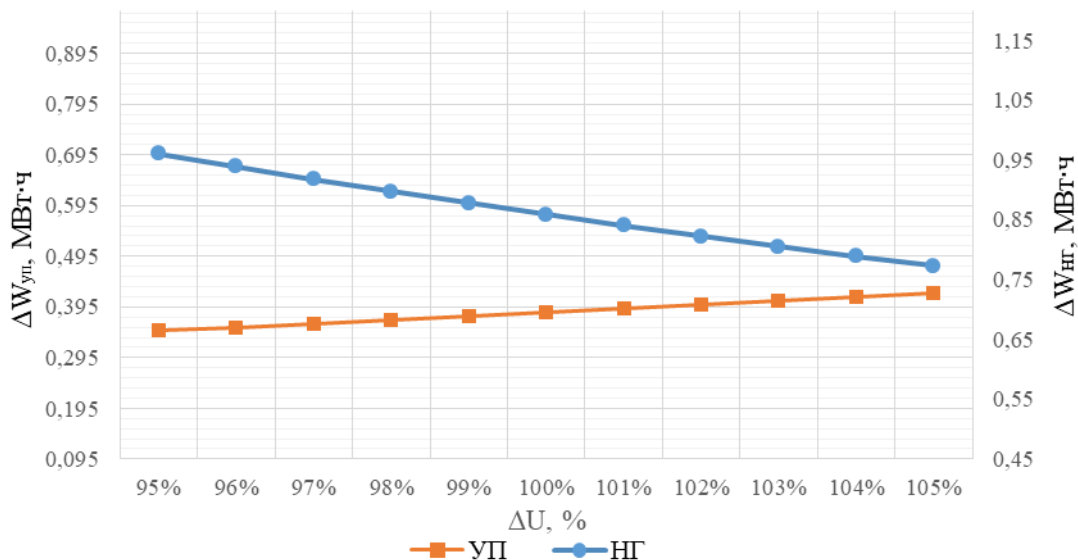


Рисунок 3 – Изменение нагрузочных (НГ) и условно-постоянных (УП) в сети при изменении напряжения

Следует отметить, что данный результат получен без учета влияния изменения напряжения на потребление мощности нагрузками. Для более точного определения потерь электроэнергии следует учитывать статические характеристики нагрузок (СХН), что и было проведено в данной работе. При этом были приняты следующие значения коэффициентов полиномов СХН, указанные в таблице 1.

Таблица 1 – Значения коэффициентов полиномов аппроксимации статических характеристик нагрузки по напряжению.

		a0	a1	a2
Для нагрузки с мощными потребителями	P_H	0,4	-0,6	0
	Q_H	4,2	-9,5	6,3
Для остальной нагрузки	P_H	0,8	-0,3	0,47
	Q_H	4,9	-10,1	6,2

Полученные зависимости изменения потерь электроэнергии при учете СХН показаны на рисунках 4 и 5.

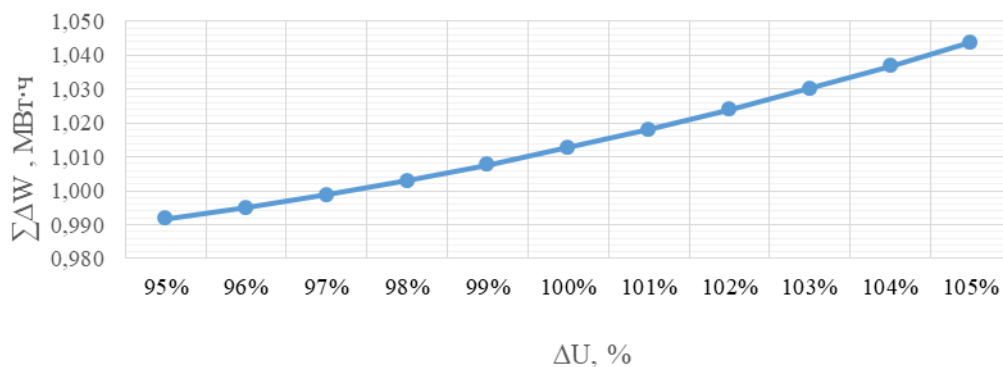


Рисунок 4 – График изменения суммарных потерь в сети при изменении напряжения и учете СХН

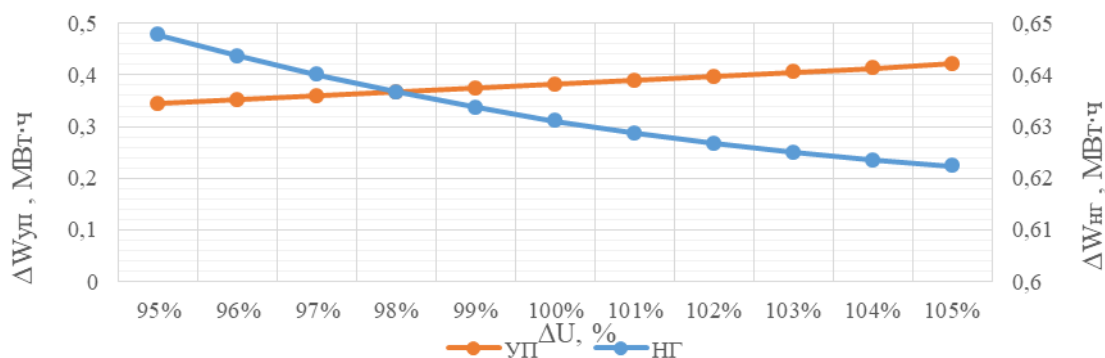


Рисунок 5 – Изменение нагрузочных (НГ) и условно-постоянных (УП) потерь в сети при изменении напряжения и учете СХН

Получено, что поскольку увеличение напряжения на зажимах электроприемников ведет к росту потребления мощности, снижение нагрузочных потерь стало меньше, чем увеличение условно-постоянных. В результате суммарные потери в сети при увеличении напряжения также увеличились.

Данный эффект также может наблюдаться и при повышении напряжения на нагрузке вследствие установки БСК [5]. Поэтому в данной работе также рассмотрено, как влияет на потери отключение компенсирующих устройств. Получено, что при отключенных БСК потери электроэнергии в сети возросли на 14,1%, что напрямую связано с резким ростом нагрузочных потерь – на 19,3% по сравнению с обычным режимом работы. Помимо этого, условно-постоянные потери также выросли, хотя и менее значительно – на 2,3%. Из этого следует, что использование БСК для исследуемой сети является важным техническим МСП.

Для снижения потерь холостого хода было рассмотрено МСП по отключению одного параллельно работающих трансформаторов ТДН-16000/110. Результаты изменения потерь мощности для трансформатора приведены в интервале времени 0-4 ч. и 16-20 ч. в таблице 2, так как в данных промежутках нагрузка меньше рассчитанного критического значения.

Таблица 2 – Изменение потерь мощности в трансформаторах.

	0-4 ч.		16-20 ч.	
	2 трансформатора	1 трансформатор	2 трансформатора	1 трансформатор
$\sum \Delta P$, МВт	0,0362	0,02095	0,0532	0,0578
$\sum \Delta P_{нг}$, МВт	0,001958	0,003861	0,020172	0,041683
$\sum \Delta P_{xx}$, МВт	0,03424	0,01709	0,03298	0,01615

Получено, что при отключении одного из трансформатора с малой нагрузкой, нагрузка которая была распределена между двумя трансформаторами, переходит на оставшийся, а условно-постоянные потери, соответственно, уменьшаются в два раза.

Однако для второго интервала, где нагрузка несущественно меньше значения критической нагрузки (10,14 МВА против 10,698 МВА), суммарные потери мощности меньше при работе двух трансформаторов, так как модель учитывает, что при отключении одного из трансформаторов изменяется напряжение в отдельных точках сети, а следовательно, и потери, вследствие изменения сопротивления сети. Оценка изменения потерь по ручному расчету не позволило бы установить для данной сети, что на интервале с 16 до 20 ч отключение рассматриваемого трансформатора не целесообразно.

Таким образом, разработанная модель и проведенный анализ способствует углубленному пониманию механизмов возникновения потерь и служит основой для разработки мероприятий по их снижению, что в итоге повышает эффективность работы электрических сетей.

Литература

1. Вайтеленко, Л. В. Разработка модели расчета потерь электроэнергии с учетом Изменения нагрузки / Л. В. Вайтеленко, А. А. Лемешева // Энергетика, информатика, инновации - 2024 : труды участников XIV Международной научно-технической конференции, Смоленск, 13-14 ноября 2024 года. – Смоленск: Универсум, 2024. – С. 24-29.
2. Лемешева, А. А. Разработка и исследование компьютерной модели для определения технических потерь электроэнергии в распределительных сетях / А. А. Лемешева // Информационные технологии, энергетика и экономика : сборник трудов XXII Международной научно-технической конференции студентов и аспирантов, Смоленск, 23–24 апреля 2025 года. – Смоленск: Универсум, 2025. – С. 56-61.
3. Справочная система SimInTech^ [Справочная система SimInTech \(v21.03.2025\)](#).
4. Приказ Минэнерго РФ от 26.09.2017 №887 «Об утверждении нормативов потерь электрической энергии при её передаче по электрическим сетям территориальных сетевых организаций».
5. Мозырский В.И., Вакуленко С. Е. Анализ эффективности работы батарей статических конденсаторов в сетях 0,4 кВ // Промэлектро. – 2002. – №3. – с. 30-43.

*Л.В. Вайтеленко, ст. преп.; Р.С. Церковный, студ.
(Филиал ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» в г. Смоленске)*

АНАЛИЗ МЕТОДОВ РАСЧЕТА ВРЕМЕНИ ДО НАСЫЩЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ ТОКА

Насыщение электромагнитных трансформаторов тока (ТТ) может привести к негативным последствиям в работе релейной защиты (РЗ) [1]. Поскольку искажение вторичного тока ТТ даже при насыщении происходит не мгновенно после возникновения повреждения, для обеспечения правильного функционирования устройств РЗ при этом необходимо, чтобы время до насыщения было

больше или равно времени, нормируемого изготовителем защиты. Поэтому одним из важнейших параметров при выборе или проверке ТТ для устройств РЗ является время до насыщения $t_{нас}$.

В настоящее время определение данного параметра производится согласно ГОСТ Р 58669–2019 [2]. Данный стандарт определяет допустимость использования четырех методов определения $t_{нас}$:

- аналитический метод;
- графический метод по паспортным данным;
- графический метод с использованием вольт-амперной характеристики (ВАХ) ТТ;
- графический метод с использованием характеристики намагничивания ТТ.

Первый метод заключается в расчёте параметра режима A , характеризующего отношение потокосцеплений насыщения и только от периодической составляющей тока. Расчёт проводится как при отсутствии остаточной намагниченности, так и при её наличии (коэффициент остаточной намагниченности K_r , при этом принимается равным 0,86) по соответствующим формулам [2]. Для расчета по данному методу требуется использовать такие исходные данные, как:

$I_{1.ном}, I_{2.ном}$ - номинальные токи ТТ;

R_2, X_2 – активное и индуктивное сопротивление вторичной обмотки ТТ;

$Z_{н.ном}$ – номинальное сопротивление нагрузки ТТ;

ε - максимальное значение полной погрешности ТТ;

$K_{ном}$ - номинальная предельная кратность ТТ.

Расчет $t_{нас}$ при отсутствии остаточной магнитной индукции производится, если выполняются следующие условия:

$$\omega \cdot T_{p.экв} + 1 > A, A > 1,$$

где $T_{p.экв}$ – эквивалентная постоянная времени цепи.

При наличии остаточного магнитного потока расчет $t_{нас}$ производится, если выполняются условия:

$$\omega \cdot T_{p.экв} + 1 > A \cdot (1 - K_r), A \cdot (1 - K_r) > 1.$$

Невыполнение указанных условий означает или отсутствие насыщения ТТ, или недопустимость эксплуатации ТТ в рассматриваемых условиях.

Аналитический метод довольно простой и менее трудоёмкий по сравнению с остальными методами, однако, за счет того, что данный метод не использует напрямую характеристики намагничивания ТТ, нужно учитывать, что при малых значениях $t_{нас}$ погрешность метода может быть сопоставима с результатом расчета. В связи с этим рекомендуется применять иные методы, если полученное значение $t_{нас}$ не превышает 15 мс [2].

Второй из рассматриваемых методов заключается в расчёте параметра режима A и определении времени $t_{нас}$ в соответствии с универсальными характе-

ристиками ТТ [2]. Выбор конкретной характеристики производится по значению косинуса угла сопротивления вторичной нагрузки ТТ и значению $T_{p.экв}$. После этого на оси « $K_{п.р.}$ » характеристики откладывается рассчитанное значение параметра A и определяется соответствующая ему величина $t_{нас}$. Расчёт параметра A проводится аналогично расчету в аналитическом методе с наличием и отсутствием остаточной магнитной индукции. При этом используются те же исходные данные, однако, точность данного метода выше, чем первого.

Третий метод использует как реальные ВАХ ТТ, так и универсальные характеристики, подобно предыдущему методу. Особенностью данного метода является возможность его применения только, если кратность отношений тока намагничивания к напряжению намагничивания по ВАХ и тока к напряжению середины линейного участка ВАХ превышает 3. При использовании данного метода параметр A вычисляется по значениям напряжений намагничивания, определенных непосредственно по ВАХ конкретного ТТ, что, с одной стороны, увеличивает точность получаемого результата $t_{нас}$, а с другой, требует наличия ВАХ конкретного ТТ.

Графический метод с использованием характеристики намагничивания ТТ, в отличие от предыдущего, основан на использовании иной характеристики ТТ – характеристики намагничивания $B = f(H)$. Помимо используемых ранее исходных данных требуются дополнительные данные: число витков вторичной обмотки ТТ w_2 , поперечное сечение магнитопровода ТТ s и средняя длина силовой линии l . Выбор универсальных характеристик, а также определение $t_{нас}$ производится аналогично предыдущим методам. Условием допустимости расчета по данному методу является значение максимальной магнитной индукции выше или равно 1,8 Тл.

Параметр режима A согласно данному методу, определяется как:

$$A = \frac{B_{m\varepsilon}}{B_m},$$

где:

$B_{m\varepsilon}$ – максимальное значение индукции, вычисленное по характеристике $B = f(H)$ при действующем значении напряженности магнитного поля;

B_m – максимальное значение индукции при напряженности, соответствующей ЭДС вторичной обмотки, $U_{2\sin}$.

С одной стороны, данный метод является наиболее трудоёмким и требует наличие данных о магнитопровode ТТ, что делает его менее привлекательным с точки зрения простоты и скорости получения результатов. Но, с другой стороны, данный метод является более точным.

Для упрощения проведения расчетов реализация описанных методов может быть выполнена на ЭВМ. Примером такой реализации выступает облачный сервис «Лаборатория РЗА». При задании необходимых для расчета данных о параметрах ТТ, токов повреждения и нагрузки на ТТ сервис производит расчет и

формирует отчет в виде текстового файла с расширением «.docx», причем структура файла представляет собой готовый шаблон проектной документации по проверке ТТ.

Следует отметить, что получение времени до насыщения возможно также на основе численного решения системы уравнений:

$$\begin{cases} R_2 i_2 + L_2 \frac{di_2}{dt} = e_2; \\ Hl = w_1 i_1 - w_2 i_2; \\ B = f(H), \end{cases} \quad (1)$$

где:

L_2 - индуктивность вторичной ветви ТТ;

e_2 - мгновенное значение вторичной ЭДС; H - напряженность магнитного поля.

При этом одной из проблем выступает необходимость аппроксимации характеристики намагничивания дифференцируемой функцией, например, гиперболическим синусом или кусочно-линейной функцией, для возможности осуществления решения дифференциального уравнения функционирования ТТ либо в математических пакетах, либо в программах по динамическому моделированию.

В данной работе в качестве примера рассмотрен расчет времени до насыщения ТТ ТПОЛ-10 600/5 А с использованием следующих способов:

1) решением системы (1) на основе расчета на языке программирования Matlab [3];

2) построением модели в среде SimInTech [1];

3) согласно методике [2] при помощи сервиса «Лаборатория РЗА».

При этом для всех рассматриваемых вариантов расчет был выполнен с использованием аппроксимированной характеристики $B = f(H)$. Для сервиса «Лаборатория РЗА» данная характеристика была задана как кусочно-линейная функция набором точек $B_i = f(H_i)$. Для модели в среде SimInTech кусочно-линейная зависимость $B = f(H)$ была преобразована к требуемому для ввода данных в блок ТТ виду кусочно-линейной зависимости потокосцепления Ψ от намагничивающего тока i_μ согласно следующим выражениям:

$$\begin{cases} \Psi_i = B_i \cdot s \cdot w_2; \\ i_{\mu i} = \frac{H(B_i)l}{w_2}. \end{cases} \quad (2)$$

Для расчета принято значение тока КЗ равное 9 кА, постоянной времени затухания апериодической составляющей 0,16 с. Кратность тока КЗ не превы-

шает предельную для рассматриваемого ТТ. Активное сопротивление нагрузки не превышает номинальное и равно 0,3 Ом. Остаточный магнитный поток отсутствует.

Результатами расчета по первому и второму рассматриваемым способам выступают зависимости $i = f(t)$, которые требуется проанализировать для получения времени до насыщения путем сравнения зависимостей первичного приведенного и вторичного тока (рисунок 1).

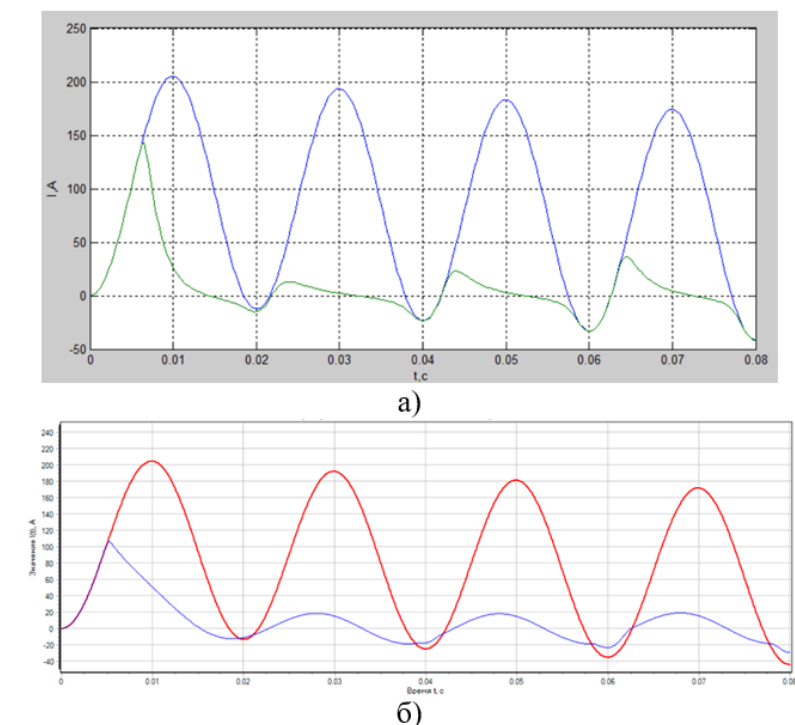


Рисунок 1 – Зависимость приведенного первичного и вторичного токов ТТ от времени:

а) по реализации расчета в Matlab, б) по модели в SimInTech

Получено, что для первого способа время до насыщения составляет бмс, для модели в SimInTech – 5,5 мс. Сервис «Лаборатория РЗА» предоставляет непосредственно время до насыщения, равное для рассматриваемых условий 6 мс. Данное значение принимается в качестве «истинного» времени, поскольку расчет в данной программе выполнен по [2]. На основе сравнения результатов расчетов с вариацией исходных данных (тока КЗ, сопротивления нагрузки и т.п.) получено, что решение системы (1) при помощи программы Matlab дает полное совпадение с расчетом в «Лаборатории РЗА» по методике [2]. Помимо этого, данный способ можно использовать для получения зависимостей токов от времени, необходимых, например, для анализа работы защит. Однако, как и в «Лаборатории РЗА», так и при решении в Matlab для расчета необходимо произвести предварительный расчет токов КЗ.

Используя модель в SimInTech, расчет токов КЗ выполняется непосредственно в этой же модели. Однако помимо отличия полученного времени

насыщения с результатами по [2], следует отметить, что форма вторичного тока при насыщении для модели в SimInTech несколько отличается от формы, характерной для реальных осциллограмм при насыщении. Можно предположить, что это вызвано погрешностью преобразования характеристики $B = f(H)$ к виду $\Psi = f(i_m)$ за счет использования усредненных параметров магнитопровода и требует дальнейшего уточнения.

В ходе исследования было выявлено, что в зависимости от поставленной задачи возможно применение расчётов по определению времени до насыщения электромагнитных трансформаторов тока как по методикам, описанным в ГОСТ Р 58669-2019, так и численных решений дифференциальных уравнений работы ТТ.

Литература

1. Церковный, Р. С. Использование среды SIMINTECH для исследования процессов насыщения трансформаторов тока / Р. С. Церковный, Л. В. Вайтеленко // Информационные технологии, энергетика и экономика : сборник трудов XXII Международной научно-технической конференции студентов и аспирантов, Смоленск, 23–24 апреля 2025 года. – Смоленск: Универсиум, 2025. – С. 91-94.
2. ГОСТ Р 58669-2019 [Электронный ресурс]. - URL: <https://files.stroyinf.ru> (дата обращения: 23.09.2025).
3. Вайтеленко, Л. В. Моделирование работы цифровых фильтров Фурье при насыщении трансформаторов тока / Л. В. Вайтеленко // Энергетика, информатика, инновации - 2018 : Сборник трудов VIII Международной научно-технической конференции. В 3-х томах, Смоленск, 18–19 октября 2018 года. Том 1. – Смоленск: Универсиум, 2018. – С. 11-16.

*А.А. Гришечкин, студ.; А.А. Назаров, к.т.н., ст. преп.; В.П. Кавченков, д.т.н., проф.
(Филиал ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» в г. Смоленске)*

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОБЪЁМА НАГРУЗКИ ПРИ ВВОДЕ ГРАФИКОВ ВРЕМЕННОГО ОТКЛЮЧЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДИСТАНЦИ- ОННОГО УПРАВЛЕНИЯ В РЕЖИМЕ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ

При управлении электроэнергетическим режимом энергосистемы основной задачей диспетчерского персонала является поддержание параметров режима в области допустимых значений, в т.ч. после нормативных возмущений. Перечень нормативных возмущений, как и величина максимально допустимого перетока активной мощности (далее – МДП) в контролируемом сечении, определяется в соответствии с методическими указаниями по устойчивости [1].

Одним из эффективных способов повышения пропускной способности сети в части увеличения МДП в контролируемом сечении является Система мониторинга запаса устойчивости (далее – СМЗУ), которая на сегодняшний день широко внедряется и успешно используется в ДЦ. СМЗУ – программный комплекс, разработанный АО «Системным оператором Единой энергетической системы» (далее – АО «СО ЕЭС») и НТЦ ЕЭС, работающий в непрерывном режиме и рассчитывающий МДП в контролируемом сечении в зависимости от актуальной конфигурации сети и загруженности генерирующего оборудования в режиме реального времени [2].

При отклонении параметров электроэнергетического режима от нормативных значений диспетчер соответствующего ДЦ, после реализации всех возможных мероприятий для предотвращения дальнейшего развития аварийной ситуации, должен отдать команду на ввод графиков временного отключения

потребителей (далее – ГВО) [3]. Существующий порядок подразумевает, что диспетчер ДЦ отдаёт команду на ввод ГВО первичному получателю команд (далее – ППК) по прямому каналу связи (телефону), тот в свою очередь отключает необходимый объём с временем ввода до 5 минут по дистанционному управлению (далее – ДУ), до 20 минут – отдаёт командами на объекты с постоянным дежурным персоналом, до 60 минут – направляет оперативно-выездные бригады на объекты без дежурного персонала [4].

В декабре 2024 года в операционной зоне Воронежского РДУ в целях сокращения времени ввода и отмены ГВО и повышения оперативности восстановления нормального режима работы энергосистемы введён программный модуль ОИК СК-11, обеспечивающий автоматизированное дистанционное управление вводом ГВО. Использование данной системы подразумевает задание диспетчером ДЦ объема ГВО с привязкой к объектам электроэнергетики и времени ввода в электронной форме. Команда с временем ввода до 5 минут направляется непосредственно на объекты, до 20 и до 60 минут направляется в электронную форму диспетчера ЦУС, где формируются предложения по отдаче голосовых команд на отключение необходимого объёма нагрузки.

Данная технология предоставляет ДЦ возможности:

- контроля доступного объема ГВО с привязкой к соответствующему центру питания (энергорайону) и ко времени ввода;
- минимизации объема отключаемой нагрузки при вводе ГВО, точно в соответствии с заданием диспетчера ДЦ;
- контроля заданных и фактически введенных объемов ГВО
- реализации команд на включение отключенных потребителей.

Следующим этапом развития данной технологии может стать учёт информации по доступному объёму ГВО, в зависимости от фактического потребления с привязкой к конкретным центрам питания, в программном комплексе СМЗУ, что открывает возможности по автоматическому расчёту необходимых объёмов ГВО при аварийных возмущениях и выводу актуальной информации диспетчерскому персоналу ДЦ. Совместное использование данных программных комплексов позволит минимизировать объёмы вводимых ГВО путём циклического итерационного расчёта в соответствии с актуальной топологией сети и доступным объёмом потребления.

Целью данной работы является описание алгоритма расчета адаптивного определения величины ГВО для региональной энергосистемы и расчёт эффекта от его применения.

Исследование эффективности разработанного алгоритма было проведено на примере Южного энергорайона электрической сети операционной зоны Воронежского РДУ. Символьная схема исследуемой сети приведена на рисунке 1.

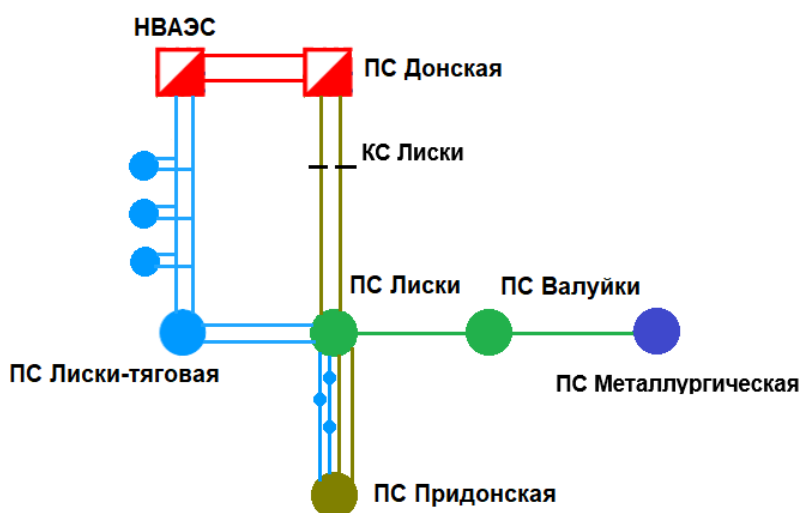


Рисунок 1 – Символьная схема исследуемой сети

В данном энергорайоне объем ГВО доступен на ПС 330 кВ Лиски, отпечных ПС 110 кВ от ВЛ 110 кВ Нововоронежская АЭС – Лиски-тяговая №1, №2, проходных ПС 110 кВ транзита 110 кВ Лиски – Придонская, а также на ПС 110 кВ, питающихся от ПС 220 кВ Придонская. ВЛ 220 кВ Донская – Лиски №1 и №2 образуют контролируемое сечение «Лиски». Шины 110 кВ ПС 220 кВ Придонская являются контрольным пунктом по напряжению, минимально допустимое напряжение (далее – МДН) и аварийно допустимое напряжение (далее – АДН) равны 97 кВ и 93 кВ соответственно.

На сегодняшний день расчёт необходимого объёма ГВО определяется технологом ДЦ на основании расчётов электроэнергетических режимов для наиболее тяжелой схемно-режимной ситуации, однако, текущий режим может быть немного «легче» рассчитанного технологом заранее, поэтому и объём ГВО может быть снижен для текущего электроэнергетического режима.

На рисунке 2 представлен предложенный алгоритм адаптивного расчёта объёма ГВО, в нём можно выделить следующие основные подэтапы:

- оценка исходной схемы на предмет превышения токовой загрузки контролируемых элементов длительно допустимой токовой загрузки (далее – ДДТН), на основании чего определяется необходимость ввода ГВО в исходной схеме (в случае необходимости определяется объём по описанному ниже алгоритму, цикл прекращается);

- оценка послеаварийной схемы на предмет превышения аварийно допустимой токовой загрузки (далее – АДТН) во всех заранее определенных послеаварийных режимах (далее – ПАР), на основании чего определяется объём ГВО (если необходимости нет – цикл прекращается);

- оценка эффективности ввода ГВО для каждого из заранее выбранных объектов в условиях наиболее тяжёлого ПАР (режима, в котором наибольшее превышение токовой загрузки АДТН) путём отключения части нагрузки и замера снижения токовой загрузки контролируемого элемента.

- поиск необходимого объема ГВО для разгрузки контролируемого элемента путем дозированного отключения нагрузки на заданных объектах в исходной схеме, применение тяжелейшего ПАР, сравнение фактической токовой загрузки с АДТН. В первую очередь отключаются нагрузка на объектах с наибольшим коэффициентом эффективности. В целях снижения количества итераций этот подэтап разбивается на грубый и точный поиск с разным шагом (10% и 1% от общего доступного объема ГВО соответственно).

Алгоритм расчёта необходимого объема ГВО для поднятия напряжения в контрольном пункте аналогичен расчёту для снижения токовой загрузки элемента за исключением оценки режима в текущей схеме на предмет превышения напряжения МДН в контрольном пункте, в послеаварийной схеме – превышения напряжения АДН, наиболее тяжёлым ПАР считать режим, в котором напряжение снизилось до наименьшего значения.

Аналогично примеру со снижением токовой загрузки ГВО вводится в исходной схеме, применяется ПАР, напряжение в контрольном пункте сравнивается с заданной уставкой. Цикл повторяется до тех пор, пока напряжение не будет выше заданной уставки. В конце цикла формируется необходимый объем ГВО в разбивке по центрам питания.

Расчёт производится путём имитации одного цикла СМЗУ в исследуемой модели электрической сети в программном комплексе RastrWin3.

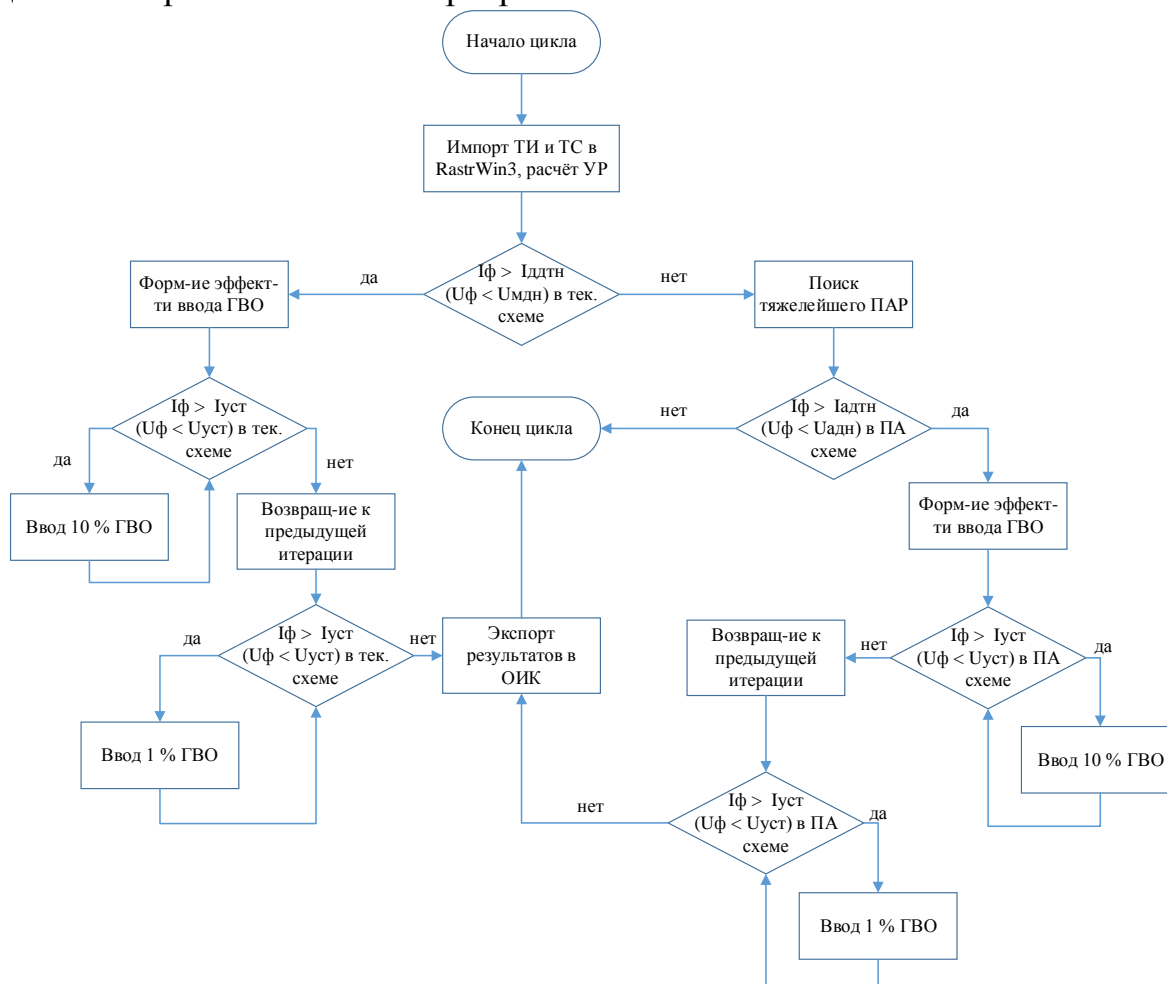


Рисунок 2 – Блок-схема алгоритма адаптивного расчёта объема ГВО

Алгоритм, представленный на рисунке 2, определяет необходимый объем ввода ГВО для текущей схемно-режимной ситуации на объектах для приведения параметров электроэнергетического режима в область допустимых значений. Цикл повторяется до тех пор, пока контролируемый параметр в послеаварийном режиме не будет ниже заданной уставки. В конце цикла формируется необходимый объем ГВО в разбивке по центрам питания.

В качестве примера работы алгоритма по определению объемов ГВО для разгрузки элемента электрической сети по току рассматривается схема двойного ремонта ВЛ 330 кВ Metallургическая – Валуйки и 2 сек 220 кВ ПС 330 кВ Лиски. В исходной схеме параметры электроэнергетического режима находятся в области допустимых значений. При аварийном отключении одной из ВЛ 220 кВ Донская – Лиски прогнозируется превышение АДТН ВЛ 110 кВ Нововоронежская АЭС – Лиски-тяговая (612 А). Результаты необходимого объема ГВО для снижения токовой загрузки элемента приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты расчётов объемов ГВО для снижения токовой загрузки элемента

Метод расчёта	Расчётный объем ГВО, МВт	Схемно-режимная ситуация
Расчёт технологом	22,42	На максимум нагрузки ЭС с учётом вероятных отклонений режима
Расчёт с помощью адаптивного алгоритма	10,43	Текущий режим в ЭС

Примером работы алгоритма определения объёмов ГВО для поднятия напряжения в контрольном пункте служит схема ремонта двух АТ на ПС 220 кВ Придонская. В исходной схеме напряжение на шинах находится в графике. При аварийном отключении одной из ВЛ транзита 110 кВ Лиски – Придонская прогнозируется снижение напряжения ниже АДН (93 кВ) на ПС 220 кВ Придонская. Результаты необходимого объема ГВО для повышения напряжения в контрольном пункте приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Результаты расчётов объемов ГВО для повышения напряжения в контрольном пункте

Метод расчёта	Расчётный объем ГВО, МВт	Схемно-режимная ситуация
Расчёт технологом	10,4	На максимум нагрузки ЭС с учётом вероятных отклонений режима
Расчёт с помощью адаптивного алгоритма	3,6	Текущий режим в ЭС

Экспорт полученных результатов предполагается в существующую форму ОИК по дистанционному управлению ГВО с объединением центров питания в группы по целевому назначению.

Для повышения эффективности оперативно-диспетчерского управления необходимо, чтобы при принятии решений диспетчер руководствовался наибо-

лее полной информацией о фактическом режиме работы энергосистемы и возможных рисках при аварийном отключении её элементов. Для этого необходимо применение адаптивных методик, которые в зависимости от режима работы ЭЭС позволят принимать необходимые и достаточные решения, позволяющие обеспечить надежность работы энергосистемы и минимизировать ущерб для её экономической эффективности. В данной статье представлен алгоритм адаптивного расчёта объёма ГВО, которые при интеграции его в ОИК ДЦ позволит предоставлять диспетчеру ЭЭС информацию о величине ГВО для обеспечения параметров электроэнергетического режима в области допустимых значений при аварийных отключениях. Использование представленного алгоритма позволило избежать перерегулирования, приводя контролируемые параметры электроэнергетического режима точно к заданным уставкам, и значительно снизить величину отключаемой нагрузки для рассматриваемой схемно-режимной ситуации.

Внедрение предложенного алгоритма в ОИК ДЦ при управлении электроэнергетическим режимом ЭС позволит повысить эффективность оперативно-диспетчерского управления и снизить величину ГВО при обеспечении нормативных требований к устойчивости и надежности ЭС.

Литература

1. Требования к обеспечению надёжности электроэнергетических систем, надёжности и безопасности объектов электроэнергетики и энергопринимающих установок «Методические указания по устойчивости энергосистем», утверждены приказом Минэнерго России от 03.08.2018 № 630.
2. Гришечкин А.А. Повышение эффективности использования пропускной способности сети // Сб трудов XXII -ой Межд. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов. В 2 т. Т 1. – 2025. – С. 19 – 23.
3. Требования к обеспечению надёжности электроэнергетических систем, надёжности и безопасности объектов электроэнергетики и энергопринимающих установок «Правила предотвращения развития и ликвидации нарушений нормального режима электрической части энергосистем и объектов электроэнергетики.
4. Правила разработки и применения графиков аварийного ограничения режима потребления электрической энергии (мощности) и использования противоаварийной автоматики, утверждены приказом Минэнерго России от 06.06.2013 № 290.

*Т.И. Дубровская, ведущий инженер; В.С. Ковженкин, к.т.н., доцент
(Филиала ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» в г. Смоленске)*

ОСОБЕННОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ И РАСЧЕТОВ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ СВЕРХВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ (СВН)

Рассмотрим определение расчетных параметров схем замещения линий электропередач СВН и их особенности.

Распределение напряжение и токов линии, работающей в нормальном режиме, характеризуется уравнениями:

$$\left. \begin{aligned} U_1 &= U_2 \cdot ch \gamma_0 \cdot L + I_2 \cdot Z_B \cdot sh \gamma_0 L \\ I_1 &= I_2 \cdot ch \gamma_0 \cdot L + (U_2 / Z_B) / sh \gamma_0 L \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где $\gamma_0 = \sqrt{(Z_0 \cdot Y_0)} = \sqrt{(r_0 + jx_0) \cdot (g_0 + jb_0)} = (\beta_0 + j\alpha_0)$.

Z_B – волновое сопротивление определяется по формуле:

$$Z_B = \sqrt{Z_0/Y_0} = Z_B \angle \xi, \quad (2)$$

где ξ – фазный угол.

Численное значение Z_B в значительной мере определяется конструкцией фазы линии. Для линий 110–220 кВ с одиночными проводами в фазе его значение близко к 400 Ом. Для линий с расщепленными проводами оно определяется главным образом количеством проводов в фазе.

Применение уравнений (1), в которых используются гиперболические функции комплексных переменных, для расчета режимов сложных электроэнергетических систем существенно усложняет задачу.

В линиях передач высокого напряжения активное сопротивление проводов значительно меньше индуктивного, а отсутствие коронирования в нормальном режиме, достигаемое увеличением диаметра проводов (расщепление), практически сводит значение g_0 к нулю. Поэтому для определения β_0 и α_0 можно пользоваться упрощенными формулами:

$$\begin{aligned} \beta_0 &\approx (r_0/2) \cdot \sqrt{(b_0/x_0)}; \\ \alpha_0 &\approx \sqrt{(x_0 \cdot b_0)} \cdot [1 + r_0^2/8x_0^2]. \end{aligned} \quad (3)$$

Для упрощенных расчетов режимов линии СВН можно пренебречь величинами r_0 и g_0 , приняв $r_0=0$ и $g_0=0$. В этом случае коэффициент затухания $\beta_0=0$, а выражения для коэффициента распространения волны γ_0 волнового сопротивления приобретают такой вид:

$$\gamma_0 = j \sqrt{x_0 \cdot b_0}; \quad Z_B = \sqrt{x_0/b_0}.$$

Линия может представляться симметричным четырехполюсником (рисунок 1) с обобщенными постоянными.

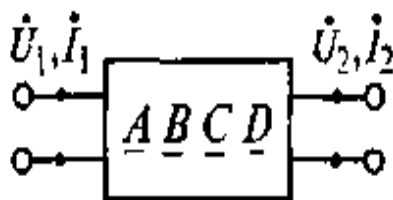


Рисунок 1 – Модель линий электропередачи в виде четырехполюсника

Уравнения (1) для четырехполюсника имеют вид:

$$\begin{aligned} \dot{U}_1 &= A \cdot \dot{U}_2 + B \cdot \dot{I}_2 \\ \dot{I}_1 &= C \cdot \dot{U}_2 + D \cdot \dot{I}_2 \end{aligned}$$

Коэффициенты четырехполюсника можно выразить через волновые параметры линии:

для реальной линии

$$A = ch\gamma_0 \cdot L; B = Z_B \cdot sh\gamma_0 \cdot L; C = (1/Z_B) \cdot sh\gamma_0 \cdot L; D = ch\gamma_0 \cdot L.$$

для идеализированной линии ($r_0=0$ и $g_0=0$)

$$A = \cos\lambda; B = j \cdot Z_B \cdot \sin\lambda; C = (j/Z_B) \cdot \sin\lambda; D = \cos\lambda.$$

Поскольку четырехполюсник, эквивалентный линии передачи, можно считать симметричным, то $A = D$, а третье уравнение четырехполюсника, связывающее первичные параметры, записывается в следующем виде:

$$A^2 - BC = 1.$$

На основании вышеизложенного проведем ряд расчётов для конкретной линии СВН. Рассмотрим одноцепную линию электропередачи напряжением 500 кВ с проводами 3хАС500/64 длиной 1000 км.

Каталожные данные по рассматриваемой линии [1]: $r_n = 0,0197$, Ом/км; $x_n = 0,304$, Ом/км; $b_n = 3,645 \cdot 10^{-6}$, 1см/км.

Рассчитаем параметры A, B, C, D и Z_B учетом и без учета потерь для линии СВН и результаты сведем в табл.1, 2,3.

Таблица 1 – Параметры линии СВН с потерями

β_0	1/км	$3,41 \cdot 10^{-5}$
α_0	1/км	$1,0529 \cdot 10^{-3}$
Z_B	Ом	$289,08 \angle -3,71^0$
$ch\gamma_0 l$		$0,4964 \angle 3,42^0$
$sh\gamma_0 l$		$0,8692 \angle 88,9^0$
$A=D$		$0,4964 \angle 3,42^0$
B	Ом	$251,268 \angle 85,19^0$
C	1/Ом	$3,007 \cdot 10^{-3} \angle 92,61^0$
$AD-BC$		$0,9935 - j0,0045 \approx 1$

Для линий без потерь гиперболические функции от комплексного аргумента переходят в круговые функции от действительного аргумента.

Таблица 2 – Параметры линии СВН без потерь

β_0	1/км	0
α_0	1/км	$1,053 \cdot 10^{-3}$
Z_B	Ом	288,79
$ch\gamma_0 l = \cos\alpha_0 l$		0,495
$sh\gamma_0 l = j \sin\alpha_0 l$		$j0,866$

$A=D$		0,495
B	Ом	$j250.092$
C	1/Ом	$j2,999 \cdot 10^{-3}$
$AD-BC$		$0,245+0,75=0,995 \approx 1$

Таблица 3 – Сравнение параметров

Параметр	Разница, в именованных ед.	Разница в %
B	1,176, Ом	0,47
$A=D$	0,0014	0,28
C	0,0087, 1/Ом	0,27
Z_B	6,29 Ом	0,10

Расчёты показали, что параметры четырехполюсника и волновые параметры линий СВН с учетом и без учета потерь близки по величине.

Существенное искажение A, B, C, D от потерь имеет место при больших длинах линий ($l > 2000$ км).

В результате можно сделать вывод: выполнять различные расчёты и анализ по дальним линиям электропередач СВН возможно для идеальной линии без потерь.

Литература

1. Карапетян, И.Г. и др. Справочник по проектированию электрических сетей / И.Г. Карапетян, Д.Л. Файбисович, И.М. Шапиро; под ред. Д.Л. Файбисовича. – Изд. 4-е, перераб. и доп. – М.: ЭНАС, 2012. – 376.: – ISBN 978-5-4248-0049-8.

*Т.И. Дубровская, ведущий инженер, В.С. Петров, к.т.н., доцент
(Филиала ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» в г. Смоленске)*

ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ ЭЭС С УЧЕТОМ ТЕХНИЧЕСКИХ И ЭКОНОМИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ

Функционирование электроэнергетических систем (ЭЭС) включает в себя различные режимы работы, среди которых выделяют установившиеся и переходные. В установившемся режиме параметры системы неизменны во времени, в переходном – изменяются. Основным режимом ЭЭС – нормальный установившийся, в таких режимах система работает большую часть времени.

Функционирование электроэнергетических систем (ЭЭС) должно находиться под жестким контролем по техническим ограничениям и с точки зрения экономического фактора.

Рассмотрим вопрос выбора оптимальных напряжений на примере заданной схемы: удаленная ГЭС связана двухцепной линией передачи напряжением 500 кВ с подстанцией приемной системы, расположенной на расстоянии 1000 км от ГЭС. На расстоянии 300 и 700 км от ГЭС имеются понижающие подстанции, на которых установлено по два автотрансформатора АТДЦТН–125000/500/110. Величина нагрузки на каждой из подстанций составляет 150 МВт, $\cos\varphi=0,9$,

причем с шин 10 кВ потребляется мощность 20 МВт. На воздушных линиях электропередачи применен провод 3хАС400/51 (рисунок 1).

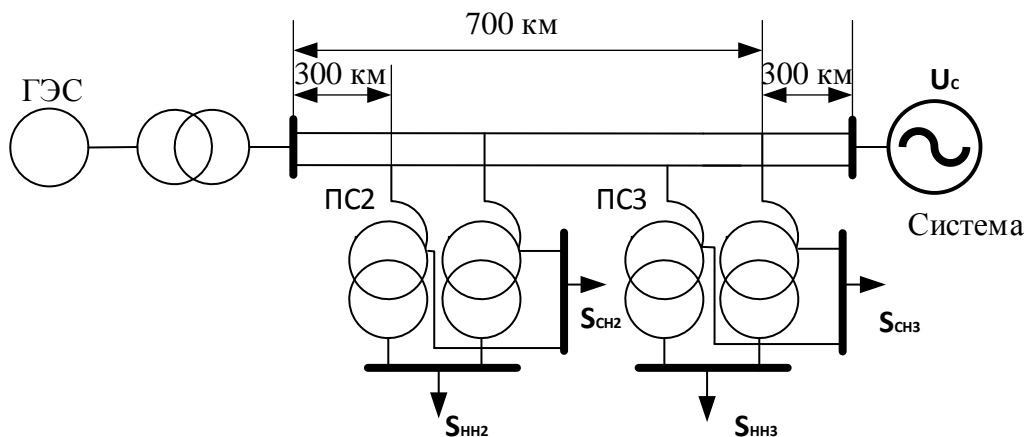


Рисунок 1 – Схема электропередачи

В режиме наибольших нагрузок от ГЭС передается 2000 МВт. Для линии время использования наибольшей нагрузки составляет 5000 час; $\tau_{\text{нб}}=3400$ час.

Рассчитаем оптимальные напряжения на подстанциях 2 и 3 при условии, что на ГЭС поддерживается напряжение 525 кВ, а на шинах приемной системы — 500 кВ. В расчётах режима потери на корону не будем учитывать.

На рисунке 2 представлена схема замещения электропередачи, а её параметры рассчитаем и сведём в таблице 1.

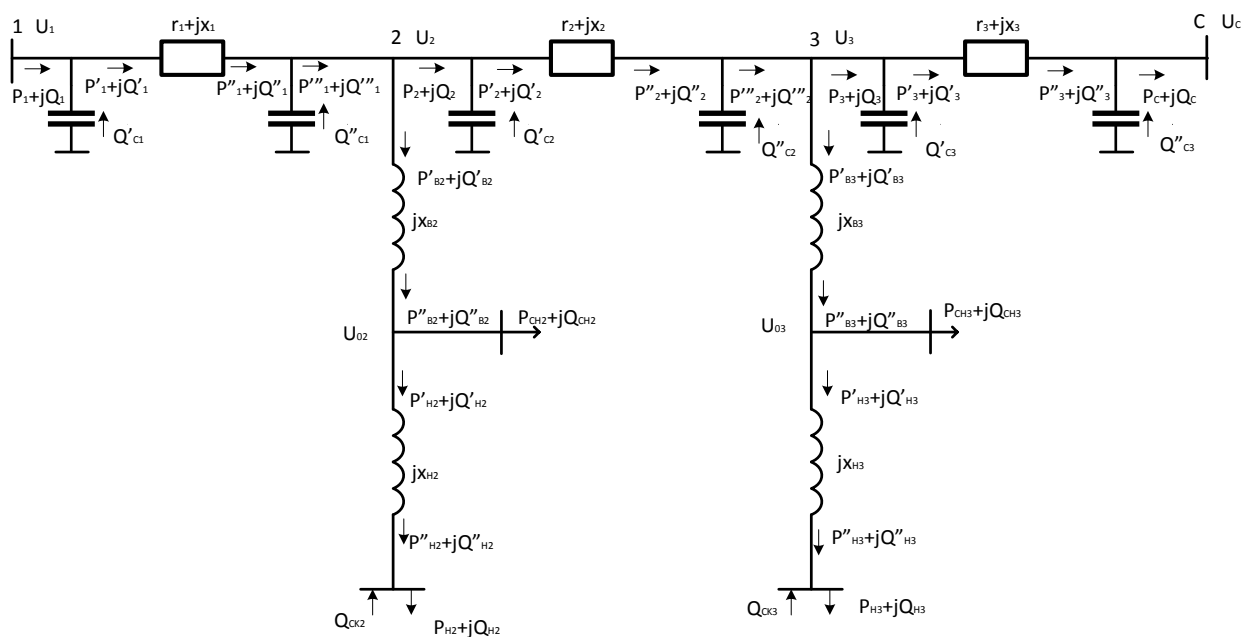


Рисунок 2 – Схема замещения электропередачи

Таблица 1 – Параметры схемы замещения

Линии электропередачи		Автотрансформаторы ПС	
$r_1=r_3$	4,2 Ом	$X_{B2}=X_{B3}$	115,5 Ом
r_2	5,45 Ом	$X_{H2}=X_{H3}$	140 Ом
$X_1=X_3$	44 Ом	$X_{C2}=X_{B3}$	0
X_2	58 Ом		
$b_1/2=b_3/2$	$11,33 \cdot 10^{-4}$ См		
$b_2/2$	$11,51 \cdot 10^{-4}$ См		

Для определения оптимального напряжения на подстанциях 2 и 3 проведем расчеты потокораспределения мощностей по схеме варьируя уровни напряжения на ПС2 и ПС3 (таблица 2).

Таблица 2 – Вариации напряжений

U_2 , кВ	525	500	475
U_3 , кВ	525, 500, 475	525, 500, 475	525, 500, 490, 480, 475

В итоге расчетов определяем мощность компенсирующих устройств на подстанциях с учетом заданного $\cos\phi$ (таблица 3).

Положительная величина мощности означает, что необходима установка синхронного компенсатора, отрицательная – установка реактора.

Далее выбираем оборудование стандартных марок [1].

В табл.4 приведен перечень дополнительного оборудования, устанавливаемого в расчетных режимах на подстанциях 2 и 3. Там же указаны капиталовложения в единицу оборудования и суммарные капиталовложения по варианту.

Таблица 3 – Мощности компенсирующих устройств

U_2 , кВ	U_3 , кВ	$Q_{СК2}$, Мвар	$Q_{СК3}$, Мвар
525	525	38,3	236,7
	500	321,1	-148,1
	475	705,5	-167,8
500	525	-200,9	610,0
	500	-105,5	32,3
	475	70,7	-186,2
475	525	-112,4	1106,3
	500	-185,3	322,6
	490	-188,9	115,4
	480	-177,1	33,9
	475	-165,2	-87,7

Таблица 4 – Перечень оборудования, установленного дополнительно на подстанциях 2

U ₂ , кВ	U ₃ , кВ	Подстанция 2			
		Наименование	Стоимость ед., тыс. руб.	Кол-в о	K _{Σ2} , тыс. руб.
525	525	КСВБ-50000-11	255563	1	255563
	500	КСВБ -160000-15 (ТЦ-400000/500)	766688(523600)	2(1)	2056976
	475	КСВБ -160000-15 (ТЦ-400000/500)	766688(523600)	4(2)	4113952
500	525	3хРОДЦ 60000/500	595631	2	1191262
	500	3хРОД-33333/110	129485	1	129485
	475	КСВБ 50000-11	255563	2	511126
475	525	3хРОДЦ 60000/500 (3хРОД-33333/110)	595631(129485)	4(1)	2512009
	500	3хРОДЦ 60000/500	595631	3	1786893
	490	3хРОДЦ 60000/500 (3хРОД-33333/110)	595631(129485)	2(1)	1320747
	480	3хРОДЦ 60000/500	595631	2	1191262
	475	3хРОДЦ 60000/500 (3хРОД-33333/110)	595631(129485)	1(1)	725116

Таблица 5 – Перечень оборудования, установленного дополнительно на подстанциях 3

U ₂ , кВ	U ₃ , кВ	Подстанция 3			
		Наименование	Стоимость ед., тыс. руб.	Кол-во	K _{Σ2} , тыс. руб.
525	525	КСВБ-160000-15(ТЦ-400000/500)	766688(523600)	2(1)	2056976
	500	3хРОДЦ 60000/500	595631	1	595631
	475	3хРОДЦ 60000/500(КСВБ-50000-11)	595631(255563)	4(1)	2638087
500	525	КСВБ -160000-15 (ТЦ-400000/500)	766688(523600)	4(2)	4113952
	500	КСВБ-50000-11	255563	1	255563
	475	3хРОДЦ 60000/500	595631	2	1191262
475	525	КСВБ -160000-15 (ТЦ-630000/500)	766688(748000)	8(2)	7629504
	500	КСВБ -160000-15 (ТЦ-400000/500)	766688(523600)	2(1)	2056976
	490	КСВБ-50000-11(ТД-80000/110)	255563(84150)	3(1)	
	480	КСВБ-50000-11	255563	1	255563
	475	3хРОД-33333/110	129485	1	129485

Для выбора оптимальных напряжений на ПС2 и 3 подсчитаем приведенные затраты на установку дополнительного оборудования и на потери энергии в линии и устанавливаемом оборудовании.

Расчеты приведенных затрат приведены в таблице 6.

Таблица 6 – Приведенные затраты на варианты

U ₂ , кВ	U ₃ , кВ	K _Σ , тыс. руб.	I _Σ , тыс. руб.	E _н · K, тыс. руб.	Z _{пр} , тыс. руб.
525	525	2312539	2962070	277504,68	3239574,68
	500	2652707	3044815	318324,84	3363139,84
	475	6752039	3219350	810244,68	4029594,68
500	525	5305214	3111480	636625,68	3748105,68
	500	385048	3158380	46205,76	3204585,76
	475	1702388	3298745	204286,56	3503031,56

	525	10141513	3336600	1216981,56	4553581,56
	500	3843869	3358040	461264,28	3819304,28
475	490	2171586	3393885	260590,32	3654475,32
	480	1446825	3442795	173619	3616414
	475	844601	3473280	101352,12	3574632,12

На рисунке 3 приведены зависимости приведенных затрат от напряжений U_2 и U_3 .

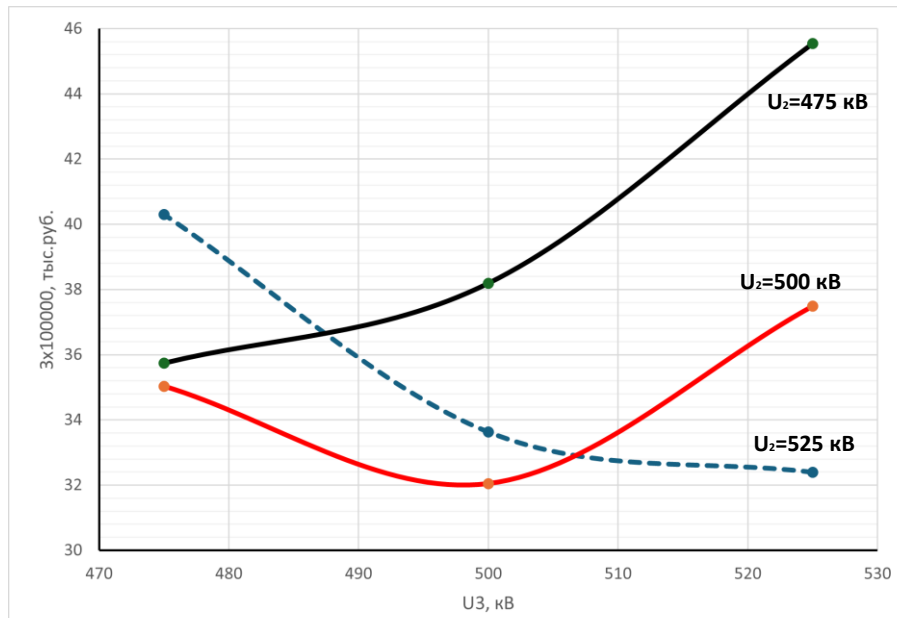


Рисунок 3 – Зависимость приведенных затрат от величины напряжений U_2 и U_3

В итоге: наименьшая величина приведенных затрат соответствует режиму при $U_2 = U_3 = 500$ кВ. При этом на подстанции 2 необходима установка реакторов 3хРОД-33333/110 на стороне среднего напряжения 110 кВ, а на подстанции 3 устанавливается синхронный компенсатор мощностью 50 Мвар.

Л и т е р а т у р а

1. Карапетян, И.Г. и др. Справочник по проектированию электрических сетей / И.Г. Карапетян, Д.Л. Файбисович, И.М. Шапиро; под ред. Д.Л. Файбисовича. – Изд. 4-е, перераб. и доп. – М.: ЭНАС, 2012. – 376.: – ISBN 978-5-4248-0049-8.

*И.В. Жаворонков, асп.; В.И. Зирюкин, асп.; К.С. Климов, асп.
(ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»)*

АДАПТИВНЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ОБЪЕКТОВ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ

Адаптивные системы в электроэнергетике могут применяться для автоматической коррекции параметров электрооборудования по текущим измерениям в режиме реального времени, чтобы сохранять устойчивость и нормальную работу при быстром изменении параметров и режимов в случае отклонения нагрузки,

пусках и остановках агрегатов, переключениях линий и изменении структуры энергосистемы.

Необходимость адаптации возникает из-за широкого рабочего диапазона электротехнического оборудования и нелинейности его характеристик, в частности это относится к генераторам, трансформаторам, электродвигателям, преобразователям, а также внешней эквивалентной сети, так как все они ведут себя по-разному при различных отклонениях мощности и напряжения. Также идеализированные модели электротехнического оборудования не отражающих реальных динамических характеристик.

Применение адаптивности позволяет достичь устойчивости и демпфирования колебаний при регулировании в условиях изменяющихся параметров сети, сократить перерегулирование и уменьшить время переходного процесса, также повысить экономичность за счет снижения затрат на повторную перенастройку регуляторов, проведение расчетов, пусконаладку и увеличения ресурса оборудования [1]. Также адаптивные системы могут позволить обнаружить повреждение и дать команду на отключение оборудования. Такая система должна иметь три структурные части: измерительную (реагирующую), логическую (оперативную), управляющую (исполнительную) [2].

При этом в такую систему должны быть заложены четыре основных требования релейной защиты: селективность, быстродействие, чувствительность и надежность [3]

Наиболее перспективные области применения адаптивных систем в электроэнергетике изображены на рисунке 1.

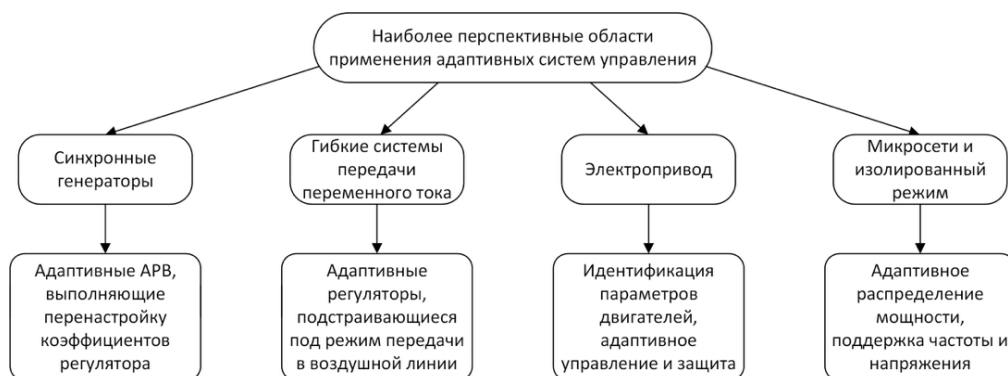


Рисунок 1 – Области применения адаптивных систем в электроэнергетике

На сегодняшний момент можно выделить два основных класса адаптивных систем. К первому классу относятся самоорганизующиеся адаптивные системы, ко второму классу относятся самонастраивающиеся системы управления. (рисунок 2).

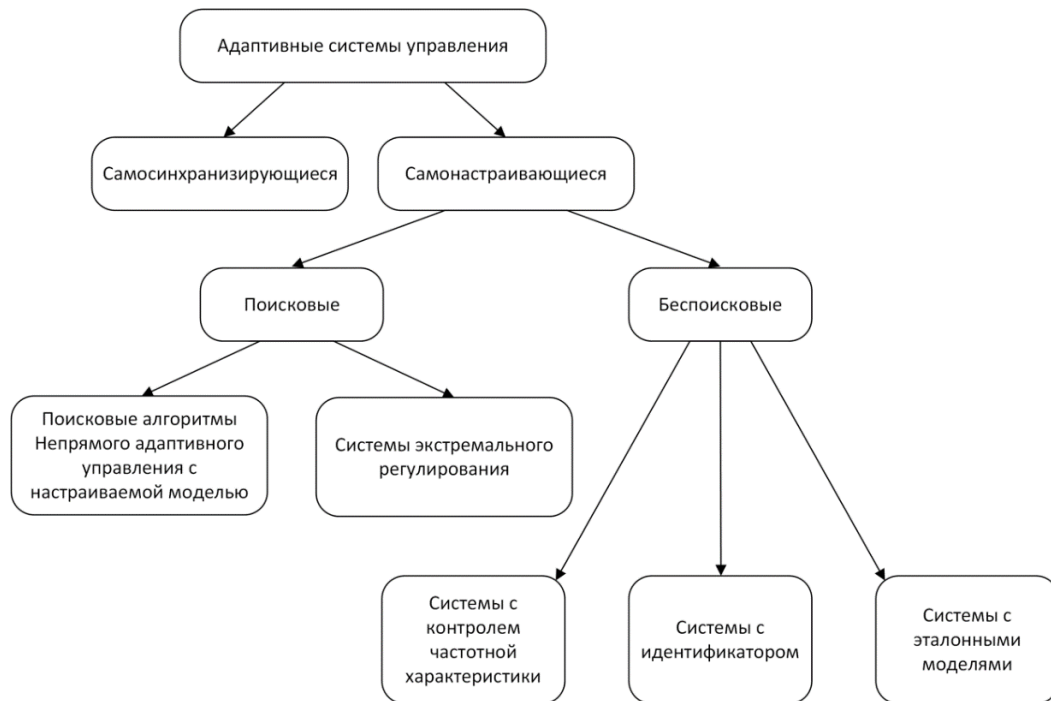


Рисунок 2 – Адаптивные системы управления

Класс самоорганизующихся систем характеризуется оптимизацией системы управления под конкретную цель или задачу в процессе ее работы. Это происходит за счет создания алгоритмов управления, параметров и структуры данного алгоритма. Применение данного класса систем обосновано в случаях, когда нет достаточной информации для расчета параметров текущего режима в случаях переменной структуры и параметров управляемого объекта.

Класс самонастраивающихся систем возможно применить в случаях, когда для объекта управления известна его структура. Тогда оценка изменения параметров объекта управления по заранее заданной структуре сильно упрощается. Алгоритм управления в данном случае строится только на оценке изменения параметров

Если система способна сама подстраивать и изменять динамические характеристики и параметры для оптимального регулирования при изменяющихся внешних условиях сети, ее также можно отнести к классу самонастраивающихся систем автоматического управления. Для оценки свойств системы в статическом и динамическом режиме, а также создания управляющих воздействий, в самонастраивающихся системах предусматривают дополнительные контуры самонастройки. Математическое задание функции на основе критерия качества функционирования позволяет системе достичь определенного уровня регулирования [4].

При более детальном рассмотрении можно выделить две основные категории самонастраивающихся систем.

К первой категории можно отнести поисковые системы. Меры качества в данном типе систем можно определить при помощи специально задаваемых поисковых сигналов. Специально заданные поисковые сигналы позволяют по-

лучить реакцию объекта, что компенсирует недостаток априорной информации в простейших поисковых системах.

Ко второй категории относятся беспоисковые системы. В данном классе систем получение статических и динамических характеристик в явном или неявном виде реализуется за счет заранее заданной модели. Если рассматривать объекты электроэнергетики, задачу адаптивного управления можно охарактеризовать как сведение к нулю различия между моделью и реальным объектом управления. Назвать такую систему можно как адаптивная система с эталонной моделью и прямым адаптивным управлением.

Для идентификации неизвестных параметров объекта на основе изучения входного и выходного сигналов объекта, в контуре адаптации содержится идентификатор.

Сегодня существует и продолжает разрабатываться множество различных методов идентификации, которые позволяют решать самые разнообразные задачи. Применительно к объектам энергетики задача адаптивного управления должна решаться в реальном времени с возможностью использования пробных сигналов. Поэтому выбор алгоритма идентификации должен удовлетворять данным требованиям.



Рисунок 3 – Классификация методов идентификации параметров для реализации адаптивных систем управления

Методы идентификации параметров (Рисунок 3) можно классифицировать по способу представления характеристик объекта следующим образом: во временной области, в частотной области и в спектральной области относительно ортонормированного базиса. Временная область дает возможность оценить переходный процесс во времени. Частотная область позволяет оценить систему на реакцию в разных частотных составляющих, что важно для построения устойчивых и точных систем управления. Спектральная область относительно ортонормированного базиса упрощает вычисления, так как позволяет легко выражать координаты, находить скалярные произведения и применять линейные преобразования.

В зависимости от способов проведения экспериментов на объекте выделяют активные, пассивные и комбинированные методы. Передача на вход объекта специальных тестовых сигналов подразумевает применение активного метода. Применение фактически существующих сигналов в системе предполагает применение пассивного метода, при этом не нарушается нормальный режим работы оборудования. Подача маломощных тестовых сигналов, которые не оказывают влияние на нормальный режим работы оборудования, предполагает комбинированный метод.

С точки зрения наличия обратной связи (сопоставления) между объектом и его математической моделью выделяют разомкнутые (без обратной связи, без сравнения) и замкнутые методы (с обратной связью, с постоянным сравнением и коррекцией). Разомкнутые методы используют математическую модель для прогнозирования или анализа без проверки ее адекватности реальному объекту, тогда как замкнутые методы включают в себя процесс сравнения результатов моделирования с реальными данными и внесения корректировок в модель или систему.

Практическое применение получили следующие алгоритмы решения задач идентификации:

- стохастической аппроксимации первого и второго порядков;
- максимизирующий апостериорную вероятность;
- использующий расширенный фильтр Калмана-Бьюси;
- реализующий метод наименьших квадратов;
- основанный на использовании быстрого преобразования Фурье;
- решение методом Ньютона.

Наиболее часто реализация управления объектами электроэнергетики сводится к идентификации RLC -параметров эквивалентной схемы замещения. RLC -параметры заданной модели электрооборудования определяются путём решения системы нелинейных дифференциальных и интегральных уравнений, описывающих её переходные процессы; при этом математическое описание переходных режимов соответствует реальной схеме подключения исследуемого оборудования [5]. Пример схемы изображен на рисунке 4.

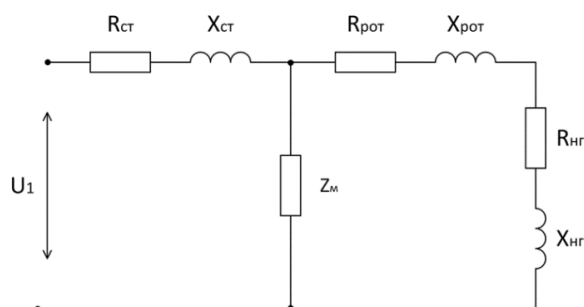


Рисунок 4 – Схема замещения асинхронной машины

Выполнение расчета параметров силового электрооборудования в данном случае позволяет создать адаптивную, самонастраивающуюся систему контроля и управления его режимами работы.

Структурная схема алгоритма идентификации электрических параметров силового электрооборудования и работы адаптивной защиты изображена на рисунке 5.

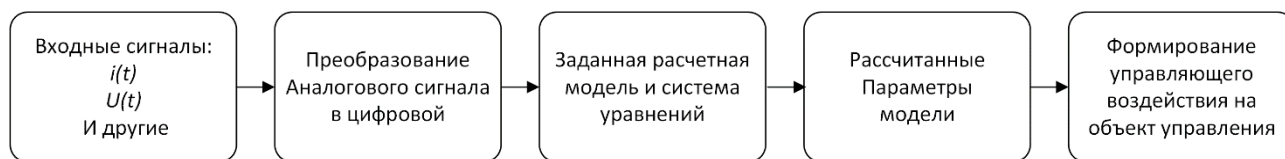


Рисунок 5 – Алгоритм работы адаптивной системы управления

Из рисунка 5 видно, что алгоритм адаптивного управления сводится к тому, что входные аналоговые сигналы с датчиков токов и напряжений приходят в АЦП и преобразуются в цифровой сигнал с требуемой частотой дискретизации. Далее цифровой измерительный сигнал поступает на вход заданной расчетной модели и системы уравнений. После вычислений алгоритм получает рассчитанные параметры исследуемого объекта, которые сравниваются с заданными эталонными значениями. В случае отклонения рассчитанных параметров алгоритм формирует управляющее воздействие для устранения отклонения между заданными и рассчитанными параметрами.

Подводя итог, стоит сказать, что адаптивные системы в электроэнергетике могут применяться для автоматической коррекции параметров электрооборудования по контролируемым измерениям в режиме реального времени.

Такая адаптация необходима из-за широкого рабочего диапазона электротехнических устройств и нелинейности их характеристик. При этом, для энергетических объектов задача адаптивного управления должна решаться в режиме реального времени, а практическая реализация сводится к идентификации RLC- параметров эквивалентной схемы замещения, описывающей её переходные процессы и полностью соответствующей реальной модели электрооборудования.

Литература

1. Никитин К.И., Сидоров О.А., Вырва А.А., Сарычев М.М. Возможные направления совершенствования релейной защиты // Омский научный вестник. - Омск: 2009. - С. 130-133.
2. Чернобровов Н. В., Семенов В. А. Релейная защита энергетических систем: Учеб. пособие для техникумов. - М.: Энергоатомиздат, 1998. 800 с.
3. Федосеев А. М. Федосеев М. А. Релейная защита электроэнергетических систем: учеб. для вузов - 2-е изд., перераб. и доп. - М.: Энергоатомиздат, 1992. - 528 с.
4. Эйкхофф П. Основы идентификации систем управления. – М.: Мир, 1975. – 686 с.
5. Попов М.Г., Ванин В.К., Забоин В.Н., Гуревич Э.И. Идентификация параметров силового электрооборудования в адаптивных средствах защиты и противоаварийной автоматики // Изв. вузов. Электромеханика. 2018. Т. 61, No 6. С. 68-76. DOI:10.17213/0136-3360-2018-6-68-76.

МЕТОДИКА РЕАЛИЗАЦИИ СИСТЕМЫ СКАЛЯРНОГО УПРАВЛЕНИЯ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СИСТЕМЫ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ

Асинхронные двигатели остаются базой промышленного электропривода благодаря надёжности, низкой стоимости и простоте обслуживания, что предопределяет жёсткие требования к их управлению, диагностике и измерениям. Появление доступных ПЛИС/SoC, RTOS, высокоточных АЦП и скоростных интерфейсов [1] сделало детерминированные системы реального времени отраслевым стандартом: они обеспечивают воспроизводимые задержки ШИМ, синхронный съём данных и устойчивость алгоритмов при изменяющейся нагрузке. В работе представлена методика скалярного управления $U/f=\text{const}$ с векторной ШИМ (SVPWM) [2] в архитектуре «RT-контроллер + ПЛИС», пригодная для широкого круга асинхронных приводов.

Наиболее практичной и вместе с тем простой считается скалярная структура с использованием векторной ШИМ [2]. Её функциональная схема приведена на рис. 1. Суть вольт-частотного управления состоит в изменении частоты питающего напряжения f при пропорциональной корректировке амплитуды U (подход, отмеченный академиком Костенко [2]) с поддержанием отношения U/f в блоке Φ . Частота выступает основным управляющим воздействием; её уставка подаётся на задатчик интенсивности ЗИ. Амплитуда при каждой f выбирается из условия приблизительно постоянного потокосцепления, исключая насыщение магнитопровода. Тем самым формируется задание по частоте вращающегося поля и рассчитывается фазная амплитуда для блока ФНУ1. Обратное преобразование Кларка из $\alpha\beta$ в abc (ФНУ2) формирует трёхфазный сигнал для инвертора [3].

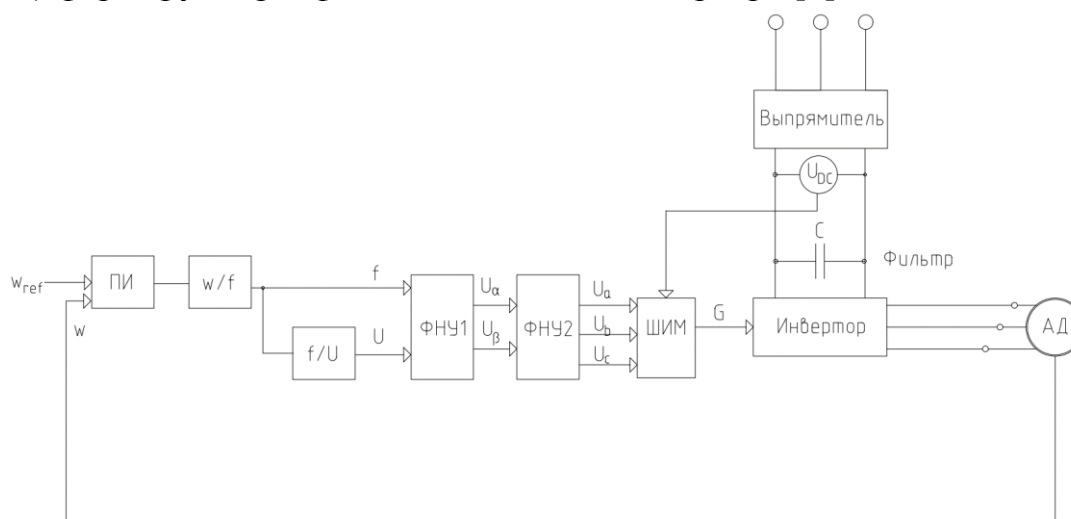


Рисунок 4 – Функциональная схема скалярной системы управления с датчиком скорости

Отсутствие замкнутого контура повышает отказоустойчивость схем $U/f=\text{const}$, но приводит к статизму по скорости при росте момента и снижению перегрузочной способности на малых оборотах [2]. Для повышения точности вводится обратная связь по скорости ротора: добавляется датчик частоты вращения и ПИ-регулятор невязки между текущей скоростью и уставкой (рисунок 1).

Таким образом, точность скалярного контура увеличивается за счёт ОС по скорости и ПИ-регулятора управляющего воздействия; при этом требуется расчёт коэффициентов регулятора. Формирование требуемых параметров напряжения статора импульсным инвертором обеспечивается ШИМ. По мере развития частотных электроприводов совершенствовались алгоритмы коммутации силовых ключей; общепринято выделять два класса ШИМ: с несущей и безнесущие. Метод сравнения с несущей сопоставляет опорный сигнал с эталоном и задаёт последовательность коммутаций. На практике применяются однополярная (carrier-based PWM), синусоидальная (SPWM) и векторная (SVPWM) модуляции [4]. Наиболее востребованы SPWM – за простоту и достаточную точность, и SVPWM – за лучшую нагрузку по напряжению звена DC и высокую точность регулирования [4].

Реализация, использованная в работе, соответствует схеме п. 3.2 и показана на рис. 2. Уставки скорости ротора, частоты инвертора и шага дискретизации ПЛИС передаются из АРМ в РХИ. В блоке БРН по уставке скорости рассчитывается опорный вектор напряжения статора по закону U/f при частоте дискретизации, согласованной с частотой коммутаций. Амплитуда и угол опорного вектора поступают в блоки расчёта времён переключений (БРВ) и состояний ключей (БРС), реализующие SVPWM. Амплитуда нормируется по измеренному напряжению звена постоянного тока. Система поддерживает режим без датчика скорости и режим с датчиком; при его активации задействуется канал измерения частоты вращения и формируется управляющее воздействие через ПИ-регулятор с коэффициентами, рассчитанными по методике [5].

Расчитанные массивы передаются по RT FIFO [5] между RT-частью и ПЛИС в контроллер платы. На их основе формируется задание опорного вектора с использованием предопределённой последовательности состояний states (рисунок 2) и вычисленных времён переключений t_array (рис. 2).

ПЛИС генерирует опорное напряжение, последовательно переключая состояния инвертора (массив G на рисунке 2) через выходы DIO по значениям t_array и states. Защита от противовключения (dead time [6]) реализована программно в блоке Dead time (рисунок 2), который исключает одновременное включение транзисторов полумоста. Представленная методика на базе программного комплекса LabVIEW демонстрирует современный, технологичный подход к построению систем управления асинхронным электроприводом в реальном времени.

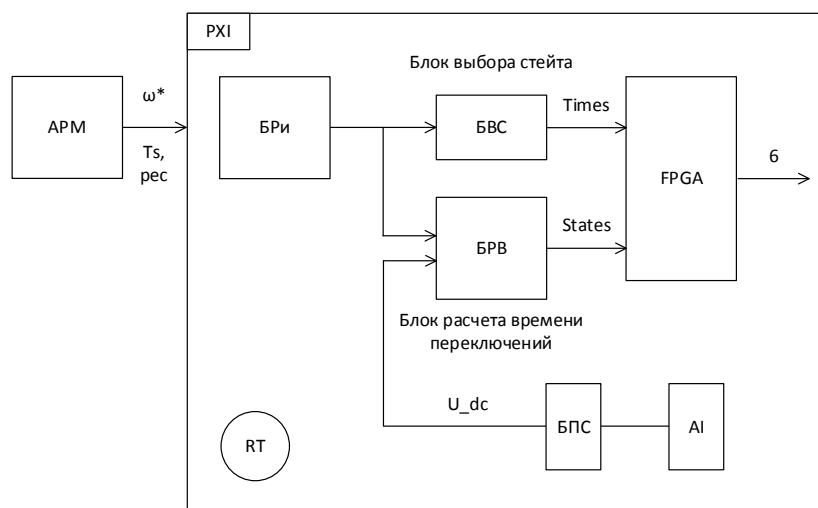


Рисунок 5 – Схема скалярной системы управления

Литература

1. Ochoa-Ruiz G., Bevan R., de Lamotte F., Diguett J.-Ph., Bao C.-C. Real-Time Control System for Improved Precision and Throughput in an Ultrafast Carbon Fiber Placement Robot Using a SoC FPGA Extended Processing Platform // International Journal of Reconfigurable Computing. – 2017. – Art. ID 3298734. – 20 p. – DOI: 10.1155/2017/3298734.
2. Булгаков А. А. Частотное управление асинхронными электродвигателями. – Изд-во Академии наук СССР, 1955.
3. Krause P. C. et al. Analysis of electric machinery and drive systems. – New York : IEEE press, 2002. – Т. 2.
4. Seo J. H., Choi C. H., Hyun D. S. A new simplified space-vector PWM method for three-level inverters //IEEE Transactions on power electronics. – 2001. – Т. 16. – №. 4. – С. 545-550.
5. Баран Е. Д., Романов А. Ю. Проектирование реконфигурируемых систем в LabVIEW FPGA : монография / Е. Д. Баран, А. Ю. Романов. – Москва : ДМК Пресс, 2023. – 646 с. – ISBN 978-5-93700-170-2.
6. Жуков К. Г. Модельное проектирование встраиваемых систем в LabVIEW : монография / Константин Георгиевич Жуков. – Москва : ДМК-Пресс, 2011. – 688 с. : ил. – ISBN 978-5-94074-673
7. V. I. Ziryukin, A. A. Melnikov, M. G. Popov, A. I. Perevalov and P. N. Mankov, "The Synthesis of the Optimal Control Law for a Frequency-Controlled Electric Drive in Starting Modes," 2023 Seminar on Electrical Engineering, Automation & Control Systems, Theory and Practical Applications (EEACS), Saint Petersburg, Russian Federation, 2023, pp. 16-19, doi: 10.1109/EEACS60421.2023.10397299.
8. Учаев В. С., Зирюкин В. И., Климов К. С., Митрохин П. М., Расторгуев М. И. Диагностика систем возбуждения синхронных генераторов в замкнутом контуре с использованием Hardware-in-the-Loop систем // Электроэнергетика, электротехника и информационные технологии : материалы Всероссийской научно-технической конференции. – Петрозаводск : Петрозаводский государственный университет, 2024. – С. 61-66.

*А.И. Ковалев, студ., Л.В. Вайтеленко, ст. пр.
(филиал ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» в г. Смоленске)*

ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ СОВРЕМЕННЫХ ВЫКЛЮЧАТЕЛЕЙ-РАЗЪЕДИНИТЕЛЕЙ

Обеспечение надежности электроэнергетических систем является важнейшим фундаментальным и критическим принципом, который во многом определяет экономичность работы рассматриваемой системы, безопасность ее для человека, а также оказывает влияние на все сферы жизни общества.

Высокая надежность каждого отдельного элемента - залог качественной работы сети. С течением времени происходит постепенная модернизация используемого оборудования, улучшаются его ключевые характеристики. Так, надежность и межремонтный интервал высоковольтных выключателей существенно возросли, чего нельзя сказать об отдельно стоящих разъединителях.

Поэтому в зарубежной практике достаточно широкое применение нашли комбинированные аппараты - выключатели-разъединители (ВР/ДСВ), которые совмещают в себе функции как выключателей, так и разъединителей. Однако, для оценки целесообразности замены традиционной компоновки на комбинированную важно определить надежность рассматриваемых ВР.

Для получения полноценной статистики с целью расчета основных показателей надежности высоковольтных выключателей необходим период 25-40 лет. Основным же периодом внедрения ВР в электроэнергетические системы стран мира является 2005-2013 год [1]. Эти данные свидетельствуют об недостаточной наработке рассматриваемого комбинированного оборудования для сбора достоверной статистики.

Для оценки надежности ВР предлагается рассмотреть его как структуру, состоящую из отдельных элементов, известная надежность которых, в свою очередь, и будет определять искомый показатель. В конструкции ВР выделяется 4 основных функциональных блока: дугогасительная камера, рабочий механизм, преобразователь тока, изоляционная колонна. Данные функциональные блоки составляют 3 различные структуры (топологии) ВР, отличительной чертой каждой из которых является расположение электронного преобразователя тока [2]. Рассмотрим и проанализируем упомянутые структуры.

На рисунке 1 представлен классический вариант топологии ВР, который обычно используется в ячейках РУ. Главным недостатком такой конструкции является то, что коллектор расположен на стороне высокого напряжения, то есть получает питание от высоковольтной шины. Отказ в любом электронном компоненте, подключенном к данной шине, приводит к отказу всего устройства, а также требует погашение всей секции шин, что, во-первых, негативно сказывается на ремонтпригодности ВР, а, во-вторых, приводит к масштабному простоем оборудования РУ. Как итог, для данной структуры общая надежность всего выключателя сильно зависит от надежности электронных трансформаторов тока.

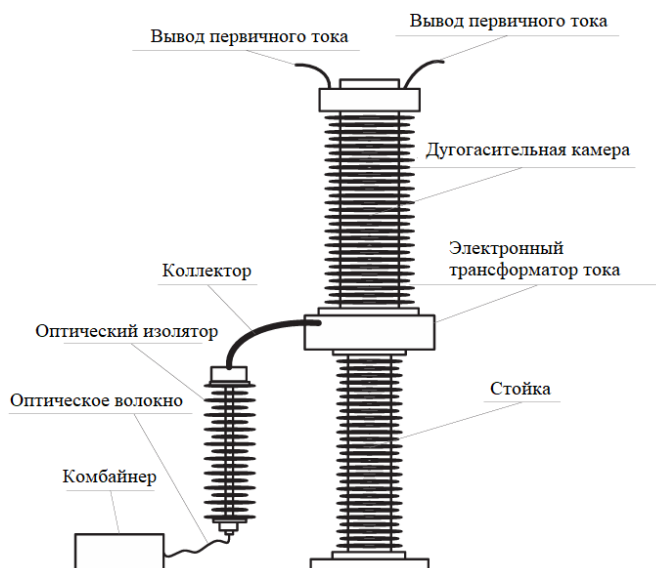


Рис. 1 – Топология №1

Первичным датчиком тока для топологии №2 (рисунок 2) является катушка Роговского, расположенная на стороне высокого напряжения и интегрированная внутри стойки. Электронный блок обработки данных расположен на стороне низкого напряжения. Данное конструктивное решение позволяет разграничить высоковольтную и низковольтную части, что повышает надежность и ремонтопригодность ВР, так как при отказе в электронном компоненте его можно заменить без необходимости отключения всей секции шин. Поэтому, влиянием электронного трансформатора на общую надежность выключателя можно пренебречь. Для данной топологии важно предусмотреть изоляцию между высоковольтной и низковольтной частями, поэтому требуется установка отдельной изолирующей камеры, что усложняет конструкцию ВР. Однако, на фоне значительного увеличения надежности всей системы этот недостаток является несущественным.

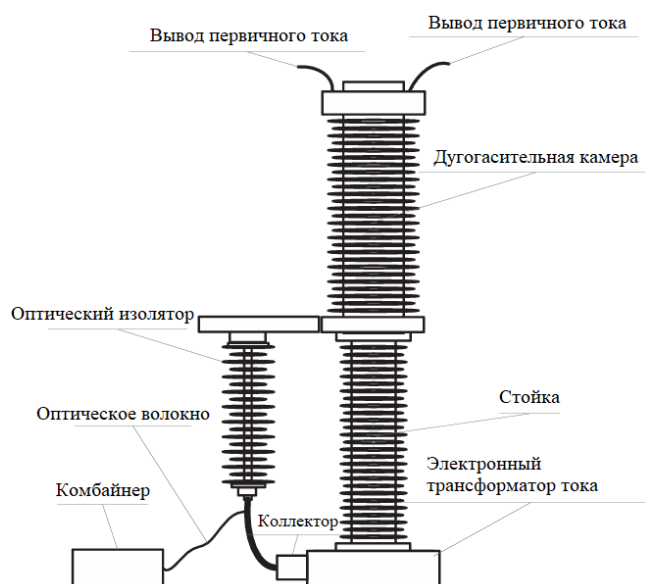


Рисунок 2 – Топология №2

Топология №3 (рисунок 3) представляет собой наиболее совершенный и перспективный подход за счет применения волоконно-оптического трансформатора тока ФОСТ, сенсорное кольцо которого интегрировано непосредственно в нижний фланец ВР. Передающее оптоволокно встроено в изоляционный слой стенки стойки. Это исключает необходимость во внешних проводках и дополнительных изолирующих камерах, повышая надежность и защищенность от внешних воздействий. Данные решения приводят к созданию более компактного, надежного и технологически продвинутого устройства.

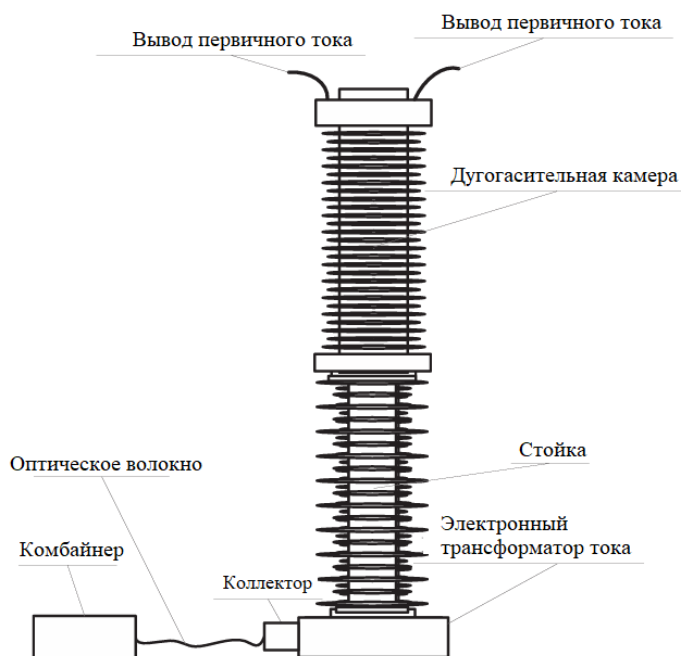


Рисунок 3 – Топология №3

В данной работе оценка надежности ВР выполнена в модуле SARA программы моделирования SimInTech [3]. Данный модуль позволяет не только рассчитать надежность заданной топологии схемы, но и оценить долю отказов отдельных элементов в общей неготовности системы.

Для примера рассмотрена упрощенная модель надежности ВР [2], состоящая из последовательно соединенных блоков дугогасительной камеры (ДГК), рабочего механизма (РМ), преобразователя тока (ПТ) и изоляционной колонны (ИК). Задание данной модели в модуле SARA выполнено с помощью дерева отказов, представленного на рисунке 4.

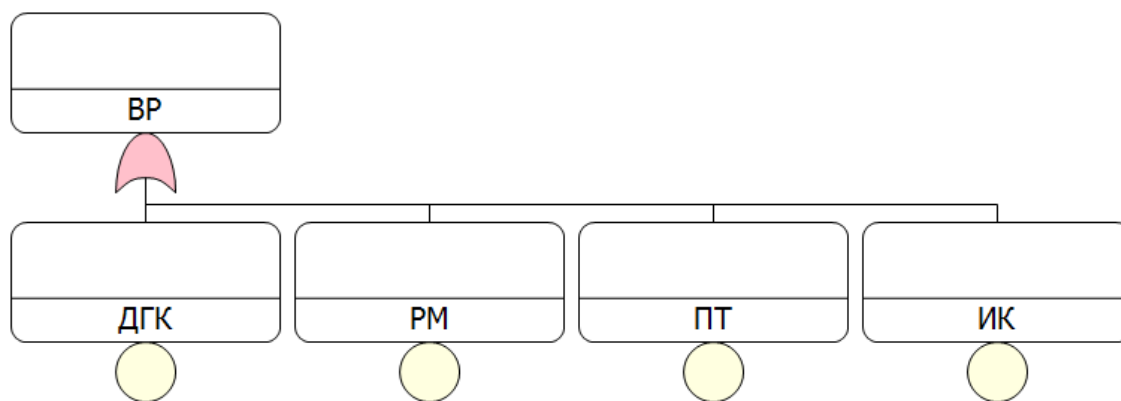


Рисунок 4 – Дерево отказов ВР в модуле SARA

Для рассматриваемой структуры ВР отказ любого элемента также приводит к отказу ВР в целом.

В качестве параметров надежности для каждого элемента были заданы частота отказов и интенсивность восстановления (рис. 5) согласно статистическим

данным, приведенным в [2]. Для всех параметров принят экспоненциальный закон распределения.

Идентификатор	Описание	Тип	Значение
R_ДГК	частота отказов ДГК	Частота	1,0243E-08
R_ИК	частота отказов ИК	Частота	3,8800E-08
R_РМ	частота отказов РМ	Частота	6,6712E-08
R_ТТ	частота отказов ТТ	Частота	1,3927E-06
T_ДГК	интенсивность восстановления ДГК	Частота	2,2475E+00
T_ИК	интенсивность восстановления ИК	Частота	1,0417E-01
T_РМ	интенсивность восстановления РМ	Частота	8,8200E-02
T_ТТ	интенсивность восстановления ТТ	Частота	5,9874E-02

Рисунок 5 - Параметры надежности элементов ВР в модуле SARA

Расчет в программе выполнялся для временного интервала, равного году. Результаты расчета представлены на рисунке 6.

Интервал времени:		8,7600E+03 ч	
Точечное			
Вероятность отказа в конце интервала:		1,3127E-02	
Средняя наработка до первого отказа:		8,7024E+03 ч	
Средняя наработка между отказами:		6,6293E+05 ч	
Среднее время восстановления:		1,6171E+01 ч	
Неготовность в конце интервала:		2,4393E-05	
Средняя неготовность:		2,3174E-05	
Поток отказов в конце интервала:		1,5084E-06 1/ч	
Средние доходы:		0,0000E+00 1/ч	
Средние расходы:		0,0000E+00 1/ч	
Сечения	Значимость событий	Чувствительность параметров	Верс
	Вероятность	Доля, %	Событие 1
1	2,3260E-05	9,5354E+01	ТТ
2	7,5637E-07	3,1007E+00	РМ
3	3,7248E-07	1,5270E+00	ИК
4	4,5573E-09	1,8683E-02	ДГК

Рисунок 6 – Результаты расчета надежности ВР в модуле SARA

(* - запись «E+(-)0N» означает умножение числа перед «E» на 10 в степени +(-)0N)

Получено, что интенсивность отказов ВР составляет $\lambda_{ВР} = 1,3127 \cdot 10^{-2}$ год⁻¹, что соответствует вероятности безотказной работы $P_{ВР}(1) = e^{-\lambda_{ВР} \cdot 1} = 0,987$. Наибольшую долю в снижение надежности ВР вносит преобразователь тока.

По аналогии была составлена модель, состоящая из отдельных выключателя, разъединителя и преобразователя тока (рисунок 7).

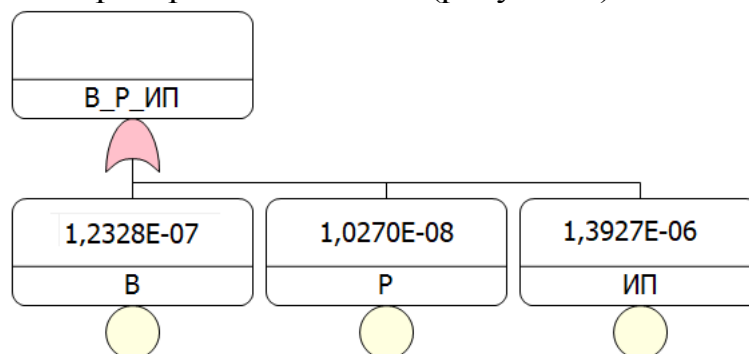


Рисунок 7 – Дерево отказов модели из отдельных выключателя, разъединителя и измерительного преобразователя в модуле SARA

Интенсивность отказа в этом случае $\lambda_{В_Р_ИП} = 1,3281 \cdot 10^{-2}$ год⁻¹, что соответствует вероятности безотказной работы $P_{В_Р_ИП}(1) = e^{-\lambda_{В_Р_ИП} \cdot 1} = 0,9868$.

Таким образом, полученный показатель надежности ячейки из отдельного выключателя, разъединителя и измерительного преобразователя тока ниже, чем для ВР, что свидетельствует о целесообразности использования ВР в схемах распределительных устройств не только для снижения занимаемой площади и времени оперативных переключений, но и для повышения надежности отдельных ячеек РУ. Однако при расчете надежности схем РУ в целом следует учитывать, что для вариантов с ВР может потребоваться отключение присоединения при ремонте ВР по сравнению, например, с применением отдельных выключателей в схемах с обходной системой шин.

Литература

1. Коммутационный аппарат нового типа – выключатель с функцией разъединителя [Электронный ресурс]. URL: https://энергия-единой-сети.рф/wp-content/uploads/2014/10/04_khlizov_ntc_ees_5-16.pdf?ysclid=mgb3oc1cs1609963810 (дата обращения 30.09.2025)
2. Liu Han, Teng Feng, Songlin Gu, Yi Jiang, Yuxiang Wan, Lin Cheng, « Research on Reliability Optimization Method of Disconnecting Circuit Breakers», 2019 IEEE 3rd Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2), DOI:10.1109/EI247390.2019.9062115.
3. Лабораторная работа №1 по курсу «Анализ надежности и риска» «Основы создания деревьев отказов и деревьев успехов» [Электронный ресурс]. URL: https://help.simintech.ru/4_nachalo_raboty/laboratornye_raboty_organizacii/SimInTech/analiz_nadezhnosti/DAT_osno_vy_sozdaniya_derevev.html?hl=расчет%2Снадежности%2Спростой%2Ссистемы (дата обращения 30.09.2025)

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СЕТИ (SMART GRIDS): ТЕХНОЛОГИИ И РЕШЕНИЯ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ И УСТОЙЧИВОСТИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Современные энергетические системы переживают глубокую трансформацию, обусловленную необходимостью перехода к устойчивому, децентрализованному и цифровому энергоснабжению. Традиционные централизованные сети, построенные в XX веке, не способны эффективно интегрировать переменные источники возобновляемой энергии, обеспечивать гибкое управление спросом или оперативно реагировать на сбои. В этих условиях интеллектуальные энергетические сети (Smart Grids) становятся ключевым элементом новой энергетической парадигмы.

Smart Grids – это интегрированная система, объединяющая физическую инфраструктуру энергоснабжения с цифровыми технологиями, такими как Интернет вещей (IoT), искусственный интеллект (ИИ), облачные вычисления и блокчейн. Цель Smart Grids – повысить надежность, устойчивость, эффективность и экологичность энергосистемы за счёт двустороннего обмена данными, автоматизированного управления и активного вовлечения потребителей.

Интеллектуальная энергосеть состоит из нескольких взаимосвязанных уровней:

1. Уровень генерации – включает централизованные электростанции и распределённые источники (солнечные панели, ветрогенераторы, микроГЭС).
2. Уровень передачи и распределения – высоковольтные линии, трансформаторные подстанции, распределительные сети.
3. Уровень потребления – конечные пользователи, включая бытовые, коммерческие и промышленные объекты.
4. Информационный уровень – ИКТ-инфраструктура, обеспечивающая сбор, передачу и обработку данных.

Ключевые технологии, реализующие функциональность Smart Grids:

- интеллектуальные счётчики (smart meters) – обеспечивают измерение потребления в реальном времени и двустороннюю связь;
- системы автоматического восстановления (self-healing grids) – локализуют и устраняют повреждения без участия человека;
- системы хранения энергии (ESS) – балансируют спрос и предложение.
- программируемые логические контроллеры (PLC) и фазометры (PMU) – обеспечивают высокоточное управление и мониторинг;
- платформы управления спросом (Demand Response) – позволяют сдвигать нагрузку во времени для снижения пикового потребления.

Надежность энергосистемы определяется как способность обеспечивать бесперебойное электроснабжение потребителей. В Smart Grids надежность достигается за счёт следующих механизмов:

1. Автоматическое восстановление (Self-Healing).

Традиционные сети требуют ручного вмешательства при авариях, что приводит к длительным отключениям. Smart Grids используют алгоритмы автоматической реконфигурации сети. Например, при коротком замыкании система перенаправляет потоки энергии через резервные линии, изолируя повреждённый участок [1].

Таблица 1 – Время восстановления сети

Тип сети	Среднее время восстановления (SAIDI*)	Частота отключений (SAIFI**)
Традиционная	120 мин	1,8 отключений/год
Smart Grid	25 мин	0,6 отключений/год

* SAIDI – System Average Interruption Duration Index

** SAIFI – System Average Interruption Frequency Index

Снижение времени отключений на 79% демонстрирует значительный вклад Smart Grids в повышение надежности.

2. Прогнозирующее обслуживание

Использование датчиков, аналитики больших данных и искусственного интеллекта позволяет предсказывать отказы оборудования, что радикально снижает как прямые затраты на ремонт, так и косвенные потери от простоев.

Например, анализ вибрации и температуры трансформатора может предупредить о перегреве за 7-10 дней до аварии.

Таблица 2 – Экономический эффект от предиктивного обслуживания (на 1 МВА установленной мощности):

Показатель	Традиционное обслуживание (руб./год)	Прогнозирующее обслуживание (руб./год)
Затраты на ремонт (на 1 МВА)	133560	79910
Потери от простоев	278250	66780
Общие годовые затраты	411810	144690

Таким образом, даже с учётом инфляционного роста цен к 2025 году, переход на прогнозирующее обслуживание в рамках Smart Grids сохраняет свою высокую экономическую эффективность, обеспечивая снижение эксплуатационных расходов [2].

3. Обеспечение устойчивости энергосистемы

Устойчивость Smart Grids оценивалась по трём критериям: техническому, экономическому и экологическому.

Переменный характер генерации от солнечных и ветровых установок создаёт вызовы для балансировки сети. Smart Grids решают эту проблему за счёт:

- использования систем хранения энергии (ESS);

- гибкого управления спросом;
- прогнозирования генерации на основе метеоданных и ИИ [3].

Цифровизация повышает уязвимость к кибератакам. Однако Smart Grids включают многоуровневую защиту:

- шифрование данных (AES-256);
- системы обнаружения вторжений (IDS);
- блокчейн для аутентификации транзакций.

Таблица 3 – Сравнение уровней защиты

Уровень безопасности	Традиционная сеть	SMART GRIDS
Шифрование данных	Нет	Да
Мониторинг в реальном времени	Ограниченный	Полный
Восстановление после атаки	Ручное	Автоматизированное
Уровень риска	Высокий	Средний/низкий

Таблица 4 – Сравнительный анализ: Smart Grids и традиционные сети

Критерий	Традиционная сеть	SMART GRIDS
Направление потока энергии	Однонаправленное	Двунаправленное
Управление спросом	Пассивное	Активное (Demand Response)
Интеграция ВИЭ	Ограниченная (<15%)	Высокая (>50%)
Потери в сетях	8–12%	5–7%
Время реакции на аварию	Часы	Минуты/секунды
Участие потребителя	Минимальное	Активное (prosumer)
CO ₂ -интенсивность	Высокая	Снижена на 20–30%

Для объективной оценки целесообразности инвестиций в интеллектуальные сети необходимо учитывать прогнозируемую инфляцию. Согласно прогнозам Минэкономразвития РФ, уровень инфляции в 2024 году составит 6%, а в 2025 году – 5%. С учётом этого, все финансовые показатели пересчитываются в цены 2025 года.

Для наглядности рассмотрим пилотный проект в населенном пункте с численностью населения 100000 человек:

Таблица 5 – Годовые выгоды в ценах 2025 года

Источник выгоды	Сумма (млн. руб)
Снижение потерь в сетях (на 3%)	46,7
Снижение затрат на обслуживание	31,2
Экономия от Demand Response	20,0
Снижение выбросов (эквивалент CO ₂)	13,4
Итого	111,3

Расчёт чистой приведённой стоимости (NPV):

При ставке дисконтирования 8% и сроке проекта 15 лет:

NPV без субсидий:

$$NPV = -1,335,600,00 + 11,300,000 \cdot \left(\frac{1 - (1 + 0,08)^{-15}}{0,08} \right) = -383 \text{ млн руб.}$$

NPV с государственной субсидией (30% от капитальных затрат): Инвестиции после субсидии = 1,336 млрд · (1 – 0,3) = 935 млн руб.

NPV ≈ +18 млн руб.

Таким образом, проект становится экономически целесообразным при наличии государственной поддержки.

Срок окупаемости:

Без субсидий: $\frac{1,336 \text{ млрд}}{111,3 \text{ млн}} \approx 12$ лет

С субсидией (30%): $\frac{0,935 \text{ млрд}}{111,3 \text{ млн}} \approx 8,4$ года

Эти расчёты подтверждают, что при текущих экономических условиях и прогнозируемой инфляции, ключевым фактором для успешного внедрения Smart Grids является государственное стимулирование.

Литература

1. International Energy Agency (IEA). (2023). World Energy Outlook 2023. Paris: IEA Publications.
2. IEEE Power & Energy Society. (2023). Smart Grid Metrics: Reliability and Resilience.
3. ПАО «Россети». (2022). Отчёт о внедрении цифровых технологий в распределительных сетях.

*И.Н. Соколов, асп.; Р.В. Солопов, к.т.н., доц.
(филиал ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» в г. Смоленске)*

ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ ТРАНСФОРМАТОРОВ ПО ДАННЫМ ВИБРАЦИОННОЙ ДИАГНОСТИКИ

Одним из ключевых требований для бесперебойной работы электрических сетей является обеспечение надежной и бесперебойной работы силовых трансформаторов. В связи с этим является актуальной проблема оценки состояния трансформатора в целях принятия решения о его дальнейшей эксплуатации или выводе в ремонт.

Известно, что вибрационная диагностика является одним из наиболее распространенных способов оценки состояния различного оборудования. В частности, в сфере электроэнергетики широко используются методы вибродиагностики и вибрационного мониторинга турбин, генераторов, насосов, электродвигателей.

Ряд исследований [1,2] показывают, что вибрационная диагностика может быть также использована и для оценки состояния трансформаторов, при этом, согласно [1], преимуществами оценки состояния по данным вибрации являются:

- возможность определения состояния трансформатора во время его работы под напряжением;
- высокая точность;
- чувствительность дефектам различной стадии развития, в том числе и к зарождающимся дефектам.

Необходимо отметить, что описанные выше преимущества определяются тем, что основные источники вибрации трансформатора делятся на два типа [2]: вибрация сердечника и вибрация обмоток. Вибрация сердечника, в свою очередь, также имеет два источника: вибрацию, вызванную магнитострикцией, и вибрацию, возникающую в воздушных зазорах. Вибрация обмоток обусловлена действием силы Лоренца, величина которой зависит от плотности тока и плотности потока рассеяния. Рассматриваемая вибрация, возникающая в обмотках и сердечнике, распространяется через трансформаторное масло и может быть зафиксирована акселерометрами, расположенными на стенках бака.

В силу того, что частота магнитострикционных сил в два раза больше частоты питания, то значение основной частоты вибрации сердечника - 100 Гц. Эту же частоту имеют вибрация, вызванная воздушным зазором, возникающим вследствие магнитного отталкивания между пластинами, и вибрация обмоток. Однако, вследствие насыщения магнитопровода в спектре вибрации появляются также гармоники 300 и 500 Гц [1].

Необходимо отметить, что с целью разделения «вклада» обмоток и магнитопровода в общую вибрационную характеристику некоторые [1,2] рекомендуют проводить измерения дважды [1,2]:

- в режиме холостого хода, когда электродинамические силы в обмотках незначительны, и, соответственно, основной вклад в вибрацию вносит магнитопровод;

- под нагрузкой, в данном случае в вибрации присутствуют обе составляющие.

Как и в случае с вибродиагностикой подшипников, передач, двигателей [3] можно выделить критерии, рассчитываемые по данным во временной и частотной областях.

Кроме оценки общего уровня вибрации по среднеквадратическим значениям виброускорения или виброскорости, во временной области для диагностики наиболее часто используются коэффициент асимметрии и коэффициент эксцесса [2]. Первый из упомянутых коэффициентов рассчитывается по формуле:

$$S = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^3 / D^3 \quad (1)$$

где:

\bar{x} – среднее значение отсчетов сигнала за выбранный период;

n – количество отсчетов сигнала за выбранный период;

D – среднеквадратическое отклонение отсчетов сигнала, рассчитываемое по формуле

$$D = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (2)$$

Коэффициент эксцесса рассчитывается по формуле

$$K = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^4 / D^4 \quad (3)$$

При нарушении прессовки магнитопровода сила прижима стальных пластин уменьшается, что приводит к асимметрии кривой плотности вероятности амплитуды сигнала, при этом увеличиваются значения как коэффициента эксцесса, так и коэффициента асимметрии.

При анализе в частотной области применяются широко используемые методы, например анализ спектра виброускорения или виброскорости на наличие определенных гармоник [1]. Однако данные методы обладают низкой чувствительностью на начальных этапах развития дефектов [1], поэтому в некоторых источниках предлагаются диагностические критерии центральной частоты сигнала [2], а также использование для диагностики вейвлет-преобразований [1,2].

Центральная частота рассчитывается по формуле

$$f_c = \frac{\int f \cdot P(f) df}{\int P(f) df} \quad (4)$$

где:

f_c – центральная частота;

$P(f)$ – функция зависимости спектральной плотности мощности от частоты.

При этом [2], если центральная частота имеет значение более 300 Гц, то с большей долей вероятности имеют место дефекты сердечника, в случае, если центральная частота находится в диапазоне от 100 до 200 Гц – дефекты обмоток.

Однако [2], анализ как во временной, так и в частотной области может приводить к ошибкам, поэтому в некоторых работах [4] делается вывод о необходимости применения методов, работающих одновременно и в частотной, и во временной областях. Одним из таких методов является вейвлет-анализ. Вейвлет анализ представляет собой математическую технику разложения сигнала на ряд частотных составляющих, позволяющую оценивать как упомянутые частотные составляющие, так и их временную локализацию.

В [4] было проведено исследование трансформатора мощностью 630 кВА, включающее в себя измерение и вейвлет-анализ вибрации, возникающей при начале работы трансформатора без нагрузки. На рисунке ниже показана схема установки акселерометров.

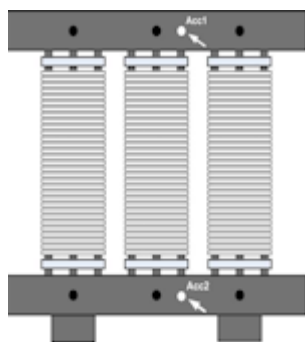


Рисунок 6 – Схема установки акселерометров при проведении вейвлет-анализа

В рассматриваемом исследовании был проведен ряд опытов, в ходе которых проводились замеры как исправного трансформатора, так и трансформатора с внесенным дефектом (ослаблением верхнего яра сердечника, как частичным, так и полным). Результаты измерений приведены на рисунке ниже.

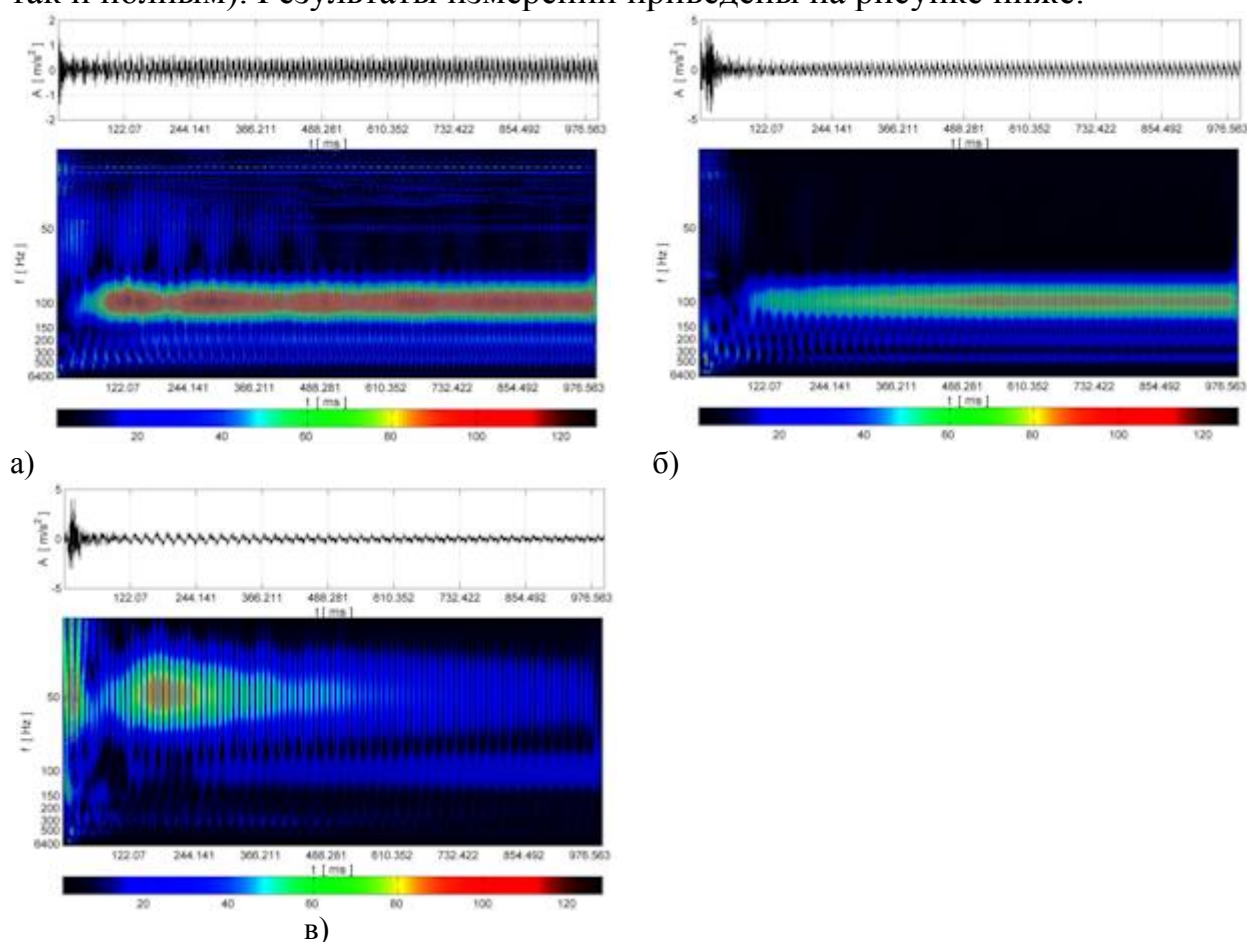


Рисунок 7 – результаты вейвлет преобразования для трансформатора без дефекта (а), с частичным (б) и полным (в) ослаблением верхнего яра

Из приведенных выше рисунков видно, что по мере усиления дефекта сначала уменьшается амплитуда основной гармонии, частота которой на исправном трансформаторе равна 100 Гц, а затем меняется и частота основной гармонии.

Таким образом, в данной статье были рассмотрены основные методы вибрационной диагностики, применимые к оценке состояния трансформаторов,

выделены основные группы подобных методов: работающие во временной области, в частотной и одновременно в двух областях. Были приведены преимущества и недостатки каждой из групп методов.

Литература

1. Низамиев М.Ф., Басенко В.Р., Ившин И.В., Владимиров О.В., Хуснутдинов А.Н., Андреев Н.К. Диагностика трансформаторов электротехнических комплексов с использованием бесконтактных лазерных виброметров // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики, 2022. pp. 97-108.
2. Shengchang J., Ping S., Yanming L., Dake X., Junling C. The vibration measuring system for monitoring core and winding condition of power transformer // roceedings of 2001 International Symposium on Electrical Insulating Materials (ISEIM 2001). 2001 Asian Conference on Electrical Insulating Diagnosis (ACEID 2001). Химеджи, Япония. 2001. pp. 849-852.
3. Корпий В.Г., Солопов Р.В., Соколов И.Н. Методы и оборудование для определения состояния энергетического оборудования по данным вибродиагностического исследования // ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ, ЭНЕРГЕТИКА И ЭКОНОМИКА (электроэнергетика, электротехника и теплоэнергетика). Сб трудов XX-ой Межд. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов. Смоленск. 2003. Vol. В 3 т. Т 1. pp. 82-86.
4. Sebastian Borucki A.C. Wavelet Analysis of Vibroacoustic Signals Registered During the Transformer Start-up // International Conference on High Voltage Engineering and Application. Шанхай, Китай. 2012. pp. 579-582.

СЕКЦИЯ 2 ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

*Д.И. Баловнев, к.т.н., доц.; М.Н. Козлов, маг.
(Филиал ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» в г. Смоленске)*

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА ПРИ РАБОТЕ НА УНИВЕРСАЛЬНОМ ПИТАНИИ

Двигатели переменного тока зарекомендовали себя в самых различных областях нашей жизни благодаря высоким энергетическим показателям, длительному сроку службы и хорошей управляемости. Зачастую их можно встретить на промышленных предприятиях в качестве элементов систем электропривода (ЭП) различных механизмов. Качество функционирования ЭП во многом определяется качеством питания электродвигателя (ЭД). Самыми главными параметрами систем питания, воздействующими на рабочие и пусковые параметры машины, выступают напряжение U_1 и частота f_1 , так как преимущественно от них зависит магнитный поток в воздушном зазоре ($\Phi \sim U_1/f_1$). Диапазон напряжения и частоты, в котором будет обеспечена работа ЭД с небольшими изменениями его характеристик, принято называть универсальным питанием.

Некоторые зависимости пусковых и рабочих величин двигателей от напряжения и частоты описаны теорией частотного регулирования, но в ней больший акцент идет на асинхронные машины из-за их преобладания на предприятиях [1]. В данной статье предлагается рассмотреть влияние универсального питания на характеристики синхронного двигателя (СД). Подобные исследования, а также распространение силовой электроники в промышленных отраслях и развитие ее местных производств делает возможным внедрение более эффективного и мощного синхронного электропривода с частотным управлением, взамен асинхронному. Несмотря на то, что для такого управления равносильно важны изменения как частоты, так и напряжения, больший исследовательский интерес представляет действие частоты на параметры рабочего и пускового режимов, ибо предсказать его может быть затруднительно. С коммерческой стороны вопроса уместно ограничиться частотой 60 Гц, которая является стандартной для Бразилии, Саудовской Аравии, некоторых стран Африки и других. Таким образом, полученные характеристики позволят обозначить перспективы продажи отечественных синхронных двигателей в зарубежные государства.

Целью настоящего исследования является определение возможности использования синхронного двигателя, рассчитанного на частоту питания 50 Гц, в сети 60 Гц. Для достижения этой цели поставлены следующие задачи:

- Проектирование синхронного двигателя;
- Проведение расчета характеристик СД для двух случаев: стандартная и повышенная частота;
- Оценка влияния повышенной частоты на характеристики машины.

Данная работа имеет ценность для развития теории частотного управления синхронными двигателями, что позволит расширить области их применения и повысить эффективность систем привода без замены оборудования, а также может представлять практический интерес для производителей синхронных машин.

Проектирование синхронного двигателя мощностью $P_{2н}$ 250 кВт на номинальное напряжение $U_{1н}$ 380 В с синхронной частотой вращения n_c , равной 750 оборотов в минуту, а также расчет его характеристик производились в программной среде Mathcad на основе методик, приведенных в [2]. Значения рабочих величин в обоих случаях сняты в точке номинальной мощности (250 кВт) при номинальном напряжении (380 В). Сравнение параметров рабочего режима представлено на рисунке 1.

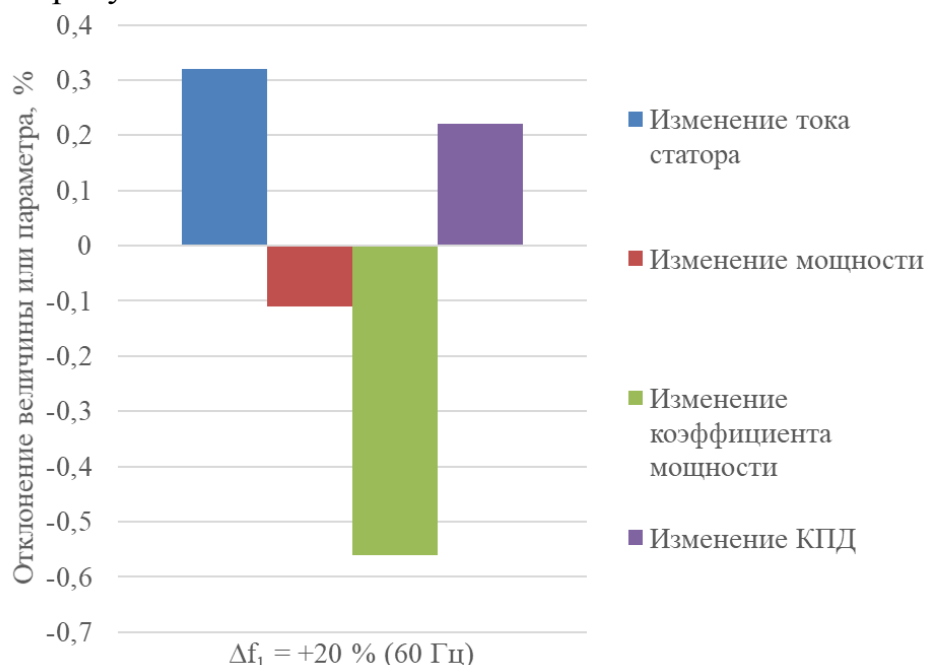


Рисунок 1 – Влияние частоты на рабочие характеристики СД

Частота сети определяет скорость вращения ротора СД, поток в воздушном зазоре, значения индуктивных сопротивлений обмоток, а также величину некоторых потерь. Действительно, при расчете двигателя с частотой питания 60 Гц заметны увеличения синхронных индуктивных сопротивлений по продольной (x_d) и поперечной оси (x_q) на 22% и 21% соответственно. Уменьшению на 11% подверглась статическая перегружаемость двигателя. Величина потерь на возбуждение стала меньше на 23%, механические потери повысились на 72%, магнитные — понизились на 16%. Как видно из рисунка 1, такие изменения практически не отразились на значении КПД. Электромагнитный момент при повышении частоты до 60 Гц упадет на 17%. Стоит отметить, что ее влияние на другие рабочие параметры несущественно. Количество необходимого для охлаждения воздуха почти не изменилось, однако его обеспечиваемый расход вырос на 20%. Пусковые характеристики двигателя при питании от напряжений разной частоты изображены на рисунке 2.

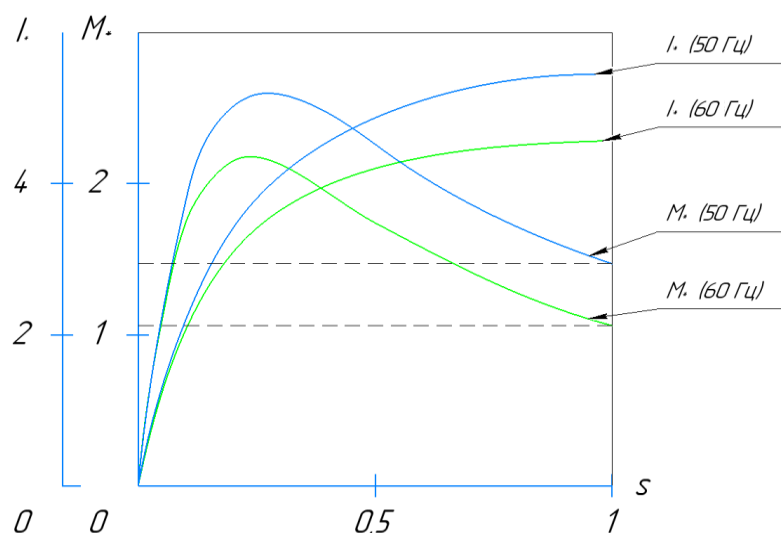


Рисунок 2 – Влияние частоты на пусковые характеристики СД

Пусковой момент машины стал меньше на 28%, что в некоторых случаях усложняет запуск под нагрузкой. Снижение же пускового тока на 16% способствует уменьшению падения напряжения в сети и нагрева обмоток при включении двигателя.

Исходя из вышеописанного, можно сделать однозначный вывод о возможности использования рассмотренного электродвигателя переменного тока при питании от напряжения с частотой 60 Гц, однако при этом его запуск стоит осуществлять с пониженной нагрузкой или вовсе без нее. Изменение частоты практически не повлияло на рабочие характеристики двигателя, но привело к уменьшению электромагнитного момента и статической перегружаемости.

Литература

1. Данилов П.Е. Основы теории электропривода. Часть первая [Электронный ресурс]: Учебно-методическое пособие / П.Е. Данилов, В.А. Барышников, В.В. Рожков. Смоленск: РИО филиала ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» в г. Смоленске, 2020. — 260 с.
2. Копылов, И.П. Проектирование электрических машин: учебник для вузов / И.П. Копылов. — 4-е изд., перераб. и доп. — Москва: Издательство Юрайт, 2025. — 828 с. — (Высшее образование). — ISBN 978-5-534-11700-4. — Текст: электронный // Образовательная платформа Юрайт [сайт]. — URL: <https://urait.ru/bcode/566208> (дата обращения: 26.09.2025)

*А.А. Быков, к.п.н., доцент; И.Д. Щеглов, студ.
(филиал ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» в г. Смоленске)*

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА АВТОМАТИЗАЦИИ ЧАСТОТНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ В СЕРВОДВИГАТЕЛЯХ

Современные системы автоматизации предъявляют повышенные требования к точности, быстродействию и надёжности управления электроприводами. Серводвигатели вследствие их высокой динамичности и способности к точному позиционированию нашли широкое применение в робототехнике, станках с числовым программным управлением, упаковочных и текстильных машинах [1]. Частотные преобразователи (ЧП) – ключевой компонент таких приводов, по-

сколькo они позволяют управлять частотой и напряжением питания двигателя, что определяет скорость, момент и динамические характеристики системы [2].

Тем не менее, при недостаточной автоматизации систем управления возможны следующие проблемы: снижение устойчивости при изменении нагрузки; ухудшение качества регулирования (ошибки устойчивого состояния, большие перерегулирования); неэффективное использование энергии; сложность адаптации к внешним возмущениям и параметрическим изменениям двигателя.

Цель исследования – разработка и экспериментальное исследование автоматизированной системы управления частотным преобразователем серводвигателя с векторным управлением и адаптивной коррекцией параметров, обеспечивающей высокую точность и динамическую устойчивость

В отечественной и зарубежной литературе представлены различные подходы к управлению серводвигателями через частотные преобразователи:

Классическое ПИД-регулирование. Применяется для менее требовательных задач; простота реализации, но при нелинейностях и изменяющейся нагрузке проявляются существенные отклонения [3].

Векторное управление (Field Oriented Control, FOC) – контроль магнитных потоков и тока двигателя в координатах, вращающихся с потоком. Позволяет значительно повысить динамику и точность [4].

Прямой контроль крутящего момента (Direct Torque Control, DTC) – быстрый отклик, но сложности с пульсациями момента и вибрациями.

Адаптивные и устойчивые методы управления – методики самонастройки параметров (например, оценка постоянной времени, сопротивления, индуктивности) при изменении условий работы [5].

Исследования показывают, что интеграция векторного управления с адаптивными алгоритмами и алгоритмами компенсации помех даёт лучшие результаты по сравнению с традиционными методами ПИД-регулирования. Однако имеются трудности в реализации – высокие вычислительные требования, необходимость точных датчиков, проблемы с шумом и нелинейностями.

Формулировка задачи и постановка эксперимента заключается в разработке автоматизированной системы управления частотным преобразователем серводвигателя, обеспечивающей:

1. Минимальную установившуюся ошибку положения ($< 0,1\%$) и скорости ($< 0,5\%$ номинала).
2. Быстрое время переходного процесса (время установления $< 0,2$ с при шаге задания скорости).
3. Устойчивость при возмущениях по нагрузке и при изменениях параметров двигателя (сопротивления, индуктивности).
4. Энергоэффективность – снижение потерь до 10% по сравнению с базовым ПИД-регулятором.

Для проведения испытания разработанной системы использовался трёхфазный асинхронный двигатель с обмотками статора и ротора, управляемый через преобразователь с IGBT-инвертором. В основе модели серводвигателя с частотным преобразователем используется следующая система уравнений:

$$\begin{cases} u_s = R_s i_s + L_s \frac{di_s}{dt} + e_s \\ u_r = R_r i_r + L_r \frac{di_r}{dt} + e_r \end{cases}$$

где u_s , u_r – напряжения на статоре и в вращающихся координатах ротора, i_s , i_r – соответствующие токи, R_s , R_r , L_s , L_r — сопротивления и индуктивности, e_s , e_r – ЭДС.

Система управления состоит из следующих блоков:

1. Датчики положения (энкодер) и скорости.
2. Алгоритм преобразования координат (преобразование Кларка–Парк).
3. Векторный контроллер скорости и момента.
4. Адаптивный модуль оценки параметров двигателя.
5. Генерация управляющих сигналов ШИМ-инвертору.

Моделирование системы проводилось в среде Matlab/Simulink. В ходе процесса моделирования осуществлялась оценка времени установления рабочего режима, ошибки регулирования частотного преобразователя серводвигателя, перерегулирования для различных нагрузок и возмущений.

Реализация прототипа была осуществлена на аппаратной платформе с цифровым сигнальным процессором (DSP) и с программируемым логическим контроллером с поддержкой высокочастотной ШИМ.

Кроме того, были проведены испытания с шагом задания скорости и нагрузки; изменения нагрузки на валу; а также с имитацией изменения параметров двигателя (температура, сопротивление обмоток).

В ходе процесса моделирования были получены следующие основные результаты, представленные в таблице 1.

Таблица 1. Результаты моделирования частотного преобразователя серводвигателя

Условие	Время установления(0...95%)	Максимальное перерегулирование	Установившаяся ошибка скорости	Установившаяся ошибка положения
Система с ПИД-контролем (базовый)	0,35 с	15 %	±2 %	±1°
Векторное управление без адаптации	0,18 с	8 %	±0,5 %	±0,2°
Векторное управление с адаптацией	0,12 с	5 %	±0,2 %	±0,05°

На аппаратной установке подтверждены следующие тенденции:

- при изменении нагрузки от 0,5 до 1,5 номинала время установления около 0,12 с;

- ошибка скорости держится в пределах $\pm 0,3$ %;
- ошибка положения – $\pm 0,1$ °;
- устойчивость против скачков параметров: при нагреве обмоток, что увеличивает сопротивление на 20 %, адаптивный алгоритм корректирует оценку и удерживает характеристики без заметной деградации.

По сравнению с ПИД-регулятором с фиксированными параметрами предложенный метод установил, что потери, связанные с реактивной составляющей, снижены на примерно 8-12 %. Общая эффективность при частичных нагрузках повысилась за счёт уменьшения избыточного тока и холостого хода.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что сочетание векторного управления и адаптивной оценки параметров значительно улучшает динамические и статические характеристики серводвигателя при управлении через частотный преобразователь.

Преимущества метода:

- высокая точность положения и скорости, что критично в станках с ЧПУ и робототехнике;
- устойчивость к внешним воздействиям и изменению параметров; экономия энергии, особенно при работе на частичных нагрузках.

Ограничения и проблемы представленного метода:

- потребность в высокопроизводительном аппаратном обеспечении (DSP, быстрые АЦП, качественные датчики);
- усложнение алгоритма и увеличение требований к программной реализации;
- чувствительность к шумам и погрешностям измерения; необходимость фильтрации;
- вопросы надёжности при экстремальных режимах работы (например, при больших температурных перепадах).

В работе разработана и исследована автоматизированная система управления частотным преобразователем серводвигателя на базе векторного управления с адаптивной коррекцией параметров. Проведённый анализ и экспериментальные испытания показали, что предложенный подход позволяет снизить время установления до $\sim 0,12-0,15$ с; уменьшить установившуюся ошибку скорости и положения до $\pm 0,2$ % и $\pm 0,1$ ° соответственно; повысить энергоэффективность при частичных нагрузках; обеспечить устойчивость работы при изменении параметров двигателя и при возмущениях.

Для практического применения рекомендуется:

1. Использовать качественные датчики положения и скорости с минимальной инерцией.
2. Обеспечить достаточную вычислительную мощность контроллера.
3. Реализовать механизм самодиагностики и фильтрации сигналов.
4. Исследовать долговременную надёжность и устойчивость в тяжёлых условиях эксплуатации.

Литература

1. Иванов И. И., Петров П. П. Управление сервоприводами. – М.: Изд-во Академии, 2018. – 320 с.

2. Smith J., Brown A. Adaptive vector control of AC servo drives // IEEE Trans. on Industrial Electronics. – 2020. – Vol. 67, № 5. – P. 3456-3463.
3. Кузнецов С. А., Орлов Д. В. Анализ устойчивости при изменении сопротивления обмоток асинхронного двигателя // Электропривод. – 2019. – № 4. – С. 23-31.
4. Zhang L., Wang T. Energy-efficient control strategies for servo motors using frequency converters // Journal of Power Electronics. – 2021. – Vol. 21, № 2. – P. 120-130.
5. Смирнов А. Н. Адаптивные алгоритмы векторного управления для промышленных приводов // Проблемы управления. – 2017. – Т. 46, № 3. – С. 45-55.

*А.С. Кудряшов, асп.; В.В. Рожков, к.т.н., доцент
(Филиал ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» в г. Смоленске)*

ПРИМЕНЕНИЕ СИСТЕМ ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ В ЗАДАЧАХ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДА

Для систем следящего электропривода в ряде задач автоматизации, например, при отработке траекторий движения, определяемых не только внешним заданием, но и свойствами материала или среды, самого объекта управления, способного менять свои параметры геометрии/момента инерции и т.п., в которых функционирует инструмент/рабочий орган/схват вместо многоконтурных систем регулирования эффективнее применять адаптивное управление. Для адаптивных систем синтез систем регулирования представляет собой комплексную творческую задачу. Сама структура системы управления при этом усложняется не существенно, но ее математическое описание и принципы синтеза отличаются от классических систем.

В адаптивных системах управления можно выделить особую группу – систем параметрического управления [1], мало известных научной общественности, хотя их общие принципы были предложены более 50 лет назад [2]. Сам термин «параметрическое управление» в имеющихся публикациях не вполне строгий и многозначный. Опуская большинство подробностей, можно сказать, что в таких системах управление достигается за счёт целенаправленного изменения параметров управляющего устройства или объекта управления (или их сочетания). При этом синтез этих систем ограничен использованием базовых функциональных блоков – операторов: интегратора, дифференциатора, усилителя и сумматора. В структуру параметрического управления добавлены лишь два дополнительных элемента – умножение и деление. Такой узкий набор блоков значительно упрощает создание систем с адаптивными свойствами. Иногда в структуре такой системы имеются различного типа идентификаторы, например, подобные показанным в монографии [3]. Их математическое описание включает дополнительные структурные нелинейности, которые отсутствуют в классических системах регулирования.

При исследованиях систем параметрического управления применительно к следящему электроприводу на начальном этапе необходимо определить область рационального применения таких структур и основные особенности построения.

Цель данной статьи – показать применение систем параметрического управления в разработке электропривода.

В качестве примера рассматривается сравнение классической схемы стабилизации скорости электродвигателя с контуром скорости, показанной на рисунке 1, и варианта схемы с параметрическим управлением и нелинейным блоком, продемонстрированной на рисунке 2.

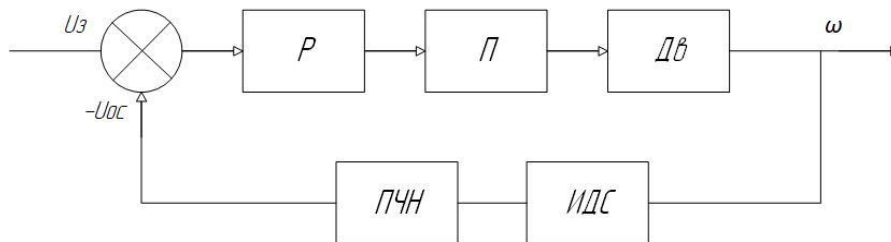


Рисунок 1 – Структура классической система стабилизации скорости электродвигателя с контуром скорости

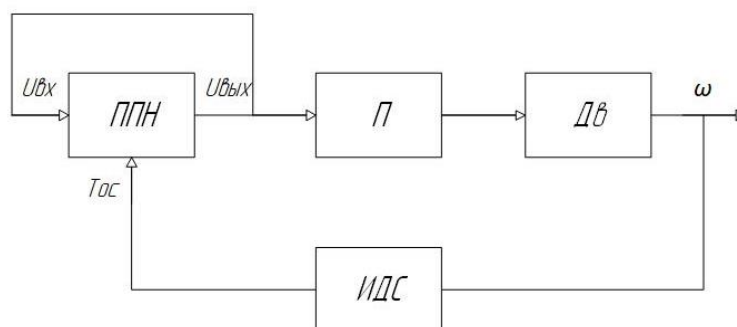


Рисунок 2 – Параметрическая система стабилизации скорости электродвигателя с контуром с переменными параметрами

На рисунках 1 и 2 приняты следующие обозначения:

П – преобразователь;

Дв – двигатель;

ИДС – датчик скорости (импульсный);

ПЧН – преобразователь частота-напряжение;

Р – регулятор (П-, ПИ-, ПИД-);

ППН – преобразователь период-напряжение;

Сигналы в системе регулирования: U_z – сигнал задания; $U_{ос}$ – сигнал обратной связи по регулируемой координате; $U_{вх}$ – входной сигнал ППН; $U_{вых}$ – выходной сигнал ППН; $T_{ос}$ – сигнал периода импульсов используемого ИДС;

ω – скорость вала двигателя.

В классической системе регулирования скорость вала измеряется датчиком и может преобразовываться при использовании импульсного датчика скорости в частоту импульсов. Этот сигнал в качестве отрицательной обратной связи подается на сумматор, а затем — на регулятор, который задает управляющее напряжение преобразователя и может в общем случае быть различной структуры в зависимости от требований к статическим и динамическим свойствам системы регулирования.

В системе с параметрическим управлением для сравнения сигналов задания и обратной связи используется нелинейный блок, реализующий операцию де-

ления (не обязательно физически выделенный в структуре системы управления). На выходе датчика одновременно присутствуют сигналы частоты импульсов и их периода (сигнал $T_{ос}$, обратно пропорциональный частоте импульсов). Важно, что такая схема сохраняет устойчивость независимо от статических коэффициентов передачи применяемого датчика, обеспечивая аperiodический переходный процесс с практически неизменной длительностью с периодом импульсов:

$$T_{ос} = \frac{1}{k_{идс} \cdot \omega},$$

где $k_{идс}$ – статический коэффициент передачи датчика скорости.

С другой стороны, зависимость между выходным напряжением ППН и входным периодом импульсов имеет вид:

$$U_{вых} = k \cdot U_{вх} \cdot T_{ос},$$

где k – коэффициент пропорциональности (зависит от фактической реализации ППН).

Здесь ППН выполняет линейную операцию умножения. В представленной схеме на вход ППН подается его выходное напряжение.

В итоге получаем, что скорость вала двигателя в этой структуре выделяется следующим образом:

$$1 = k \cdot T_{ос} = \frac{k}{k_{идс} \cdot \omega} \text{ или } \omega = \frac{k}{k_{идс}}$$

Кроме того, важной особенностью является то, что быстродействие системы параметрического управления выше, чем у классической, что обеспечивает более высокую скорость реакции на управление. Само построение схемы, несмотря на дополнительные нелинейности от операций умножения или деления, при этом оказывается проще и эффективнее.

Таким образом, системы параметрического управления предлагают простой и эффективный способ повышения быстродействия и устойчивости электроприводов. Их ограниченный набор элементов облегчает синтез системы автоматического регулирования. Это делает параметрические системы регулирования в следящем электроприводе перспективными на практике для внедрения.

Литература

1. Воронин, А. В. Адаптивные системы управления : учебное пособие / А. В. Воронин. — Томск : ТПУ, 2022. — 138 с. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/332432>
2. Догановский С. А. Параметрические системы автоматического регулирования. – Москва, «Энергия», 1973. Библиотека по автоматике. Выпуск 465.
3. Рубан А.И. Адаптивные системы управления с идентификацией : монография / А. И. Рубан. – Красноярск : Сиб. федер. ун-т, 2015. – 140 с.

*С.П. Курилин, д. т. н., проф., В.В. Борисов, д. т. н., проф.
(Филиал ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» в г. Смоленске)*

ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МОДУЛЬНЫХ ЭЛЕКТРО- ДВИГАТЕЛЕЙ

Модульные электродвигатели являются средством повышения надёжности технических систем путем резервирования мощности. Целевой областью их применения являются технологические установки с непрерывным циклом производства, характерные для черной и цветной металлургии. Электродвигатели строятся на базе нескольких тяговых линейных модулей (ТЛМ), работающих на общий вторичный элемент (ВЭ). Благодаря дроблению мощности, часть модулей может быть отключена или подключена в целях обслуживания, ремонта, регулирования, форсировки момента и других. При этом прерывания работы всего электропривода не происходит, а технологическая установка продолжает выпускать продукцию. В множестве технологических машин металлургических производств особое место занимают машины с особо низкими скоростями движения, типа обжиговых или агломерационных машин. Модульные электроприводы для них предлагается создавать по безредукторному или редукторному принципу. В первом случае момент электродвигателя прикладывается непосредственно к ведущему барабану конвейера, что позволяет максимально упростить кинематическую схему электропривода. Во втором случае момент электродвигателя прикладывается к ведущему барабану конвейера через вал и понижающий редуктор, что позволяет повысить скорость ВЭ и КПД электропривода.

Предлагаемые конструкции модульных электродвигателей подробно описаны ранее. Оболочкой двигателя является стальное кольцо, закрепленное на раме технологической машины. На кольце равномерно размещены 12 ТЛМ. Каждый ТЛМ представляет собой двухсторонний плоский индуктор, снабженный трёхфазной обмоткой для возбуждения бегущего магнитного поля. Между внутренними сторонами индукторов размещен общий вторичный элемент, изготовленный в виде кольца из сплава алюминия. Низкие частоты вращения ВЭ удается получить благодаря большим радиальным размерам оболочки в сочетании с низкими частотами питания обмоток индукторов. Кольцо ВЭ крепится к ведущему барабану конвейера с помощью ребер (безредукторное исполнение) или к валу электродвигателя с помощью стального диска (редукторное исполнение).

Исследование технических характеристик модульных электродвигателей было предпринято с целью поиска возможностей их совершенствования. Анализировались данные проектирования четырёх вариантах исполнения модульного электродвигателя для привода обжиговой машины ОК – 306 [1].

Вариант 1: безредукторный электродвигатель, питаемый от источника с частотой 10 Гц.

Вариант 2: редукторный электродвигатель, коэффициент редуцирования 30, частота источника питания 12,5 Гц.

Вариант 3: редукторный электродвигатель, коэффициент редуцирования 40, частота источника питания 15 Гц.

Вариант 4: редукторный электродвигатель, коэффициент редуцирования 50, частота источника питания 18 Гц.

Все варианты имеют одинаковые конструктивные данные ТЛМ и ВЭ, представленные выше для варианта 1. Расчет технических, энергетических и тепловых показателей вариантов модульного электродвигателя были выполнены по методике [2].

На рисунке 1 приведены характеристики амплитуды токовой нагрузки ТЛМ в кА/м (график 1), КПД электродвигателя в % (график 2) и температуры обмоток индукторов в градусах Цельсия (график 3) по вариантам. Для наглядности точки графиков соединены линиями.

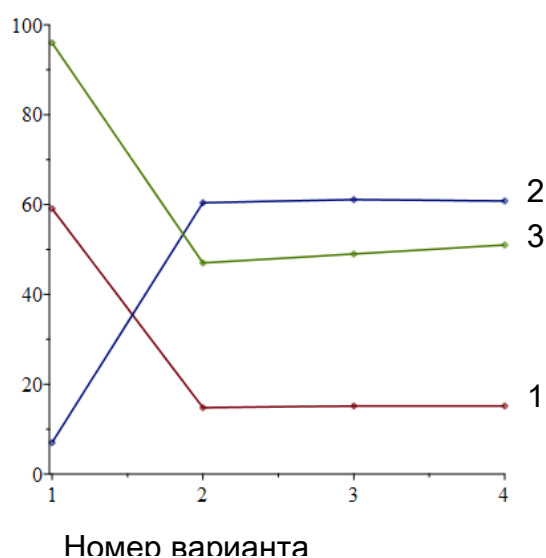


Рисунок 1 Характеристики токовой нагрузки, КПД и температуры обмоток

Приведенные результаты свидетельствуют о том, что применение одноступенчатых редукторов с небольшими коэффициентами редукиции позволило существенно снизить токовую нагрузку ТЛМ. Это вызвало радикальное снижение электрических потерь, температуры обмоток ТЛМ и, в итоге, к росту номинального КПД электродвигателя с 7% (вариант 1) до 61% (варианты 3 и 4).

На рисунке 2 показаны номинальные моменты в кНм (график 4) и номинальные мощности в кВт (график 5) вариантов электродвигателя.

Наиболее существенно применение редуктора сказывается на моменте электродвигателя, снижая его со значения 480,4 кНм (вариант 1) до значения 10,8 кНм (вариант 4). Это, в свою очередь, позволяет несколько снизить мощность электродвигателя (график 5). Значения мощности составляют 14,9 кВт (вариант 1) и 10,2 кВт (вариант 4).

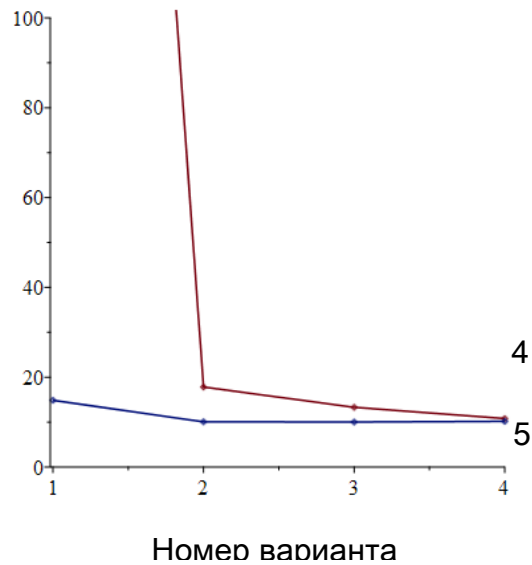


Рисунок 2 Номинальные моменты и мощности

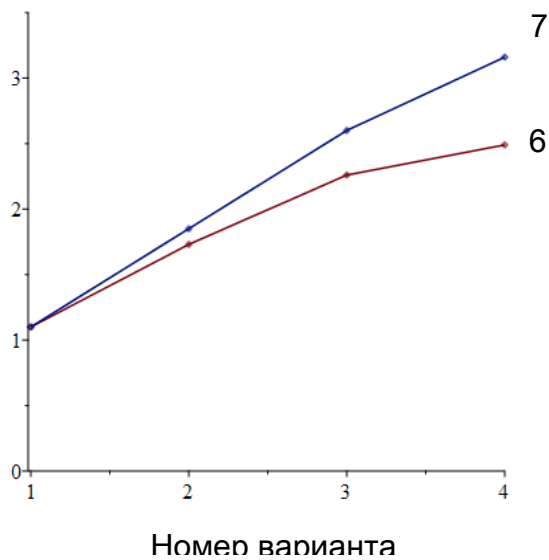


Рисунок 3 Кратности пускового и максимального моментов

Таким образом применение редуктора создает предпосылки для снижения стоимости электродвигателя. При этом совокупная стоимость электропривода может как снизиться, так и повысится в зависимости от стоимости редуктора. По этой причине применение многоступенчатых и дорогих редукторов в электроприводах тихоходных технологических установок оправдано при положительных результатах технико-экономического обоснования.

На рисунке 3 приведены кратности пускового момента (график 6) и максимального момента (график 7) для вариантов электродвигателя. Кратности даны в долях от номинального момента. Здесь также прослеживается позитивная тенденция повышения технических показателей в связи с применением редукторов с небольшими передаточными отношениями. Вместе с тем чрезмерное

повышение коэффициента редукции и переход на многоступенчатые трансмиссии может повысить стоимость электропривода и снизить его надежность.

В целом наиболее удачным исполнением модульного электродвигателя представляется вариант 4. Он имеет следующие числовые значения технических показателей, приведенные в таблице 1.

Таблица 1. Технические показатели модульного электродвигателя

Тип электропривода	Редукторный
Коэффициент редуцирования трансмиссии	50
Частота источника питания, с ⁻¹	18
Амплитуда токовой нагрузки индуктора, кА/м	15,15
Номинальная частота вращения вала, с ⁻¹	0,15
Номинальный момент, кНм	10,79
Номинальная мощность, кВт	10,16
Номинальная тяговая сила ТЛМ, Н	204,3
Номинальная скорость ВЭ, м/с	4,52
Номинальный КПД, %	60,8
Максимальный КПД, %	71
Кратность пускового момента	2,49
Кратность максимального момента	3,16
Температура обмотки индуктора, °С	51

Механическая характеристика ТЛМ в относительных единицах приведена на рисунке 4. Здесь тяговая сила ТЛМ выражена в долях от значения 4751 Н, а скорость движения ВЭ выражена в долях от значения 13,5 м/с.

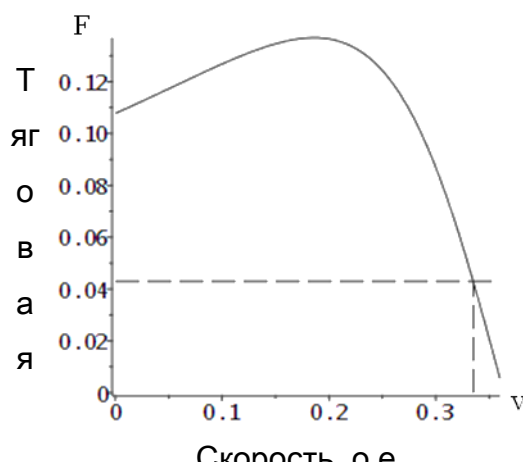


Рисунок 4 Механическая характеристика ТЛМ

Пунктирными линиями на рисунке показаны номинальные значения тяговой силы и скорости.

Совершенствование устройства предполагается осуществить в направлении снижения массогабаритных показателей. Представленное выше исполнение имеет существенный резерв по тепловой нагрузке. Температура обмоток индукторов составляет 51°С при допустимой для класса изоляции F температуре 155 °С. В этих условиях целесообразно снизить габариты, массу и стоимость активной части электродвигателя при соответствующем повышении токовой

нагрузки. Это приведет к росту электрических потерь и снижению КПД. Но здесь также имеется резерв, поскольку КПД серийного электропривода имеет величину 29% [3], а КПД предлагаемого электродвигателя равен 61%. Таким образом после снижения габаритов разработанный модульный электродвигатель имеет все предпосылки для сохранения своих конкурентных преимуществ.

Литература

1. <https://web.archive.org/web/20210419211432/https://uralmash-kartex.ru/aglomeracionnoe-i-obzhigovoe-oborudovanie> (дата обращения 25.04.2025)
2. Курилин С.П. Математическая модель для компоновочного проектирования линейных асинхронных электродвигателей // Вестник МЭИ. 2023. № 3. С. 11—20. DOI: 10.24160/1993-6982-2023-3-11-20
3. Курилин С.П., Ясницкий Л.Н. Энергоэффективный модульный электродвигатель для тихоходных установок черной металлургии //Черные металлы. 2025. №8. С. 81 – 87. DOI: 10.17580/chm.2025.08.12

Поддержка исследования

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки РФ, проект № FSWF-2023–0012

*С.П. Курилин, д. т. н., проф., А.П. Жарков, асп.
(Филиал ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» в г. Смоленске)*

РАЗРАБОТКА МОДУЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ДЛЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ УСТАНОВОК МЕТАЛЛУРГИИ

В парке технологических установок черной и цветной металлургии имеются агрегаты с особо низкими частотами вращения и скоростями перемещения рабочих органов. В частности, для таких установок как обжиговые и агломерационные машины, барабанные печи частота вращения барабанов составляет несколько радиан в минуту, а шихта движется со скоростью несколько метров в минуту [1]. Их электропривод строится на асинхронном электродвигателе и многоступенчатой трансмиссии с передаточным числом в несколько тысяч единиц. Наличие сложной трансмиссии существенно снижает показатели надёжности установки. Это весомый фактор, поскольку вышеперечисленные агрегаты имеют непрерывный цикл производства и их аварийные остановки оцениваются в миллионы рублей в час. Сложная трансмиссия снижает также энергетические массогабаритные показатели электропривода. Энергетические показатели электропривода сами по себе являются малозначительным фактором повышения энергоэффективности всей установки, поскольку потери энергии в электроприводе составляют доли процента от расхода энергии в теплофизической подсистеме технологической установки. Вместе с тем, повышение энергетических показателей электропривода позволяет снизить его массогабаритные показатели и стоимость, то есть является путем снижения капитальных затрат. Таким образом в разработке электроприводов тихоходных технологических установок имеются две тенденции:

во-первых, тенденция снижения передаточного числа трансмиссии или разработки безредукторных электроприводов с целью повышения показателей надёжности установки [2];

во-вторых, повышения энергетических показателей электропривода с целью снижения его массогабаритных характеристик и стоимости [3].

Отмеченные тенденции противоречивы, а их реализация видится в форме взвешенного компромисса. Поиск такого компромисса является целью принятого исследования. В данной статье представляются два варианта исполнения электродвигателя для обжиговой машины ОК-306: электродвигатель для безредукторного электропривода (вариант 1) и электродвигатель для редукторного электропривода, снабженный редуктором с передаточным числом 50 (вариант 4). Высокие показатели надежности заложены в оба варианта исполнения модульным принципом построения. Модульное построение позволяет выводить из эксплуатации некоторое количество модулей, не прерывая при этом работу электропривода.

Электродвигатель для безредукторного электропривода (вариант 1), приведенный на рисунке 1, выполнен из двенадцати тяговых линейных модулей (ТЛМ), работающих на общий вторичный элемент (ВЭ), Модули размещены на кольцеобразной скобе. ТЛМ изготовлены на базе двухсторонних индукторов, снабженных трёхфазными обмотками, подключенными к источнику переменного напряжения с частотой 10 Гц. Между внутренними сторонами индуктора установлен ВЭ, представляющий собой кольцо из сплава алюминия, соединенное посредством ребер с валом приводного барабана конвейера обжиговой машины.

На рисунке 1 показаны: 1 - вал приводного барабана конвейера, 2 - приводной барабан, 3 - обжиговые тележки, 8 - индуктор ТЛМ, 9 – кольцеобразная скоба, 10 - вторичный элемент ТЛМ, 11 – ребра.

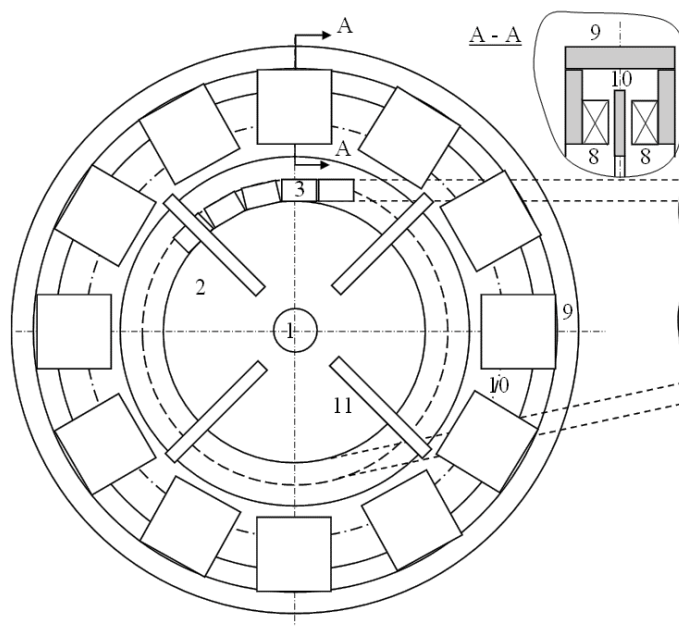


Рисунок 1. Безредукторный электропривод обжиговой машины

Тяговые модули электродвигателя имеют следующие конструктивные характеристики: длина индуктора 2,16 м, высота индуктора 0,24 м, ширина ин-

дуктора 0,6 м, немагнитный зазор в индукторе 0,012 м, материал ВЭ – сплав АКМ2 – 1, толщина ВЭ 0,006 м, радиус средней окружности ВЭ 4,8 м, число пар полюсов обмотки индуктора 8.

Первоначальным вариантом (вариант 0) режима эксплуатации безредукторного электропривода был вариант питания обмоток индукторов трёхфазным током частотой 50 Гц. Механические характеристики двигателя в рабочем режиме (11 модулей) и в форсированном режиме (12 модулей) показаны на рисунке 2.

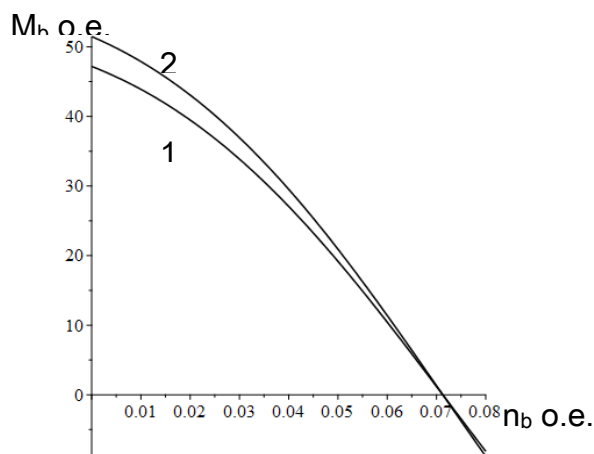


Рисунок 2. Механические характеристики при частоте питания 50 Гц
1 – нормальный режим, 2 – форсированный режим

Здесь приведены зависимости момента на ведущем барабане конвейера обжиговой машины ОК-306 от частоты его вращения в относительных единицах. Номинальная частота вращения барабана составляла 0,011 относительных единиц. В качестве базовых использовались следующие значения: для момента – 10264 Нм, для частоты вращения – 375 об/мин. Данный вариант продемонстрировал низкие значения кратностей пускового и максимального момента даже в форсированном режиме. В связи с этим было принято решение о понижении частоты питания модулей до 10 Гц.

В последнем случае (вариант 1) электродвигатель в целом имеет следующие технические показатели: частота источника питания, c^{-1} – 10, амплитуда токовой нагрузки индуктора, кА/м - 59,08, номинальная частота вращения барабана, c^{-1} - 0,005, номинальный момент, кНм - 480,40, номинальная мощность, кВт - 14,86, номинальная тяговая сила ТЛМ, Н – 9074, номинальная скорость ВЭ, м/с - 0,15, номинальный КПД, % - 7, максимальный КПД, % - 13,7, кратность пускового момента – 1, кратность максимального момента - 1,1, температура обмотки индуктора (при внешнем обдуве), °С - 96. Двигатель в целом рассчитан на работу при скоростях ВЭ (1,51 - 9,12) м/мин и при 11 подключенных модулях создает пусковое усилие 9,8 кН, что обеспечивает необходимые величины скорости и момента на валу барабана конвейера обжиговой машины.

Электродвигатель для редукторного электропривода (вариант 4) в отношении конструкции аналогичен безредукторному исполнению. Отличие состоит

в наличии вала, соединенного с ведущим барабаном конвейера посредством редуктора. Двигатель показан на рисунке 2. Электродвигатель имеет вал 1 соединённый со стальным диском ротора 2 посредством втулки 3. На диске 2 закреплено кольцо вторичного элемента 4. Внешней оболочкой электродвигателя является кольцо 5, выполненное из конструкционной стали. На кольце 5 закреплены элементы 6 арматуры крепления индукторов 7 тяговых модулей. Арматура 6 обеспечивает возможность аксиальных перемещений для регулирования зазоров между внутренней поверхностью индуктора 7 и внешней поверхностью ВЭ 4.

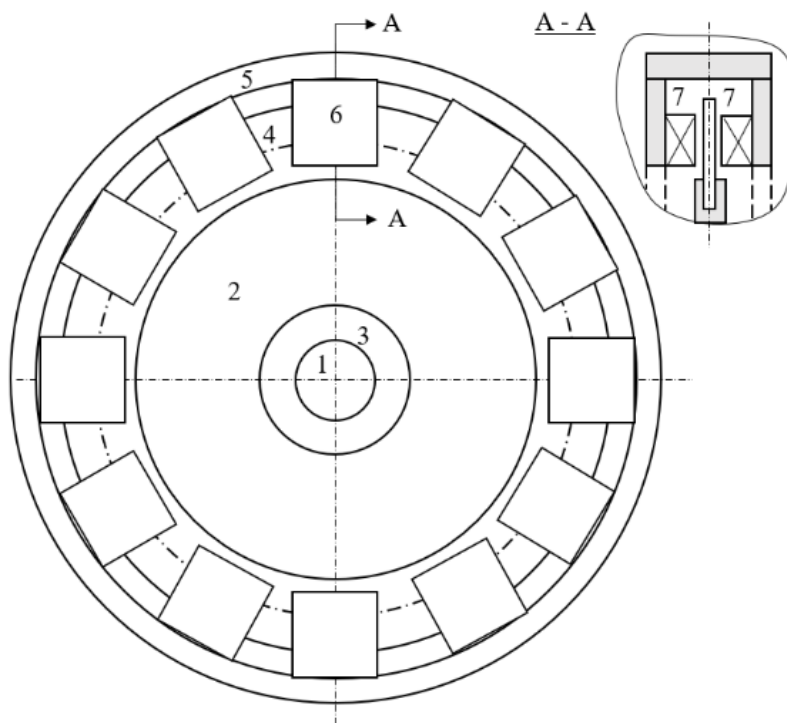


Рисунок 2. Электродвигатель для редукторного электропривода

Взаимодействие бегущего магнитного поля, созданного токами в обмотке индуктора 7 и вихревых токов в ВЭ 4 образует тяговую силу и вращающий момент ТЛМ, передаваемый через диск 2 и втулку 3 на вал 1. Совокупность вращающих моментов всех ТЛМ образует вращающий момент электродвигателя, передаваемый на редуктор.

Количество и технические характеристики тяговых модулей и вторичного элемента электродвигателя такие же, как и в безредукторном исполнении. При этом электродвигатель в целом, работая в паре с редуктором с передаточным числом 50, имеет следующие технические показатели: частота источника питания, с^{-1} – 18, амплитуда токовой нагрузки индуктора, кА/м - 15,15, номинальная частота вращения вала, с^{-1} - 0,15, номинальный момент, кНм - 10,79, номинальная мощность, кВт - 10,16, номинальная тяговая сила ТЛМ, Н – 204,3, номинальная скорость ВЭ, м/с - 4,52, номинальный КПД, % - 60,8, максимальный

КПД, % - 71, кратность пускового момента – 2,49, кратность максимального момента - 3,16, температура обмотки индуктора (без обдува), °С - 51.

Как показывают результаты сравнения вариантов, вариант 4 имеет существенные преимущества перед вариантом 1 по величинам энергетических показателей (номинальный и максимальный КПД) и по величинам технических показателей (кратности пускового и максимального моментов). Этих результатов удалось достичь, благодаря повышению скорости движения ВЭ в редукторном варианте электропривода. Повышение скорости обеспечило снижение токовой нагрузки в обмотках ТЛМ и во вторичном элементе. Результатом этого стало существенное снижение электрических потерь в электродвигателе. Другой результат состоит в существенном снижении температуры обмотки индуктора с 96 до 51 градуса Цельсия. Удалось, кроме того, отказаться от внешнего обдува модулей потоком воздуха. Эти результаты закладывают базу для снижения массогабаритных характеристик электродвигателя, осуществляемого путем повышения токовой нагрузки индукторов с одновременным снижением длины, ширины и массы тяговых модулей. Данный процесс будет сопровождаться ростом температуры обмоток индукторов, но имеющиеся температурные запасы позволяют это сделать.

Единственный недостаток редукторного варианта исполнения усматривается в наличии редуктора, снижающего показатели надежности и повышающего общую массу технологической установки.

Материалы исследования могут быть использованы для проектирования специальных электродвигателей электроприводов тихоходных технологических установок предприятий черной и цветной металлургии.

Литература

4. <https://web.archive.org/web/20210419211432/https://uralmash-kartex.ru/aglomeracionnoe-i-obzhigovoe-oborudovanie> (дата обращения 25.04.2025)
5. Курилин С.П., Федотов В.В. Исследование характеристик безредукторного электропривода конвейерной машины для обжига окатышей в цветной металлургии// Цветные металлы, 2025. №8. С. 57 – 65. DOI: 10.17580/tsm.2025.08.07
6. Курилин С.П., Ясницкий Л.Н. Энергоэффективный модульный электродвигатель для тихоходных установок черной металлургии //Черные металлы. 2025. №8. С. 81 – 87. DOI: 10.17580/chm.2025.08.12

Поддержка исследования

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки РФ, проект № FSWF-2023–0012

Т.С. Ларькина, ст. пр.

(филиал ФГБОУ ВО «НИУ МЭИ» в г. Смоленске)

ВЛИЯНИЕ ВНЕДРЕНИЯ ЭЛЕКТРОМОБИЛЕЙ И СТАНЦИЙ ДЛЯ ИХ ПОДЗАРЯДКИ НА ЭНЕРГОСИСТЕМУ РОССИИ

Статья посвящена комплексному анализу влияния массового внедрения электромобилей и зарядной инфраструктуры на энергосистему России. В данной статье исследуются перспективы и риски, связанные с ростом парка электромобилей для российской энергетики. Показано, что, несмотря на значительный резерв мощности, стихийное развитие зарядной инфраструктуры может привести к критическим перегрузкам в распределительных сетях.

Основной вывод заключается в том, что электромобили могут стать не проблемой, а ресурсом для повышения гибкости и надежности энергосистемы при условии реализации комплекса мер: внедрения «умных» технологий зарядки (Smart Charging, V2G), модернизации сетей и адаптации нормативной базы. В заключение представлен комплексный подход к успешной интеграции, включающий меры по развитию «умных» сетей, тарифному регулированию и модернизации инфраструктуры.

Ключевые слова: Электромобили, зарядная инфраструктура, энергосистема России, пиковые нагрузки, перегрузка сетей, износ оборудования, распределительные сети, умные сети (Smart Grid), умная зарядка (Smart Charging), технология V2G (Vehicle-to-Grid), накопители энергии.

Современное развитие электромобильного транспорта в России приобретает все большую динамику. Рынок электромобилей растет, а вместе с ним активно развивается инфраструктура зарядных станций. Этот процесс оказывает заметное влияние на российскую энергосистему, требуя переосмысления энергопотребления, модернизации сетей и внедрения новых технологий управления нагрузкой [1].

Стремительный рост популярности электромобилей во всем мире – это не просто тренд, а полноценная технологическая революция в транспортной отрасли. Россия, хоть и с некоторым запозданием, также вступает на этот путь. Однако массовый переход на электротранспорт ставит перед национальной энергосистемой комплекс сложных и масштабных задач.

Переход на электромобили влечет значительное увеличение потребления электроэнергии. Каждый электромобиль при подзарядке добавляет нагрузку на энергосистему, требующую дополнительных мощностей. По оценкам, массовое использование электромобилей может увеличить общий спрос на электроэнергию в России. Однако этот рост будет постепенным, что позволяет энергосистеме адаптироваться [2].

На сегодняшний день парк электромобилей в России исчисляется десятками тысяч, что на фоне общего количества автомобилей (более 50 млн) представляет собой небольшой процент. Существующая энергосистема, с ее значительным резервом мощности, без труда справляется с такой нагрузкой. Проблема заключается в будущем.

Внедрение электромобилей и зарядных станций влечет за собой изменение профиля нагрузки на электросети. Нагрузка становится более пиковой в вечерние часы, когда владельцы машин заряжают батареи после работы. Для снижения негативных эффектов внедряются технологии умной зарядки и аккумуляторные системы, которые позволяют более равномерно распределять потребление энергии [3].

Прогнозируемый рост числа электромобилей до сотен тысяч, а в перспективе и миллионов, создаст качественно новую нагрузку. По оценкам экспертов, если одновременно по всей стране подключить к сети всего 300-500 тысяч электромобилей для быстрой зарядки, это может создать пиковую нагрузку, сопоставимую с потреблением такого мегаполиса, как Москва. Ключевой вызов – не в общем объеме потребления, а в его концентрации во времени и пространстве:

1. Пиковые нагрузки и «вечерний провал».

Основная зарядка электромобилей будет происходить в вечерние часы, когда владельцы возвращаются домой. Это совпадает с существующим бытовым пиком потребления. Наложение этих нагрузок может привести к значительной перегрузке распределительных сетей, особенно в старых жилых районах, не рассчитанных на такие мощности.

2. Износ сетевой инфраструктуры.

Трансформаторные подстанции, линии электропередач и распределительные щиты в жилом секторе могут начать работать на пределе своих возможностей. Ускоренный износ оборудования потребует масштабных и дорогостоящих модернизаций.

3. Неравномерность распределения.

Нагрузка будет крайне неравномерной. Крупные города и густонаселенные регионы (Москва, Санкт-Петербург, Московская область) ощутят эффект первыми. В то же время в сельской местности или удаленных районах проблема может быть не столь острой, но там возникнут сложности с развитием зарядной инфраструктуры.

4. Необходимость в «умных» решениях.

Без интеллектуального управления зарядками энергосистема не сможет эффективно адаптироваться. Стихийная, неконтролируемая зарядка – это самый неблагоприятный сценарий.

Несмотря на вызовы, распространение электромобилей открывает и значительные возможности:

1. Сглаживание графика нагрузки.

Внедрение «умных» зарядных станций (Smart Charging) и систем Vehicle-to-Grid (V2G – машина-сеть) может превратить парк электромобилей в гигантский распределенный накопитель энергии. В ночные часы, когда потребление электроэнергии минимально, автомобили могут заряжаться по низкому тарифу, помогая энергосистеме загрузить недоиспользуемые мощности. В периоды пиковых нагрузок они, наоборот, могут отдавать энергию обратно в сеть, стабилизируя ее.

2. Стимул для развития ВИЭ.

Электромобили – идеальный партнер для солнечной и ветровой энергетики, чья выработка непостоянна. Избыток энергии, произведенный днем, можно накапливать в аккумуляторах автомобилей, компенсируя их нестабильность.

3. Модернизация сетей.

Необходимость адаптации к новым условиям станет мощным катализатором для цифровизации и модернизации российской энергосистемы. Это включает в себя внедрение интеллектуальных систем учета (умные счетчики), автоматизацию распределительных сетей и развитие накопителей энергии.

4. Рост спроса на электроэнергию.

Для генерирующих компаний рост числа электромобилей – это гарантированное увеличение спроса на их продукцию в долгосрочной перспективе, что делает инвестиции в новую генерацию более привлекательными.

Для успешной интеграции электромобилей в энергосистему России необходим комплексный подход (табл. 1).

Таблица 1 – Комплексный подход к интеграции электромобилей в энергосистему России

Направление деятельности	Конкретные меры и технологии	Ожидаемый результат
1. Развитие «умной» инфраструктуры и технологий	<ul style="list-style-type: none"> • Внедрение Smart Charging (умная зарядка) с управлением по сигналу от сетевого оператора. • Пилотные проекты и внедрение технологии V2G (Vehicle-to-Grid), позволяющей электромобилям отдавать энергию в сеть. • Развитие сети накопителей энергии (БАТ) для совместной работы с зарядными станциями. 	Снижение пиковых нагрузок, повышение стабильности энергосистемы, превращение электромобилей в управляемый ресурс.
2. Цифровизация и модернизация сетей	<ul style="list-style-type: none"> • Массовое внедрение интеллектуальных систем учета (АИИС КУЭ) – «умные счетчики». • Автоматизация распределительных сетей 6-20 кВ для оперативного перераспределения нагрузок. • Активное обновление трансформаторных подстанций и кабельных линий в «группах риска» (спальные районы). 	Повышение гибкости, надежности и наблюдаемости сетей, предотвращение аварийных ситуаций, оптимизация затрат на модернизацию.
3. Нормативно-правовое и тарифное регулирование	<ul style="list-style-type: none"> • Введение дифференцированных по зонам суток тарифов для стимулирования ночной зарядки. • Разработка и утверждение технических стандартов и регламентов для зарядных станций и их подключения. • Создание правовой базы для работы технологии V2G (определение статуса просьюмера, механизмы оплаты). 	Формирование экономических стимулов для владельцев ЭМ, создание прозрачных и единых «правил игры» для всех участников рынка.
4. Планирование и стимулирование	<ul style="list-style-type: none"> • Создание карт нагрузки для прогнозирования и планирования модернизации сетей в наиболее уязвимых районах. • Государственно-частное партнерство (ГЧП) для развития скоростной зарядной инфраструктуры вдоль ключевых магистралей. • Субсидии и льготы для потребителей и бизнеса, устанавливающих «умные» зарядные станции и системы накопления энергии. 	Снижение рисков перегрузки, ускоренное развитие инфраструктуры, стимулирование спроса на современные и сетевые технологии.
5. Интеграция с возобновляемой энергетикой (ВИЭ)	<ul style="list-style-type: none"> • Стимулирование строительства зарядных станций, совмещенных с солнечными панелями и накопителями. 	Повышение экологичности транспорта, снижение нагрузки на сеть от заря-

	<ul style="list-style-type: none"> • Разработка тарифов, поощряющих зарядку электромобилей в периоды максимальной выработки ВИЭ (например, днем для солнечной генерации). 	док, поддержка баланса энергосистемы и развития ВИЭ.
--	--	--

Внедрение электромобилей в России – это не угроза, а мощный вызов и возможность для энергосистемы. Стихийный и неконтролируемый рост может привести к локальным проблемам и перегрузкам. Однако продуманная государственная политика, инвестиции в «умные» сети и активное участие энергетических компаний способны превратить парк электромобилей из проблемы в ценный ресурс для повышения гибкости, надежности и эффективности всей национальной энергетики. У России есть все шансы не просто адаптироваться к новой реальности, но и использовать ее для технологического рывка.

Литература

1. Барочкин, Е. В. Общая энергетика : учебное пособие / Е. В. Барочкин, М. Ю. Зорин, А. Е. Барочкин. – 4-е изд. – Вологда : Инфра-Инженерия, 2025. – 312 с.
2. Ростовский, Й. К. Влияние развития электромобилей на потребление энергоресурсов: риски и возможности для экономики России [Текст] / Й. К. Ростовский // Проблемы прогнозирования, 2023, №3. – с. 105-119. URL: <https://cyberleninka.ru>.
3. Сидорович, В. Электромобили и энергосистема: вопросы интеграции [Текст]. URL: <https://renew.ru>.

*Р.Е. Магидов, асп.; В.В. Рожков, к.т.н., доц.
(филиал ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» в г. Смоленске)*

НАСТРОЙКА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЧАСТОТНЫМ ПРИВОДОМ СВЕРЛИЛЬНОГО СТАНКА

Для отработки методики управления станочным приводом, изложенной в тезисах [1], было принято решение рассмотреть стратегию управления электроприводом станка для одного из самых распространенных видов металлообработки – сверления.

В качестве экспериментального макета выбран станок, оказавшийся под рукой - Einhel SB401, как показано на рисунке 1.



Рисунок 8 – Станок Einhel SB401

Обычно применяемые в системах управления частотным приводом ПИ-регуляторы требуют настройки для конкретного объекта управления, чему будет посвящена данная работа.

Для разработки и последующей настройки частотного преобразователя нужно знать параметры двигателя. Производитель раскрывает не все параметры электродвигателя, только самые основные. Они приведены на рисунке 2.



Рисунок 9 – Параметры

Перед тем, как приступить к экспериментам на реальном объекте, требуется провести моделирование системы.

Однако для моделирования поведения системы указанных на заводской табличке параметров недостаточно.

В ходе проведённого анализа рынка был подобран аналогичный по мощности асинхронный двигатель АИР63А2ПУ3 со следующими параметрами (таблица 1).

Таблица 1 – Основные технические данные двигателя АИР63А2ПУ3

Номинальная мощность $P_{2ном}$, кВт	0,37
Номинальная скорость вращения $n_{ном}$, об/мин	2730
Номинальное напряжение $U_{л ном}$, В (Δ/Y)	380
Номинальный ток статора $I_{1ном}$, А(Δ/Y)	1,6
Коэффициент полезного действия $\eta_{ном}$, %	72
Коэффициент мощности $\cos \varphi_{ном}$, о.е.	0,84
Кратность пускового тока k_i ($I_{п}/I_{н}$)	5,0
Кратность пускового момента $k_{п}$ ($M_{п}/M_{н}$)	2,6
Кратность максимального (критического) момента k_{max} ($M_{max}/M_{н}$)	2,6
Число пар полюсов $p_{п}$	1
Момент инерции ротора J , кг · м ²	0,00043

При помощи модели прямого пуска параметры из таблицы 1 были проверены на соответствие паспортным данным двигателя (номинальная скорость вращения). Руководствуясь параметрами из таблицы 1, можно приступить к проектированию модели частотного преобразователя и его системы управления.

Структуру частотного преобразователя реализует модель, показанная на рисунке 3.

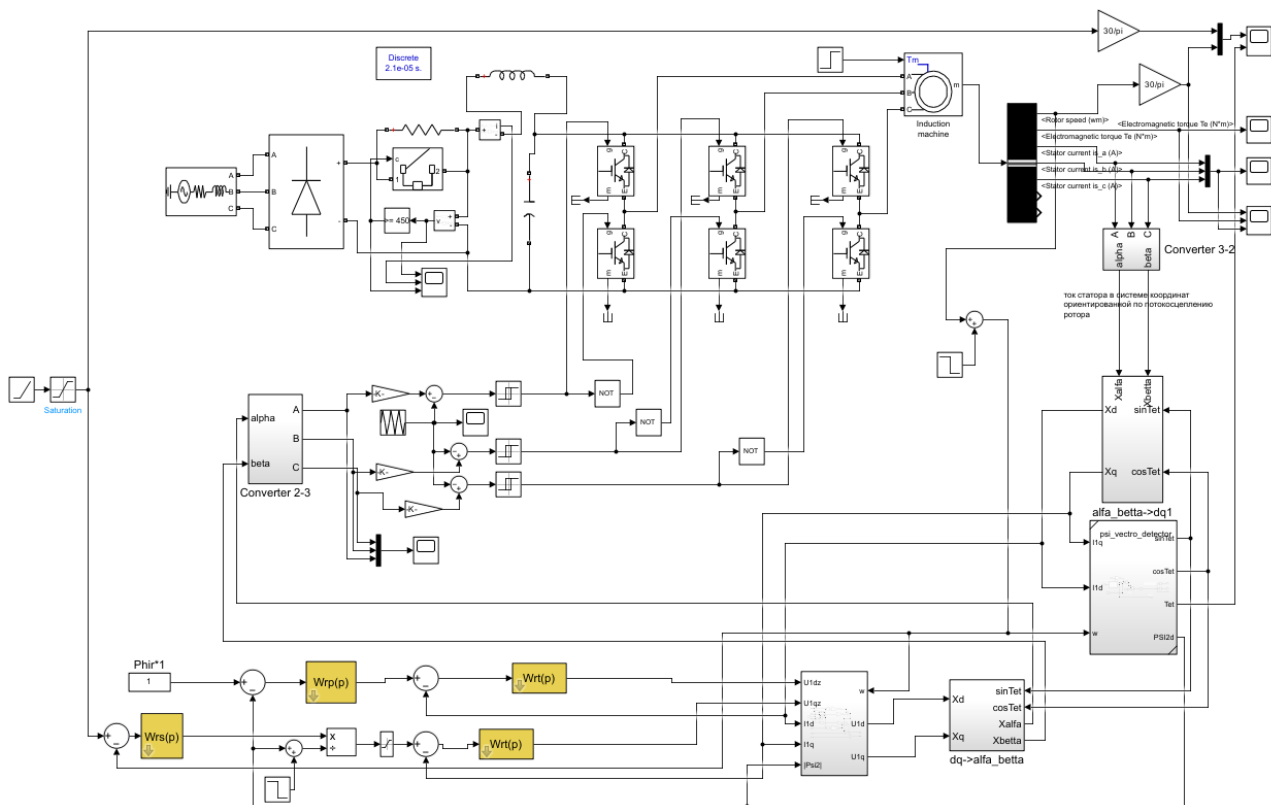


Рисунок 10 – Модель

В её основе лежит векторная система управления, в которой отсутствуют датчики магнитного потока, используются только 2 датчика тока (на две фазы из трёх) и датчик оборотов. Такая структура представляется оптимальным компромиссом для решаемой задачи, так как отказ от большего количества датчиков, замена их вычислительными блоками приведёт к нестабильности из-за температурного дрейфа параметров в ходе длительной работы привода.

Система с полным набором датчиков, включая датчики магнитного потока, для данного применения не целесообразна по экономическим соображениям.

```

tFinal = 2; %время моделирования
Ts = 0.00002
%параметры двигателя
Rr = 20.92; %сопротивление ротора
Lr = 0.029; %индуктивность ротора
Rs = 20.7989; %сопротивление статора
Ls = 0.085757; %сопротивление статора
Pnom = 370; %номинальная мощность
Lm = 1.679; %взаимоиндукция
J = 0.00043; % момент инерции(kg.m^2)
pn = 1; % количество пар полюсов
L1 = Lm + Ls;
L2 = Lm + Lr;

```

Рисунок 11 – Скрипт

При моделировании на вход системы подается уставка по оборотам, представляющая собой наклонную линии от 500 до 3000 об/мин, переходящая затем в горизонтальную линию на уровне 3000 об/мин, момент на валу двигателя от 0 до 1,2 составляет половину от номинального значения, затем происходит нагружение до номинального момента.

Остальные параметры модели заданы при помощи скрипта, как показано на рисунке 4.

Запуск модели и вывод графиков также осуществляется по команде из скрипта m-файла.

При использовании коэффициентов в обратных связях по умолчанию из литературы [2], получается резко колебательный характер при переходных режимах работы двигателя, как показано на рисунке 5.

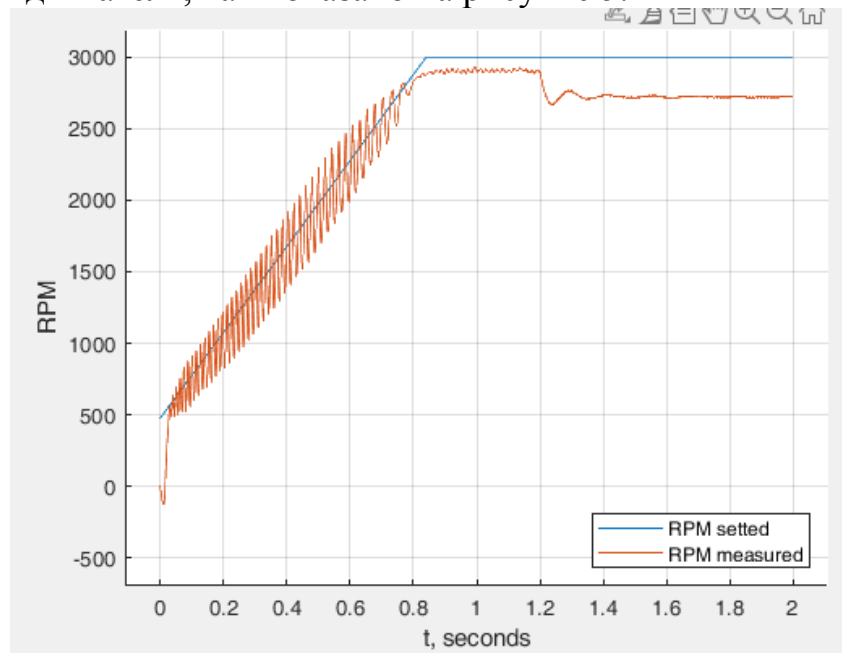


Рисунок 12 – График работы системы

В ходе экспериментов на модели были подобраны другие коэффициенты, повышающие качество системы регулирования. График работы системы представлен на рисунке 6.

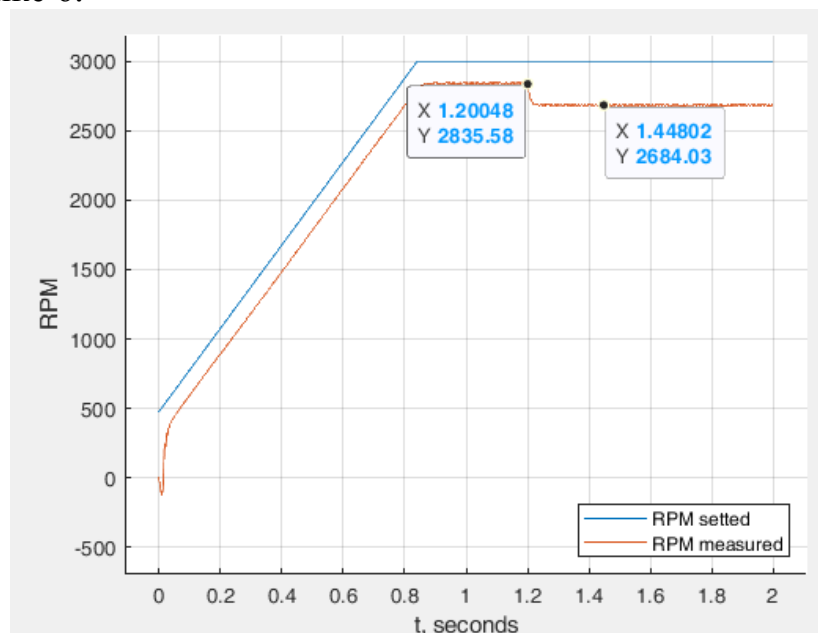


Рисунок 13 – График работы системы

В установившемся режиме работы двигателя при максимальном паспортном моменте обороты составляют 2684 об/мин, что на 46 об/мин меньше номинального значения, это говорит о корректной работе регулятора.

Таким образом, в ходе проведенной экспериментальной работы на модели удалось провести настройку регулятора с хорошим качеством, далее можно приступить к моделированию системы слежения за вибрацией.

Литература

1. Магидов, Р. Е. Разработка методики обучения системы вибродиагностики станочного электропривода / Р. Е. Магидов // Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности: материалы Междунар. науч.-техн. конф. молодых ученых /М-во образования Респ. Беларусь, М-во науки и высш. образования Рос. Федерации, Белорус.-Рос. ун-т; редкол.: М. Е. Лустенков (гл. ред.) [и др.]. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2023. – С. 131.

2. Управление частотно-регулируемым электроприводом: Конспект лекций по курсу «Специальные разделы теории электропривода». /Данилов П.Е., Крутиков К.К., Рожков В.В. – 2-е изд., испр. – Смоленск, 2012. – 100 с.

*В.Л. Максимкин, к. т. н., доц., Д.А. Шулакова, маг.
(Филиал ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» в г. Смоленске)*

ПУТИ СНИЖЕНИЯ МАССОГАБАРИТНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ СИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ

Снижение массогабаритных показателей актуально практически для всех преобразователей энергии. Особое значение приобретает эта задача для электродвигателей летательных аппаратов.

В настоящее время беспилотные летательные аппараты (БПЛА) применяются во многих сферах жизнедеятельности человека: сельское хозяйство, сфера услуг, медицина, сфера обслуживания, энергетика, машиностроение и т. д. Для БПЛА неотъемлемой частью является двигатель, являющийся основной функциональной составляющей привода винта. На практике чаще всего применяют двигатель внутреннего сгорания, что создаёт ряд недостатков:

- низкая скорость полёта,
- сложная система управления полетом,
- большой вес самого двигателя уменьшает вес полезной нагрузки, устанавливаемой на БПЛА,
- большое тепловое излучение,
- неэкологичность,
- шум,
- пожароопасность,
- большие габариты БПЛА.

Большинство из приведенных выше проблем можно решить применением привода с бесколлекторным электродвигателем. Такое решение позволит получить конструкцию без использования дополнительного топливного оборудования, а также получить более высокие энергетические характеристики, повысить скорость, упростить управление, улучшить массогабаритные показатели.

Для уменьшения габаритов электрического двигателя с постоянными магнитами, можно, например, использовать:

- постоянные магниты с лучшими магнитными характеристиками;
- устройства для питания обмотки статора напряжением с повышенной частотой;
- материал магнитопровода с высокой магнитной проницаемостью;
- более простую систему управления и пр.

В данной работе более подробно рассмотрен 1-й вариант, а именно проведено исследование влияния материала постоянного магнита на массогабаритные показатели электрического двигателя в целом и магнитной системы в частности. Исследования проводились с использованием двух методов: аналитического и полевого.

Как указано в [1], особенностью расчета электрического двигателя с постоянными магнитами является расчет магнитной цепи, а именно графическое определение точки, определяющей режим работы электродвигателя на рабочей диаграмме магнита.

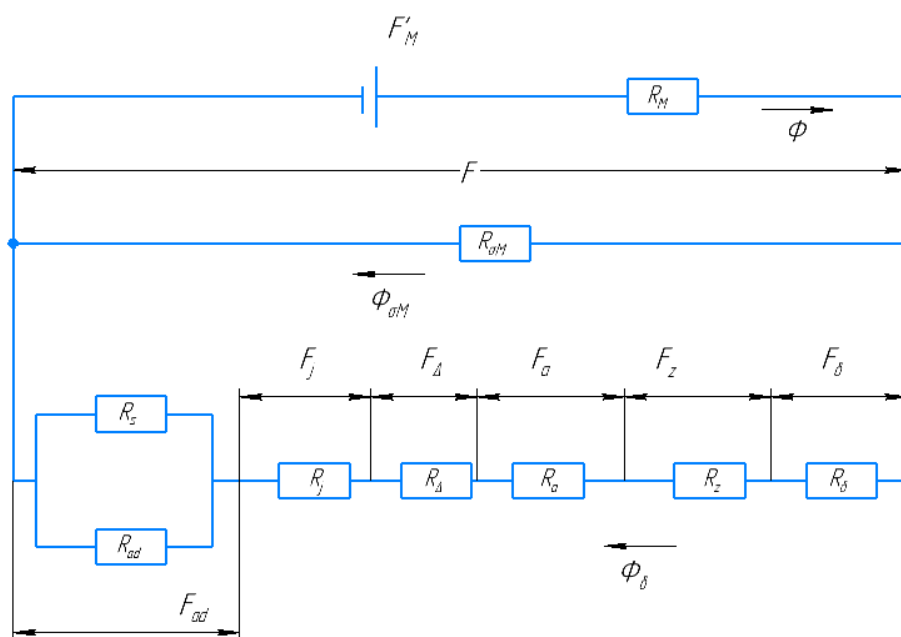


Рисунок 1. Схема магнитной цепи по продольной оси на один полюс

На рисунке 1 показана схема замещения магнитной цепи по продольной оси на один полюс для двигателя с постоянными магнитами. Она состоит из F – МДС магнита ротора, F'_M – условная МДС магнита ротора; Φ , $\Phi_{\sigma M}$, Φ_{δ} – магнитные потоки (общий, рассеяния магнита, воздушного зазора); R_M , $R_{\sigma M}$, R_{δ} , R_S , R_{ad} , R_Z , R_j , R_a , R_{Δ} – магнитные сопротивления (магнита, рассеяния магнита, воздушного зазора, рассеяния обмотки якоря, продольной составляющей реакции якоря, зубцов якоря, втулки ротора, спинки статора, воздушного зазора в стыке магнитов и втулки ротора).

Исследования проводились из предположения, что положение рабочей точки на диаграмме состояния магнита не изменялось при изменении материала магнита (табл. 1).

Таблица 1 – Параметры рабочей точки

Параметр	Ед. измерения	Значение
МДС воздушного зазора, F_{δ}	А	1192
Магнитный поток в воздушном зазоре при ХХ, $\Phi_{\delta 0}$	Вб	0.005
МДС в постоянных магнитах, $F_{ПМ}$	А	493.5

Технические данные исследуемой электрической машины приведены в [1]. Для сравнения рассмотрим материалы постоянных магнитов, часто применяемые на практике (таблица 2).

Таблица 2. Параметры магнитотвердых материалов

Материал	B_r , Тл	H_c , кА/м	W_{Mmax} , Дж/м ³	μ_0	Стоимость на единицу объема, руб.
Неодим-железо-бор	0.94-0.98	680-700	150-170	1.05-1.1	0.21
Самарий-кобальт	0.82	560	130	1.05	0.084
Самарий-кобальт	0.8	500	72.5	1.05	0.084

Аналитический метод заключается в расчёте электрического двигателя с помощью традиционных средств вычислительной техники при помощи рабочей диаграммы постоянного магнита, схемы замещения и векторной диаграммы. Данный метод был реализован с использованием программного пакета *Mathcad* при заданных выше условиях по алгоритму, описанному в [1].

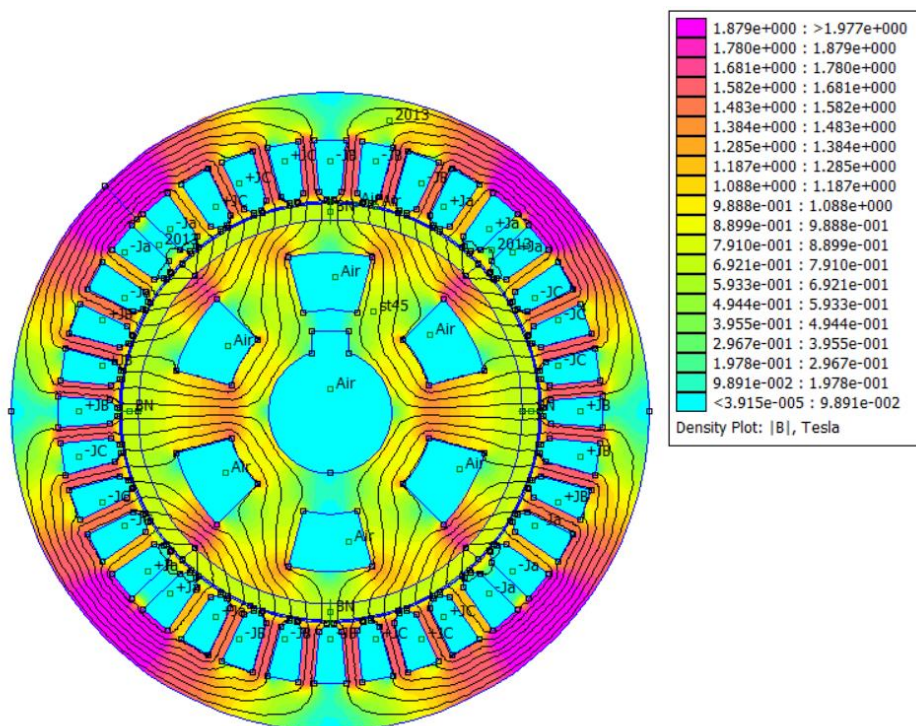


Рисунок 2 – Картина поля

Полевой метод представляет собой расчет параметров магнитной системы с помощью метода конечных элементов [2]. В данном случае расчет был проведен для получения более точных значений параметров магнитной системы и проводился в программном пакете *Femm*. На рисунке 2 показана картина магнитного поля и геометрия магнитной системы при использовании постоянных магнитов из сплава неодима, железа и бора.

Результаты проведенных исследований приведены в таблице 3 в относительных единицах. В качестве базовых параметров приняты параметры магнита из неодим-железо-бора.

Таблица 3 – Результаты расчетов

Материал	Ширина магнита b_M^*	Высота магнита h_M^*	Объем магнита V_M^*	Масса магнитов*	Стоимость*	Масса всей магнитной системы*
Неодим-железо-бор	1	1	1	1	1	1
Самарий-кобальт	1	1,43	1,43	1,84	0,57	1,026
Самарий-кобальт	1	1,71	1,65	2,12	0,66	1,007

На основании проведенных исследований можно сделать следующие выводы: применение магнитов с лучшими параметрами позволяет

- при той же мощности снизить массу магнитной системы и электродвигателя в целом, а, следовательно, увеличить массу полезного груза;
- перейти на габарит с меньшим диаметром статора;
- снизить момент инерции двигателя и улучшить его динамические свойства.

Литература

1. Шулакова, Д. А. Влияние материала постоянного магнита на параметры синхронного двигателя / Д. А. Шулакова // Информационные технологии, энергетика и экономика : сборник трудов XXII Международной научно-технической конференции студентов и аспирантов, Смоленск, 23–24 апреля 2025 года. – Смоленск: Универсиум, 2025. – С. 164-168. – EDN SFOMKC.
2. Шулакова, Д. А. Методы исследования влияния величины воздушного зазора на магнитную систему асинхронного двигателя / Д. А. Шулакова, Е. С. Арчакова // Технологии, энергетика и экономика : труды XXI Международной научно-технической конференции студентов и аспирантов : в 3 т., Смоленск, 24–25 апреля 2024 года. – Смоленск: Универсиум, 2024. – С. 146-150. – EDN VNXRRT.
3. Максимкин, В. Л. Особенности проектирования бесколлекторных двигателей постоянного тока на постоянных магнитах / В. Л. Максимкин, Д. А. Шулакова // Энергетика, информатика, инновации - 2024 : труды участников XIV Международной научно-технической конференции, Смоленск, 13–14 ноября 2024 года. – Смоленск: Универсиум, 2024. – С. 105-108. – EDN FJUTBV.

АНАЛИЗ РАБОТЫ ДВУХДВИГАТЕЛЬНОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА УСТАНОВКИ БЕССЛИТКОВОЙ ПРОКАТКИ

Бесслитковая прокатка предполагает использование расплавленных металлов, наносимых на непрерывно движущуюся заготовку. В частности, такой метод применяется при производстве электродной ленты.

Схема установки бесслитковой прокатки электродной ленты, поясняющая технологический процесс, представлена на рисунке 1. На установке происходит слив расплава хлористой меди на поступающую с отдающего устройства перфорированную пуклеванную сетку, заправленную между направляющими роликами. Далее осуществляется кристаллизация расплава на сетке в валках кристаллизатора и прокатка электродной ленты между валками с последующей намоткой полученной ленты на ролик устройства намотки.

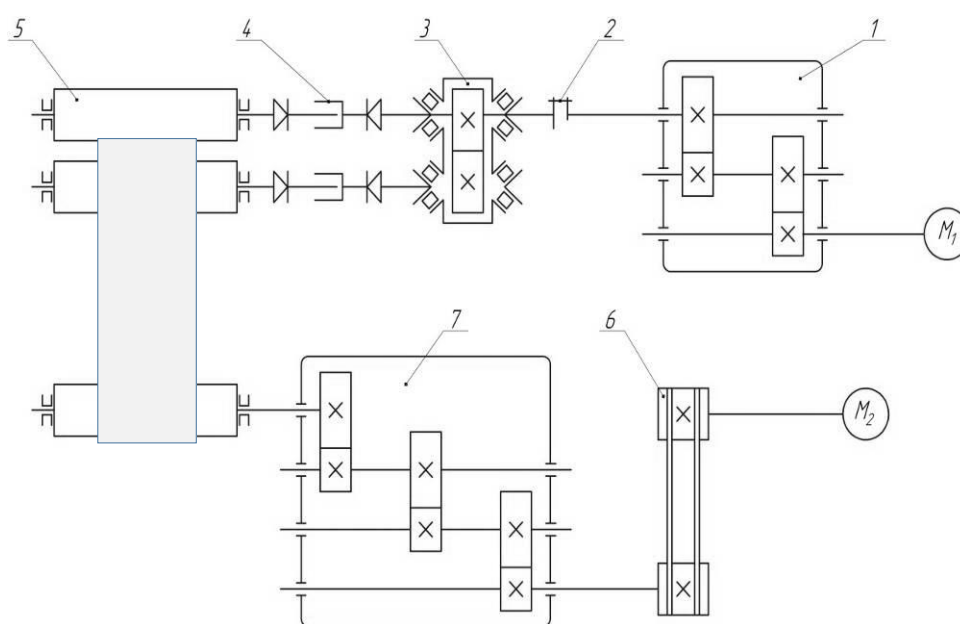


Рисунок 1 – Кинематическая схема установки бесслитковой прокатки:
1 – редуктор валкового кристаллизатора; 2 - фрикционная муфта;
3 - раздаточная коробка, 4 - карданные валы; 5 - валки кристаллизатора;
6 - клиноременная передача; 7 - редуктор устройства намотки;
 M_1 , M_2 – электродвигатели

Электропривод установки бесслитковой прокатки должен обеспечить плавность пуска и согласованность вращения ролика устройства намотки и валков кристаллизатора. Согласно техническим данным диапазон изменения линейной скорости прокатки ленты $D_v = 3$. При этом допустимая погрешность стабилизации скорости прокатки электродной ленты не должна превышать 5%. С учетом изменения радиуса наматываемого рулона в цикле работы диапазон изменения угловой скорости наматывающего устройства составляет $D_\omega = 10$.

Устройство намотки должно обеспечивать равномерную укладку готовой ленты в рулон. Для этого требуется обеспечить стабилизацию натяжения ленты в процессе намотки с допустимой погрешностью 15% при максимальном отклонении в динамических режимах не более 30%.

Реализовать такие технологические требования достаточно эффективно можно в системе электропривода с источником тока [1], которая позволяет использовать для нескольких приводов, выполняющих самостоятельные функции, один общий источник питания. Двухдвигательный электропривод с питанием якорных цепей двигателей устройства намотки и валкового кристаллизатора от неуправляемого преобразователя – параметрического источника тока и регулированием координат по цепям возбуждения позволяет осуществлять раздельное регулирование скорости прокатки и натяжения ленты. Последовательно могут быть соединены машины с различными номинальными мощностями, но с равными (близкими) номинальными токами. Напряжение на каждом из двигателей является свободной координатой, которая определяется скоростью и магнитным потоком двигателя. Установленная мощность источника тока при этом может оказаться существенно меньше суммарной установленной мощности двигателей, что позволяет обеспечить высокую энергетическую эффективность системы электропривода. Схема двухдвигательного электропривода с параметрическим источником тока представлена на рисунке 2.

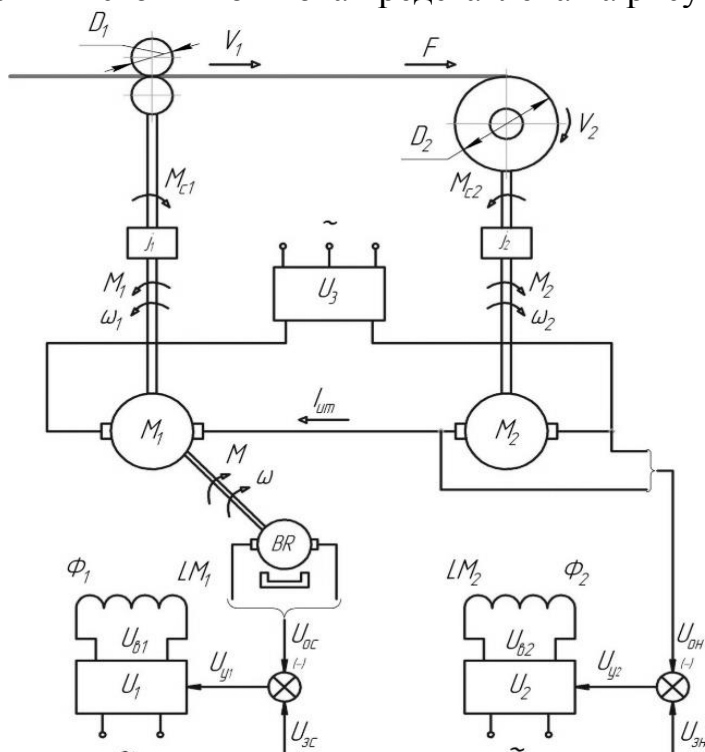


Рисунок 2 – Функциональная схема двухдвигательного электропривода

Другим достоинством такой системы привода является возможность косвенного (параметрического) регулирования и стабилизации натяжения перематываемой ленты без использования специальных датчиков натяжения. Такая

возможность обеспечивается наличием в электроприводе устройства намотки обратной связи по напряжению [2].

Для анализа работы электропривода была разработана модель в программной среде MATLAB, с использованием интерактивной графической среды Simulink, представленная на рисунке 3.

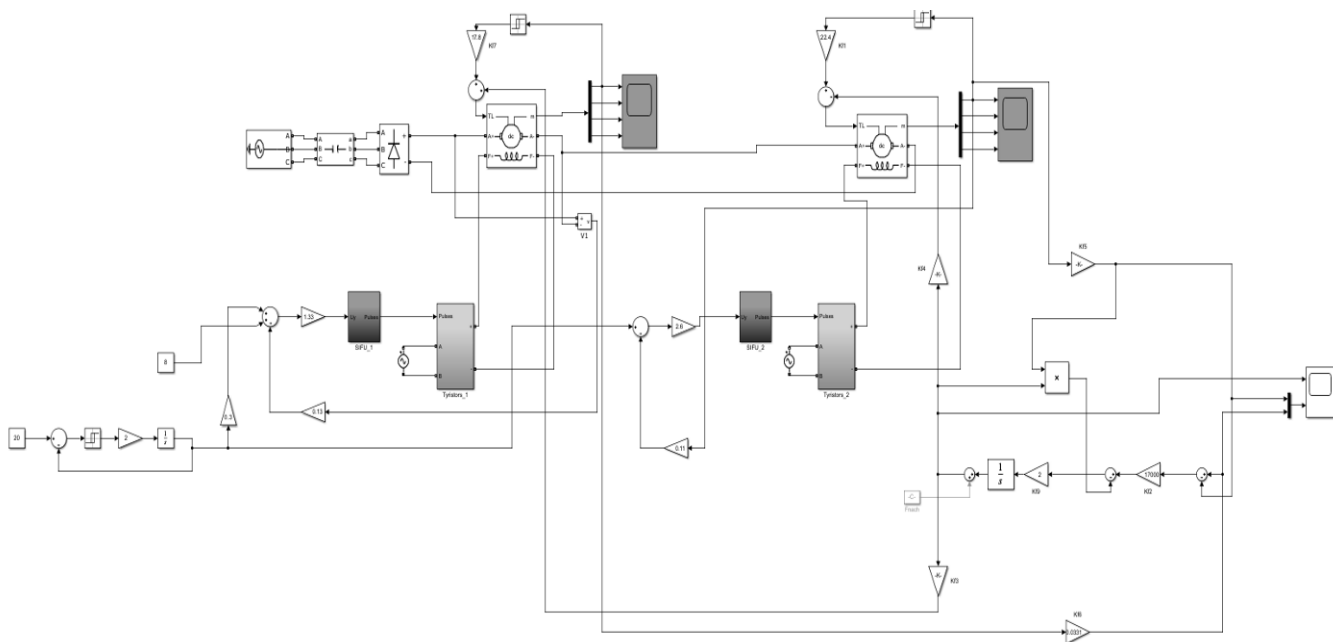


Рисунок 3 – Модель двухдвигательного электропривода

Результаты моделирования представлены на рисунках 4 и 5, где показано изменение натяжения ленты (верхний график) и линейные скорости V_1 , V_2 в соответствии с обозначениями рисунка 2 (нижний график).

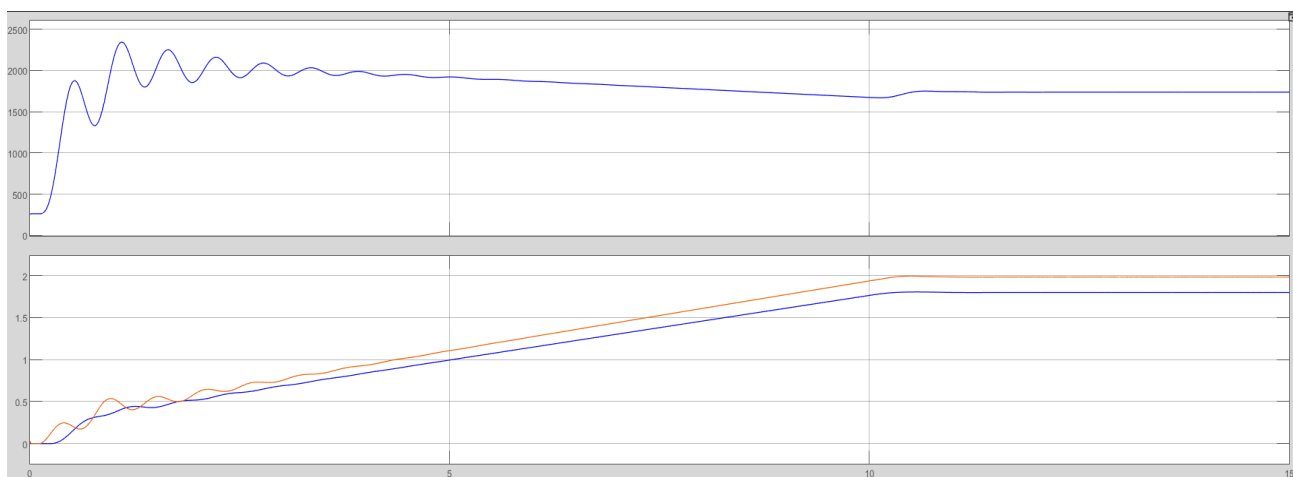


Рисунок 4 – Пуск и работа электропривода в начале цикла

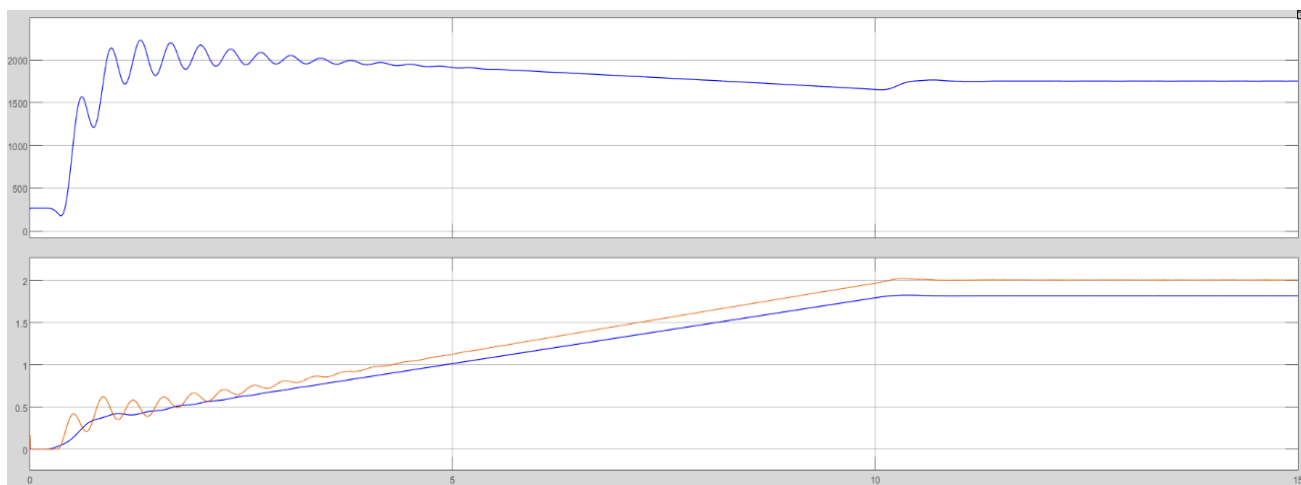


Рисунок 5 – Пуск и работа электропривода в конце цикла

Рассматривались процессы пуска установки в начале цикла работы (с незаполненным роликом устройства намотки) и в конце рабочего цикла с наработанной бухтой электродной ленты. Соответственно, при этом учитывалось изменение статического момента электропривода наматывающего устройства и его момента инерции. В целом на сам характер переходных процессов эти изменения не повлияли. Различие проявилось на начальном участке, где колебания натяжения ленты стали более сглаженными, и отклонение натяжения от установившегося значения уменьшилось. Однако и в том, и в другом случае пиковое отклонение натяжения не превысило допустимого значения (30%). Изменение линейной скорости в процессе пуска происходит практически без перерегулирования, а точность ее стабилизации в процессе работы составляет 2%.

Таким образом, разработанная система электропривода достаточно простыми техническими средствами обеспечивает требуемые технологические показатели в статических и динамических режимах в цикле работы установки бесслитковой прокатки.

Литература

1. В.И. Лабовский, В.П. Петров, И.С. Саватеева. Многодвигательные электроприводы производственных механизмов с параметрическими источниками тока. – М.: Моск. энерг. ин-т, 1989. – 80 с.
2. Дёмин А.С., Саватеева И.С. Формирование натяжения в системах электропривода устройств перемотки длинномерных материалов. Сб. трудов XII-ой Междунар. науч.-техн. конф. «Энергетика, информатика, инновации – 2022» Т 1. Сс. 59-64

*В.В. Федотов, асп., В.В. Рожков, к.т.н., доцент
(Филиал ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» в г. Смоленске)*

ВОЗМОЖНОСТИ ПОСТРОЕНИЯ ТРЕХФАЗНОГО ТРАНЗИСТОРНОГО МОСТОВОГО ВЫПРЯМИТЕЛЯ С ВЫСОКИМ КПД КАК ЗВЕНА ПРЕ- ОБРАЗОВАТЕЛЯ ЧАСТОТЫ

Исследование, разработка и применение различных топологий силовых преобразователей для электропривода и средств управления ими направлены, главным образом, на получение максимально простого и энергетически эффек-

тивного варианта. Это всегда нахождение оптимума между функционалом и стоимостью.

Топологии силовых схем преобразователей частоты (ПЧ) для общепромышленного частотного электропривода в последние десятилетия устоялись. Как правило, это двухзвенный вариант «трехфазный неуправляемый диодный выпрямитель (НВ) – звено постоянного тока – трехфазный двухуровневый транзисторный автономный инвертор напряжения (АИН) с высокочастотной широтно-импульсной модуляцией (ШИМ) транзисторов» (НВ-АИН) [1]. Эта схема хорошо отработана, относительно проста и дешева, имеет высокий КПД 95-97%, хорошие регулировочные свойства благодаря ШИМ-управлению ключами АИН на частоте единиц-десятков килогерц и применению векторных подходов к построению систем управления электроприводом. Её недостатки – высокий коэффициент нелинейных искажений выходного напряжения, существенно несинусоидальный потребляемый из сети ток, и, соответственно, высокий коэффициент его нелинейных искажений. Высокочастотные пульсации напряжения на выходе АИН, обусловленные высшими гармониками и зависящие от амплитуды источника и частоты ШИМ-управления, для большинства применений в электроприводе в системах стабилизации скорости и регулирования положения в малом диапазоне не слишком критичны. Однако для задач глубокорегулируемого прецизионного электропривода станков с ЧПУ, промышленных роботов и т.д. силовая схема НВ-АИН может быть не пригодна. Необходим поиск разумной альтернативы НВ как звена ПЧ.

Как вариант можно рассмотреть ПЧ с многоуровневыми автономными инверторами напряжения (МАИН), где звено выпрямителя расщеплено на n нерегулируемых индивидуальных источников. Но напряжение питания ячеек МАИН, если их число не слишком велико, также значительно.

Еще одна топология взамен НВ-АИН связана с заменой НВ на транзисторный активный выпрямитель (АВ), схема которого подобна АИН, но с другим законом управления. Эти решения используются либо в качестве преобразователя-рекуператора [2], либо в качестве активного фильтра по технологии «СтатКом» в электроэнергетических применениях [3]. Тогда транзисторный АВ используется не для регулирования напряжения на стороне выпрямленного тока, а организует высокочастотный энергообмен между питающей сетью и емкостным накопителем, в первом случае – для рекуперации тока в питающую сеть, а во втором – для фильтрации сетевого тока, искаженного любым произвольным нелинейным потребителем.

Однако, в принципе, транзисторный выпрямитель (ТрВ) с высокочастотным ШИМ-управлением может обеспечить глубокое и точное регулирование выходного напряжения. Простая замена НВ на ТрВ невозможна из-за того, что регулирование напряжения таким способом сопровождается значительными динамическими потерями на ключах ТрВ, увеличивающимися пропорционально глубине регулирования и сопровождающимся соответствующим снижением КПД схемы. Низкий КПД схемы перечеркнет все возможные новые свойства.

Краткий анализ показывает, что известной выпускаемой промышленностью номенклатуры ПЧ недостаточно для решения задачи существенного снижения пульсаций напряжения на выходе преобразователя.

Целью настоящей статьи является поиск ответа на вопрос: можно ли разработать топологию ПЧ, содержащую ТрВ с высокочастотным ШИМ-управлением и АИН с ШИМ, то есть эффективно использовать сочетание широтной и амплитудной модуляции при регулировании. Обязательным условием при этом является обеспечение высокого КПД схемы.

Исследования построения топологий матричных преобразователей частоты (МПЧ) в последние 15 лет проведены в зарубежной научной школе преобразовательной техники под руководством профессора Й. Колара и в отечественной практике мало известны. При высокой привлекательности схем классических транзисторных МПЧ (отсутствие двухкратного преобразования энергии «выпрямление–инвертирование» и объемных электролитических/пленочных конденсаторов большой емкости, двунаправленность схемы, и соответственно, обеспечение как режимов потребления, так и генераторных без дополнительных модификаций схемы), их практическое использование до сих пор ограничено. Большинство отечественных исследователей схем классических МПЧ связывает эти трудности с большим по сравнению со схемой НВ-АИН количеством ключей, специфичностью и большей стоимостью двунаправленных модулей, сложным алгоритмом управления транзисторами, худшим гармоническим составом выходного напряжения МПЧ вследствие его формирования из фрагментов сетевых линейных напряжений. Однако основная причина кроется в том, что схема МПЧ, несмотря на все свои преимущества, при глубоком регулировании имеет низкий КПД из-за больших потерь при коммутации ключей, питающих нагрузку от источника с индуктивным внутренним сопротивлением (т.е. от обычной промышленной трансформаторной сети). В схеме НВ-АИН таких проблем нет. Ключи АИН коммутируют источник от звена постоянного тока с разряжающимся на нагрузку емкостным накопителем. Й. Коларом еще предложены варианты построения топологий МПЧ, которые сводятся к секционированию схемы – переходе от матрицы к разделению на секцию квази-выпрямителя и инвертора [4]. Выделяется секция выпрямителя из 12 транзисторов и 12 диодов и традиционного АИН из 6 транзисторов с 6 обратными диодами (всего, как и в схеме рис.2 – 18 ключей). По мере уменьшения числа транзисторов в ТрВ до 9, 6 и, наконец, 3-х, эти схемы как бы «разрезаются», и формируется группа разреженных схем выпрямителей так называемых «непрямых» топологий МПЧ – с вариантами разреженного, сверхразреженного и ультраразреженного ТрВ. Топология МПЧ с трехключевым ультраразреженным ТрВ показана на рисунке 1.

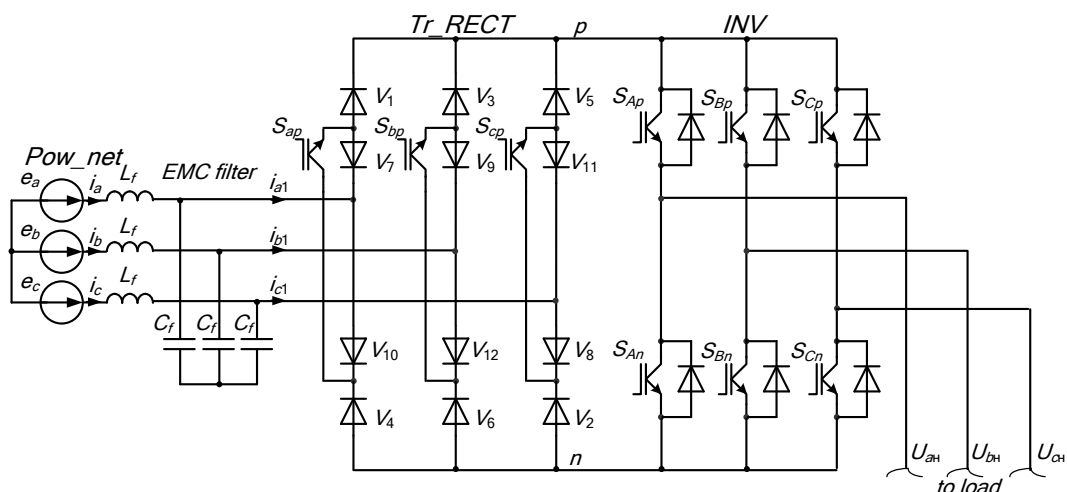


Рисунок 1 – Топология матричного преобразователя частоты с ультраразреженным выпрямителем

Однако, несмотря на имеющееся сходство со схемой двухзвенного ПЧ распространенной топологии, здесь принципиальное значение имеет как вариант схемы выпрямителя, так и, самое главное, технология управления секциями ТрВ и АИН. Подробно идея, моделирование и анализ схемы с ультраразреженным ТрВ и АИН в составе МПЧ показаны в [5].

Эта топология наиболее привлекательна для дальнейших исследований и применения в частотном электроприводе из-за относительной простоты (по сравнению со схемой НВ-АИН здесь имеются всего 3 транзистора и 6 дополнительных диодов в выпрямителе). Кроме того, в схеме рис.1 между секцией выпрямителя и инвертора вообще нет накопителя. В схемах МПЧ выпрямитель ТрВ, в том числе ультраразреженный, работает в соответствии с алгоритмом, обеспечивающим квазисинусоидальную форму потребляемого тока с минимальным ТНД_г. Однако ТрВ в МПЧ не предназначен для регулирования выходного напряжения. Согласованное управление секций ТрВ и АИН состоит в возможности использовать, к примеру, одинаковую частоту ШИМ для транзисторов ТрВ и АИН и корректировать моменты так называемых «нулевых» команд управления АИН (когда одновременно в стойках АИН включены либо три верхних ключа, либо три нижних). Эта корректировка осуществляется в АИН внутри периода ШИМ во время коммутации ключей ТрВ таким образом, чтобы ключи ТрВ переключались во время действия «нулевой» команды АИН, то есть в бестоковую для ТрВ паузу, когда нагрузка не питается от АИН, и ТрВ соответственно работает в режиме холостого хода. Тогда обеспечивается высокий КПД схемы ТрВ, близкий к 95%. Кроме того, достоинством схемы рис.1 с ТрВ в ультраразреженном исполнении (в отличие от других вариантов меньшего «разрежения») является ее надежность (отсутствие опасности междуфазных коротких замыканий входного источника из-за сбоя в управлении) и меньшая стоимость. При одновременном включении всех трех транзисторов схема вырождается в топологию НВ. Транзисторные ключи здесь является своеобразным высокочастотным выключателем НВ.

Возможности схемы ТрВ с ШИМ можно расширить, рассмотрев ее свойства с позиций упомянутых выше особенностей и требований к объектам управления систем позиционного и следящего электропривода. Сосредоточимся в настоящей статье на исследовании этой топологии ТрВ с постановкой задачи глубокого регулирования выходного напряжения. Это, в первую очередь, требует разработки компьютерной модели ТрВ как самостоятельного объекта управления, а также исследования его свойств, достоинств и ограничений. Представляется целесообразным для схемы, которая показана на рисунке 2, провести исследование ее энергетических и динамических характеристик.

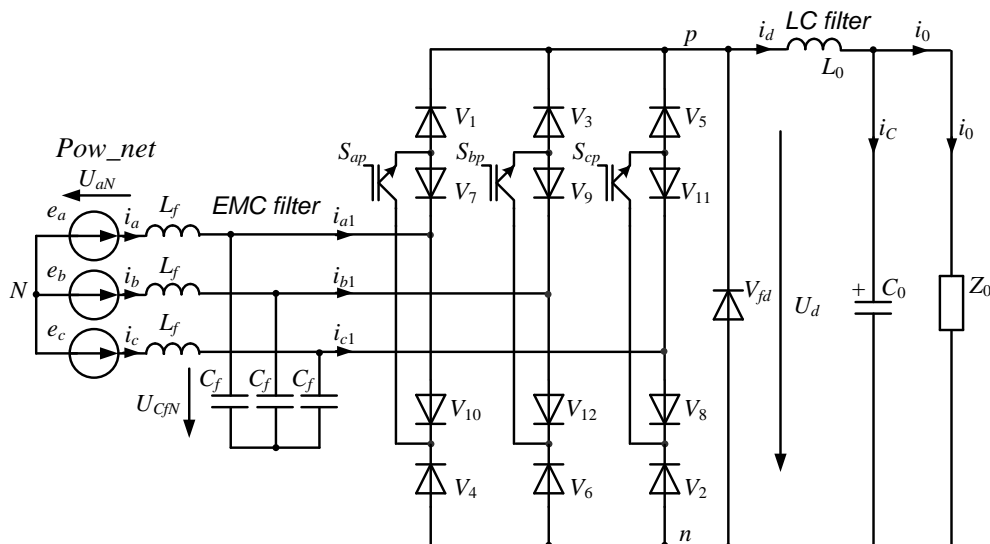


Рисунок 2 – Предлагаемая топология ТрВ с трехключевым выпрямителем, электромагнитным фильтром на входе и выходным *LC*-фильтром

Представленная на рис.2 топология позволяет при управлении ТрВ в составе ПЧ сочетать широтную и амплитудную модуляцию, как в схемах тиристорных преобразователей частоты с инверторами, работающими на частоте выходной сети, но без недостатков тиристорных выпрямителей с большим потреблением реактивной мощности при глубоком регулировании.

На основе [4] и проведенного в [5] анализа разработана авторская технология управления ключами ТрВ, обеспечивающая регулирование выходного напряжения с высоким КПД и малым коэффициентом нелинейных искажений потребляемого сетевого тока.

Для предлагаемой топологии разработана компьютерная модель, показанная на рисунке 3.

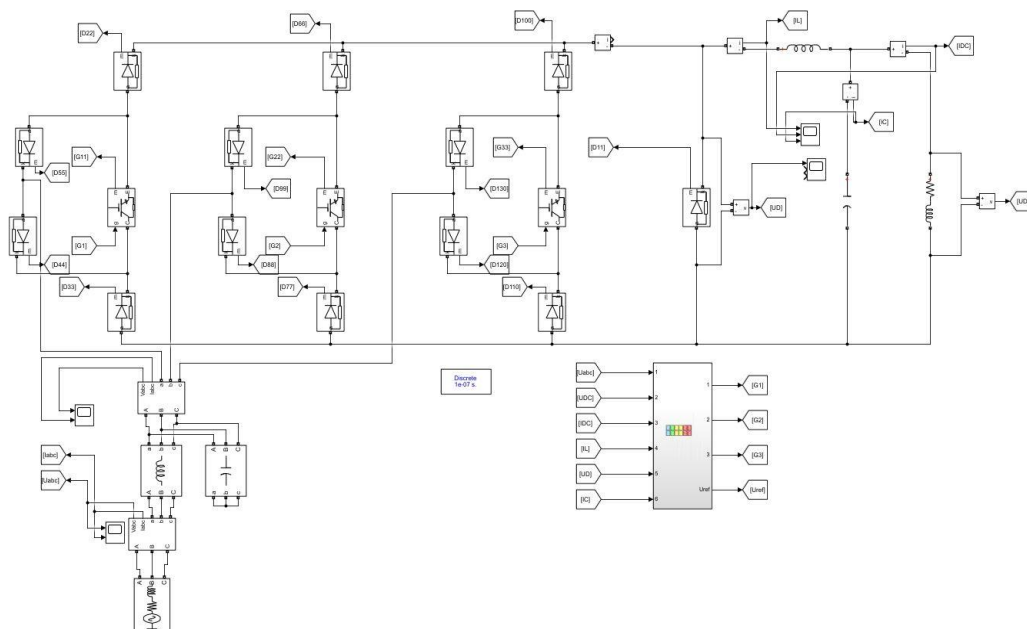


Рисунок 3 – Модель ТрВ с системой управления

На модели проведены серии экспериментов, подтверждающие возможность достижения КПД схемы ТрВ на уровне 95-99% при регулировании выходного напряжения в диапазоне 100-500 В.

Работа выполнена в рамках государственного задания, проект № FSWF-2023-0012.

Литература

1. Асинхронный частотно-регулируемый электропривод типовых производственных механизмов : учебное пособие / Ю. Н. Дементьев, В. М. Завьялов, Н. В. Кояин, Л. С. Удуг. — Томск : ТПУ, 2017. — 404 с. — ISBN 978-5-4387-0774-5. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/106737> (дата обращения: 16.02.2025)
2. Частотные преобразователи Mitsubishi Electric FR-A741 с рекуперацией [Электронный ресурс] // URL: http://esspb.ru/fr-a741_invertors.html (дата обращения: 27.02.2025)
3. Приходько В. Транзисторный компенсатор реактивной мощности // Силовая электроника, №1, 2017, с. 65-68. [Электронный ресурс] URL: <https://power-e.ru/wp-content/uploads/6465.pdf> (дата обращения: 27.02.2025)
4. J. W. Kolar, F. Schafmeister, S. D. Round and H. Ertl, "Novel Three-Phase AC-AC Sparse Matrix Converters," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 22, no. 5, pp. 1649-1661, Sept. 2007, doi: 10.1109/TPEL.2007.904178
5. Кисляков М.А., Крутиков К.К., Рожков В.В., Федотов В.В. Трехфазный транзисторный матричный преобразователь частоты с ультраразреженной топологией: свойства и возможности применения / Электричество. 2024. № 2. С. 53-66.

СЕКЦИЯ 3 ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА

*В.А. Галковский, к.т.н., доцент; С.М. Лобанов, студ.
(Филиал ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» в г. Смоленске)*

АНАЛИЗ РАБОТЫ СИСТЕМ ОТОПЛЕНИЯ МНОГОЭТАЖНОГО ЗДАНИЯ

Система отопления представляет собой комплекс технических компонентов, предназначенных для восполнения тепловых потерь через наружные ограждающие конструкции путем генерации, транспортировки и распределения необходимого объема тепла по всем отапливаемым помещениям с целью обеспечения заданного температурного режима.

Разводка отопительной системы представляет собой схему размещения отопительных приборов и соединительных трубопроводов между ними. Эффективность функционирования всей системы, а также ее внешний вид и экономические показатели зависят от типа разводки. Систему водяного отопления применяют с верхним и нижним расположением магистралей, с тупиковым и попутным движением воды в них, с последовательным и параллельным соединением отопительных приборов. В зависимости от этого системы классифицируются как однотрубные, двухтрубные или бифилярные [1].

Актуальность темы обусловлена необходимостью снижения затрат на сооружение систем отопления и повышения уровня комфорта. Эффективная работа системы отопления способствует созданию благоприятных условий для проживания и снижению капитальных и эксплуатационных расходов.

На первом этапе работы была проведена классификация систем отопления, что позволило выделить достоинства и недостатки отопительных систем, применяемых в многоквартирных зданиях. Анализ вертикальных однотрубных систем показал их простоту и экономичность, однако выявлены ограничения по равномерности распределения тепла. В отличие от них, двухтрубная вертикальная система продемонстрировала более эффективное и равномерное теплораспределение. Горизонтальные системы отопления также нашли свое применение в зданиях с определенными архитектурными особенностями, хотя требуют более сложного монтажа и обслуживания.

Проведенный сравнительный анализ позволил обосновать выбор наиболее оптимальной системы отопления с учетом технических, экономических и эксплуатационных факторов.

Далее были рассмотрены подробная методика расчета тепловых потерь здания и методика гидравлического расчета систем отопления.

Объектом рассмотрения является десятиэтажное многоквартирное здание, расположенное в городе Смоленск. Строение имеет техническое подполье и технический этаж.

На третьем этапе по подробным методикам был проведен детальный расчет теплопотерь десятиэтажного жилого здания. Эти данные позволили получить полное представление о потребностях здания в тепле. Спроектированы три схемы разводки систем отопления. Для данных схем был выполнен гидравлический расчет, в ходе которого подобраны оптимальные диаметры труб, необходимые для обеспечения эффективного распределения теплоносителя, выполнена их гидравлическая увязка, что позволило обеспечить согласование давлений и потоков в различных участках системы, а также осуществлен подбор отопительных приборов, что позволяет обеспечить необходимый уровень комфорта в помещениях, учитывая тепловые потери.

По итогам произведенных расчетов, вертикальная двухтрубная система отопления имеет наименьшее гидравлическое сопротивление.

На заключительном этапе были составлены таблицы с итоговой стоимостью всех систем отопления (таблица 1-3). Это позволило сделать следующие выводы:

Вертикальная однострунная система является второй, как по стоимости (1489750 руб.), так и по гидравлическому сопротивлению (8180,9 Па). Данная система позволяет сэкономить на трубах, но из-за постепенного остывания теплоносителя в стояках требует установки большего количества секций радиаторов. За счет увеличенных отопительных приборов однострунная система оказалась дороже двухтрубной.

Таблица 1 – Стоимость компонентов однострунной вертикальной системы

Наименование	Количество	Стоимость	Итоговая стоимость, руб
Труба стальная 21,3x2,8 ДУ 15	196,6 м	176 руб/м	34596
Труба стальная 26,8x2,8 ДУ 20	38,1 м	234 руб/м	8911
Труба стальная 33,5x3,2 ДУ 25	210,8 м	315 руб/м	66389
Труба стальная 42,3x3,2 ДУ 32	81,1 м	423 руб/м	34305
Труба стальная 48,0x3,5 ДУ 40	13,7 м	503 руб/м	6891
Труба стальная 60,0x3,5 ДУ 50	24,4 м	659 руб/м	16080
Труба стальная 76x3,5 ДУ 65	52,7 м	705 руб/м	37154
Кран шаровой 3/4"	110 шт	764 руб/шт	84040
Клапан регулирующий ручной 3/4"	110 шт	1328 руб/шт	146080
Кран шаровой 3"	2 шт	17265 руб/шт	34530
Клапан балансировоч- ный ручной 1 1/2"	7 шт	6582 руб/шт	46074
Секция радиатора	855 шт	1140 руб/шт	974700
Итого:			1489750

Вертикальная двухтрубная система является самой дешевой (1366714 руб.) и самой гидравлически эффективной (5239,2 Па) системой. Равномерное распределение теплоносителя по отопительным приборам позволяет установить минимальное количество секций радиаторов, что существенно уменьшается ее стоимость. Также данная система позволяет осуществлять разводку только в техническом подполье, без необходимости верхнего розлива и наличия технического этажа.

Таблица 2 – Стоимость компонентов двухтрубной вертикальной системы

Наименование	Количество	Стоимость	Итоговая стоимость, руб
Труба стальная 21,3x2,8 ДУ 15	229,5 м	176 руб/м	40385
Труба стальная 26,8x2,8 ДУ 20	55,6 м	234 руб/м	13008
Труба стальная 33,5x3,2 ДУ 25	302,4 м	315 руб/м	95256
Труба стальная 42,3x3,2 ДУ 32	53,9 м	423 руб/м	22800
Труба стальная 48,0x3,5 ДУ 40	10,2 м	503 руб/м	5151
Труба стальная 60,0x3,5 ДУ 50	24,4 м	659 руб/м	16080
Труба стальная 76x3,5 ДУ 65	20,7 м	705 руб/м	14594
Кран шаровой 3/4"	110 шт	764 руб/шт	84040
Клапан регулирующий ручной 3/4"	110 шт	1328 руб/шт	146080
Кран шаровой 3"	2 шт	17265 руб/шт	34530
Клапан балансировоч- ный ручной 1 1/2"	7 шт	6582 руб/шт	46074
Кран шаровой 1 1/2"	7 шт	4151 руб/шт	29057
Секция радиатора	719 шт	1140 руб/шт	819660
Итого:			1366714

Горизонтальная двухтрубная система является самой дорогой (2005922 руб.), это связано с наличием распределительных коллекторов. Также коллекторно-лучевая схема обладает наибольшим гидравлическим сопротивлением (49332,9 Па). Это обусловлено прокладкой дополнительных полиэтиленовых труб и наличием всего двух стояков.

Таблица 3 – Стоимость компонентов коллекторно-лучевой системы

Наименование	Количество	Стоимость	Итоговая стоимость, руб
Труба стальная 21,3x2,8 ДУ 15	210,4 м	176 руб/м	37032
Труба стальная 26,8x2,8 ДУ 20	290,0 м	234 руб/м	67865

Труба стальная 42,3х3,2 ДУ 32	5,6 м	423 руб/м	2369
Труба стальная 48,0х3,5 ДУ 40	11,2 м	503 руб/м	5634
Труба стальная 60,0х3,5 ДУ 50	28,0 м	659 руб/м	18452
Труба стальная 76х3,5 ДУ 65	35,4 м	705 руб/м	24922
Труба из сшитого поли- этилена 17х2,0 ДУ 13	1443,4 м	125 руб/м	180423
Кран шаровой 3/4"	231 шт	764 руб/шт	176484
Кран шаровой 3"	4 шт	17265 руб/шт	69060
Кран шаровой 1"	80 шт	1405 руб/шт	112400
Клапан балансировоч- ный ручной 1 1/2"	7 шт	6582 руб/шт	46074
Клапан регулирующий ручной 3/4"	11 шт	1328 руб/шт	14608
Коллекторный блок 4 вых	20 шт	9451 руб/шт	189020
Коллекторный блок 6 вых	20 шт	12096 руб/шт	241920
Секция радиатора	719 шт	1140 руб/шт	819660
Итого:			2005922

Таким образом, вертикальная двухтрубная система является наиболее рациональным решением. Обладая минимальными гидравлическими потерями, наименьшей ценой и высоким уровнем комфорта, она рекомендуется к установке в данном многоэтажном здании.

Литература

1. Сканава А. Н., Махов Л. М. Отопление / А. Н. Сканава, Л. М. Махов — Учебник для вузов. — М.: Издательство АСВ, 2008 — 576 с;

*В.А. Галковский, к.т.н., доцент; Я.С. Силков, студент
(филиал ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» в г. Смоленске)*

МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВОДЯНЫХ ТЕП- ЛОВЫХ СЕТЕЙ

Эксплуатация водяных тепловых сетей в современных условиях характеризуется необходимостью обеспечения высокой надежности и экономической эффективности. Ключевой проблемой при этом являются значительные потери тепловой энергии при транспортировке, во многом обусловленные неоптимальной пространственной конфигурацией сетей и дисбалансом нагрузок. В этой связи актуализируется применение методов пространственного анализа, позволяющих научно обосновать решения по развитию и модернизации тепловой инфраструктуры. Наиболее значимыми расчетными параметрами для такого анализа выступают средневзвешенная плотность тепловой нагрузки и центр отопительных нагрузок на обслуживаемой территории.

Решение задач, связанных с оптимизацией тепловых сетей, требует предварительного определения ключевых параметров, характеризующих территорию. Одним из основополагающих показателей служит средневзвешенная плотность тепловых нагрузок (q). Её вычисляют по формуле (1), где в числителе находится суммарная тепловая мощность всех потребителей, обслуживаемых источником тепла (котельной или ТЭЦ), а в знаменателе – площадь соответствующей зоны.

$$q = \frac{\Sigma Q_{\text{сум}}}{F} \quad (1)$$

где:

$\Sigma Q_{\text{сум}}$ – суммарная нагрузка от отопления, вентиляции, ГВС и технологических нужд (Гкал/ч),

F – площадь территории теплоснабжения (га).

Суммарная тепловая нагрузка ($Q_{\text{сум}}$) рассчитывается как сумма всех видов тепловых нагрузок на рассматриваемой территории (2).

$$Q_{\text{сум}} = Q_o + Q_v + Q_{\text{ГВС}} + Q_{\text{тех}} \quad (2)$$

Расчет отдельных составляющих:

1. Нагрузка на отопление (Q_o):

$$Q_o = \Sigma (\alpha \cdot q_o \cdot V_{\text{зд}} \cdot (t_{\text{вн}} - t_{\text{но}})) \quad (3)$$

где:

α – поправочный коэффициент на инфильтрацию воздуха (рассчитывается как $\alpha = 1 + \mu$, где μ – коэффициент инфильтрации);

q_o – удельная тепловая характеристика здания (Вт/м³·°С);

$V_{\text{зд}}$ – строительный объем здания (м³);

$t_{\text{вн}}, t_{\text{но}}$ – соответственно, внутренняя расчетная температура и расчетная температура наружного воздуха для проектирования отопления (°С).

2. Вентиляционная нагрузка (Q_v):

$$Q_v = \Sigma q_v \cdot V_{\text{зд}} \cdot (t_{\text{вн}} - t_{\text{нв}}) \quad (4)$$

где:

q_v – удельная вентиляционная характеристика здания (Вт/м³·°С);

$t_{\text{нв}}$ – расчетная температура наружного воздуха для вентиляции (°С).

3. Расчет выполняют по выражению, которое базируется на нормативах расхода воды:

$$Q_{\text{ГВС}} = \frac{1,2 \cdot m \cdot (a + b) \cdot (60 - t_{\text{ХЗ}})}{24 \cdot 3600} \cdot c_{\text{воды}} \quad (5)$$

где:

Коэффициент 1,2 вводится для учета теплотерь в системе ГВС внутри здания;

m – численность потребителей (например, жителей);

a и b – суточные нормы расхода горячей воды на одного человека в жилых и общественных зданиях соответственно (л/сутки) 60 – температура горячей воды в местах водозабора ($^{\circ}\text{C}$);

$60 - t_{\text{ХЗ}}$ – разность между температурой горячей воды у потребителя и холодной воды в зимний период (при отсутствии данных $t_{\text{ХЗ}}$ принимают равной $+5^{\circ}\text{C}$);

$c_{\text{воды}}$ – теплоемкость воды (Дж/кг $\cdot^{\circ}\text{C}$);

Знаменатель $24 \cdot 3600$ служит для перевода суточного расхода в секундный и получения мощности в ваттах.

4. Тепловая нагрузка на технологические нужды ($Q_{\text{тех}}$)

В отличие от стандартных нагрузок, технологическая составляющая сильно варьируется в зависимости от типа объекта. Например, для заводского цеха, больницы или бассейна требуются индивидуальные расчеты, основанные на данных о технологическом процессе или проектных решениях для этих зданий.

Справочную информацию, такую как расчетные температуры, удельные тепловые нагрузки и коэффициенты инфильтрации, следует брать из актуальных нормативных документов [1, 2, 3].

Границы зоны теплоснабжения, определяющие её площадь (F), задаются контуром трубопроводов, доставляющих теплоноситель от котельной или ТЭЦ к конечным потребителям [4].

Полученное значение позволяет выполнить первичную оценку целесообразности использования централизованных систем. Однако для проектирования эффективной конфигурации тепловых сетей этого недостаточно.

Более глубокий анализ обеспечивается расчетом центра отопительных нагрузок. Этот показатель идентифицирует точку на карте, в которой условно сосредоточена результирующая тепловая мощность всех потребителей. Методология расчета аналогична определению центра масс в механике, где роль массы играет тепловая нагрузка.

Математически координаты центра нагрузок определяются по формулам:

$$X_{\text{ц}} = \frac{\sum(Q_i \cdot X_i)}{\sum Q_i}, \quad Y_{\text{ц}} = \frac{\sum(Q_i \cdot Y_i)}{\sum Q_i} \quad (6)$$

где Q_i – тепловая нагрузка i -го потребителя, а X_i, Y_i – его координаты в заданной системе отсчёта.

Визуализация расположения центра нагрузок относительно источника тепла и трасс существующих сетей является мощным инструментом для выявления "перекосов" в системе.

Комплексное использование двух указанных параметров открывает возможности для следующих направлений оптимизации:

1. Корректировка трассировки магистральных сетей. Идеальная с гидравлической и тепловой точки зрения конфигурация стремится к тому, чтобы источник тепла находился как можно ближе к расчетному центру нагрузок. На практике это означает, что новые магистрали следует прокладывать в направлении этой точки, а для существующих систем может быть рассмотрена целесообразность строительства новых центральных или пиковых котельных в районе центра нагрузок для сокращения длины подающих веток.

2. Оптимизация зон ответственности источников тепла. Анализ распределения плотности тепловой нагрузки по территории позволяет провести реструктуризацию зон теплоснабжения. Участки с низкой плотностью ($q < 0.2$ Гкал/ч·га), удаленные от основного центра нагрузок, могут быть переданы на обслуживание децентрализованным (небольшим котельным) или индивидуальным источникам тепла, что снижает потери в протяженных магистралях.

3. Балансировка колец и тупиковых веток. В рамках одной тепловой сети расчет подцентров нагрузок для отдельных районов помогает выявить участки с повышенным гидравлическим сопротивлением и неравномерностью распределения теплоносителя. Это позволяет обосновать установку дополнительных перемычек, балансировочной арматуры или изменения диаметров труб.

Таким образом, интеграция расчета средневзвешенной плотности тепловой нагрузки с методом пространственного позиционирования центра отопительных нагрузок переводит задачу повышения эффективности водяных тепловых сетей из области эмпирических оценок в область научно обоснованного проектирования.

Представленные методики позволяют:

1. Обоснованно выбирать приоритетные направления развития сетевой инфраструктуры.

2. Снижать капитальные затраты на строительство избыточных сетей.

3. Сокращать эксплуатационные расходы за счет минимизации транспортных потерь тепла.

4. Повышать надежность и живучесть системы теплоснабжения в целом.

Важно подчеркнуть, что данные методики носят рекомендательный и вспомогательный характер. Они не являются единственными или исчерпывающими инструментами для принятия окончательных проектных решений. Их ценность заключается в способности дать ценные ориентиры и выявить потенциальные «узкие места». Однако они не отменяют необходимости проведения детального технико-экономического обоснования, учета локальной специфики, стоимости оборудования, полного гидравлического расчета и анализа множества других факторов, таких как экологические нормативы и социальные аспекты.

Ни одна расчетная методика не может полностью охватить всю сложность реальной системы, поэтому окончательные решения должны приниматься на основе комплексного анализа, в котором предложенные подходы служат важной, но не основной составляющей.

Литература

1. СП 131.13330.2020 Строительная климатология. Актуализированная редакция СНиП 2021-06-25.
2. СП 124.13330.2012 Тепловые сети. Актуализированная редакция СНиП 41–02–2003.
3. Соколов Е.А. Теплофикация и тепловые сети. – М.: Издательство МЭИ, 2001. – 472с.
4. Приказ Минэнерго России от 5 марта 2019 г. № 212 "Об утверждении Методических указаний по разработке схем теплоснабжения" (редакция от 11.09.2024) [Электронный ресурс] // Справочная правовая система КонсультантПлюс. – (Дата обращения: 12.03.2025).

*И.А. Кабанова, к.т.н., доц.; А.И. Мудрякова, маг.
(филиал ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» в г. Смоленске)*

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ В ПЛИНТУСНЫХ СИСТЕМАХ ОТОПЛЕНИЯ

В настоящее время, благодаря своим малым габаритам, перспективным решением для создания комфортного микроклимата в помещениях различного назначения являются плинтусные конвекторы. Плинтусные обогреватели – это компактные панельно-лучистые системы отопления, монтируемые вдоль наружных стен. Их работа основана на двухступенчатом теплообмене: конвективный поток от нагретого экрана прогревает стену, которая, в свою очередь, передает тепло в помещение за счет излучения.

Существующие плинтусные системы отличаются разнообразием конструкций, размеров и, что наиболее важно, типов оребрения теплообменных труб. Эти конструктивные различия напрямую влияют на эксплуатационные характеристики, в частности на суммарную тепловую мощность, передаваемую в помещение конвекцией и излучением.

Во многих работах эффективность плинтусных систем изучается изучалась преимущественно через оценку их конечной эффективности – теплового комфорта в помещении при использовании готовых изделий. Однако ключевая задача, связанная с проектированием самих плинтусных систем, а именно – тепловая оптимизация и создание инженерных методик для расчета их параметров под конкретные условия, до сих пор остается нерешенной.

С учетом анализа полученных результатов в [1] можно сказать, что теплогидродинамика плинтусной системы определяется величиной модифицированного числа Релея (Ra). При $Ra < 40-50$ доминирует теплопроводность. Поток воздуха в межреберном канале прогрет однородно. При $Ra > 100$ усиливается свободная конвекция. Формируются изолированные прогретые слои у поверхности труб и ребер. Из-за высокой скорости потока эти зоны не успевают объединиться, создавая пространственно неоднородное поле температур.

Кроме этого, анализируя базовое уравнение теплоотдачи $\alpha = Q/F\Delta T$ делаем вывод, что существует два основных фактора, определяющих интенсивность теплообмена в системе:

– температурный напор $\Delta T = T_{тр} - T_0$, чем он больше, тем, при прочих равных, интенсивнее теплообмен;

– геометрия системы, наиболее значимыми геометрическими параметрами здесь выступают диаметр трубы (d) и шаг оребрения (δ).

Оценим эффективность теплопередачи в плинтусных системах отопления. Для этого требуется выполнить расчет на определение значений основных вариативных параметров межреберного расстояния δ и диаметра трубы d , а также необходимо определить тепловую мощность Q_λ плинтусной системы, и оценить гидравлические характеристики насоса, для обеспечения циркуляции теплоносителя.

В качестве объекта исследования был выбран вариант плинтусной системы типа ПЛК 04.14.150. Внешний вид теплого плинтуса с основными геометрическими параметрами представлен на рисунке 1. Тепловой поток от горячей воды проходит несколько стадий: сначала он передается через стенку трубы, затем путем теплопроводности распределяется по ребрам, и, наконец, преобразуется в кинетическую энергию конвективного воздушного потока. Этот восходящий поток служит конечным теплоносителем, непосредственно передающим энергию стене и помещению. В результате нагретые стена и внешний экран плинтусной системы становятся источниками лучистого тепла для помещения.

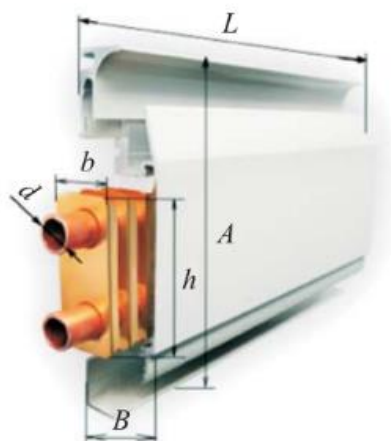


Рисунок 14 – Внешний вид плинтусной системы с обозначениями геометрических параметров

Конструкция плинтусного отопительного прибора характеризуется компактными габаритными размерами (145×37 мм). Для интенсификации теплопередачи на теплообменные трубы устанавливаются поперечные П-образные латунные ребра размером 30×60 мм. Каждый трехметровый модуль оснащен автономной системой циркуляции теплоносителя, обеспечивающей стабильность теплосъема. Оптимальный тепловой режим работы системы достигается при выборе межреберного зазора δ_{opt} , величина которого определяется из соотношения (1).

$$\frac{\delta_{opt}}{h} = 2,66/Ra_h^{\frac{1}{4}} \quad \#(1)$$

В соответствии с данной зависимостью ключевым параметром оптимизации тепловой эффективности системы является выбор оптимального межреберного зазора, который определяется высотой конвективного канала h и температурным напором ΔT между поверхностью трубы и окружающим воздухом. Для рабочего диапазона $\Delta T = T_{тр} - T_0$ от $30 \text{ }^\circ\text{C}$ до $70 \text{ }^\circ\text{C}$ и соответствующей геометрии системы оптимальная величина зазора имеет значение $\delta_{opt} = 5 \dots 8 \text{ мм}$.

Другим способом повышения теплоотдачи является увеличение площади теплообмена через выбор диаметра трубы. Анализ показывает, что максимальная эффективность достигается при соотношении $d \approx d_{opt} = \delta$. Исходя из стандартной номенклатуры выбран диаметр трубы $d = 15 \text{ мм}$. Удельная тепловая мощность системы рассчитывается по формуле (2).

$$Q_l = 2\lambda \left(\frac{b}{h}\right) \Delta T \frac{Nu_{\delta_0}(y, Ra_h)}{y^2} F_1(y) \varepsilon \left(\frac{d}{b}\right), \quad \#(2)$$

где $\Delta T = T_{тр} - T_0 = \frac{T_{ж0} - T_{жк}}{2} - T_0 = T_{ж0} - T_0 - (T_{ж}/2)$.

Кроме того, данная зависимость позволяет оценить влияние на тепловую мощность каждого конструктивного параметра плитусной системы. Следует отметить, что наибольшую значимость имеет величина межреберного зазора.

Расчетные графики зависимостей Q_l от перепада температур $\Delta T_{ж} = T_{ж0} - T_{жк}$ при различных значениях температур теплоносителя на входе $T_{ж0}$ приведены на рисунке 2.

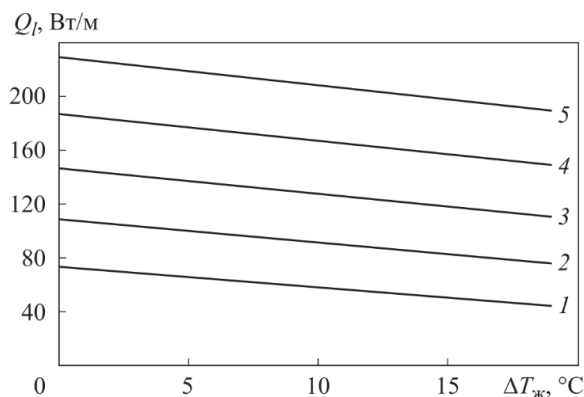


Рисунок 15 – Тепловая мощность плитусной системы на 1 м длины Q_l [Вт/м] в зависимости от перепада температуры теплоносителя в трубах $\Delta T_{ж}$:

1 – $\Delta T_{ж0} = 50 \text{ }^\circ\text{C}$; 2 – $\Delta T_{ж0} = 60 \text{ }^\circ\text{C}$; 3 – $\Delta T_{ж0} = 70 \text{ }^\circ\text{C}$; 4 – $\Delta T_{ж0} = 80 \text{ }^\circ\text{C}$; 5 – $\Delta T_{ж0} = 90 \text{ }^\circ\text{C}$

По результатам исследования видно, что имеются широкие возможности регулирования тепловой мощности плитусной системы за счет изменения

температуры теплоносителя. Как показали расчеты, нагрев воды на входе от 50 до 90 °С позволяет плавно изменять удельную мощность в диапазоне 60-200 Вт/м при сохранении рекомендуемого перепада температур теплоносителя $\Delta T_{\text{ж}} = 5-10$ °С.

Из расчета плинтусной системы отопления для индивидуального жилого дома в [3], аналогично для конвектора типа ПЛК 04.14.150 при нормальных условиях (номинальном расходе воды, номинальном температурном напоре) мощность плинтусного конвектора на погонный метр при температурном графике 55/50°С составила 154 Вт.

Сравнительный анализ с существующими аналогами подтверждает эффективность предложенных решений, поскольку оптимизированная геометрия разработанной системы обеспечивает существенное преимущество как по максимальной мощности, так и по ширине регулировочного диапазона.

Массовый расход греющего теплоносителя определяется из уравнения энергетического баланса:

$$G = \frac{Q_l L}{c_{pm} \Delta T_{\text{ж}}}, \#(3)$$

где c_{pm} — удельная массовая теплоемкость воздуха при постоянном давлении, Дж/(кг·К).

Потери давления в трубопроводе Δp определяются по формуле:

$$\Delta p = \xi_{\Sigma} \frac{8}{\pi^2 d^4} \frac{G^2}{\rho_{\text{ж}}}, \#(4)$$

где ξ_{Σ} — суммарный коэффициент гидравлического трения. Для данного случая $\xi_{\Sigma} = 1,668$ — складывается из сопротивления на повороте трубы на 180°, а также на входе и на выходе из нее.

Рассчитанные по данным формулам величины массового расхода G и потери давления Δp как функции $\Delta T_{\text{ж}}$ для различных $T_{\text{ж0}}$ приведены на рисунке 3.

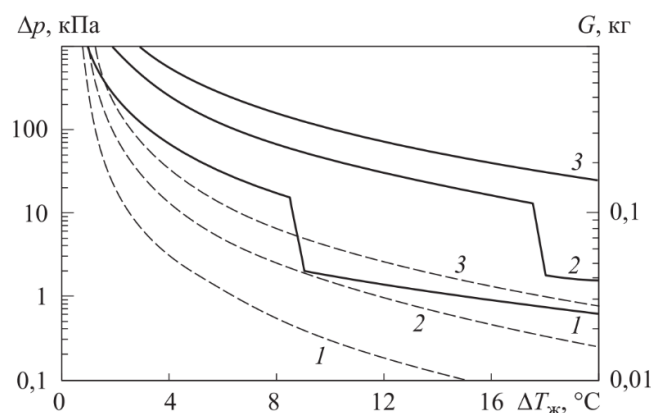


Рисунок 16 – Потери давления в трубопроводе плинтусной системы Δp (сплошные линии) и массовый расход теплоносителя G (штриховые линии) от перепада температур, при различной температуре подачи:

1 – $T_{\text{ж0}}=50$ °С; 2 – $T_{\text{ж0}}=70$ °С; 3 – $T_{\text{ж0}}=90$ °С

Для штатного режима работы системы с перепадом температур теплоносителя 5-10°C расчетные гидравлические параметры ($\Delta p \leq 300$ кПа, $G < 0,1$ кг/с) позволяют рекомендовать к применению серийные насосные станции. Это подтверждается сравнительным анализом с характеристиками стандартного оборудования.

Таким образом, установлено, что для достижения максимальной величины тепловой мощности плинтусной системы следует подбирать оптимальные значения диаметра греющих трубопроводов и межреберного пространства плинтусной системы. Кроме того, выявлено, что реализация плинтусной системы отопления с оптимальными геометрическими параметрами позволит увеличить тепловую мощность по сравнению с существующими плинтусными системами.

Литература

1. Гришин Ю.М., Хандрамай Н.А. Тепловая оптимизация параметров плинтусных систем отопления со свободно-конвективным теплообменом. Электрон. версия. печ. публ. – <https://engjournal.bmstu.ru/articles/2376/2376.pdf>.
2. Еремкин А.И., Королева Т.И., Данилин Г.В. Экономическая эффективность энергосбережения в системах отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха: Учебное пособие. – М.: Издательство ассоциации строительных вузов, 2008. – 184с.
3. Мудрякова А.И., Кабанова И.А. Системы отопления зданий индивидуальной застройки // Сборник трудов XIV Международной научно – технической конференции «Энергетика, информатика, инновации – 2024». 2024, Т. 1, С 150 – 154. – Электрон. версия. печ. публ. – https://sbmpei.ru/files/uplfiles/f675a737e48956Tom_1.pdf

*А.И. Киселева, ст. пр.; И.В. Голузова, У.А. Ткачева, студ.
(Филиал ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» в г. Смоленске)*

СПОСОБЫ ВЫСВОБОЖДЕНИЯ РЕЗЕРВОВ МОЩНОСТИ ТЕПЛОВОЙ СЕТИ

Тенденция развития городов растет с каждым днем, поэтому существующие источники тепловой энергии перегружены работой, а тепловые сети имеют высокую степень износа и ограниченную пропускную способность, что приводит к необходимости анализа вариантов высвобождения тепловой мощности в уже существующих тепловых сетях.

Основными способами выявления резервов мощности являются:

- регулирование гидравлического режима;
- уменьшение тепловых потерь;
- замена оборудования на ЦТП.

Регулирование гидравлического режима имеет следующие цели:

- обеспечение эффективного распределения тепла по всей сети;
- поддержание нужного давления и расхода теплоносителя;
- подготовка систем к изменяющимся условиям нагрузки.

В гидравлическом режиме давление, температура, скорость и расход должны поддерживаться на оптимальном уровне для эффективной работы всей системы.

Регулирование параметров теплоносителя можно осуществить несколькими способами:

1. Контроль давления в системе.

Постоянный мониторинг и регулирование давления теплоносителя позволяет поддерживать стабильную работу всей системы, особенно в условиях пиковых нагрузок.

Для этого могут быть использованы:

- насосные станции;
- регуляторы давления и расхода.

2. Поддержание оптимального расхода.

Система, способная изменять количество теплоносителя в соответствии с изменениями внешних температур, количества потребителей и других факторов, является более эффективной и гибкой. Для этого могут использоваться насосные станции и задвижки. Настройка расхода позволяет перераспределять тепло, предотвращая нагрузку в определенных участках сети.

3. Эффективное использование тепловых аккумуляторов.

Тепловые аккумуляторы могут накапливать тепло в периоды низкой нагрузки. Накопленное тепло можно использовать в период пикового потребления.

4. Гидравлические расставления и перепроектирование сетей.

Перепроектировка сети включает в себя создание дополнительных или резервных контуров, что позволяет увеличить устойчивость к аварийным ситуациям.

5. Прогнозирование и управление нагрузкой.

Использование современных систем мониторинга позволяет заранее корректировать гидравлический режим и выделять дополнительные ресурсы для покрытия пиковых нагрузок. Системы автоматического регулирования могут адаптироваться к изменениям в реальном времени, чтобы обеспечить баланс между производственными мощностями и потребностью тепла.

Преимуществами данного метода являются:

- поддержание стабильности: предотвращения резких перепадов давления и температур способствует стабильности теплоснабжения;
- гибкость;
- экономия ресурсов: оптимальное использование резервных мощностей и накопленных ресурсов (например, с помощью тепловых аккумуляторов) помогает снизить расходы на генерацию тепла и снижению эксплуатационных затрат.

Недостатки данного метода включают в себя:

- техническая сложность: установление правильного гидравлического режима требует монтаж сложных и дорогостоящих систем регулирования, которые требуют высококвалифицированного обслуживания;
- экологические и эксплуатационные ограничения.

Уменьшение тепловых потерь через изоляцию является одним из самых эффективных способов повышения резервов мощности. Правильная изоляция помогает значительно снижать потери тепла, что улучшает общую эффективность работы тепловой сети, позволяя обеспечивать более стабильную подачу тепла.

Основные причины тепловых потерь:

- неизолированные участки трубопроводов;
- проблемы с изоляцией: поврежденная изоляция, изнашивание;
- низкая плотность покрытия.

Нужно признать факт наличия сверхнормативных тепловых потерь, который становится все более очевидным при тенденции увеличения доли потребителей, оснащенных приборами учета.

Преимущества данного метода включают в себя:

- повышение надежности и долговечности трубопроводов;
- приведение тепловых потерь к нормативным значениям может привести к тому, что не потребуется строительство новых источников теплоты;
- снижение затрат на топливо.

Недостатками данного метода являются:

- сложность измерения тепловых потерь в реальных условиях эксплуатации;
- трудоемкость и дороговизна.

Рассмотрим замену оборудования на ЦТП, как метод выявления резерва мощности. Устаревшее оборудование является одной из самых больших проблем. Большинство ЦТП постсоветского пространства используют изношенные насосы, теплообменники, а также арматуру и автоматику. Это приводит к неэффективности данной системы, а соответственно и к высоким тепловым потерям и потерям давления.

Замена и модернизация оборудования включает в себя:

- замену кожухотрубных теплообменников на пластинчатые: это улучшает теплообмен, экономит место и вес, облегчает транспортировку и установку оборудования;
- установку частотно-регулируемых приводов насосов: позволяет изменить частоту вращения насоса в зависимости от текущих потребностей водоснабжения, что снижает энергопотребление;
- внедрение систем автоматического регулирования: автоматический контроль позволяет оптимизировать работу системы, что сокращает расходы.

Модернизация ЦТП может быть:

1. Полная – замена водонагревательных элементов, насосов, узлов учета тепла и воды, систем автоматизации, контрольно-измерительных приборов и запорной арматуры.

2. Частичная – замена некоторых элементов ЦТП, например, установка пластинчатых теплообменных аппаратов.

Достоинства данного метода включают в себя:

- оптимизация распределения тепловой нагрузки в теплосети: например, замена гидроэлеватора и циркуляционный насос позволяет реализовать энергосберегающие функции теплопотребления здания;
- управление гидравлическим и тепловым режимами: например, установка автоматических систем регулирования температуры теплоносителя, подаваемого в систему отопления, в зависимости от температуры наружного воздуха;

- снижение расхода теплоносителя в тепловой сети: уменьшает затраты на перекачку теплоносителя сетевыми насосами.

Недостатками данного метода являются:

- сложность проектирования ЦТП перед модернизацией: необходимо разработать техническое задание, рассчитать возможные тепловые нагрузки, выбрать технические решения и согласовать проект;

- дополнительные затраты на модернизацию;

- необходимость учета фактического состояния абонентского ввода перед заменой оборудования.

Подключение нового абонента к тепловой сети оказывает влияние на расход воды, местные сопротивления и потери напора. Обновленная изоляция помогает предотвратить большую часть тепловых потерь. Этот метод является одним из наиболее эффективных.

Данные энергосберегающие мероприятия являются достаточно эффективными и могут снижать тепловые потери на, как минимум, 20-30%. Однако каждый случай необходимо рассматривать индивидуально: не все методы оптимизации тепловой сети могут подходить для конкретной тепловой сети. Применение рассмотренных в статье способов высвобождения тепловой мощности помогут также снизить затраты на топливо, что подтверждает их целесообразность.

Литература

1. НП "Энергоэффективный город" представляет портал "Энергосовет" - всё об энергосбережении в интернете / [Электронный ресурс] // <http://www.energsovet.ru> : [сайт]. — URL:<http://www.energsovet.ru/stenergo.php?idd=30> (дата обращения: 15.05.2025).

*А.И. Киселева, ст.пр.; И.В. Голузова, У.А. Ткачева студ.
(Филиал ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» в г. Смоленске)*

ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ ПРИ КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЯХ

Многолетние климатические исследования, проводимые специалистами во многих странах, выявили устойчивую тенденцию к повышению температуры в приземном слое атмосферы, особенно ярко проявляющуюся за последние пять десятилетий. Значительную роль в этом процессе играют урбанизированные зоны, где сосредоточены главные источники теплового загрязнения – транспортные системы, отапливаемые здания, промышленные предприятия и энергетические объекты. В крупных городах формируется особый микроклимат с повышенным температурным фоном по сравнению с прилегающими территориями. Хорошим примером служат данные по Смоленску, где наиболее заметный рост температур приходится на зимний период, что указывает на существенное влияние антропогенных факторов на сезонные климатические показатели.

Изменения климатических условий требуют серьезного пересмотра подходов к проектированию и развитию городской энергетической инфраструктуры. Традиционные методы создания систем теплоснабжения, основанные на

анализе исторических климатических данных, теряют свою актуальность на фоне стремительных изменений температурных режимов.

На рисунке 1 показано изменение среднегодовой температуры наружного воздуха $t_{ср.г}$ в Смоленске за период с 1975 по 2024 г. - наблюдается устойчивый возрастающий тренд [1].

В 2020 году среднегодовая температура наружного воздуха в Смоленске составила 7,7 °С, что на 1,3 °С выше значения, приведённого в своде правил по строительной климатологии (6,4 °С).



Рисунок 1 – Изменение среднегодовой температуры наружного воздуха, $t_{ср.г}$

При проектировании инженерных систем зданий особое внимание уделяется точному определению расчетных климатических параметров, которые являются основой для проведения теплотехнических расчетов. Для систем отопления главным показателем выступает расчетная температура наружного воздуха, принимаемая как средняя температура наиболее холодной пятидневки с обеспеченностью 0,92. Этот нормативный параметр отражает статистически обоснованный уровень тепловой нагрузки, который необходимо компенсировать системам отопления для обеспечения комфортного микроклимата внутри помещений. Для города Смоленска данное значение установлено на уровне -23°С, что учитывает особенности местного климата. Дополнительные расчетные температуры для зимнего периода в Смоленске представлены в таблице 1.

Для сравнения в таблице 1 приведены данные стандартов по строительной климатологии разных лет, по которым видно, что современные расчетные параметры климата отличаются от данных устаревших стандартов 1982 г [2].

Точное определение температуры наружного воздуха имеет критическое значение при проектировании, эксплуатации и расчетах тепловых систем, в частности трубопроводов, по следующим причинам:

1. Расчет тепловых потерь: тепловые потери трубопровода напрямую зависят от разницы температур между теплоносителем и окружающей средой.

Неверное определение температуры наружного воздуха приведёт к ошибкам в расчетах теплопотерь.

2. Проектирование систем отопления и теплоснабжения: температура наружного воздуха – ключевой параметр для определения тепловой нагрузки зданий и сетей. Точная температура позволяет корректно рассчитать необходимую мощность котельных установок, насосов и других компонентов.

3. Обеспечение надежности и безопасности: при неправильном учёте температуры наружного воздуха возможны случаи переохлаждения теплоносителя, замерзания труб, повреждений оборудования, что ведёт к авариям и дорогостоящему ремонту.

Таблица 2 – Расчетные параметры наружного воздуха в Смоленске

Стандарт (СНиП / СП)	Температура воздуха, °С				Абсолютная минимальная температура воздуха, °С
	Наиболее холодных суток обеспеченно- стью		Наиболее холодной пя- тидневки обеспеченно- стью		
	0.98	0.92	0.98	0.92	
СНиП 2.01.01 -82	-34	-31	-28	-26	-41
СНиП 23-01-99	-34	-31	-28	-26	-41
СП 131.13330.2012	-33	-28	-26	-25	-40
СП 131.13330.2018	-33	-28	-26	-25	-40
СП 131.13330.2020	-30	-28	-26	-23	-40

Для оценки воздействия изменения температуры наружного воздуха был проведён анализ изменения тепловых потерь трубопроводов диаметром 250 мм и длиной 100 метров на основе данных из предыдущей таблицы. Результаты представлены в таблице 2

Таблица 2 – Результаты расчета тепловых потерь

Тип прокладки	Расчетная температура наружного воздуха, °С				
	-26	-26	-25	-25	-23
Бесканальная	4339,96	4339,96	4241,33	4241,33	4044,06
Полупроходная	4226,75	4226,75	4130,68	4130,68	3938,56
Воздушная	3962,6	3962,6	3872,52	3872,52	3692,40

Из таблицы 2 видно, что с увеличением расчетной температуры наружного воздуха тепловые потери уменьшаются. Анализ данных подтвердил, что повышение температуры окружающей среды способствует снижению тепловых потерь, что объясняется уменьшением разницы температур между теплоносителем и внешней средой. Соответственно снижается необходимая мощность котла и других отопительных приборов.

Изменение параметров зимних температур оказывает воздействие не только на расход тепловой энергии, но и на теплопотери строений, а также на технические характеристики отопительного оборудования и его экономическую эффективность.

Для расчетов были взяты отчетные данные за 2023-2024 годы для жилого дома в Смоленске, находящийся по адресу ул. Маршала Соколовского,13. Построен в 1973 году, 9 - этажный, имеет общую площадь всех помещений 11981.7м².

В данном отчете представлен суточный архив потребления тепла в период с 03.10.2023 по 30.04.2024. На основе данных наружной температуры воздуха и количества потребляемого тепла в сутки построен график теплоспонобления (рисунок 2).

Из графика чётко прослеживается обратная зависимость между температурой и потерями тепла: при низких температурах потери тепла наиболее высоки и достигают максимальных значений, а по мере повышения температуры наружного воздуха потери тепла постепенно снижаются.

За отопительный период преобладающая температура была от -5°С до +5°С. При расчетной температуре наружного воздуха равной -23°С теплотери для данного дома составляют приблизительно 11,2 Гкал.

График потребления тепла

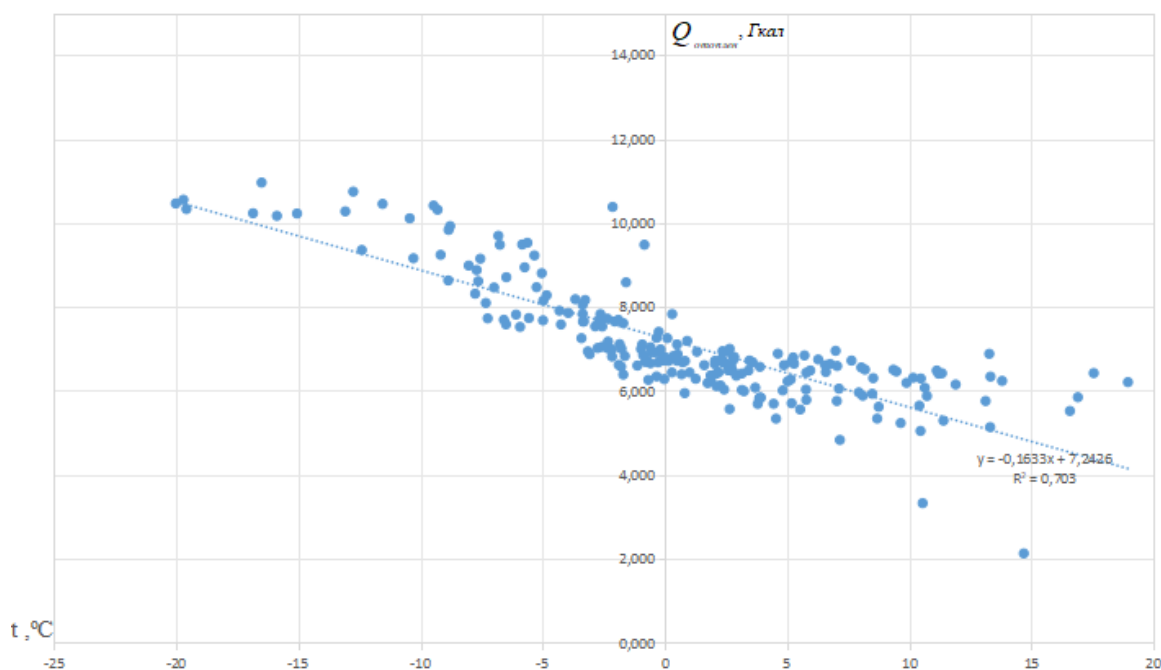


Рисунок 2 – График потребления тепла

Согласно нормативам потребления коммунальных услуг по отоплению на территории города Смоленска для данного 9 - этажного здания норма потребления тепловой энергии оставляет 0,423Гкал/ч.

Для оценки влияния температуры наружного воздуха на теплоспонобление зданий были определены договорные и фактические нагрузки рассматриваемого дома. После обработки данных суточного архива фактическое тепловое потребление составило 0,49 МВт, договорная нагрузка по расчетам составила 1,04 МВт, а это значит, что фактическое потребление тепла оказалось меньше договорного.

Для определения высвобожденной мощности проведена оценка экономии тепловой энергии при несоответствии договорных нагрузок фактическим, результаты расчетов представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Результаты расчетов годового расхода тепла на отопление

$Q_{\text{год}}^{\text{дог}}$, МВт·ч	$Q_{\text{год}}^{\text{факт}}$, МВт·ч
2520,4	1187,5

По данным таблицы 3 определена разница годового расхода тепла за отопительный период при расчетной температуре $t_{\text{но}} = -23^{\circ}\text{C}$, она составила 1146,3 Гкал.

Согласно источнику [4] цена за 1 Гкал в городе Смоленске для данного дома составляет 2515,48 рублей, значит:

$$1146,3 \cdot 2315,48 \approx 3\,348\,885 \text{ рублей}$$

Полученная сумма отражает общий объём экономии денежных средств, достигнутый потребителями благодаря внедрению автоматизированного индивидуального теплового пункта. Это позволяет оценить, насколько эффективно данное техническое решение снижает затраты на теплоэнергию за счёт оптимизации её потребления и повышения точности регулирования.

Кроме того, анализ результатов демонстрирует потенциал высвобождения тепловой мощности, который возникает вследствие пересмотра договорных нагрузок с теплоснабжающей организацией. Такая корректировка возможна благодаря изменению температурных режимов и более рациональному использованию ресурсов, что приводит к нескольким важным положительным эффектам:

1. Точный учёт тепла снижает расходы жильцов за счёт уменьшения излишних затрат.
2. Меньшее потребление тепла освобождает пропускную способность сетей, повышая их надёжность и позволяя подключать новых абонентов.
3. Пересмотр договорных нагрузок оптимизирует работу оборудования и снижает эксплуатационные расходы.
4. Сокращение потребления тепла уменьшает расход топлива и снижает экологическую нагрузку.
5. Снижение нагрузок на топливно-энергетический комплекс повышает энергетическую безопасность и устойчивость системы.

Таким образом, комплексная корректировка температурных режимов и рационализация использования тепла оказывают существенное положительное влияние как на экономику конечных потребителей, так и на общую эффективность работы энергетической инфраструктуры.

Литература

2. Архив погоды г.Смоленска / [Электронный ресурс] // <https://rp5.ru> : [сайт]. – URL:https://rp5.ru/Погода_в_Смоленске (дата обращения: 11.05.2025);

3. СП 131.13330.2020. Актуализированная редакция СНиП 23-01-99* “Строительная климатология”. М.: Минстрой России, 2020;
4. СП 60.13330.2020. Свод правил. Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха. М.: Минстрой России, 2020;
5. Тарифы на коммунальные услуги АО "КВАДРА" в 2025 г/ [Электронный ресурс] // <https://my-gkh.ru> : [сайт]. – URL: <https://my-gkh.ru/gettariff/pao-kvadra/0/smolensk>;

*Н.С. Козлов, студ.; Г.Ю. Новиков, к.т.н., доц.
(филиал ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» в г. Смоленске)*

СПОСОБЫ ОПТИМИЗАЦИИ РЕЖИМОВ ПРОИЗВОДСТВА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ И ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИИ НА ТЭЦ

Повышение эффективности работы теплоэлектроцентралей (ТЭЦ) представляет собой одну из наиболее актуальных задач для энергетического сектора. Ее решение напрямую влияет на экономическую устойчивость энергокомпаний, особенно в условиях либерализации рынков электроэнергии и ужесточения экологических требований. Ключевым резервом в данном контексте является совершенствование методов распределения тепловых и электрических нагрузок между турбоагрегатами. Специфика ТЭЦ заключается в комбинированной выработке двух видов

энергии – электрической и тепловой – в едином технологическом цикле. В отличие от конденсационных энергоблоков, турбины с регулируемыми отборами пара или противодавлением имеют сложную, многопараметрическую зависимость расхода тепла от выходных мощностей. Эта особенность обуславливает сложность задачи оптимизации и определяет выбор метода ее решения, который, в первую очередь, опирается на поиск адекватного математического описания указанной функции [1].

Для проведения оптимизационных расчетов, основанных на диаграммах режимов, используемых на современных ТЭЦ, необходима разработка точной и адекватной математической модели расходных характеристик турбоагрегатов. Эти характеристики, отражающие зависимость расхода тепла (или пара) от электрической и тепловой нагрузок, могут быть представлены в табличной, графической или аналитической форме. Однако для реализации эффективных вычислительных процедур оптимизации наиболее предпочтительной является аналитическая форма.

Основу составляет уравнение, связывающее расход тепла Q с параметрами работы турбины. В общем виде для турбины с двумя отборами (промышленным и теплофикационным) оно может быть представлено как сегментированная функция [2]:

$$Q_o = Q_{xx} + k_1 \cdot N + k_2 \cdot Q_T + k_3 \cdot Q_{\Pi} \quad (1)$$

где:

Q_{xx} – условная тепловая мощность на холостой ход при отсутствии отборов пара, МВт;

N – нагрузки турбоагрегата, соответствующие точкам излома расходных характеристик;

Q_T – теплофикационная нагрузка, Гкал/ч;

$Q_{п}$ – промышленная нагрузка, МВт;

k_1, k_2, k_3 – коэффициенты, характеризующие влияние изменения нагрузок на расход тепла.

Особенностью предлагаемого подхода является учет точек излома расходных характеристик, положение которых зависит от расходов пара в отборе. Эти точки определяются через линейные зависимости, коэффициенты которых являются постоянными для каждого типа турбин и определяют чувствительность характеристики к изменению режимных параметров.

Использование диаграммы режимов позволяет установить граничные условия работы турбогенератора, определяя минимально и максимально допустимые электрические нагрузки в зависимости от величин тепловых отборов. Такой подход обеспечивает адекватное математическое описание реальных процессов и создает основу для последующей оптимизации.

Современная концепция управления ТЭЦ интегрирует в себе множество разнородных факторов. Экономическая эффективность предприятия напрямую увязана с конъюнктурой оптового и розничного рынков электроэнергии и тепла, что делает оптимизационное планирование приоритетным направлением деятельности.

Под приоритетными режимами эксплуатации теплоэнергетического оборудования понимаются такие условия его работы в энергосистеме, которые характеризуются максимальной экономической или операционной эффективностью для предприятия в различные временные интервалы. Критерии для выбора этих режимов включают:

1. Технические показатели: коэффициент использования установленной мощности, относительная продолжительность работы, требования к маневренным возможностям генерирующих агрегатов.

2. Экономические показатели: маржинальная прибыль, рентабельность и себестоимость генерации. Эти показатели напрямую зависят от цен на топливо, электроэнергию на оптовом (ОРЭМ) и розничных рынках, а также от тарифов на тепловую энергию.

3. Рыночная конъюнктура: цены на электроэнергию в разные часы суток и сезоны года кардинально меняются. Приоритетным становится режим, при котором максимизируется выручка от продажи электроэнергии в «пиковые» часы высокой цены, даже если это требует работы оборудования с неполной тепловой нагрузкой или вынужденной выработки тепла в пиковых водогрейных котлах.

4. Экологические ограничения: нормативы по выбросам загрязняющих веществ и система квот зачастую определяют выбор вида топлива и технологические решения, ограничивая возможные режимы эксплуатации.

Формирование этих приоритетных режимов является комплексной задачей, требующей учета множества взаимосвязанных факторов. Ключевыми из них являются:

1. Структура тепловой и электрической нагрузки: Сезонные и суточные графики потребления тепла и электроэнергии являются основным драйвером для планирования режимов ТЭЦ.

2. Конъюнктура оптового рынка электроэнергии и мощности (ОРЭМ/ОРЭ): Цены на электроэнергию в разные часы суток и в разные сезоны года кардинально меняются. Приоритетным становится режим, при котором максимизируется выручка от продажи электроэнергии в «пиковые» часы высокой цены, даже если это требует работы оборудования с неполной тепловой нагрузкой.

3. Техническое состояние и тип оборудования: Парогазовые установки (ПГУ) обладают высокой гибкостью и эффективностью, тогда как паровые турбины с противодавлением имеют жесткую связь между выработкой тепла и электроэнергии. Это фундаментально ограничивает возможные режимы их эксплуатации [3].

Таким образом, задача анализа режимных требований к агрегатам ТЭЦ должна решаться комплексно, с учетом необходимости одновременного выбора состава оборудования и распределения нагрузок в условиях неполной информации. Внедрение цифровых двойников, систем предиктивной аналитики и программного обеспечения для краткосрочного и среднесрочного планирования позволяет перейти от реактивного управления к проактивному, определяя наиболее выгодные приоритетные режимы эксплуатации ТЭЦ на сутки, неделю или даже отопительный сезон вперед. Необходимость проведения многовариантных расчетов с применением комплекса взаимосвязанных математических моделей, адаптированных к современным рыночным условиям.

Литература

1. Яковлев Б.В. Повышение эффективности теплофикации и теплоснабжения / Б.В. Яковлев. – М.: Новости теплоснабжения, 2008г. – 448с. – ISBN 5-94296-015-1.
2. Андрущенко А.И, Аминов Р.З.. Оптимизация режимов работы и параметров тепловых электростанций. – МВ Ввiсшая школа, 1983.-255 с. ил.
3. Тепловые электрические станции: учебник для вузов./ В.Д. Буров, Е.В. Дорохов, Д.П. Елизаров и др.; под ред. В.М. Лавыгина, А.С. Седлова, С.В. Цанева. – 3-е издание, стереот.- М.: Издательский дом МЭИ, 2009г. -466с.: ил.

*А.Е. Куликов, студ.; И.А. Кабанова, к.т.н., доц.
(филиал ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» в г. Смоленске)*

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ И НАДЁЖНОСТИ ТЕПЛОГЕНЕРИРУЮЩИХ УСТАНОВОК ПУТЁМ ВНЕДРЕНИЯ КОНТАКТНЫХ ТЕПЛОУТИЛИЗАЦИОННЫХ УСТАНОВОК

Современная промышленность сталкивается с необходимостью минимизировать воздействие на окружающую среду, что связано с проблемой правильного использования энергоресурсов и сокращения выбросов загрязняющих веществ. Энергетический сектор различных производств, помимо химического воздействия, характеризуется значительными тепловыми потерями, которые не только ведут к экономическому ущербу, но и способствуют тепловому загрязнению атмосферы и водоемов.

Тепловое загрязнение представляет собой форму физического воздействия на окружающую среду, характеризующуюся повышением температуры выше естественного уровня. Основными источниками теплового загрязнения являются сброс подогретых вод с промышленных предприятий и ТЭЦ, а также выбросы горячих газов в атмосферу. Для водных экосистем повышение температуры даже на несколько °С приводит к серьезным последствиям, а именно: уменьшается растворимость кислорода в воде, что вызывает кислородное голодание гидробионтов; увеличивается токсичность некоторых загрязняющих веществ и т.д. Для атмосферы тепловое загрязнение способствует образованию тепловых куполов над промышленными центрами, изменяет локальные климатические условия и усиливает фотохимические реакции, приводящие к образованию смога [1].

Химическое загрязнение окружающей среды подразумевает привнесение в экосистемы химических веществ, несвойственных им или находящихся в концентрациях, превышающих естественный фоновый уровень. Это один из наиболее опасных видов антропогенного воздействия, поскольку многие химические соединения способны накапливаться в пищевых цепях и оказывать долгосрочное негативное влияние на здоровье человека и состояние экосистем. Основными загрязнителями атмосферы от энергетических установок являются твердые частицы (зола), оксиды серы (SO_2), оксиды азота (NO_2), диоксид углерода (CO_2) и тяжелые металлы.

По этой причине востребованными становятся технологии, направленные на утилизацию бросового тепла и нейтрализацию вредных химических соединений. Контактные теплоутилизационные установки представляют собой эффективный инструмент для решения данной задачи, поскольку их применение позволяет не только повысить общий КПД энергетической системы предприятия, но и внести весомый вклад в снижение углеродного следа и теплового загрязнения за счёт сокращения потребления первичного топлива и использования вторичных энергоресурсов (ВЭР).

Эффективность использования ВЭР и экологическая безопасность зависят также от химического состава самих продуктов сгорания, который в свою очередь зависит от применяемого вида топлива. Ключевыми видами топлива для теплогенераторов технических производств являются уголь и природный газ, каждый из которых формирует специфический набор загрязняющих веществ. Так при сжигании угля, содержащего серу и золу, в дымовых газах присутствуют значительные концентрации оксидов серы (SO_2 , SO_3) и азота (NO_2), а также твёрдые частицы золы. Природный газ является более чистым видом топлива, но его продукты сгорания также содержат оксиды азота, а ряд его месторождений и сернистые соединения, что приводит к образованию оксидов серы [2].

Главную опасность для оборудования при конденсации водяных паров из дымовых газов представляет низкотемпературная сернокислотная коррозия. При охлаждении газов ниже точки росы выделяется триоксид серы (SO_3), который, взаимодействуя с парами воды, приводит к образованию H_2SO_4 . Данный процесс возможен при утилизации тепла котлоагрегатов, работающих как на угле,

так и на природном газе. Образующаяся серная кислота вызывает интенсивное разрушение металлических поверхностей традиционных рекуператоров, снижая их надежность и срок службы, а ее выбросы усугубляют проблему кислотных дождей, нанося серьёзный вред экологии.

Таким образом, задача утилизации бросового тепла усложняется необходимостью нейтрализации агрессивных компонентов. Именно контактные теплоутилизационные установки (КТАН) предлагают комплексный подход к решению этой проблемы, позволяя совместить процесс теплосъема с абсорбцией вредных примесей, что открывает путь к созданию более безопасных и экологических производственных систем.

Контактный теплоутилизатор работает следующим образом. В аппарате имеется активная насадка, которая способствует интенсификации теплообмена между дымовыми газами и охлаждающей водой путём впрыска орошающей воды. В ходе теплообмена дымовые газы отдают тепло к охлаждающей воде не только за счёт охлаждения, но и за счёт их скрытой теплоты парообразования (конденсации). Охлаждённые продукты сгорания, проходя через сепарационное устройство, удаляются из аппарата при помощи дымососа, а нагретая в процессе теплообмена охлаждающая вода может быть использована на различные нужды.

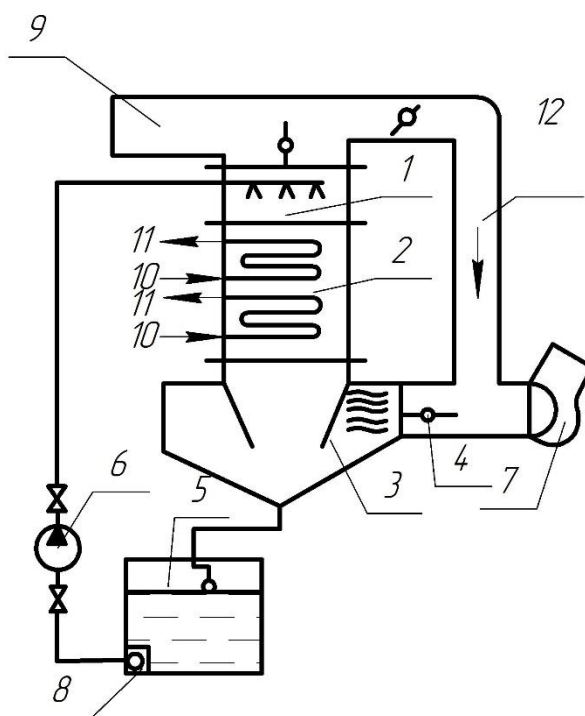


Рисунок 1 – Принципиальная схема контактного теплоутилизатора:

1 – система орошения; 2 – блок насадок; 3 – сепаратор; 4 – заслонка; 5 – бак орошающей воды; 6 – насос; 7 – дымосос; 8 – фильтр; 9 – основной газоход; 10, 11 – вход и выход нагреваемой воды; 12 – байпасный газоход.

Процесс конденсации играет ключевую роль в механизме удаления примесей из дымовых газов. Данный механизм работает следующим образом. Сконденсировавшиеся водяные пары абсорбируют диоксиды азота и серы, а

также триоксид серы, который мгновенно гидратируется до серной кислоты. NO_2 димеризуется и реагирует с образованием смеси азотистой и азотной кислот. Растворённый в воде SO_2 также способен окисляться кислородом, растворённым в воде, образуя H_2SO_4 . Образующиеся кислоты нейтрализуются путём добавления в орошающую воду щелочных реагентов (к примеру, гидроксид натрия NaOH или оксид магния MgO), после чего могут быть отведены на очистные сооружения. Образующийся конденсат также способствует коагуляции золы и сажи [3].

Для определения эффективности был проведён тепловой расчёт. В ходе расчёта были получены следующие результаты.

Таблица 1 – Результаты расчёта

Параметр	V , $\text{м}^3/\text{с}$	$Q_{\text{КА}}$, кВт	$V_{\text{Г}}$, $\text{м}^3/\text{м}^3$	Q , кВт
Величина	0,515	17075	13,360	1911,084

Результаты выполненных расчётов показывают, что применение теплоутилизатора позволяет получить значительное количество теплоты. А именно, для выбранных исходных параметров топлива и котлоагрегата, полученная теплота Q составляет практически 2000 кВт, что в свою очередь позволяет применять данную теплоту на различные производственные нужды в качестве ВЭР.

Экологический же эффект такой технологии носит комплексный характер. Снижение температуры выбросов непосредственно уменьшает тепловое загрязнение атмосферы, а конденсация значительного объема водяных паров приводит к дополнительному теплосъёму. Химическое загрязнение снижается за счет удаления из продуктов сгорания наиболее агрессивных компонентов — оксидов серы и азота. Таким образом, установка выполняет функцию не только теплоутилизатора, но и газоочистного сооружения начальной ступени.

Так внедрение контактных теплоутилизационных установок создаёт синергетический эффект, объединяющий энергосбережение, экологическую безопасность и повышение эксплуатационной надёжности энергетической системы. Данная технология представляет собой комплексное решение для модернизации промышленных предприятий в контексте устойчивого развития и ресурсосбережения, обеспечивая одновременное достижение значительной экономии энергоресурсов, снижение негативного воздействия на окружающую среду и повышение долговечности оборудования.

Литература

1. Дерябин, В.А. Экология: учебное пособие / В.А. Дерябин, Е. П. Фарафонтнова. — Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2016. — 136 с.
2. Кожевникова Е. Е. Геология и геохимия нефти и газа: учебное пособие / Пермский государственный национальный исследовательский университет. – Пермь, 2020. – 90 с.
3. Кудинов А.А. Энергосбережение в теплогенерирующих установках. - Ульяновск: УлГТУ, 2000.-139 с.

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ ГИБРИДНОЙ СИСТЕМОЙ УТИЛИЗАЦИИ ТЕПЛА ЦОД ДЛЯ НУЖД ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ

Современные центры обработки данных (ЦОД) являются критической инфраструктурой цифровой экономики, однако их энергопотребление достигает колоссальных величин. До 40-50% электроэнергии, потребляемой ЦОД, преобразуется в тепловую энергию, которая в большинстве случаев просто рассеивается в атмосферу через системы чиллеров или градирен [1]. Это приводит к значительным экономическим потерям и увеличению углеродного следа. Одновременно с этим существует постоянная потребность в тепловой энергии для нужд отопления и горячего водоснабжения (ГВС) как самих зданий ЦОД, так и прилегающих жилых или коммерческих кварталов. Утилизация тепла вычислительных серверов – очевидное и перспективное направление повышения энергоэффективности. Однако существующие решения, такие как простые теплообменники «воздух-вода», обладают существенным недостатком: их эффективность резко падает при низких температурах теплоносителя со стороны потребителя или при неполной нагрузке ЦОД. Кроме того, они не способны гибко перераспределять потоки энергии между различными источниками и потребителями.

Традиционные системы охлаждения ЦОД можно условно разделить на: **прямое охлаждение**: наружный воздух используется напрямую (недостаток: зависимость от климата, низкая температура теплового потенциала для утилизации); и **системы с промежуточным контуром**: тепло от серверов передается жидкостному контуру, который в дальнейшем охлаждается чиллером или градирней (такая система более пригодна для утилизации, но управляется, как правило, по простейшим температурным графикам).

Основная **проблема** – несоответствие между нестабильным, переменным во времени тепловыделением ЦОД и столь же переменной потребностью в тепле у внешних потребителей (рис.1). Существующие системы не обладают необходимой гибкостью, что приводит к неполной утилизации тепла или необходимости его сброса. **Задача управления** формулируется следующим образом: разработать такой алгоритм работы гибридной системы, который в любой момент времени будет обеспечивать приоритетное и максимально эффективное использование тепла ЦОД для покрытия тепловой нагрузки, минимизируя использование энергии пикового догревателя и собственных энергозатрат системы (электроэнергия на насосы и компрессор теплового насоса) [2].

Предлагаемая к рассмотрению гибридная система включает в себя следующие ключевые элементы:

- **источник тепла (ИТ)**: серверные стойки ЦОД с системой жидкостного охлаждения (холодная вода 20°C -> горячая вода 45-50°C);

- **промежуточный контур утилизации:** теплообменник, забирающий тепло от контура ЦОД; **тепловой насос (ТН):** повышает температурный потенциал тепла от ЦОД (до 60-70°C) для возможности его использования в системе отопления;
- **бак-аккумулятор (БА):** накопитель тепловой энергии, сглаживающий дисбаланс между генерацией и потреблением;
- **пиковый догреватель (ПД):** газовый или электрический котел, включающийся при недостатке тепла от ЦОД и ТН;
- **система теплотребления (СТ):** отопление и ГВС зданий.

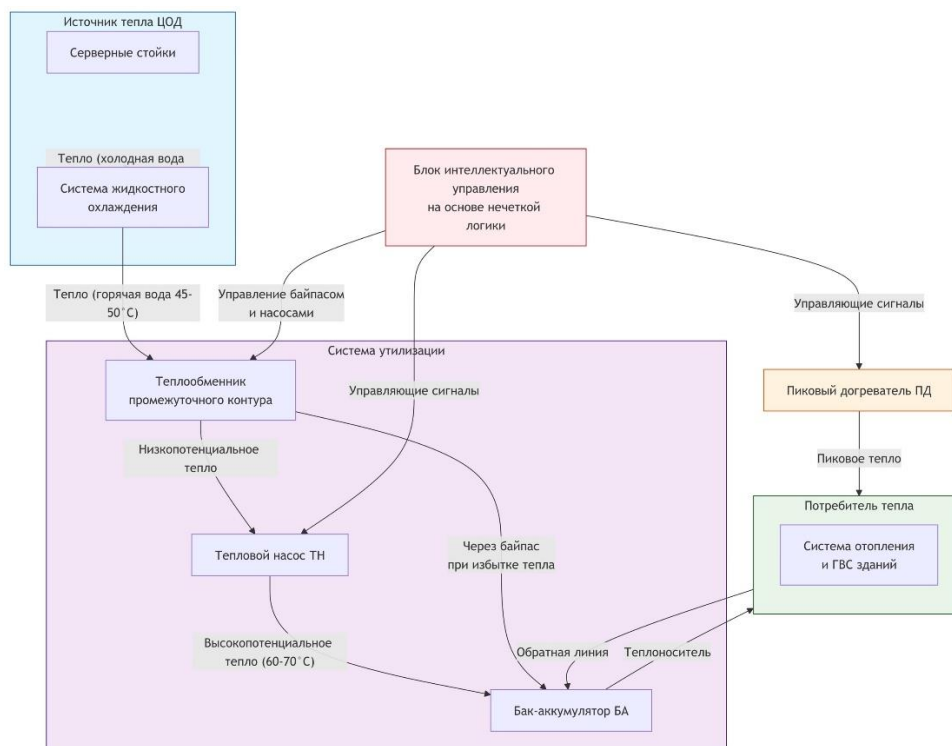


Рисунок 1 – Схема гибридной системы утилизации тепла ЦОД

Гибридность системы заключается в комбинации трех источников тепла: прямого (от утилизации), преобразованного (через ТН) и резервного (ПД). Ядром предлагаемого решения является алгоритм на основе **нечеткой логики (Fuzzy Logic)**. Данный выбор обусловлен его способностью работать с неточными входными данными и нелинейными зависимостями, что характерно для описываемой системы.

Входные переменные для блока нечеткого вывода:

- $\Delta T_{\text{аккумулятор}}$ – отклонение температуры в баке-аккумуляторе от заданного значения (например, «Отрицательное», «Нулевое», «Положительное»);
- $Q_{\text{ЦОД}}$ – текущая тепловая нагрузка ЦОД («Низкая», «Средняя», «Высокая»);
- $Q_{\text{потребление}}$ – текущая тепловая нагрузка потребителя («Низкая», «Средняя», «Высокая»);
- $T_{\text{наружная}}$ – температура наружного воздуха («Низкая», «Средняя», «Высокая»).

Выходные переменные:

- мощность_ТН – управляющее воздействие на производительность теплового насоса («Уменьшить», «Поддерживать», «Увеличить»);

- состояние_ПД – управление пиковым догревателем («Выкл», «Половина мощности», «Полная мощность»); приоритет_потока – направление потоков теплоносителя (например, «Через ТН», «Напрямую в БА», «В сброс»).

Алгоритм работает в реальном времени, непрерывно опрашивая датчики и пересчитывая оптимальные управляющие воздействия. **Ключевые результаты:** коэффициент утилизации тепла (КУТ) в системе с нечетким управлением составил в среднем 78%, против 60% в традиционной системе; время работы пикового догревателя сократилось на 35%; суммарное энергопотребление системы (ТН + насосы) снизилось на 12% за счет более оптимальных режимов работы ТН; общая экономическая эффективность за отопительный период, по предварительным оценкам, возросла на 18-25% [3].

В статье была рассмотрена актуальная проблема повышения энергоэффективности центров обработки данных (ЦОД) за счет утилизации низкопотенциального тепла, выделяемого серверным оборудованием. Проанализированы недостатки существующих систем утилизации, в частности, их неспособность адаптироваться к переменным нагрузкам ЦОД и внешним климатическим условиям. Предложена гибридная система, сочетающая тепловые насосы, теплообменники промежуточного контура и пиковый догреватель. Разработан оригинальный алгоритм интеллектуального управления на основе нечеткой логики, который в реальном времени оптимизирует режимы работы системы, максимизируя коэффициент утилизации тепла (КУТ) и минимизируя эксплуатационные затраты. Приведена математическая модель системы и представлены результаты имитационного моделирования, подтверждающие повышение эффективности на 18-25% по сравнению с традиционным релейным управлением. Была доказана принципиальная возможность и высокая эффективность применения интеллектуального управления на основе нечеткой логики для гибридных систем утилизации тепла ЦОД. Внедрение подобных систем может стать новым стандартом для строительства экологичных и экономичных ЦОД («зеленых ЦОД») в условиях растущих тарифов на энергоресурсы. **Дальнейшие исследования** планируется направить на интеграцию в алгоритм предиктивных моделей, основанных на прогнозе погоды и анализе расписания вычислительной нагрузки ЦОД, что позволит перейти от реактивного к проактивному управлению.

Литература

1. Соколов Е.Я., Бродянский В.М. Энергетические основы трансформации тепла и процессов охлаждения: Учеб.пособие для вузов. - 2-е изд, перераб. - М., Энергоиздат, 1981. - 320 с.
2. Кузнецов О.А., Горюнов О.А., Жебрак Ю.А., Байков И.Р. Использование вторичных энергоресурсов на газотурбинных КС //Газовая промышленность. - 2002. - №ISSN: 0016-5581. - С. 58-60.
3. Иванов А.А. Энергосбережение в промышленности. М.: Техносфера, 2022.

СЕКЦИЯ 4

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ПРОИЗВОДСТВЕ И СТРОИТЕЛЬСТВЕ

*М.А. Андреев, ст. преп.; И.С. Гришин; Г.С. Родяхин; В.В. Шеховцов
(Филиал ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» в г. Смоленске)*

ОБНАРУЖЕНИЕ АНОМАЛИЙ В РАБОТЕ ФИЗИЧЕСКОГО ОБЪЕКТА С ПОМОЩЬЮ АЛГОРИТМА ISOLATION FOREST

Современные физические объекты – промышленные установки, энергетические системы, транспортные средства и другие технические комплексы – характеризуются высокой степенью автоматизации и сложностью внутренней структуры. Надежность и стабильность их функционирования напрямую зависят от способности своевременно выявлять аномальные состояния (шаблоны данных, имеющих характеристики, отличные от нормальных экземпляров), которые могут быть предвестниками отказов или аварийных ситуаций. Классические методы диагностики зачастую оказываются недостаточно гибкими для обработки больших объемов данных и обнаружения нетривиальных аномалий, что делает актуальным применение алгоритмов интеллектуального анализа данных и машинного обучения.

Значительным достижением в области поиска аномалий стало создание алгоритма «Isolation Forest», являющегося на сегодняшний день одним из наиболее эффективных инструментов для этой задачи. В отличие от традиционных методов, основанных на плотности распределения или расстоянии между точками, данный алгоритм использует принцип изоляции аномалий: чем легче наблюдение изолировать от остальной части данных, тем выше вероятность того, что оно является аномальным. Этот подход хорошо масштабируется, обладает высокой вычислительной эффективностью и не требует предварительного знания распределения данных, что особенно важно при мониторинге реальных физических объектов.

Применение алгоритма «Isolation Forest» позволяет автоматизировать процесс выявления нештатных состояний оборудования, минимизировать влияние человеческого фактора и повысить точность прогнозирования потенциальных отказов. Таким образом, разработка и внедрение алгоритмов для обнаружения аномалий представляют собой важное направление развития современных технологий технической диагностики.

Рассмотрим реализацию алгоритма. Процесс начинается с определения входного множества $X = \{x_1, \dots, x_n\}$ – набора точек в d -мерном пространстве. Далее строится дерево изоляции $iTree$, состоящее из узлов T со следующими свойствами: T является внешним узлом без потомков; T является внутренним узлом с одной проверкой и ровно двумя дочерними узлами T_l и T_r . Под проверкой на узле T подразумевается сравнение двух атрибутов: q – случайно выбранного значения из столбцов данных и p – случайного значения между мак-

симальным и минимальным элементом выборки. Проверка условия $q < p$ определяет, в какую ветвь (T_l или T_r) будет направлена точка данных [1].

Алгоритм продолжает дробить данные множества X , пока в результате не будут сформированы узлы, в которых все элементы имеют одинаковые значения, либо дерево достигнет предельной высоты $|X| = 1$.

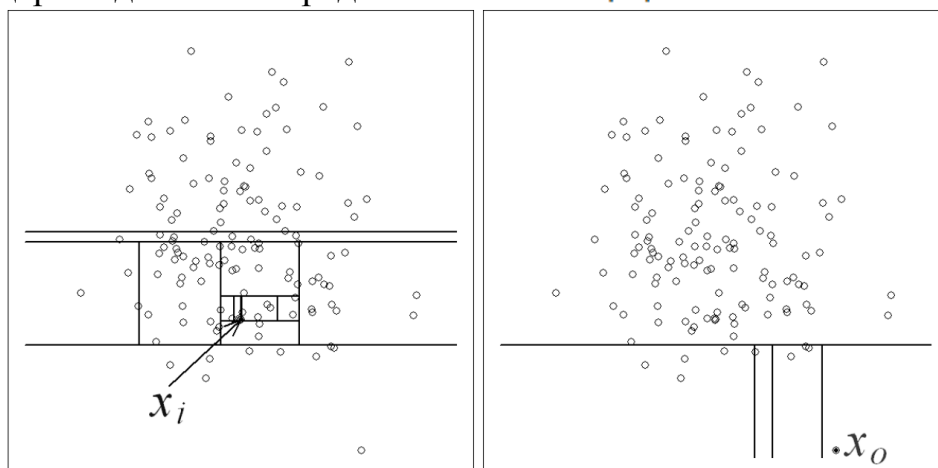


Рисунок 1 – Изоляция аномального и неаномального значения

Задача обнаружения аномалий состоит в том, чтобы предоставить ранжирование, отражающее степень аномальности. Таким образом, один из способов обнаружения аномалий – это сортировка точек данных в соответствии с их длинами путей или оценками аномальности; и аномалиями являются точки, которые находятся вверху списка [1].

Алгоритм «Isolation Forest» обладает рядом характерных свойств, определяющих области его эффективного применения. Одним из ключевых преимуществ является возможность работы с малыми выборками данных. Поскольку метод не требует полного описания «нормального» поведения системы, он может успешно функционировать на субдискретизированных данных, игнорируя значительную часть обучающей выборки без потери качества обнаружения аномалий.

Однако алгоритм сталкивается с определенными ограничениями, такими как проблемы перегруженности и маскировки. Перегруженность возникает, когда нормальные и аномальные показатели расположены слишком близко друг к другу, что увеличивает количество необходимых разбиений и затрудняет идентификацию выбросов. Маскировка проявляется при наличии большого количества аномалий, которые могут образовывать плотные кластеры, скрывая отдельные аномальные точки. Обе эти проблемы могут быть решены путем уменьшения размера выборки.

На применение алгоритма влияет еще один немаловажный фактор. «Isolation Forest» не является алгоритмом потоковой обработки данных. Однако он идеально подходит для почти реального времени (near real-time) в рамках двухэтапного процесса, который доминирует в промышленных решениях.

Классическая схема работы представляет собой процесс обучения и последующего применения обученных изоляционных деревьев. Построение i Trees может занять некоторое время, в зависимости от размера выборки, но после за-

вершения данные с датчиков можно сразу же пропускать через деревья, анализируя длину пути.

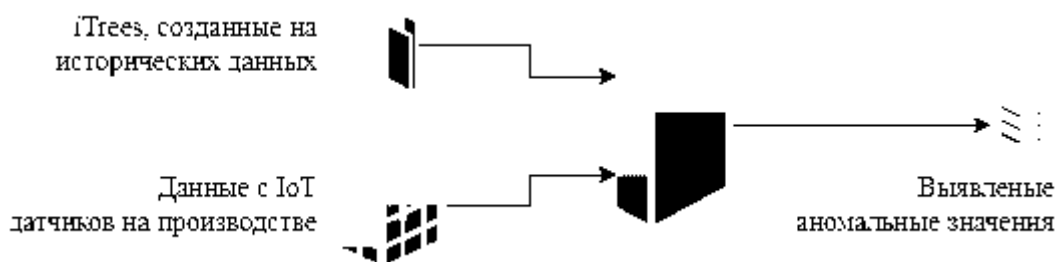


Рисунок 2 – схема процесса сбора и анализа данных с применением Isolation Forest

Алгоритм «Isolation Forest» – это простой в реализации и высокоэффективный алгоритм анализа, применимый к большому объему данных. Он не опирается на свойства распределения, а использует идею изолирования. Для работы не требуются предварительные предположения о данных.

Применение алгоритма «Isolation Forest» позволяет эффективно решать задачу выявления аномалий без необходимости сложной предварительной подготовки данных или строгих статистических предположений. Алгоритм прост в реализации, устойчив к шуму и масштабируется на большие массивы данных, что делает его практичным инструментом для анализа систем с высокой динамикой. Благодаря способности выявлять выбросы на основе структуры дерева изоляции, модель может своевременно сигнализировать о возможных нарушениях или изменениях состояния объекта. Это повышает надёжность и адаптивность системы анализа данных, что особенно важно в условиях современных производственных и технологических процессов.

Литература

1. Лю Ф. Т., Тинг К. М., Чжоу Ч.-Х. Изолирующий лес // Восьмая Международная конференция IEEE по интеллектуальному анализу данных (ICDM 2008): материалы конф. – 2008. – Декабрь. – С. 413–422.

*М.А. Андреев, ст.преп.; И.С. Гришин; Г.С. Родяхин; В.В. Шеховцов
(Филиал ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» в г. Смоленске)*

АЛГОРИТМЫ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ КАК ЯДРО DATA-DRIVEN ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА

Современные промышленные системы становятся всё более сложными и изменчивыми, что требует внедрения интеллектуальных методов управления, диагностики и прогнозирования. Одним из ключевых инструментов, отвечающих этим задачам, является концепция цифрового двойника (Digital Twin) – виртуальной модели реального объекта, отображающей его текущее состояние и поведение в реальном времени. Такая модель позволяет анализировать процессы, проводить эксперименты и прогнозировать развитие событий без вмешательства в работу оборудования.

Особую роль занимают цифровые двойники, построенные на основе данных (data-driven), где основой служат реальные сведения, поступающие от датчиков, SCADA-систем и других источников. Такой подход делает модель

гибкой, адаптивной и менее зависимой от физических уравнений. Важнейшим компонентом анализа информации в цифровом двойнике являются алгоритмы машинного обучения, которые позволяют выявлять закономерности, прогнозировать изменения и автоматически реагировать на внешние воздействия [1].

Машинное обучение формирует интеллектуальное ядро цифрового двойника, определяя его способность адаптироваться к новым условиям. От качества модели зависит точность прогнозов, устойчивость к шуму и полнота отражения реального процесса. При обучении используются как исторические данные, так и потоковая информация, поступающая в режиме реального времени. Это позволяет цифровому двойнику не только воспроизводить текущее состояние, но и предугадывать будущие события.

Одним из ключевых направлений применения машинного обучения в цифровых двойниках является прогнозирование временных рядов. Такие модели позволяют предсказывать изменение параметров оборудования и технологических процессов, что даёт возможность заранее выявлять возможные сбои и оптимизировать обслуживание. Среди методов, применяемых для подобных задач, особое место занимают нейронные сети LSTM (Long Short-Term Memory), которые способны учитывать длительные зависимости во временных данных. Их архитектура основана на системах врат, управляющих потоками информации внутри сети: врата забвения определяют, какие прошлые данные стоит исключить, входные врата – что добавить из текущего состояния, а выходные врата формируют итоговый прогноз.

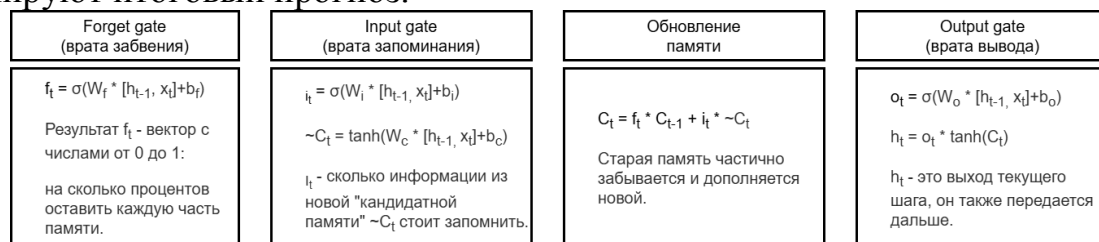


Рисунок 1 – Математическая формулировка работы LSTM

LSTM-сети широко применяются в промышленности для прогнозирования температуры, вибрации, износа и других параметров, позволяя цифровому двойнику своевременно реагировать на потенциальные отклонения и корректировать режимы работы оборудования.

Другим важным направлением является классификация – автоматическое определение состояния системы или типа неисправности на основе наблюдаемых данных. Одним из эффективных алгоритмов такого типа является Random Forest, представляющий собой ансамбль решающих деревьев. Каждый элемент ансамбля обучается на случайном подмножестве данных и признаков, а итоговое решение принимается большинством голосов деревьев. Такой подход снижает риск переобучения и повышает стабильность результата [2].

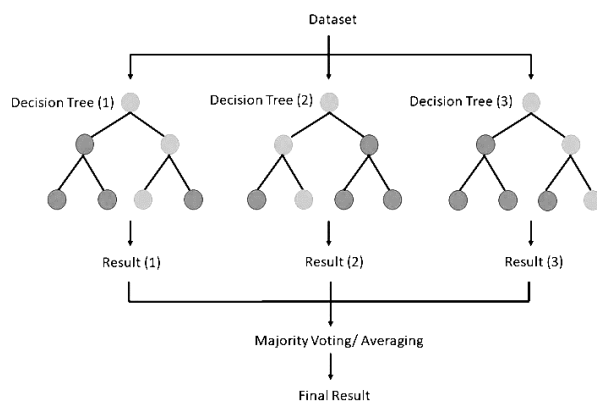


Рисунок 2 – Принцип работы алгоритма «Random Forest»

Random Forest широко используется в задачах диагностики и классификации, где требуется надёжная оценка состояния оборудования. Алгоритм позволяет цифровому двойнику не только определять тип неисправности, но и оценивать вероятность её возникновения.

Применение машинного обучения в цифровых двойниках открывает широкие возможности для разных отраслей. В машиностроении это помогает контролировать техническое состояние оборудования, прогнозировать износ и предотвращать поломки. В энергетике – оптимизировать распределение ресурсов и режимы работы систем. В транспорте – анализировать эксплуатационные данные и повышать надёжность транспортных средств. В медицине цифровые двойники позволяют моделировать физиологические процессы и прогнозировать эффективность лечения [3].

Внедрение алгоритмов машинного обучения в цифровые двойники знаменует новый этап развития промышленной аналитики. Интеллектуальные модели превращают цифровой двойник из статической копии физического объекта в динамическую систему, способную к самообучению, прогнозированию и оптимизации процессов. Благодаря применению методов, таких как LSTM и Random Forest, цифровые двойники получают возможность не только точно воспроизводить текущее состояние оборудования, но и предсказывать его поведение в будущем, выявлять скрытые зависимости и предотвращать неисправности ещё до их возникновения. Интеграция машинного обучения делает цифровые двойники ключевым элементом цифровой трансформации, обеспечивая рост эффективности, надёжности и адаптивности современных промышленных систем.

Литература

1. Tao F., Zhang M., Liu Y., Nee A.Y.C. Digital Twin Driven Smart Manufacturing. Academic Press, 2019.
2. Grieves M. Digital Twin: Manufacturing Excellence through Virtual Factory Replication. White Paper, 2014.
3. Goodfellow I., Bengio Y., Courville A. Deep Learning. MIT Press, 2016.

ПОВЫШЕНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ СЕТЕЙ К КИБЕРУГРОЗАМ: АНАЛИТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ И НАПРАВЛЕНИЯ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ МЕХАНИЗМОВ ЗАЩИТЫ

Современная цифровая эпоха диктует высокие требования к телекоммуникационной инфраструктуре, которая служит основой функционирования не только бизнеса и государственного управления, но и социальной сферы. Нарастающая зависимость от цифровых сервисов приводит к тому, что телекоммуникационные сети становятся приоритетной целью для киберпреступников и иностранных угроз. Около 30% всех атак на инфраструктуру компаний были направлены на телеком-сектор [1]. В условиях гибридных угроз и активизации кибершпионажа, простая периметральная защита уже не обеспечивает требуемый уровень устойчивости.

Характер атак на отрасль становится всё более многоуровневым в связи с тем, что злоумышленники используют не только технические средства, но и социальную инженерию, атаки на цепочки поставок, внедрение вредоносного кода в оборудование, а также атаки нулевого дня, которые невозможно отследить с помощью сигнатурных методов. Количество атак с использованием сложной инфраструктуры (например, Cobalt Strike, Metasploit) увеличилось более чем на 60% за последние два года. Это требует не просто модернизации средств защиты, но и коренного изменения подхода к построению архитектуры безопасности [2].

В настоящее время в организациях используются преимущественно классические методы информационной безопасности, такие как использование межсетевых экранов, систем обнаружения атак (IDS/IPS), антивирусных решений и логирования событий. Однако практика показывает, что эти меры, будучи необходимыми, уже не способны справляться с современными угрозами. Их уязвимость к атакам, не имеющим известных сигнатур, и неспособность в реальном времени выявлять аномалии в поведении системы приводит к высоким задержкам в реагировании. Среднее время обнаружения вторжения в таких системах может достигать 207 дней [3]. Это создаёт огромные риски для сохранности данных и непрерывности бизнеса.

Основные проблемы существующих подходов:

- фокусировка на защите периметра, игнорируя угрозы внутри сети;
- ограничения в обнаружении новых, целевых атак;
- отсутствие возможности предиктивного анализа и проактивного реагирования;
- отсутствие интеграции с современными платформами корреляции и автоматизации инцидентов.

На рисунке 1 представлена тенденция роста числа киберинцидентов в телеком-секторе за последние годы. Это подтверждает необходимость перехода от реактивной к проактивной модели безопасности [1].

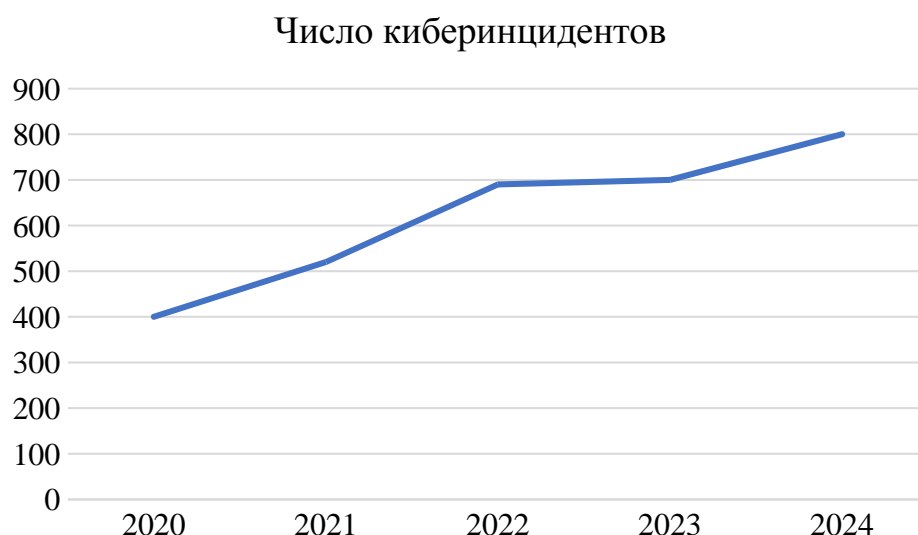


Рисунок 1 – Рост числа киберинцидентов в телекоммуникационной отрасли за 2019 - 2023 гг.

В ответ на эти вызовы предлагается комплексный подход, предполагающий построение **адаптивной многоуровневой архитектуры безопасности**, которая обеспечивает гибкость, устойчивость и автоматическое реагирование в условиях динамически изменяющихся угроз. Ключевыми элементами этой архитектуры являются, во-первых, **поведенческий анализ и машинное обучение**. В отличие от сигнатурных методов, машинное обучение анализирует поведение пользователей, устройств и сетевого трафика, выявляя аномалии, характерные для вредоносной активности. Такие модели тренируются на массиве логов и событий, распознают как типичные действия, так и отклонения, что позволяет в реальном времени блокировать потенциальные угрозы. Например, система, выявившая попытку загрузки больших объёмов данных в нерабочее время с аккаунта обычного пользователя, может инициировать автоматическое ограничение прав доступа.

Во-вторых, **концепция Zero Trust**. Принцип «недоверия по умолчанию» полностью меняет парадигму безопасности. Если ранее основное внимание уделялось защите периметра, то Zero Trust требует верификации каждой попытки доступа независимо от местоположения и роли субъекта. Все устройства, пользователи и сервисы считаются потенциально ненадёжными до момента доказательства обратного. Для реализации данной концепции требуется использование многофакторной аутентификации, микросегментации сети, постоянного мониторинга и анализа запросов на доступ [4].

В-третьих, системы класса SIEM (Security Information and Event Management) позволяют централизовать сбор и анализ логов, выявляя инциденты на основании корреляции событий. SOAR (Security Orchestration, Automation and Response) добавляет возможность автоматизации ответных действий – от создания тикета до блокировки узла. Такие решения позволяют не

только быстро реагировать на инциденты, но и выявлять сложные многоступенчатые атаки, маскирующиеся под легитимную активность [3].

И наконец, **модульная архитектура реагирования**. В рамках предложенного подхода архитектура строится по принципу микросервисов, каждый из которых способен функционировать автономно. При возникновении инцидента определённый модуль может быть изолирован от сети, перезапущен или переведён в безопасный режим без остановки всей системы. Это особенно актуально для операторов связи, где прерывание работы даже одной подсистемы может повлечь большие убытки. В таблице 1 представлены ожидаемые эффекты от внедрения этих компонентов архитектуры.

Таблица 1 – Ожидаемые эффекты от внедрения адаптивной многоуровневой архитектуры безопасности

Компонент архитектуры	Основная функция	Ожидаемый эффект
Анализ поведения	Отслеживание отклонений от нормальной сетевой активности	Выявление атак без известных сигнатур
Машинное обучение	Обучение на исторических данных и прогноз угроз	Предиктивная защита и сокращение времени реагирования
Zero Trust	Контроль доступа по принципу «недоверия по умолчанию»	Снижение риска внутренних угроз
SIEM/SOAR платформы	Корреляция событий и автоматизация реагирования	Повышение скорости и точности реагирования
Микросервисная модулярность	Изоляция и автономность компонентов системы	Устойчивость при локальных сбоях и атаках

Среди достоинств предлагаемых улучшений можно выделить несколько основных, а именно:

- высокая устойчивость к атакам нулевого дня;
- автоматическое обнаружение и реагирование на инциденты;
- гибкость и масштабируемость архитектуры;
- соответствие международным и национальным стандартам информационной безопасности;
- возможность интеграции с существующими системами.

Отдельного внимания заслуживает экономическая эффективность внедрения такой архитектуры. Несмотря на относительную сложность и ресурсоёмкость первоначального этапа, дальнейшая эксплуатация адаптивных систем требует меньших затрат на инцидент-менеджмент, снижает вероятность утечек данных и простоев. Согласно данным отчета Касперского, компании, внедрившие системы анализа поведения и автоматизированного реагирования, в среднем сокращают последствия атак на 30-50% [3].

Дополнительно можно выделить важность нормативного соответствия. В России всё большее значение придаётся обеспечению критической информационной инфраструктуры. Федеральный закон №187-ФЗ «О безопасности критической информационной инфраструктуры Российской Федерации» [4] устанавливает требования к защите критической информационной инфраструктуры, включая внедрение систем мониторинга и реагирования на инциденты информационной безопасности.

Федерации» требует от операторов связи реализации мер защиты, в том числе адаптивного мониторинга, анализа инцидентов и быстрого реагирования. Предлагаемая архитектура в полной мере соответствует этим требованиям и может быть интегрирована с системами госмониторинга.

Учитывая приведённые аргументы, можно заключить, что переход к адаптивной модели киберзащиты с использованием поведенческого анализа, машинного обучения, принципов Zero Trust и платформ SIEM/SOAR является не просто инновацией, а необходимостью. Это единственный эффективный путь к обеспечению устойчивости телекоммуникационных систем в условиях нарастающих угроз.

Литература

- 1 Positive Technologies. Аналитика киберугроз 2023 [Электронный ресурс] // ptsecurity.com: URL: <https://www.ptsecurity.com/ru-ru/research/threatscape/> (дата обращения: 14.03.2025).
- 2 Group-IB. Ежегодный отчет о киберугрозах Hi-Tech Crime Trends 2023 [Электронный ресурс] // group-ib.ru: URL: <https://www.group-ib.ru/resources/threat-research/> (дата обращения: 14.03.2025).
- 3 Касперский, А. Аномалии как основа безопасности: подходы и кейсы [Электронный ресурс] // kasperskycontenthub.com: URL: <https://media.kasperskycontenthub.com> (дата обращения: 14.03.2025).
- 4 ФСТЭК России. Методические рекомендации по архитектуре Zero Trust [Электронный ресурс] // fstec.ru: URL: <https://fstec.ru/component/attachments/download/2762> (дата обращения: 14.03.2025).

Н.А. Верзун, к.т.н., доцент; М.О. Колбанёв, д.т.н., профессор; А.Р. Салиева (Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина))

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ АЛГОРИТМОВ АКУСТИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ ПРОМЫШЛЕННОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Внедрение технологий роботизации и автоматизации в промышленное производство ведет возникновению «заводов без людей» [1] и требует новых подходов к техническому обслуживанию автономно функционирующего оборудования [2].

В исследовании проводится сравнительный анализ трех подходов к решению задачи акустической диагностики неисправностей промышленного оборудования: алгоритм на основе обучения с подкреплением (Reinforcement Learning, RL), многоагентный ансамблевый алгоритм (Multi-Agent Acoustic Reasoning, MAAR) и динамически адаптируемый ансамбль агентов с генеративным усилением (Dynamically Adaptive Agent-based Generative Ensemble, DAAGE). Цель проведенного исследования: количественная и качественная оценка характеристик алгоритмов в контексте производственных сценариев. Экспериментальная апробация алгоритмов проведена на открытом датасете MIMI (Malfunctioning Industrial Machine Investigation and Inspection), включающем записи нормального и аномального функционирования оборудования в условиях контролируемых шумов [3].

Первый подход базируется на алгоритме обучения с подкреплением с использованием глубокой Q-сети (Deep Q-Network, DQN). В качестве входных признаков использовались мел-кепстральные коэффициенты (MFCC) и амплитудный спектр. RL-модель была реализована в виде единственного агента, принимающего решения на основе текущего состояния акустического сигнала.

Архитектура обеспечивает низкие вычислительные затраты и высокую скорость отклика, что делает её подходящей для применения во встроенных системах и микроконтроллерах.

Второй подход – MAAR, представляет собой ансамбль из четырёх специализированных агентов, каждый из которых анализирует определённую компоненту входного сигнала: временные характеристики, спектральное содержание, параметры окружающей среды и контекст. Такой метод обеспечивает устойчивость к фоновым шумам и возможность интерпретации принимаемых решений, благодаря модульной структуре и отдельной логике агентов [4]. Решения агентов агрегируются с использованием простых правил голосования или согласования.

Третий подход – DAAGE, расширяет архитектуру MAAR за счёт интеграции генеративной модели на базе модифицированной WaveGAN [5] для усиления обучающих данных. Адаптивное взвешивание вклада каждого агента реализуется с использованием DQN, что позволяет модели динамически подстраиваться под текущие условия среды. Генеративный модуль оптимизируется с использованием частотно-взвешенного регуляризатора. Механизм награды учитывает одновременно метрики качества (например, F1-мера), ложноположительные срабатывания, вычислительную нагрузку и устойчивость весов агентов. Данный подход направлен на компенсацию дисбаланса в данных и повышение адаптивности при работе с редкими типами отказов.

Сравнительный анализ показал:

1. DAAGE обеспечивает наивысшую точность (F1-мера 93.7%) благодаря генеративному усилению и адаптивному взвешиванию.

2. RL-алгоритм оптимален для ресурсно-ограниченных систем (150 МБ RAM, 0.25 сек).

3. MAAR обеспечивает стабильную работу в шумной среде с хорошей интерпретируемостью. Выбор алгоритма определяется приоритетами: максимальная точность (DAAGE), минимальные ресурсы (RL) или устойчивость к шумам (MAAR).

Литература

1. Будзинская О. В. "Безлюдное производство": страх или неизбежная реальность? // Инновации и инвестиции, № 10, 2018, С. 63-68.

2. Верзун Н. А., Колбанёв М. О., Салиева А. Р. Анализ перспектив обучения умных автономных логистических систем на основе оптимизации функции ценности. Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2024, т. 17, № 10, с. 28–39. doi:10.32603/2071-8985-2024-17- 10-28-39.

3. Purohit H., Koizumi Y., Harada N. MIMI Dataset: Sound Dataset for Malfunctioning Industrial Machine Investigation and Inspection. 2019. arXiv:1909.09347.

4. Верзун Н. А., Колбанёв М. О., Салиева А. Р. Многоагентный ансамблевый алгоритм акустического распознавания нарушений работоспособности автономного технологического оборудования // Информационно-управляющие системы. 2025. №3. С.14–24. doi:10.31799/1684-8853-2025-3-14-24.

5. Donahue C., McAuley J., Puckette M. Adversarial Audio Synthesis. ICLR 2019. arXiv:1802.04208.

ПРИМЕНЕНИЕ КОНФОРМНЫХ ОТОБРАЖЕНИЙ И ОБОБЩЁННЫХ ТЕЛЕГРАФНЫХ УРАВНЕНИЙ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ВЧ-СИГНАЛА В ОБОЛОЧКАХ СИЛОВЫХ КАБЕЛЯХ

Силовые кабели для энергосистемы – это важный и дорогостоящий актив, от которого зависит бесперебойное электроснабжение потребителей. Отказ кабельных линий (КЛ) влечёт за собой большие экономические потери и создаёт риски, связанные с безопасностью людей на техногенных объектах, относящихся к потребителям первой категории. Традиционные методы отыскания мест повреждений, например, измерение частичных разрядов, требуют отключения кабельной линии. Использование высокочастотных методов диагностики позволяют вести непрерывный онлайн-мониторинг, что позволит переходить от планового ремонта к ремонту по фактическому состоянию. При эксплуатации сложных и протяжённых систем такой метод диагностики позволит оперативно планировать техническое обслуживание и планирование ремонтов [1].

Принцип метода основан на использовании в математической модели изменения волновых параметров кабельной линии при измерениях на высоких частотах. Для передачи высокочастотного сигнала по КЛ определяющим значением будет влияние конструктивных особенностей силовых кабелей на распространение по ним электромагнитных волн. Чаще всего в распределительных сетях с изолированной нейтралью применяются трёхжильные кабели с металлической бронёй. Трёхжильный силовой кабель в этом случае можно считать частным случаем многопроводной электрической системы.

Основные требования для силовых кабелей, характеризующие применимость телеграфных уравнений для системы проводников, находящихся в диэлектрике:

- токоведущие жилы и металлическая броня считается прямолинейной;
- глубина проникновения поля для частоты свыше 30 кГц в 20 раз меньше радиуса кривизны, поэтому не оказывают влияние на токораспределение;
- верхний диапазон частот для расчёта 500 кГц.

Численный расчёт высокочастотных параметров силовых кабелей является затруднительным и на практике определяется экспериментальным путём. Значения километрического затухания и фазового коэффициента можно усреднить, так как их нахождение возможно по единым частотным зависимостям, но подобное усреднение допустимо для одиночной и однородной линии. Для кабелей напряжением 6-10 кВ в свинцовой или алюминиевой оболочке поверх поясной изоляции накладывается экран из полупроводящей бумаги. Наличие экрана позволяет осуществлять выравнивание напряжённости электрического поля, что повышает изоляционную прочность кабеля. В рамках рассматриваемой задачи будет произведено моделирование передачи высокочастотного сигнала по схеме «оболочка – жила».

Применительно к трёхжильному кабелю обобщённые телеграфные уравнения в матричной форме:

$$-\frac{d}{dx}(\dot{U})=[Z](\dot{I})$$

$$-\frac{d}{dx}(\dot{I})=[Y](\dot{U})$$

где:

(\dot{U}) и (\dot{I}) – матрицы напряжения и тока в каждой токопроводящей жиле кабеля относительно металлической брони;

$[Z]$ и $[Y]$ – матрицы сопротивления и проводимости силового кабеля.

Систему матричных телеграфных уравнений можно рассматривать как систему двух линейных дифференциальных уравнений первого порядка с постоянными коэффициентами, описывающими изменения тока и напряжения вдоль координаты X моделируемой линии. принимая равными матрицы тока и напряжения в начале линии равными. Таким образом, для схемы «жила – оболочка» постоянная распространения будет:

$$\gamma=\sqrt{Y(Z_{kk}+2Z_{ik})}$$

Уравнения для напряжения и тока в каждой жиле кабеля преобразуются в следующие выражения:

$$(\dot{U})=\frac{(\dot{U})_0\gamma_1+[Z](\dot{I})_0}{2\gamma_1}e^{-\gamma_1x}+\frac{(\dot{U})_0\gamma_1-[Z](\dot{I})_0}{2\gamma_1}e^{\gamma_1x}$$

$$(\dot{I})=\frac{(\dot{U})_0[Y]+\gamma_1(\dot{I})_0}{2\gamma_1}e^{-\gamma_1x}+\frac{(\dot{U})_0[Y]-\gamma_1(\dot{I})_0}{2\gamma_1}e^{\gamma_1x}$$

Конформное отображение является наиболее действенным методом определения полей, позволяющим учесть влияние границ сложной конфигурации. Сущность конформных преобразований при определении полей состоит в нахождении уравнения, связующего данное поле с другим, решение которого известно [2].

Рассмотренный метод в дальнейшем является универсальным, так как для силовых кабелей любой конфигурации отображающие функции строятся всегда в одном и том же симметричном виде. Например, для силовых кабелей разных сечений и видами изоляций (пластмассы, сшитый полиэтилен и т.п.), решение будет аналогичным. Итерационный алгоритм показанный на рисунке 1 описывает аппроксимацию сложных контуров с помощью эквивалентных круговых элементов. Процесс включает расчёт параметров, интерполяцию точек, вычисление погрешностей и корректировку повышения точности вычислений [3].

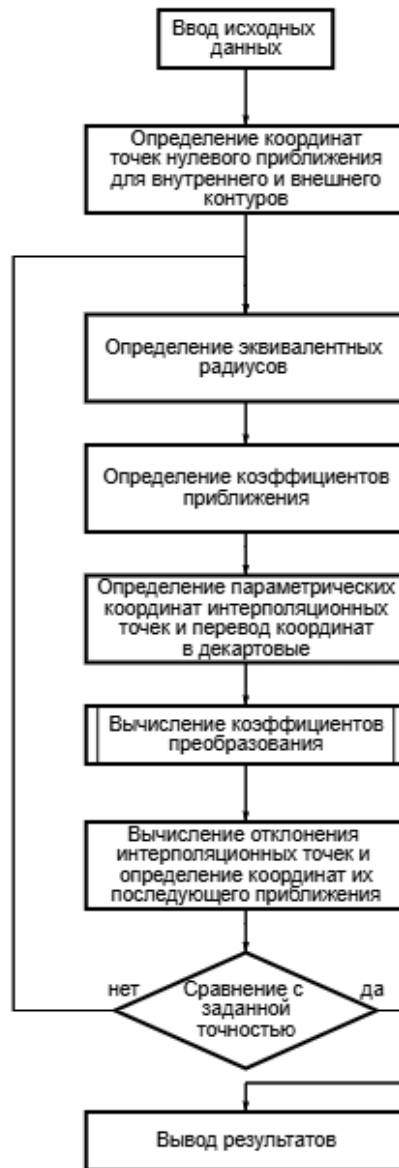


Рисунок 1 – Итерационный алгоритм параметрической аппроксимации контуров

Для автоматизации расчётов коэффициентов конформного преобразования необходимо представить внешний и внутренний контуры области волнового канала в формализованном виде. Поскольку описать их одним уравнением невозможно, за исключением внешнего контура, который является окружностью, в рассматриваемой модели кабеля воспользуемся способом разбиения контуров на отдельные участки с последующим аналитическим определением параметров каждого из них. Внутренний контур волнового канала разбивается на 6 участков – 4 дуги окружностей и два отрезка прямых линий, что показано на рисунке 2. Внешний контур волнового канала разбивается на 7 участков – 2 отрезка и 5 дуг окружностей.

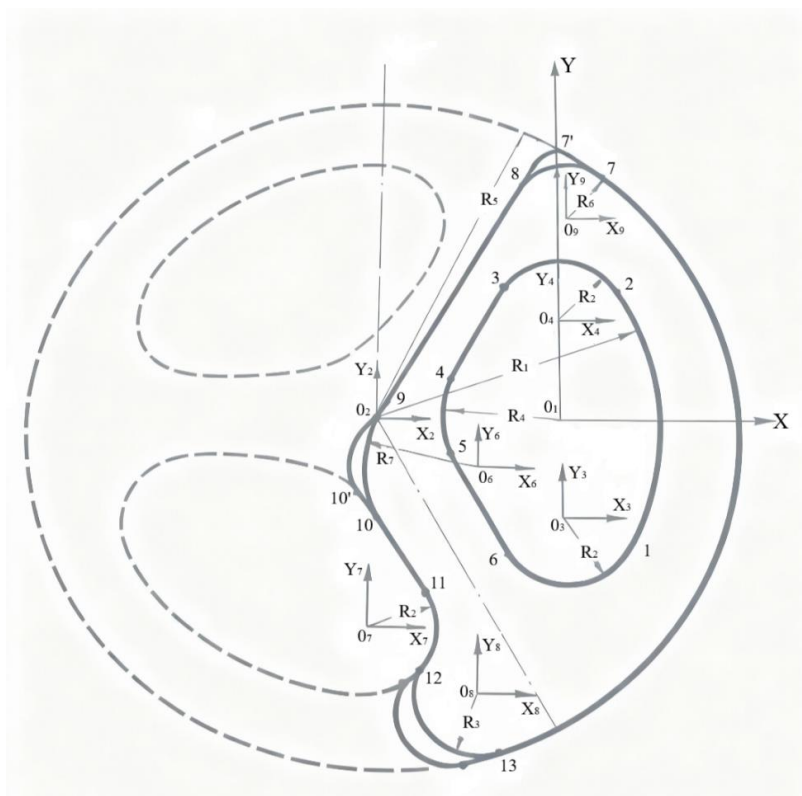


Рисунок 2 – Графическое отображение контуров области волнового канала модели кабельной линии в виде элементарных дуг окружностей

Метод конформного отображения применяется ко всему изоляционному слою кабеля, преобразуя его кольцевое сечение в сечение всего волнового канала. Радиус внешней окружности кольца при этом выбирается равным внутреннему радиусу оболочки.

Таблица 1 – Влияние экранирования трёхжильного силового кабеля на его волновые параметры

Проводимость изоляции, 1/Ом м	$1.1 \cdot 10^5$	$1.0 \cdot 10^4$	$1.0 \cdot 10^3$	Без экранирования
Коэффициент экранирования	4.14	1.79	1.19	1
Модуль и аргумент волнового сопротивления, Ом	32,3	31,50	31,5	33,41
Километрическое затухание, Дб/км	2,10	1,73	1,62	1,52
Фазовый коэффициент, рад/км	2,18	2,25	2,25	2,12

При рассмотрении вопроса передачи высокочастотного сигнала по броне силового кабеля важно учитывать, что существенное влияние на волновые параметры, особенно затухание, оказывает полупроводящий экран.

Проведённое моделирование демонстрирует эффективность использования математического аппарата обобщённых телеграфных уравнений в матричной

форме и метода конформных отображений для анализа возможности распространения высокочастотного сигнала в волновом канале «оболочка – жила» трёхжильного силового кабеля. Численно и экспериментально установлено, что наличие и проводимость полупроводящего экрана под оболочкой кабеля оказывают существенное влияние на его волновые параметры. В частности, экран с проводимостью порядка 1.1 может увеличивать километрическое затухание на 40% в низкочастотном диапазоне, что является важным фактором при проектировании систем диагностики. Результаты эксперимента применимы при использовании метода анализа переходных процессов (TDR/FDR – Time/Frequency Reflectometry), при котором возможно наиболее точное определение импеданса кабеля.

Литература

1. Девятков, Т. В. Применение имитационного моделирования при оперативном управлении сложными системами / Т. В. Девятков, В. В. Девятков, А. В. Габалин // Прикладная информатика. – 2023. – Т. 18, № 2(104). – С. 60-72. – DOI 10.37791/2687-0649-2023-18-2-60-72.
2. Атабаев, О. Х. Дифференциальные поля, задаваемые конформными отображениями: аналитические и теоретические аспекты / О. Х. Атабаев, Д. И. Мирзаева // Материалы 52-й Всероссийской научно-технической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов с международным участием, Октябрьский, 25–26 апреля 2025 года. – Уфа: Уфимский государственный нефтяной технический университет, 2025. – С. 480-483. – EDN PFTDFK.
3. Куликов, О. Е. АСОНИКА-ЭМС: моделирование электромагнитных процессов конструкций электроники / О. Е. Куликов, А. С. Шалумов, М. А. Шалумов // Автоматизация. Современные технологии. – 2020. – Т. 74, № 1. – С. 3-13. – EDN TSDIJV.

*В.Н. Денисов, д.т.н., доцент, М.А. Новикова, ст. преподаватель
(филиал ФБГОУ ВО «НИУ «МЭИ» в г. Смоленске)*

ВЛИЯНИЕ УТОЧНЕНИЯ НЕЛИНЕЙНОСТИ НА ОЦЕНКУ ХАРАКТЕРИСТИК КАВИТАЦИОННОГО ПУЗЫРЬКА

В работе исследуется вопрос учета влияния нелинейных эффектов на динамику кавитационного пузырька. Рассматривается как классическая нелинейная модель - уравнение Рэлея-Плессета, так и уточненная нелинейная модель. Уточнение нелинейности за счет введения слагаемого более высокой степени радиуса, связанной с большими амплитудами колебаний, теплопереносом, сжимаемостью жидкости и диффузией газа, позволяет получить более приближенные к реальным оценки критических характеристик: максимальных температур и давлений внутри пузырька, порогов кавитации, что имеет большое значение для современных приложений в медицине, промышленности и научных исследованиях [1].

Кавитация – образование, рост и коллапс пузырьков газа и пара в жидкости — это сложное физическое явление, лежащее в основе множества природных и технологических процессов [2]. Прогнозирование поведения кавитационного пузырька это насущная задача в диапазоне от гидродинамики судовых винтов до ультразвуковой очистки, от разрушения почечных камней до перспективных методов направленной доставки лекарств. Основой математического моделирования кавитации является уравнение Рэлея-Плессета и его модификации. В качестве основы для математического моделирования примем дифференци-

альные уравнения описывающее процесс расширения и сжатия кавитационной полости [3]:

$$(R\ddot{R} + 1,5\dot{R}^2)\rho + 4\mu\frac{\dot{R}}{R} - \left(P_{ст} - P_V + \frac{2\sigma}{R_0}\right)\frac{R_0^3}{R^3} - P_V + \frac{2\sigma}{R} - P_{зв}\sin\omega t + P_{ст} = 0 \quad (1)$$

где:

$P_{ст}$ – статическое давление в жидкости Па;

$P_{зв}$ – амплитудное звуковое давление, определяется параметрами ультразвуковой установки Па;

ρ – плотность среды кг/м³ ;

μ – динамическая вязкость Па · см;

P_V – давление насыщенных паров Па;

σ – поверхностное натяжение Н/м и дифференциальное уравнение для процесса сжатия кавитационной полости вида:

$$(R\ddot{R} + 1,5\dot{R}^2)\rho + 4\mu\frac{\dot{R}}{R} - \left[\left(P_{ст} - P_V + \frac{2\sigma}{R_0}\right)\frac{R_0^3}{R_{max}^3} + P_V\right]\frac{R_{max}^4}{R^4} + \frac{2\sigma}{R} - P_{зв}\sin\omega t + P_{ст} = 0 \quad (2)$$

Начальные условия для процесса расширения имеют вид:

$$t = 0, R = R_0, \dot{R} = 0,$$

Для процесса схлопывания начальные условия принимают в виде:

$$t = t_{расш}, R = R_{max}, \dot{R} = 0,$$

$t_{расш}$ – время расширения кавитационной полости.

При осуществлении моделирования преобразуем дифференциальные уравнения (1), (2) к нормальным системам дифференциальных уравнений, записанным в безразмерном виде с учетом параметров обезразмеривания:

$$R = \tilde{R} \cdot R_0, t = \tau \cdot \tau_0,$$

где $R_0 = 10^{-5}$ м, $\tau_0 = 10^{-6}$ с при соответствующих начальных условиях.

Моделирование кавитационных процессов будем проводить в соответствии с (1) и (2) с использованием структурных схем пакета Simintech. Эти схемы позволяют проводить параметрическое исследование процесса кавитации с учетом изменения звукового давления, частоты звукового давления, вязкости и плотности коагулируемой жидкой среды. Моделирование производилось при следующие числовые данные, близких по числовым значениям к реальной среде: $P_{ст} = 90000$ Па, $P_V = 3000$ Па, $R_0 = 10^{-5}$ м, $\tau_0 = 10^{-6}$ с, $\sigma = 0.07$ н/м, $\mu = 0.001$ мПа · с.

Произведем сравнение (1), (2), осуществив численно-параметрический анализ. Проведем параметрическое сравнение представленных моделей при

значении амплитуды акустического давления при значениях близких к статическому давлению. Результаты параметрического исследования представлены на рисунке 1 для значения незначительно превышающего половину периода действия акустического давления при $\sigma = 0.07 \frac{\text{Н}}{\text{м}}$, $\mu = 0.001 \text{ Па} \cdot \text{с}$ для частоты 30 кГц, амплитудного значения 100 кПа,

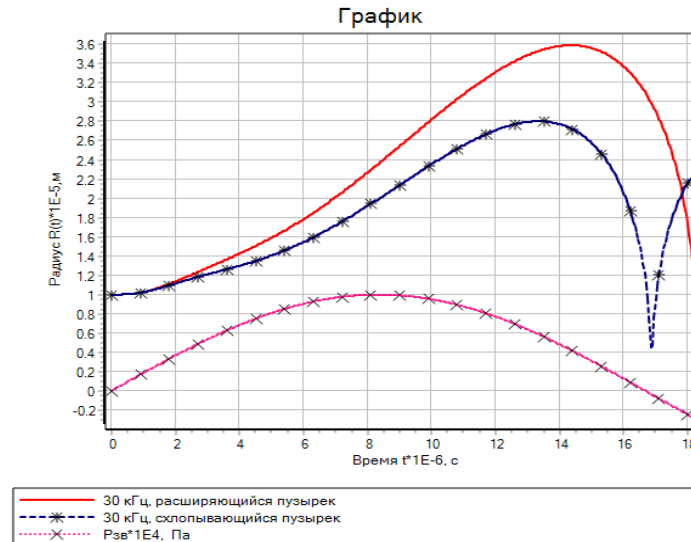


Рисунок 1 – Графики изменения радиуса пузырька и акустического давления

Первоначальный радиус «зародыша» кавитации для обеих моделей взят один и тот же. Максимальный радиус для модели сжимающегося пузырька принят равным первоначальному радиусу пузырька. Отличие моделей друг от друга будет лишь в порядке нелинейности. И одна и вторая модели для рассматриваемого участка времени описывают расширение и сжатие пузырька. Но модель сжатия является более качественной. Это демонстрирует рисунок 2. Если увеличить время рассмотрения акустического давления по обеим моделям, то придем к результату, показанному на графике 2

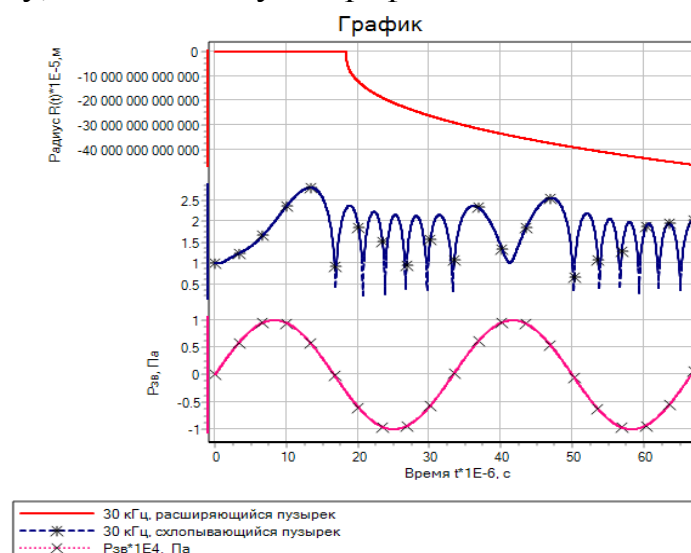


Рисунок 2 - Графики изменения радиуса пузырька и акустического давления для времени, превышающем период акустического воздействия

Модель расширяющегося пузырька (1) работает на половине периода акустического воздействия. При времени превышающем эту величину эта модель становится неустойчивой. В этом случае она не учитывает вторичную осцилляцию кавитационного пузырька.

Модель сжимающегося пузырька (2) работает во всем рассматриваемом диапазоне времени, учитывает вторичный кавитационный рост и осцилляцию.

При параметрическом исследовании моделей получены следующие данные, изображенные на рисунках 3, 4:

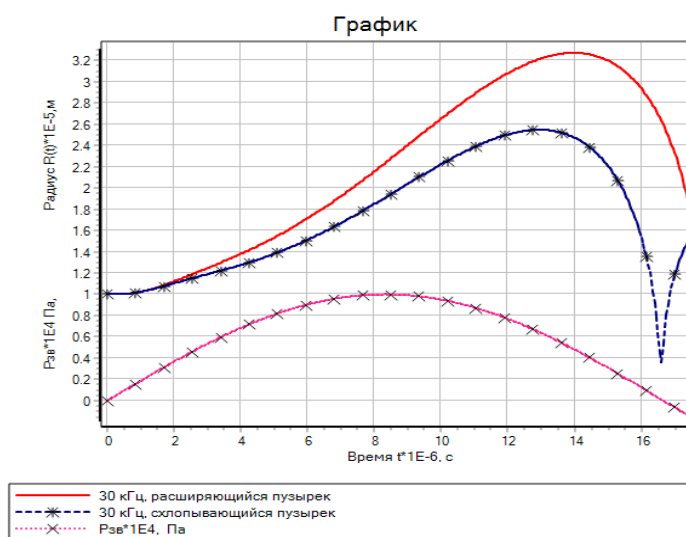


Рисунок 3 – Зависимость радиуса при $\sigma = 0.07 \frac{\text{Н}}{\text{м}}$, $\mu = 0.01 \text{ Па} \cdot \text{с}$.

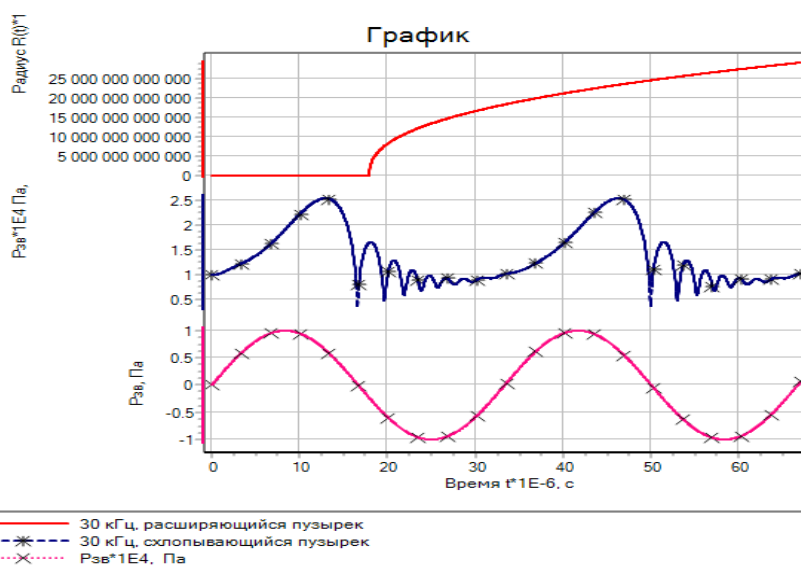


Рисунок 4 – Зависимость радиуса при $\sigma = 0.07 \frac{\text{Н}}{\text{м}}$, $\mu = 0.01 \text{ Па} \cdot \text{с}$.

При уменьшении вязкости модель сжимающегося пузырька (2) вновь оказывается более предпочтительной, как более качественно описывающая процесс кавитации единичного пузырька.

С изменением поверхностного натяжения в некоторых случаях обе модели работают качественно однотипно (рисунок 5). Хотя стоит отметить, что модель расширяющегося пузырька (1) приводит к меньшим значениям пузырька при сжатии и большим при расширении пузырька, что может сказаться на оценку давления и температуры внутри пузырька

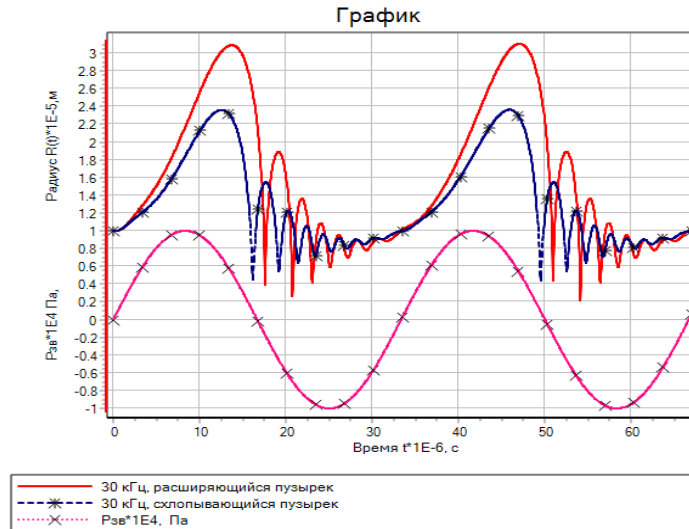


Рисунок 5 – Зависимость радиуса при $\sigma = 0.1 \frac{Н}{м}$, $\mu = 0.01 \text{ Па} \cdot \text{с}$.

В других случаях модель расширения (1) вновь работает только на полупериоде акустического воздействия, что демонстрирует рисунок 6.

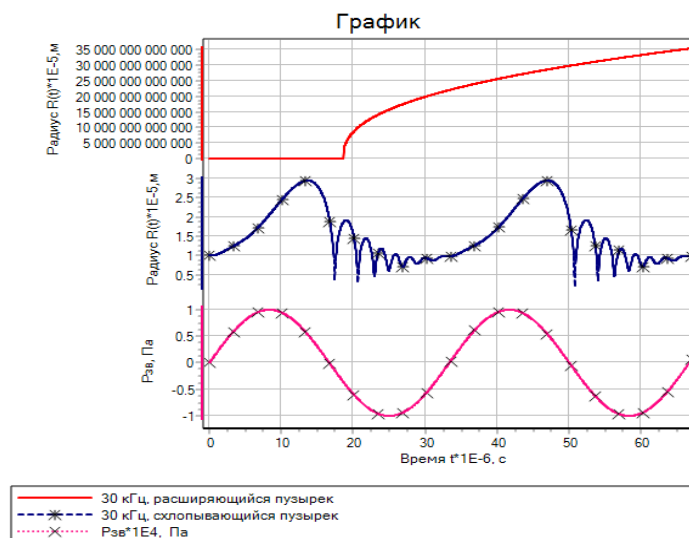


Рисунок 6 – Зависимость радиуса при $\sigma = 0.01 \frac{Н}{м}$, $\mu = 0.01 \text{ Па} \cdot \text{с}$.

Численное моделирование по обеим моделям при наличии предположения о существовании пузырьков с увеличенным(уменьшенным) радиусом R_m существенно не меняет картину кавитационной осцилляции единичного пузырька, как приведено на рисунках 5, 6. Как и ожидалось, обе модели дают схожие результаты на половине периода акустического воздействия. На боль-

шем промежутке времени модель расширяющегося пузырька не применима, она неустойчива, так как в ней радиус пузырька стремится к нулю, что приводит к бесконечно большому давлению внутри пузырька, а это физически невозможно. И при дальнейшем моделировании радиус пузырька вообще стремится к минус бесконечности.

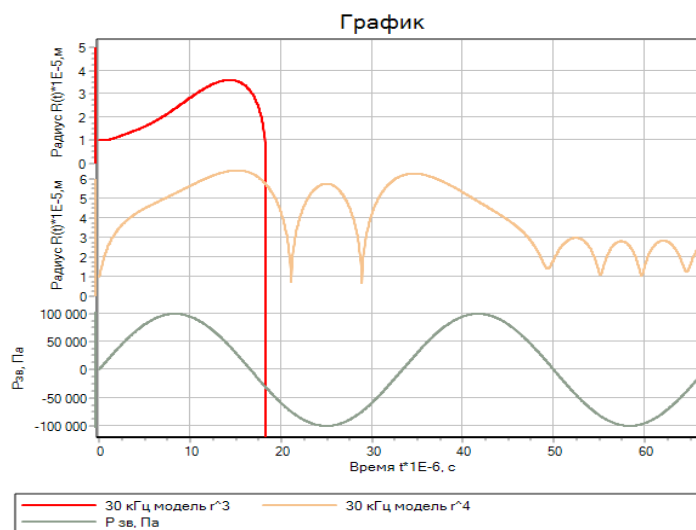


Рисунок 7 – Зависимость радиуса
 при $\sigma = 0.01 \frac{\text{Н}}{\text{м}}$, $\mu = 0.001 \text{ Па} \cdot \text{с}$, $Rm = 5E - 5 \text{ м}$.

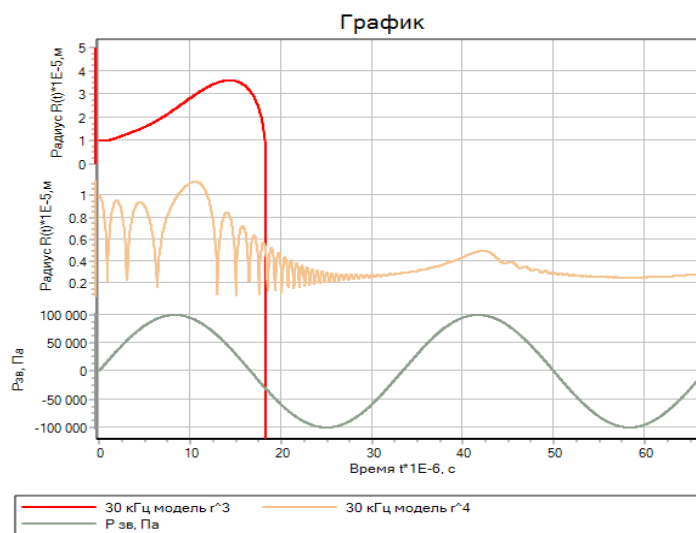


Рисунок 8 – Зависимость радиуса
 при $\sigma = 0.01 \frac{\text{Н}}{\text{м}}$, $\mu = 0.001 \text{ Па} \cdot \text{с}$, $Rm = 1E - 7 \text{ м}$.

Как видно из рисунков если предположить что возможно существование пузырьков с наибольшим радиусом большим первоначального радиуса, то процесс осцилляции происходит около величины первоначального радиуса или величины превышающей его в несколько раз. Если же предположить, что существуют пузырьки меньшего радиуса, чем первоначальный, то модель сжатия (1) описывает процесс осцилляции с радиусами на порядок большими, чем

предполагаемый максимальный радиус. Причем, при уменьшении «максимального» радиуса R_m происходит более сильная осцилляция на рассматриваемом промежутке.

По результатам численно-параметрического анализа выбираем модель сжатия (1) как основную для описания и расширения и сжатия единичного пузырька.

Таким образом, переход от простых нелинейных моделей к комплексным, учитывающим многофакторную нелинейность динамики кавитационного пузырька, является существенным шагом для перехода от качественного к количественному описанию явления. Это позволяет получать интригующие, но зачастую не адекватные цифры из упрощенных моделей, а достоверные инженерные данные, на основе которых можно проектировать эффективные и безопасные технологии будущего.

Литература

1. Скворцов С.П. Методы контроля параметров ультразвуковой кавитации // Наука и образование, 2015 №2, С. 83-100.
2. Шестаков С.Д. Исследование возможности непараметрического усиления многопузырьковой кавитации // Прикладная физика, 2008. , №6, С. 18-24.
3. Бронин, Ф.А. Исследование кавитационного разрушения и диспергирования твердых тел в ультразвуковом поле высокой интенсивности : диссертация ... кандидата технических наук : 05.00.00. — Москва, 1966. С 294.

*В.Н. Денисов, д.т.н., доцент, М.А. Новикова, ст. преподаватель
(филиал ФБГОУ ВО «НИУ «МЭИ» в г. Смоленске)*

РАЗРАБОТКА СТРУКТУРНОЙ СХЕМЫ ИССЛЕДОВАНИЯ КАВИТАЦИИ В SIMINTECH

Кавитация – это сложное физическое явление, заключающееся в образовании, росте и схлопывании пузырьков пара или газа в жидкости, которое возникает при локальном падении давления ниже критического значения. Этот процесс сопровождается значительными энергетическими воздействиями: при коллапсе пузырьков генерируются ударные волны и микроструи, развиваются высокие температуры и давления [1].

В работе предлагается структурная схема в среде SimInTech для исследования нелинейных эффектов в динамике кавитационного пузырька. Схема позволяет исследовать кавитационные процессы как на основе классической нелинейной модели – уравнении Рэлея-Плессета, так и уточненной нелинейной модели. Уточнение нелинейности за счет введения слагаемого более высокой степени радиуса пузырька, связанной с большими амплитудами колебаний, теплопереносом, сжимаемостью жидкости и диффузией газа, позволяет получить более приближенные к реальным оценки критических характеристик.

В качестве базы для математического моделирования примем дифференциальные уравнения описывающее процесс расширения и сжатия кавитационной полости [2]:

$$(R\ddot{R} + 1,5\dot{R}^2)\rho + 4\mu\frac{\dot{R}}{R} - \left(P_{ст} - P_v + \frac{2\sigma}{R_0}\right)\frac{R_0^3}{R^3} - P_v + \frac{2\sigma}{R} - P_{зв}\sin\omega t + P_{ст} = 0 \quad (1)$$

где:

$P_{ст}$ – статическое давление в жидкости Па;

$P_{зв}$ – амплитудное звуковое давление, определяется параметрами ультразвуковой установки Па;

ρ – плотность среды кг/м³;

μ – динамическая вязкость Па · см;

P_v – давление насыщенных паров Па;

σ – поверхностное натяжение Н/м.

Уточненное дифференциальное уравнение для процесса сжатия (схлопывания) кавитационной полости примем в виде:

$$(R\ddot{R} + 1,5\dot{R}^2)\rho + 4\mu\frac{\dot{R}}{R} - \left[\left(P_{ст} - P_v + \frac{2\sigma}{R_0} \right) \frac{R_0^3}{R_{max}^3} + P_v \right] \frac{R_{max}^4}{R^4} + \frac{2\sigma}{R} - P_{зв} \sin \omega t + P_{ст} = 0 \quad (2)$$

Для процесса расширения начальные условия имеют вид:

$$t = 0, R = R_0, \dot{R} = 0.$$

Для процесса схлопывания начальные условия имеют вид:

$$t = t_{расш}, R = R_{max}, \dot{R} = 0.$$

трасш – это время расширения кавитационной полости.

В целях моделирования преобразуем дифференциальные уравнения (1), (2) к нормальным системам. Для обезразмеривания уравнений относительно радиуса пузырька и времени его моделирования, введем обозначения $R = \tilde{R} \cdot R_0$, $t = \tau \cdot \tau_0$, где $R_0 = 10^{-5}$ м, $\tau_0 = 10^{-6}$ с.

Тогда, учитывая, что скорость ускорение изменения радиуса пузырька имеют вид:

$$\frac{dR}{dt} = \frac{R_0}{\tau_0} \tilde{R}'_{\tau}, \quad \frac{d^2R}{dt^2} = \frac{R_0}{\tau_0^2} \tilde{R}''_{\tau\tau},$$

Получаем системы (3), (4) для моделирования кавитационных процессов при расширении и сжатии пузырьков.

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d\tilde{R}}{d\tau} = \tilde{R}_1 \\ \frac{d\tilde{R}_1}{d\tau} = \left[-\frac{3\tilde{R}_1^2}{2} + \frac{\tau_0^2}{R_0^2\rho} \left[P_{3B} \sin(\omega\tau_0\tau) + P_v - P_{CT} - \frac{2\sigma}{\tilde{R}R_0} + \right] + \left[\left(P_{CT} - P_v + \frac{2\sigma}{R_0} \right) \frac{1}{\tilde{R}^3} \right] - 4\mu \frac{\tilde{R}_1}{\tau_0\tilde{R}} \right] \cdot \frac{1}{\tilde{R}} \end{array} \right. \quad (3)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d\tilde{R}}{d\tau} = \tilde{R}_1 \\ \frac{d\tilde{R}_1}{d\tau} = \left[-\frac{3\tilde{R}_1^2}{2} + \frac{\tau_0^2}{R_0^2\rho} \left[P_{3B} \sin(\omega\tau_0\tau) + P_v - P_{CT} - \frac{2\sigma}{\tilde{R}R_0} + \right] + \left[\left(P_{CT} - P_v + \frac{2\sigma}{R_0} \right) \frac{R_m}{R_0} + P_v \cdot \left(\frac{R_m}{R_0} \right)^4 \right] \cdot \frac{1}{\tilde{R}^4} - 4\mu \frac{\tilde{R}_1}{\tau_0\tilde{R}} \right] \cdot \frac{1}{\tilde{R}} \end{array} \right. \quad (4)$$

При соответствующих начальных условиях, моделирование кавитационных процессов будем проводить в соответствии с (3) или (4) с использованием пакета Simintech. Для этой цели разработаны структурные схемы, одна из которых, для случая расширяющегося пузырька, представлена на рисунке 1. Эти схемы позволяют проводить параметрическое исследование процесса кавитации с учетом изменения звукового давления, частоты звукового давления, вязкости и плотности среды.

Для моделирования взяты следующие числовые данные, близкие по числовым значениям к реальной среде: $P_{CT} = 90000$ Па, $P_v = 3000$ Па, $R_0 = 10^{-5}$ м, $\tau_0 = 10^{-6}$ с, $\sigma = 0.07$ н/м, $\mu = 0.001$ мПа·с.[3]. Покажем работоспособность и адекватность структурных схем произведя сравнение на их основе различных нелинейных кавитационных моделей вида (1), (2), осуществив численно-параметрический анализ. Сначала проведем параметрическое сравнение представленных моделей при значении амплитуды акустического давления при значениях близких к статическому давлению так, чтобы не превысить критическое давление кавитации.

Результаты параметрического исследования представлены на рисунке 2, для значения немного превышающего половину периода действия акустического давления для частоты 30 кГц, амплитудного значения 100 кПа, при $\sigma = 0.07 \frac{\text{Н}}{\text{м}}$, $\mu = 0.001$ Па·с.

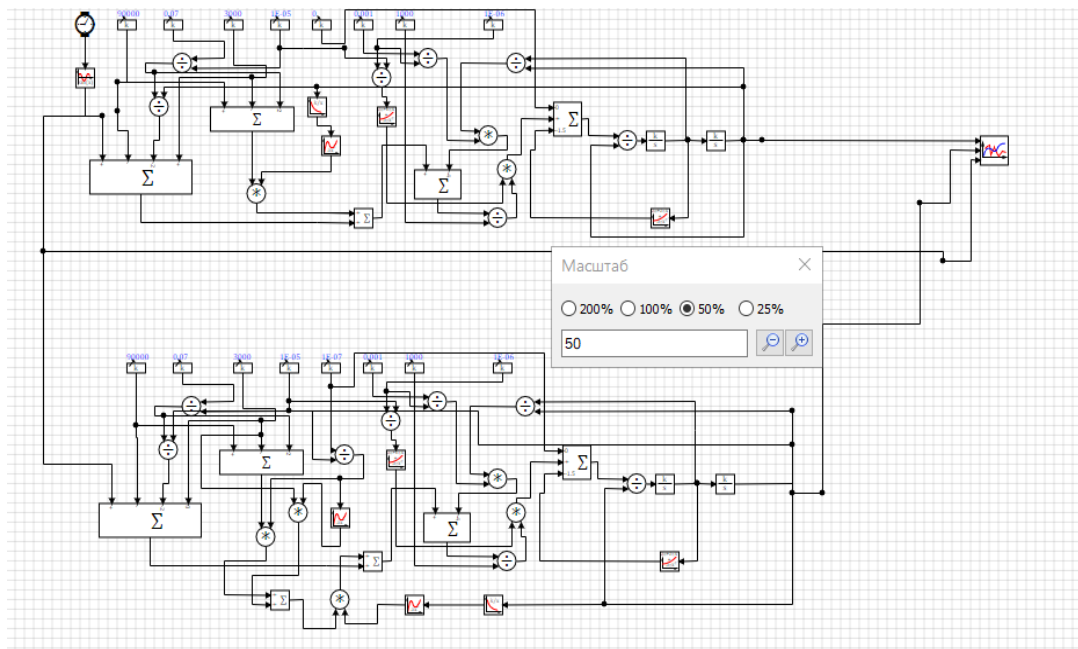


Рисунок 1 – Структурная схема рабочей программы

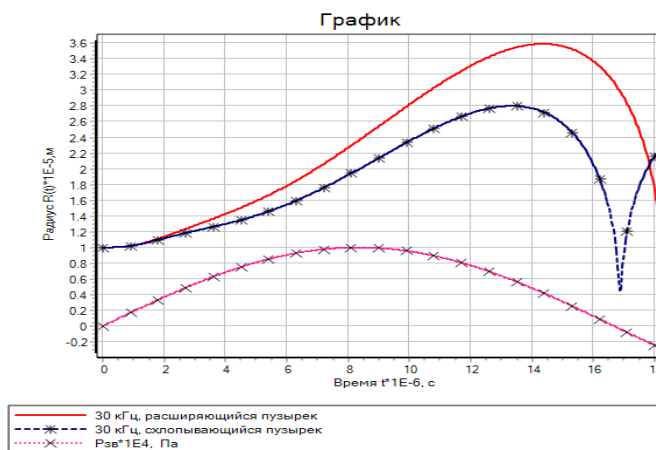


Рисунок 2 – Графики изменения радиуса пузырька и акустического давления

Для обеих моделей первоначальный радиус «зародыша» кавитации взят один и тот же. Максимальный радиус для модели сжимающегося пузырька взят равным первоначальному радиусу пузырька. В этом случае отличие моделей будет лишь в порядке нелинейности. И одна и вторая модели для рассматриваемого участка времени описывают расширение и сжатие пузырька. Но модель сжатия является более качественной, так как на графике изменения радиуса в момент наибольшего акустического давления (примерно 8.2 миллисекунды) появляется точка перегиба, после которой с уменьшением давления начинается уменьшение скорости роста пузырька. В модели расширяющегося пузырька эта точка появляется намного позже, что приводит к несколько завышенному показателю наибольшего радиуса пузырька и увеличению времени схлопывания.

Если увеличить время рассмотрения акустического давления по обеим моделям, то приходим к результату, показанному на графике 3.

Модель расширяющегося пузырька (1) работает на половине периода акустического воздействия, при времени превышающем эту величину эта модель становится неустойчивой, она не учитывает вторичную осцилляцию кавитационного пузырька.

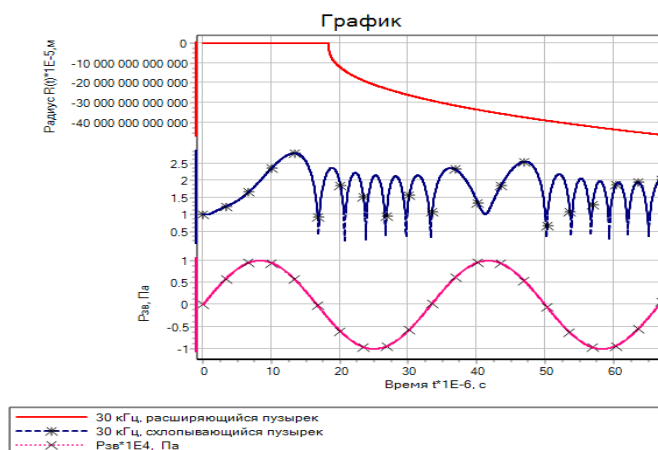


Рисунок 3 – График изменения радиуса пузырька и акустического давления для времени, превышающего период акустического воздействия

Модель сжимающегося (схлопывающегося) пузырька (4) работает во всем рассматриваемом диапазоне времени, учитывает вторичный кавитационный рост и осцилляцию.

Таким образом предложенная структурная схема с учетом нелинейности более высокого порядка позволяет рассматривать кавитационные эффекты в более широком временном диапазоне с учетом эффекта осцилляции кавитационного пузырька. Схема может быть полезна для исследования кавитационных процессов на практике.

Литература

1. Шестаков С.Д. Исследование возможности непараметрического усиления многопузырьковой кавитации // Прикладная физика. 2008, №6, С. 18-24.
2. Бронин, Ф.А. Исследование кавитационного разрушения и диспергирования твердых тел в ультразвуковом поле высокой интенсивности : диссертация ... кандидата технических наук : 05.00.00. — Москва, 1966. С. 294.
3. Шестаков С.Д. Многопузырьковая акустическая кавитация: математическая модель и физическое подобие // Техническая акустика, 2010, №14 С. 1-16.

*И.А. Жужгина, канд. экон. наук, доц.; Д.В. Лаконова, магистрант
(Филиал ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» в г. Смоленске)*

ЦИФРОВАЯ ТРАНСФОРМАЦИЯ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ КАК ИНСТРУМЕНТ ПЕРЕХОДА К ТЕХНОЛОГИЧЕСКОМУ СУВЕРЕНИТЕТУ

В условиях глобальной конкуренции и геополитической нестабильности технологический суверенитет становится не просто элементом промышленной политики, а стратегической целью, определяющей устойчивость национальной экономики. Для России технологический суверенитет означает способность обеспечивать полный цикл разработки, производства и внедрения критически

важных технологий на отечественной базе [1]. Эта концепция в последние годы трансформировалась в новую ИТ-стратегию российского бизнеса, предполагающую активное развитие национальной базы цифровых решений, а также создание независимых производственных экосистем. Суть данной стратегии заключается в переходе от политики заимствования технологий к их собственному созданию и адаптации под внутренние потребности, что позволяет обеспечить безопасность критически важных отраслей и устойчивость хозяйственных связей.

Машиностроительный комплекс занимает центральное место в обеспечении технологического суверенитета, так как является ядром промышленного производства, обеспечивающим функционирование смежных отраслей – энергетики, транспорта, оборонной промышленности, строительства. В силу капиталоемкости и стратегического значения машиностроение напрямую определяет конкурентоспособность страны. От уровня его технологического развития зависит способность государства поддерживать экономический рост, проводить модернизацию производства и создавать инновационные продукты. Поэтому именно в этой отрасли наиболее востребованы механизмы ускоренной цифровизации, которые позволят снизить зависимость от зарубежного оборудования, программного обеспечения и компонентной базы.

Под цифровой трансформацией, являющейся ключевым инструментом достижения технологического суверенитета, понимается не точечное внедрение отдельных технологий, а комплексное преобразование всей системы управления. В машиностроении цифровая трансформация затрагивает проектирование, производство, логистику, сервисное обслуживание и стратегическое управление. На этой основе формируются новые бизнес-модели, интегрирующие цифровые решения на всех уровнях производственного цикла. Применение таких технологий, как искусственный интеллект, аддитивное производство, позволят существенно сократить время вывода продукции на рынок, повысить её качество и снизить затраты. Использование цифровых двойников и виртуальных моделей делает возможным прогнозирование эксплуатационных характеристик продукции ещё на этапе проектирования, что снижает риски и ускоряет инновационный цикл. Благодаря внедрению предиктивной аналитики, промышленного интернета вещей, систем управления жизненным циклом продукции (PLM) и больших данных, предприятия могут выстраивать производственные процессы под меняющиеся условия, эффективно использовать ресурсы и быстро реагировать на изменения рыночного спроса.

Процесс цифровой трансформации машиностроительных предприятий сопровождается рядом системных проблем, требующих комплексного решения.

Во-первых, это сохраняющаяся импортозависимость от критически важных компонентов в сфере высоких технологий, в том числе, в цифровых. Решение заключается в активной разработке отечественных цифровых платформ и инструментов, а также в государственной поддержке компаний-разработчиков.

Во-вторых, существенным препятствием является дефицит квалифицированных кадров в области цифровых технологий и управления цифровыми эко-

системами. Несмотря на то, что 30% предприятий отрасли нуждается в значительных инвестициях для технологического обновления, большая часть сотрудников пока не обладает достаточными навыками для работы в условиях цифровизации. Для преодоления данной проблемы необходимо развитие отраслевых центров компетенций, а также интеграция образовательных программ по цифровым технологиям в систему образования.

В-третьих, значительные финансовые затраты на внедрение инноваций ограничивают возможности предприятий, особенно среднего и малого бизнеса. В этом контексте ключевую роль играют государственные субсидии, налоговые льготы и привлечение частных инвестиций в государственные проекты, которые позволяют снизить финансовую нагрузку и стимулировать цифровизацию.

В-четвёртых, предприятия сталкиваются с отсутствием интеграции между различными информационными системами, что препятствует формированию единого информационного пространства. Решением становится внедрение сквозных цифровых платформ и стандартизированных протоколов обмена данными, позволяющих объединять все этапы жизненного цикла продукции в единую экосистему.

Дополнительными факторами риска выступают разрывы в уровнях цифровой зрелости различных предприятий, что затрудняет формирование отраслевых экосистем, а также необходимость создания нормативно-правовой базы [соответствующей](#) новым вызовам цифровой экономики. Кроме того, сохраняются культурные и организационные барьеры, связанные с нежеланием сотрудников и руководителей перестраивать традиционные бизнес-процессы. Для их преодоления необходима разработка программ внутренней мотивации, обучение персонала и внедрение механизмов адаптивного управления изменениями.

Решение проблем предполагает всесторонний подход, сочетающий усилия государства, бизнеса и научного сообщества. Только при условии консолидации ресурсов и стратегического взаимодействия возможно успешное формирование цифровой индустрии машиностроения, ориентированной на технологический суверенитет. При этом важно обеспечить продолжение комплексной поддержки и согласованность действий государства и бизнеса, а также оперативно реагировать на возникающие вызовы.

Важным условием становится поэтапность процесса цифровой трансформации, который можно представить, как последовательность шагов (таблица 1): от внедрения базовых ИТ-решений до построения цифровых экосистем. Представленные этапы отражают эволюционный путь от автоматизации отдельных функций к созданию целостной, самообучающейся производственной системы, формированию интегрированной цифровой экосистемы, способной к принятию решений.

Таблица 1 – Этапы цифровой трансформации машиностроительных предприятий

Этап	Содержание	Основные технологии
Базовый	Автоматизация отдельных процессов, переход на цифровое проектирование и учёт	CAD, CAM, CAE, ERP, PDM
Интеграционный	Создание единой цифровой среды предприятия, внедрение аналитики и моделирования	MES, PLM, Big Data, IoT
Прорывной	Формирование «умного производства», интеграция в цифровые экосистемы	Цифровые двойники, ИИ, роботизация, аддитивные технологии

Около 60% предприятий машиностроения находятся на среднем или высоком уровне готовности к внедрению инноваций, поэтому ключевым фактором становится качество и эффективность инструментов цифровой трансформации. Отечественные решения демонстрируют высокий уровень конкурентоспособности, так как современные российские платформы предлагают разные варианты технологических возможностей и функционала.

Государственная политика в сфере цифровизации промышленности отражает стратегическую значимость данного процесса. Согласно «дорожной карте» «Новое индустриальное программное обеспечение», к 2030 г. предполагается поэтапное повышение уровня цифровой зрелости отечественной промышленности, и достижение доли отечественного ПО в промышленности 90% [2]. В 2023 году уровень использования российских решений в машиностроении оценивался в 50–60%, при этом в 2030 году планируется рост доли отечественного программного обеспечения: для автоматизации до уровня 90%, для производственных платформ на базе интернета вещей до 76,8%, а для платформ управления ресурсами и процессами предприятий до 92,3%.

В таблице 2 представлены некоторые целевые показатели и их плановые значения к 2030 году, а также для сопоставления – базовые значения в 2021 г.

Таблица 2 – Целевые показатели цифровой зрелости промышленности

Целевой показатель	2021 год (базовый)	2030 год
Цифровая зрелость ключевых производственных процессов	44%	85%
Цифровая зрелость вспомогательных процессов	49%	90%
Использование API в бизнес-процессах	9%	90%
Использование цифровых двойников в машиностроении	18%	80%
Применение предиктивной аналитики	8%	75%

Следовательно, цифровая зрелость промышленности к 2030 г. должна перейти на качественно новый уровень. Наличие обеспечиваемых государством программ развития машиностроения станет не только индикатором цифровой зрелости, но и важным условием обеспечения технологического суверенитета

России. Следует отметить, что с 2023 года проведение оценки цифровой зрелости, не реже одного раза в полугодие является обязательным условием для промышленных предприятий, рассчитывающих на государственную поддержку.

Перспективы цифровой трансформации машиностроительных предприятий в контексте достижения технологического суверенитета связаны с формированием устойчивой, независимой и высокотехнологичной производственной базы, опирающейся на отечественные цифровые решения и платформенные разработки. Основной акцент сделан на формирование единого цифрового контура производства, интеграцию современных технологий и переход к управлению на основе данных. Особое значение имеет распространение сквозных решений - цифровых двойников, предиктивной аналитики и API, которые способствуют созданию адаптивной производственной экосистемы. Системное внедрение технологий сквозной цифровизации в производственные и управленческие процессы создает предпосылки для укрепления научно-технического потенциала и достижения устойчивого технологического лидерства страны.

Таким образом, цифровая трансформация является не только инструментом повышения производительности и конкурентоспособности, но и основой технологического суверенитета. Она позволит сформировать национальную цифровую инфраструктуру и обеспечить устойчивое развитие промышленности. Результативность цифровой трансформации машиностроительной отрасли России во многом зависит от компаний, которые могут предложить не только технологические продукты, но и комплексные стратегии, направленные на развитие культуры разработки и систему подготовки специалистов.

Литература

1. Горячева Т. В., Мызрова О. А. Роль и место технологического суверенитета в обеспечении устойчивости экономики России // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Экономика. Управление. Право. 2023. Т. 23, № 2. С. 134–145.

2. Стратегическое направление в области цифровой трансформации обрабатывающих отраслей промышленности, относящейся к сфере деятельности Министерства промышленности и торговли Российской Федерации: распоряжение Правительства РФ от 7 ноября 2023 г. № 3113-р // Информационно-правовой портал Гарант.РУ. URL: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/407862013/?ysclid=mg315wfvw7168939808>.

*А.А. Каракулька, инженер-программист
(АО «НИИ СТТ», г. Смоленск)*

ГЕЙМДЕВ В СИСТЕМЕ ОБРАЗОВАНИЯ (КРАТКИЕ ТЕЗИСЫ)

Проблема традиционного обучения программированию заключается в его оторванности от реальности. Ученики часто решают абстрактные, изолированные задачи, что приводит к отсутствию мотивации и не формирует ключевые навыки XXI века – 4К (критическое мышление, креативность, коммуникация, кооперация). Главным ограничением является индивидуальный формат работы, который не готовит учащихся к решению многогранных проблем в команде и лишает их возможности наработать критически важный социальный опыт.

Предлагаемое решение – это система командной разработки игровых прототипов (образовательный геймдев). Важно подчеркнуть: игра здесь – не самоцель, а инструмент и мотивирующий контекст. Такой подход требует от уча-

щихся интеграции самых разных умений и активного взаимодействия. Как показывают реализованные учебные проекты («В тылу врага», «Операция Багратион» и др.), ученики не только осваивают программирование, но и погружаются в дизайн, сторителлинг и командную координацию. Ключевой фокус смещён не на подготовку будущих геймдев-специалистов, а именно на формирование универсальных компетенций и опыта проектной деятельности.

II. Двойной образовательный результат: hard & soft skills

Модель образовательного геймдева обеспечивает одновременное развитие двух типов навыков:

Hard skills (Технические навыки): это конкретные, измеримые умения, которые осваиваются на практике:

1. Программирование: написание кода на C#, создание игрового цикла, реализация механик.

2. Прикладная математика и физика: векторная математика для движения и коллизий, понятия скорости, ускорения.

3. Архитектура ПО: принципы ООП (инкапсуляция, наследование, полиморфизм) и проектирование модульного кода.

4. Работа с инструментами: освоение Visual Studio, понимание основ игровых движков.

Оценка Hard Skills проводится через анализ качества кода и работоспособности прототипа.

Soft skills (Гибкие навыки, 4К): это основная цель методики. Навыки целенаправленно развиваются в командной работе:

1. Критическое мышление: анализ ошибок, аргументированный выбор механик.

2. Креативность: генерация идей, поиск нестандартных решений.

3. Коммуникация: ясное изложение мыслей, активное участие в обсуждениях.

4. Кооперация: выполнение обязательств, помощь команде, готовность к компромиссу.

К ним также добавляются управление задачами и временем (Agile-подход) и лидерство.

Оценка Soft Skills проводится через критическое наблюдение (педагог использует чек-листы) и формализованную рефлексию после каждого проекта, когда команда совместно анализирует свой опыт.

III. Методология: образовательный геймдев-конвейер

Образовательный принцип: «От простого к сложному через итеративное развитие». Вместо принципа «быстро и много» используется плавное наращивание сложности. Каждый новый проект строится на опыте предыдущего, создавая «образовательную лестницу». Цикл остается коротким и повторяющимся: «Идея → Прототип → Тест → Рефлексия».

Иерархия инструментов: Осознанный путь от фундамента к мощным инструментам.

Первый этап: C# / Windows Forms. Выбор продиктован не простотой, а педагогической целесообразностью. WinForms – это «песочница» для глубокого понимания основ: ручное управление игровым циклом, фокус на логике, а не на конфигурации, формирование архитектурного мышления. Это доказывает, что создать игру – достижимо даже на базовой технологии.

Второй этап: Переход на Unity. Осуществляется не по расписанию, а когда идеи учащихся перерастают технические возможности WinForms. К этому моменту у них уже есть понимание основ, и движок воспринимается как логичный и мощный инструмент для реализации сложных идей, а не как «магическая среда».

Командные роли: Проекты реализуются в командах с распределением ролей (программист, дизайнер, художник, менеджер и др.). Ключевой акцент – на гибкости и ротации ролей, что способствует взаимопониманию, повышает вовлеченность и дает каждому участнику опыт полного цикла разработки.

IV. Результаты: что дает система на выходе

Естественное усвоение hard skills: сложные концепции (например, математика или ООП) перестают быть абстрактными теориями и становятся инструментами для решения конкретных и мотивирующих задач в игре.

Целенаправленное формирование soft skills (4К): Система создает среду, где мягкие навыки являются прямым следствием процесса. Командная работа, итеративный цикл и необходимость «доводить прототип до ума» на практике развивают критическое мышление, креативность, коммуникацию и кооперацию.

Межпредметность: Геймдев стирает границы между дисциплинами. Технические науки (программирование, математика) естественно объединяются с гуманитарными и художественными (история, литература, дизайн, музыка), формируя у учащихся целостную картину мира. Проекты «В тылу врага» (история) и «Азбука» (педагогика) – яркие тому примеры.

V. Преодоление барьеров: практические решения для педагога

Фокус на прототипы, а не на шедевры. Снижение планки до «работоспособного прототипа» ускоряет цикл, дает быстрый успех и поддерживает мотивацию. Культура ошибки внедряется как ценность: неудачный прототип – это не провал, а ценный опыт для рефлексии.

Выбор технологии: WinForms как оптимальный баланс. Для школ со слабой технической базой и ограниченными ресурсами WinForms оказывается оптимальным решением: нулевая стоимость развертывания, стабильная работа на старых ПК, строгая типизация C#. Это надежнее альтернатив (Python/Pugame, Unity) для старта.

Роль педагога-координатора. Педагог не источник готовых ответов, а помощник, который задает наводящие вопросы, помогает команде самостоятельно находить решения и преодолевать творческие и технические кризисы.

Четкий итеративный конвейер. Структура «Идея → Прототип → Тест → Рефлексия» служит готовым планом урока, организует работу и предотвращает хаос. Визуализация процесса (например, с помощью Trello) помогает отслеживать прогресс.

VI. Почему команда? Сравнение с индивидуальным подходом

Индивидуальная работа позволяет углубиться в узкую задачу (код, графика), но не развивает soft skills и ограничивает масштаб проекта производительностью, доступным временем и навыками одного человека.

Командная работа моделирует реальный производственный конвейер. Она создает синергию, когда совокупный результат команды несоизмеримо больше возможностей одиночки. Это единственный способ наработать критический опыт кооперации, коммуникации, управления задачами и разрешения конфликтов. Команда способна создавать комплексные продукты (как «Космический археолог»), недоступные одиночке.

VII. Заключение: геймдев-подход как педагогическая система

Предложенная модель – это универсальная педагогическая система, а не узкоспециализированный курс. Через итеративную командную разработку игр абстрактные образовательные стандарты превращаются в реальный, «осязаемый» опыт.

Ключевой результат – формирование «универсального решателя проблем». Выпускник этой системы – это личность, готовая к сложным проектам в любой сфере, способная к декомпозиции задач, итеративному поиску решений, эффективной командной работе и целостному мышлению, синтезирующему технологии и гуманитарное знание.

VIII. Приложение: краткое описание учебных проектов.

1. «В тылу врага»

Жанр: Настольная игра-«бродилка» с элементами сторителлинга.

Технология: C# / Windows Forms.

Суть: Игрок управляет советским лётчиком, который должен вернуться к своим из тыла врага. Проект демонстрирует применение ООП (объекты персонажа, инвентаря) и интеграцию исторического контента (биографии реальных героев) в игровой процесс.

2. «Операция Багратион»

Жанр: Обучающая карточная стратегия.

Технология: C# / Windows Forms.

Суть: Игрок участвует в ключевых сражениях исторической операции, управляя колодой карт. Проект сочетает логику пошагового боя, геймификацию исторического материала и использование мультимедиа (озвучка, видео).

3. «Космический археолог»

Жанр: Прототип RPG с элементами открытого мира.

Технология: C# / Windows Forms.

Суть: Игрок исследует космос, торгует, улучшает корабль и вступает в бои. Проект иллюстрирует переход к сложным системам: экономика, прокачка, модульная архитектура корабля, требующие продвинутого применения ООП и системного мышления.

4. «Азбука»

Жанр: Интерактивное пособие для изучения букв.

Технология: C# / Windows Forms.

Суть: Проект для дошкольников, где ребёнок учит буквы через выбор правильного варианта. Демонстрирует фокус на педагогической механике и быстром прототипировании, а также использование современных инструментов (нейросети) для генерации контента.

Литература

1. Троелсен Эндрю. C# и платформа .NET / Эндрю Троелсен; [пер. с англ. Р. Михеев]. – Санкт-Петербург [и др.]: Питер: Питер принт, 2002. – 795 с.: ил.; 24 см. – (Библиотека программиста). – ISBN 5-318-00750-3.
2. Петцольд Чарльз. Программирование с использованием Microsoft Windows Forms: мастер-класс / Чарльз Петцольд; [пер. с англ. под общ. ред. А. Р. Врублевского]. – Москва: Русская редакция: Питер, 2006. – 410 с.: ил., табл. – (Мастер-класс). – ISBN 5-7502-0284-4 (Русская редакция). – ISBN 5-91180-041-1 (Питер).
3. Грегори Джейсон. Игровой движок. Программирование и внутреннее устройство: [пер. с англ.] / Джейсон Грегори. – 3-е изд. – Астана: Sprint Book, 2025. – 1136 с. – (Для профессионалов). – ISBN 978-601-08-4571-8.
4. Кон, Майк. Agile: оценка и планирование проектов / Майк Кон; [пер. с англ. В. Ионова]. – Москва: Альпина Паблицер, 2018. – 418 с.: табл. – ISBN 978-5-9614-6947-9.

*Д.А. Колабская, студ., А.В. Зедаина, ст. преп.
(филиал ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» в г. Смоленске)*

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ КАК ИНСТРУМЕНТ ОПТИМИЗАЦИИ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ В ИНДУСТРИИ ПРОИЗВОДСТВА ОДЕЖДЫ

Современная текстильная и швейная промышленность сталкивается с растущими требованиями к скорости, качеству и гибкости производства. В условиях глобальной конкуренции и изменяющихся предпочтений потребителей организации вынуждены внедрять информационные технологии (ИТ) для автоматизации процессов и повышения эффективности. Использование ИТ позволяет не только сократить издержки и время выпуска продукции, но и повысить её точность, улучшить управление цепочками поставок, а также адаптироваться к индивидуальным запросам клиентов. Внедрение систем компьютерного проектирования (CAD), автоматизированного управления производством (MES), а также технологий больших данных и искусственного интеллекта становится ключевым фактором конкурентоспособности в быстро меняющейся модной индустрии.

В целом рынок одежды достаточно развит, так, по данным Минпромторга РФ, объем производства в легкой промышленности России в 2023 году вырос на 6,8%, однако доля импорта в розничных продажах одежды остаётся высокой — около 65–70% [1]. При этом только 12–15% отечественных предприятий используют современные системы управления производством, что ограничивает их конкурентоспособность.

По данным Statista, мировой рынок одежды в 2023 году оценивался в 1,5 трлн долларов США с ежегодным ростом 4–5%. Отмечается устойчивый переход к «умному производству»: более 40% крупных компаний ЕС и США уже внедрили ERP- или PLM-системы. В то же время развивающиеся страны, такие как Бангладеш и Вьетнам, удерживают лидерство по себестоимости, создавая дополнительное давление на российских производителей [2].

Для оптимизации процессов в швейной индустрии применяются CAD/CAM-системы, ERP и PLM-технологии. CAD-программы позволяют создавать точные лекала и визуализировать модели, а CAM-системы обеспечивают автоматизацию раскроя и пошива. ERP и PLM-решения помогают управлять ресурсами, логистикой и жизненным циклом продукта. Эти технологии особенно эффективны на средних и крупных предприятиях.

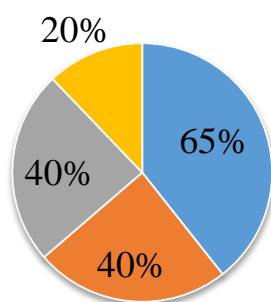
Примеры успешного внедрения ИТ можно найти у таких компаний, как Zara и Nike. В России цифровизация также набирает обороты. По данным Аналитического центра при Правительстве РФ (2022), такие технологии повышают производительность на 25-30% и сокращают сроки выпуска продукции на 20%. Например, швейная фабрика «Смоленский текстиль» в Смоленской области после внедрения ERP-системы сократила сроки выполнения заказов на 20% и улучшила управление материалами. Это подтверждает, что цифровые технологии способны повысить эффективность не только международных корпораций, но и отечественных предприятий [3].

Одним из ключевых барьеров на пути цифровизации швейной промышленности является высокая стоимость внедрения информационных технологий. По данным исследования, проведенного McKinsey (2022), около 65% малых предприятий легкой промышленности сталкиваются с финансовыми ограничениями, которые не позволяют им инвестировать в современные ИТ-решения. Это особенно актуально для регионов, где доступ к кредитным ресурсам ограничен, а окупаемость таких проектов может составлять несколько лет [4].

Ещё одной серьезной проблемой является недостаток квалифицированных кадров. Согласно отчету Минпромторга РФ (2023), только 30% сотрудников предприятий легкой промышленности обладают достаточными навыками работы с цифровыми системами управления производством, что требует расширения программ переподготовки кадров. Также важным стимулом для малого и среднего бизнеса могут стать льготные кредиты и создание специализированных технопарков. Кроме того, более 40% работников старше 45 лет испытывают сопротивление изменениям, что затрудняет обучение и адаптацию к новым условиям труда.

Также стоит отметить угрозы кибербезопасности, которые становятся всё более острыми по мере увеличения степени автоматизации. По данным экспертов, каждое пятое предприятие (около 20%) сталкивалось с попытками кибератак после внедрения ИТ-систем. В большинстве случаев это связано с недостаточной защитой данных и отсутствием специализированных служб безопасности организациях. Эти факторы заставляют руководство задумываться о рисках, связанных с цифровизацией [5].

Основные проблемы внедрения информационных технологий в производстве одежды представлены на рисунке 1.



- Высокая стоимость внедрения ИТ
- Нехватка квалифицированных кадров
- Сопrotивление изменениям со стороны персонала

Рисунок 1 – Основные проблемы внедрения информационных технологий в производстве одежды

Одной из ключевых перспектив развития швейной промышленности в России является переход к «умным» фабрикам, основанным на принципах Индустрии 4.0. По данным Минпромторга РФ (2023), более 45% предприятий легкой промышленности планируют внедрение цифровых решений в ближайшие 3-5 лет. Это связано с ростом интереса к автоматизации процессов, внедрению систем IoT (интернета вещей) и использованию искусственного интеллекта для прогнозирования спроса и управления запасами [6].

Важным направлением развития отечественной промышленности является массовое внедрение ERP- и PLM-систем, позволяющих эффективно управлять производственными процессами и жизненным циклом продукта. Успешное развитие цифровизации невозможно без поддержки государства, в частности без поддержки системы образования. Лишь 35% работников легкой промышленности обладают навыками работы с современными ИТ-инструментами. Перспективы развития информационных технологий в производстве одежды представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Перспективы развития информационных технологий в производстве одежды

Направление/перспектива	Описание	Данные/процент
Переход к «умным» фабрикам	Внедрение технологий Индустрии 4.0: IoT, автоматизация, ИИ	Более 45% предприятий планируют цифровизацию в ближайшие 3-5 лет
Внедрение ERP- и PLM-систем	Управление производственными процессами и жизненным циклом продукта	+25-30% производительности, снижение сроков выпуска на 20%
Государственная поддержка	Льготные кредиты, технопарки, субсидии для малого и среднего бизнеса	Повышает доступность внедрения ИТ для регионов и небольших предприятий
Подготовка кадров	Обучение сотрудников работе с современными ИТ-технологиями	Только 35% работников обладают необходимыми навыками

Из таблицы 1 видно, что цифровизация швейной промышленности в ближайшие 3–5 лет является одной из ключевых тенденций отрасли. Более 45% организаций планируют внедрять технологии Индустрии 4.0, такие как автоматизация, IoT и искусственный интеллект.

Несмотря на трудности, преимущества цифровизации перевешивают недостатки. Еще одним важным направлением становится развитие онлайн-продаж и персонализации продукции, которые способствовали росту спроса и увеличению доли электронной коммерции до 65% к 2024 году.

Информационные технологии играют ключевую роль в оптимизации производственных процессов в индустрии производства одежды. Их внедрение позволяет значительно сократить время на проектирование и изготовление продукции, повысить точность раскроя и пошива за счёт автоматизации рутинных операций. Системы управления производством и контроля качества способствуют снижению уровня брака, минимизации ошибок на всех этапах создания одежды, а также эффективному управлению ресурсами и складскими запасами. Таким образом, использование ИТ не только повышает общую производительность, но и усиливает конкурентоспособность предприятий в условиях быстро меняющегося рынка [7].

Литература

1. Statista Global Market Outlook for Apparel & Accessories – данные за 2023 год. URL: <https://www.statista.com/outlook/cmo/apparel/worldwide> (дата обращения: 15.03.2025)
2. McKinsey & Company – отчет «The State of Fashion 2023». URL: <https://www.mckinsey.com/industries/retail/our-insights/state-of-fashion-archive> (дата обращения: 15.03.2025)
3. World Bank Open Data – данные по мировому производству и торговле одеждой. URL: <https://data.worldbank.org/indicator/NV.MNF.TXTL.ZS.UN> (дата обращения: 17.03.2025)
4. Васильев, А. Н. Цифровизация производства в легкой промышленности: проблемы и перспективы // Вестник новых информационных технологий. – 2021. – № 3. – С. 45–52. (дата обращения: 19.03.2025)
5. Иванова, О. В. Применение CAD/CAM-систем в швейной промышленности // Технологии и 6. предпринимательство. – 2020. – № 7. – С. 112–118. (дата обращения: 19.03.2025)
6. McKinsey & Company. Fashion on the Edge: Digital Transformation in Apparel Manufacturing. – 2022. URL: <https://www.mckinsey.com> (дата обращения: 19.03.2025)
7. Иванова О. В. Применение CAD/CAM-систем в швейной промышленности // Технологии и предпринимательство. – 2020. – № 7. – С. 112–118. (дата обращения: 24.03.2025)

*А.А. Коротких, ст. преп.; П.А. Моликов, студ.
(Филиал ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» в г. Смоленске*

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЗЕЛЁНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ (ЗЕЛЁНЫХ КРЫШ, ВЕРТИКАЛЬНОГО ОЗЕЛЕНЕНИЯ) НА ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ ЗДАНИЙ В ГОРОДСКИХ УСЛОВИЯХ

Современные городские агломерации сталкиваются с многочисленными проблемами, связанными с экологическим состоянием и потреблением энергетических ресурсов. Одной из наиболее острых проблем является явление «городского теплового острова», характеризующееся повышенной температурой в пределах города по сравнению с прилегающими сельскими территориями. Этот феномен в сочетании с высокими показателями энергопотребления зданий и ухудшением качества атмосферного воздуха требует комплексного и иннова-

ционного подхода к градостроительному планированию и проектированию. Традиционно используемые строительные материалы и технологии зачастую усиливают этот эффект, способствуя чрезмерному накоплению тепловой энергии в летний период и значительному рассеиванию тепла зимой. Это, в свою очередь, приводит к увеличению эксплуатационных расходов на отопление и кондиционирование.

Среди наиболее перспективных направлений развития зелёной инфраструктуры в контексте зданий выделяются зелёные крыши и вертикальное озеленение. Зелёные крыши, покрытые растительностью и слоем почвы, выполняют множество функций: от улучшения теплоизоляции до управления ливневыми стоками. Вертикальное озеленение, превращающее глухие фасады в живые «зелёные стены», также оказывает существенное влияние на температурный режим зданий и окружающую среду [1].

Целью данного исследования является количественная оценка влияния зелёных крыш и вертикального озеленения на энергоэффективность зданий в типичных городских условиях, а также анализ механизмов, лежащих в основе этого влияния.

Основным механизмом, благодаря которому зелёные крыши улучшают теплозащиту зданий, является создание дополнительного теплоизоляционного слоя. Зимой растительный покров и почва препятствуют утечке тепла из помещений верхних этажей. Этот эффект прямо пропорционален глубине почвенного слоя и плотности растительности. Летом зелёные крыши демонстрируют ещё более выраженный положительный эффект. Во-первых, листва растений затеняет кровельное покрытие, значительно снижая его нагрев под прямыми солнечными лучами. Во-вторых, процесс эвапотранспирации — испарения влаги растениями и почвой — поглощает колоссальное количество тепловой энергии, приводя к охлаждению поверхности крыши и прилегающего к ней воздуха. Этот эффект, проявляющийся в жаркие дни, значительно снижает нагрузку на системы кондиционирования. Кроме того, слой почвы и растительности обладает высокой тепловой инерцией, замедляя проникновение внешнего тепла внутрь здания в часы пиковой солнечной активности. Зелёные крыши также играют важную роль в управлении ливневыми стоками, задерживая значительную часть осадков, что снижает нагрузку на городскую дренажную систему.

Вертикальное озеленение, покрывающее фасады зданий, в основном действует как активный регулятор температурного режима. Летом плотный растительный покров создает «живую тень» для стен, уменьшая их нагрев. Эвапотранспирация растений способствует охлаждению фасада и снижению температуры окружающего воздуха. Зачастую системы вертикального озеленения предусматривают воздушный зазор между стеной и растениями, который усиливает эффект естественной вентиляции и охлаждения. Зимой влияние вертикального озеленения на теплопотери менее значительно, однако плотный растительный покров может создавать некоторую ветрозащиту, уменьшая инфильтрацию холодного воздуха. Кроме того, зелёные фасады способствуют

улучшению качества воздуха, поглощая углекислый газ и некоторые загрязняющие вещества [2].

Для количественной оценки влияния «зелёной» инфраструктуры на энергоэффективность зданий было проведено комплексное моделирование. В качестве расчётной базы использована типовая модель 5-этажного офисного здания, характерная для городской застройки. Геометрическая модель здания, включающая основные ограждающие конструкции (стены, окна, перекрытия, кровлю), была построена в программном комплексе nanoCAD. Для моделирования теплотехнических процессов использовалось специализированное программное обеспечение, позволяющее анализировать энергетические характеристики зданий, интегрированное с BIM-моделями.

Исследование проводилось с использованием климатических данных для средней полосы России, включающих информацию о температуре воздуха, солнечной инсоляции и скорости ветра в течение года. Были заданы следующие параметры ограждающих конструкций: для традиционной кровли удельное сопротивление теплопередаче составляло $R_{тр} = 3,0 \text{ м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$, для стен — $R_{тр} = 2,5 \text{ м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$. В сценарии с использованием зелёной инфраструктуры для зелёной крыши было предусмотрено дополнительное тепловое сопротивление от растительного покрова и слоя почвы $R_{доп} \approx 1,5 \text{ м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$. При вертикальном озеленении учитывались эффекты затенения и эвапотранспирации, снижающие температуру наружных поверхностей фасада.

Расчёты энергопотребления на отопление (зимой) и кондиционирование (летом) проводились для двух сценариев: базового (здание с традиционными ограждающими конструкциями) и с использованием зелёной инфраструктуры (зелёная крыша и вертикальное озеленение) [3].

Проведённое моделирование позволило количественно оценить положительное влияние зелёной инфраструктуры на энергоэффективность зданий, данные сведены в таблицу 1.

Как видно из таблицы, суммарное годовое энергопотребление здания со значительной долей «зелёной» инфраструктуры снизилось на 20 %. Наиболее существенное сокращение расходов произошло за счёт снижения потребности в кондиционировании воздуха летом, что подтверждает высокую эффективность этих технологий в борьбе с летними теплопритоками

Таблица 1 – Сравнение годового энергопотребления на отопление и кондиционирование для зданий в средней полосе России (кВт*ч/м²)

Параметр	Сценарий 1 (традиционная инфраструктура)	Сценарий 2 (зелёная инфраструктура)	Снижение (%)
Энергопотребление на отопление	95	82	-13.7
Энергопотребление на кондиционирование	70	50	-28.6
Суммарное годовое энергопотребление	165	132	-20.0%

Аналогичные положительные результаты были получены при анализе влияния вертикального озеленения. Как показано в таблице 2, использование вертикального озеленения на фасаде также привело к снижению годового энергопотребления, в основном за счёт летних теплопритоков.

Таблица 2 – Влияние вертикального озеленения на энергопотребление (кВт*ч/м²)

Параметр	Сценарий 1 (традиционный фасад)	Сценарий 2 (вертикальное озеленение)	Снижение (%)
Энергопотребление на отопление	95	90	-5.3
Энергопотребление на кондиционирование	70	55	-21.4
Суммарное годовое энергопотребление	165	145	-12.1

Помимо прямого воздействия на энергоэффективность самих зданий, «зелёная» инфраструктура оказывает положительное влияние на микроклимат городской среды. Зелёные крыши и вертикальное озеленение увеличивают площадь эвапотранспирации в городе, способствуя снижению средней температуры воздуха и смягчению эффекта «городского теплового острова». Кроме того, растения играют роль естественных фильтров, поглощая углекислый газ и некоторые загрязняющие вещества, что способствует улучшению качества атмосферного воздуха.

Для оценки экономической целесообразности внедрения «зелёных» технологий был проведён упрощённый расчёт потенциальной экономии на энергозатратах для типового 5-этажного офисного здания площадью 5000 м². При тарифе на электроэнергию 6 руб/кВт*ч общая годовая экономия от использования зелёной крыши и вертикального озеленения составила около 1 588 950 рублей. Стоит отметить, что первоначальные инвестиции в «зелёную» инфраструктуру могут быть выше, однако, учитывая снижение эксплуатационных расходов, улучшение теплоизоляции и продление срока службы кровельных и фасадных материалов, срок окупаемости может оказаться вполне приемлемым.

Настоящее исследование неопровержимо доказывает, что интеграция элементов зелёной инфраструктуры, таких как эксплуатируемые кровли и вертикальные озеленённые системы, представляет собой действенный метод улучшения энергетических характеристик зданий в городской среде. Применение этих технологий способствует значительному сокращению расходов на отопление и охлаждение, что, в свою очередь, уменьшает как эксплуатационные издержки, так и нагрузку на окружающую среду. Более того, распространение «зелёных» решений положительно сказывается на микроклимате городских территорий, формируя более благоприятные и здоровые условия для жизни. Перспективные направления дальнейшей работы включают разработку комплексных стратегий внедрения «зелёной» инфраструктуры, совершенствование

её конструктивных аспектов и детальный анализ воздействия на всех этапах жизненного цикла зданий.

Литература

1. СП 50.13330.2012 «Тепловая защита зданий» (актуализированная редакция СНиП 23-02-2003).
2. СП 60.13330.2020 «Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха» (актуализированная редакция СНиП 41-01-2003).
3. Байбурин, Т. Т. Архитектура жилых и общественных зданий: учебник / Т. Т. Байбурин, В. А. Малинин, Г. А. Нечаев. — 3-е изд., перераб. и доп. — Москва: КНОРУС, 2021. — 416 с. — ISBN 978-5-406-08182-3.

*А.А. Коротких, ст. преп.; П.А. Моликов, студ.
(Филиал ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» в г. Смоленске)*

ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ ЗДАНИЙ: ПРОГНОЗИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

В условиях растущих цен на энергоносители и необходимости снижения негативного воздействия строительной отрасли на окружающую среду повышение энергоэффективности зданий является одной из ключевых задач. Современные здания, оснащённые сложными инженерными системами, такими как системы отопления, вентиляции, кондиционирования (ОВКВ) и освещения, потребляют значительное количество энергии. Традиционные методы управления этими системами, часто основанные на фиксированных алгоритмах и ручном регулировании, не всегда позволяют достичь оптимальных результатов с точки зрения экономии энергии.

В связи с этим особую актуальность приобретает разработка интеллектуальных систем управления энергопотреблением, способных адаптироваться к меняющимся условиям и оптимизировать работу инженерных систем в режиме реального времени. Методы машинного обучения (МО) открывают новые возможности в этой области, позволяя строить точные прогнозные модели энергопотребления, учитывающие широкий спектр факторов, влияющих на этот процесс. Прогнозная информация, в свою очередь, может служить основой для разработки алгоритмов оптимизации, позволяющих динамически регулировать работу инженерных систем, минимизируя энергозатраты при одновременном поддержании комфортных условий для людей. Настоящее исследование направлено на изучение и демонстрацию эффективности использования методов машинного обучения для прогнозирования энергопотребления зданий и последующей оптимизации режимов работы систем отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха.

В основе исследования лежит комплексный подход, включающий сбор и анализ данных, разработку и обучение прогнозных моделей, а также применение этих моделей для оптимизации работы инженерных систем [1].

Для построения прогнозных моделей необходим значительный объем информации, включающий: исторические данные об энергопотреблении здания (почасовые или более подробные записи о потреблении электроэнергии и тепла), метеорологические данные (температура наружного воздуха, влажность, скорость ветра, солнечная радиация), а также сведения о работе инженерных систем

(например, заданные параметры температуры, режимы работы вентиляции) и загрузке здания (расписание работы, количество людей). Собранные данные проходят обязательную предварительную обработку: очистку от аномальных значений, заполнение пропущенных данных, нормализацию для приведения к единому масштабу, а также отбор наиболее значимых признаков, влияющих на энергопотребление. Далее данные разделяются на обучающую, проверочную и тестовую выборки для корректного обучения и последующей оценки качества моделей [2].

Для прогнозирования энергопотребления зданий применялись как традиционные, так и более современные методы. Среди регрессионных моделей были рассмотрены: линейная регрессия, случайный лес, градиентный бустинг. Для прогнозирования временных рядов использовался метод ARIMA и модели на основе экспоненциального сглаживания. Особое внимание уделялось применению рекуррентных нейронных сетей (RNN), в частности LSTM (Long Short-Term Memory, долговременная кратковременная память), которые хорошо подходят для обработки последовательностей данных, таких как временные ряды энергопотребления. Обучение моделей проводилось на подготовленных данных, а их качество оценивалось с помощью стандартных метрик (MAE, MSE, RMSE, R-квадрат).

На основе построенных прогнозных моделей разрабатываются алгоритмы оптимизации режимов работы инженерных систем. Прогноз энергопотребления, полученный, например, с помощью модели LSTM, передается в модуль оптимизации. Этот модуль с помощью методов математической оптимизации (например, градиентного спуска или генетических алгоритмов) определяет оптимальные параметры работы систем отопления, вентиляции и кондиционирования (температуру теплоносителя, скорость подачи воздуха, время включения/выключения систем) таким образом, чтобы минимизировать энергопотребление при соблюдении заданных требований к комфорту. Таким образом, создаётся интеллектуальная система управления, способная прогнозировать будущие потребности в энергии и заблаговременно корректировать работу инженерных систем [3].

Проведённое исследование демонстрирует значительный потенциал применения методов машинного обучения для оптимизации энергопотребления зданий. Наилучшие результаты прогнозирования энергопотребления были достигнуты с использованием рекуррентной нейронной сети LSTM.

Качество прогнозирования, выраженное с помощью метрик, показало следующее:

- линейная регрессия: $MAE = 15$ кВтч, $RMSE = 21,2$ кВтч, $R^2 = 0,75$;
- случайный лес: $MAE = 8$ кВтч, $RMSE = 10,9$ кВтч, $R^2 = 0,92$;
- LSTM (RNN): $MAE = 7$ кВтч, $RMSE = 10,2$ кВтч, $R^2 = 0,94$.

Таким образом, LSTM-модель продемонстрировала наиболее высокую точность, что выражается в наименьших значениях MAE и RMSE, а также в наибольшем значении коэффициента детерминации R^2 . Это свидетельствует о

способности LSTM-сетей эффективно выявлять сложные зависимости в данных об энергопотреблении.

Использование разработанных прогнозных моделей для оптимизации режимов работы систем ОВКВ позволило добиться следующих результатов:

- снижение годового энергопотребления: 10 %;
- повышение комфорта: сокращение времени, проводимого вне зоны комфорта, на 50 %.

Эти данные демонстрируют практическую ценность предложенного подхода и подтверждают возможность существенного снижения энергозатрат и повышения комфорта в зданиях.

Предложенная система прогнозирования энергопотребления на основе машинного обучения и оптимизации работы систем отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха показала высокую эффективность. Применение рекуррентных нейронных сетей (LSTM) для прогнозирования в сочетании с алгоритмами оптимизации позволяет значительно снизить энергопотребление и повысить комфорт в зданиях. Полученные результаты открывают широкие перспективы для дальнейших исследований.

Дальнейшие исследования могут быть направлены на разработку более сложных моделей, учитывающих большее количество факторов, влияющих на энергопотребление, включая данные о внутреннем оборудовании, освещённости и других параметрах. Интеграция этих моделей с BIM-моделями зданий позволит автоматизировать процесс сбора данных и упростить разработку интеллектуальных систем управления. Кроме того, перспективным направлением является разработка адаптивных алгоритмов оптимизации, учитывающих динамические изменения в условиях эксплуатации здания, например изменения в графике работы или погодных условиях. Экономический анализ эффективности внедрения предложенных систем, включая оценку срока окупаемости инвестиций и долгосрочных выгод, также является важной задачей для будущих исследований.

Внедрение интеллектуальных систем управления энергопотреблением на основе машинного обучения – перспективное направление развития, способствующее повышению энергоэффективности зданий, снижению эксплуатационных расходов и улучшению экологической обстановки.

Литература

1. СП 50.13330.2012 «Тепловая защита зданий» (актуализированная редакция СНиП 23-02-2003).
2. СП 60.13330.2020 «Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха» (актуализированная редакция СНиП 41-01-2003).
3. Смирнов, В. О. Технология и организация строительства промышленных объектов: учебник / В. О. Смирнов. – Москва: Юрайт, 2021. – 410 с. – ISBN 978-5-534-11002-8. (Представлен в качестве примера, демонстрирующего понимание контекста строительства).

ВЛИЯНИЕ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ НА ТРАНС- ФОРМАЦИЮ УПРАВЛЕНЧЕСКИХ И ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ ПРО- ЦЕССОВ В ТАНЦЕВАЛЬНЫХ СТУДИЯХ

Танцевальная индустрия, традиционно воспринимаемая как сугубо практическая и гуманитарная сфера, в последнее десятилетие претерпевает значительную трансформацию под влиянием цифровых технологий. Современная танцевальная студия – это не только хореографы и залы с зеркалами, но и сложный бизнес-проект, требующий эффективного управления ресурсами, клиентскими потоками и образовательным контентом. Растущая конкуренция на рынке досуговых и образовательных услуг вынуждает руководителей студий искать инновационные пути для привлечения и удержания клиентов, оптимизации внутренних процессов и создания уникального ценностного предложения [1].

Информационные технологии (ИТ) становятся ключевым инструментом в решении управленческих задач в танцевальной индустрии. На сегодняшний день возникла необходимость в систематизации и анализе многообразия ИТ-решений, применяемых в танцевальных студиях, а также оценке их эффективности. Важной задачей является комплексное исследование роли и воздействия информационных технологий на операционную, маркетинговую и образовательную деятельность танцевальных студий.

Одной из наиболее болезненных точек для любого растущего бизнеса является рутинное администрирование. Для танцевальных студий это такие бизнес-процессы, как управление расписанием, учет посещений, контроль платежей, хранение клиентских данных и коммуникация. На смену бумажным журналам и таблицам MS Excel приходят специализированные программные комплексы – системы управления взаимоотношениями с клиентами (CRM) и системы автоматизации бизнеса, адаптированные под специфику студий и фитнес-центров (например, JustCoach, SportSoft, 1С:Фитнес клуб).

Внедрение подобных систем позволяет:

- автоматизировать запись и отмену занятий (клиенты самостоятельно записываются через онлайн-расписание на сайте или в мобильном приложении), что снижает нагрузку на администратора и исключает ошибки;
- осуществлять прозрачный финансовый контроль (система автоматически считает посещения, списывает средства с абонементов, формирует отчеты по выручке, отслеживает долги);
- сегментировать аудиторию и настраивать коммуникацию (CRM позволяет хранить полную историю взаимодействия с каждым клиентом, отправлять персонализированные уведомления через SMS и e-mail);
- управлять ресурсами (контроль заполняемости залов, учет инвентаря, планирование нагрузки тренеров).

Таким образом, ИТ трансформируют административную функцию из затратной в эффективную, высвобождая время руководителя для стратегического развития студии. В условиях, когда потенциальный клиент ищет услуги в первую очередь в интернете, цифровое присутствие студии в сетях становится решающим. Информационные технологии являются основным каналом для построения бренда и привлечения новой аудитории. Корпоративный сайт выступает визитной карточкой и основным инструментом продаж. Важнейшими элементами являются онлайн-расписание, возможность покупки абонемента, форматы онлайн-записи на пробное занятие, а также SEO-оптимизация для попадания в топ выдачи по релевантным запросам («танцы в [городе]», «хип-хоп для начинающих») [2].

В таблице 1 представлена сравнительная характеристика популярных CRM-систем для танцевальных студий по выбранным критериям.

Таблица 1 – Сравнительная таблица CRM-систем для танцевальных студий

Название CRM-системы	Критерии		
	Ключевые функциональные возможности	Особенности тарифов и стоимости	Интеграции и поддержка
1С:Фитнес клуб	Управление расписанием, онлайн-запись, CRM с воронками продаж, контроль посещений, расчет ЗП	Линейка тарифов: от "Старт" (от 2 310 руб./мес.) до "Бизнес" (27 720 руб./мес.)	Более 100 готовых интеграций (ip-телефония, мессенджеры, онлайн-платежи)
Мой Класс	Календарь занятий, учет абонементов, автоматические оповещения	Бесплатный тариф (до 5 групп), платные тарифы	Интеграция с сайтом, телефонией; есть мобильные приложения
FitBase (ФитБейс)	Мобильное приложение для клиентов и тренеров	Стоимость зависит от количества клиентов	Интеграции с мессенджерами (Telegram, WhatsApp)
ImpulseCRM	IP-телефония, мобильное приложение для клиентов в фирменном стиле	Расчет стоимости индивидуальный	Более 10 встроенных интеграций
Wellyx	Встроенные инструменты маркетинга и аналитики	Бесплатной версии нет	Интеграции с платежными системами (например, Stripe)

CRM-системы, представленные в таблице, позволят эффективно управлять бизнес процессами и оптимизировать работу танцевальной студии.

Кроме того, внедрение ИС в деятельность студии даст возможность подключить таргетированную и контекстную рекламу. Так, например, рекламные кабинеты социальных сетей позволят с высочайшей точностью показывать рекламу именно целевой аудитории, выделяя ее по географическому признаку; возрасту; полу и интересам (например, пользователям, интересующимся танцами, фитнесом, определенными музыкантами), а электронная почтовая рас-

сылка (e-mail маркетинг) будет эффективным инструментом для удержания текущих клиентов. Рассылки с анонсами новых наборов, мастер-классов, специальных скидок и полезным контентом поддержат интерес и лояльность клиентов.

Пандемия 2020 года стала катализатором для развития дистанционного образования в танцах. Проведение занятий через Zoom, Skype, специальные платформы стало нормой. Это позволило студиям не только продолжать работу в период ограничений, но и расширить географию аудитории, приглашая учеников из других городов и стран. Появился формат гибридных занятий, где часть группы присутствует очно, а часть подключается онлайн [3]. Популярной стала возможность создания и использование видеоуроков: от коротких обучающих роликов в соцсетях до полноценных многочасовых курсов на платформах типа Teachable, GetCourse, Udemy, что позволило ученикам повторять материал дома, а студии – создавать пассивный источник дохода. Постепенно начинают появляться эксперименты с использованием виртуальной реальности (VR) для обучения. Ученик может оказаться на виртуальной сцене или в классе с известным хореографом, что кардинально меняет восприятие и тренирует уверенность [4].

Также в условиях дистанционного обучения часто стала применяться замедленная съемка (slow-motion) для разбора сложных движений, использование приложений для анализа позы и техники (например, с помощью скелетной анимации), синхронизация видео с музыкой. Фитнес-трекеры и умные часы помогают танцорам и преподавателям отслеживать физическую нагрузку, пульс, количество сожженных калорий, что способствует более осознанному подходу к тренировкам и предотвращению переутомления [5].

Очевидно, что информационные технологии перестали быть вспомогательным инструментом и стали неотъемлемым структурным элементом современной танцевальной студии. Их интеграция носит комплексный характер, затрагивая три ключевых блока: управление, маркетинг и образование.

Внедрение ИТ-решений приводит к следующим стратегическим преимуществам:

- снижение издержек на рутинные операции, минимизация человеческих ошибок, повышение прозрачности бизнес-процессов;
- создание удобного и технологичного сервиса для клиента становится весомым конкурентным преимуществом;
- за счет онлайн-форматов и диджитал-маркетинга студия перестает быть ограниченной физическими границами своего района или города;
- за счет использования цифровых учебных материалов, технологий анализа и обратной связи.

Таким образом, степень цифровизации деятельности прямо коррелирует с устойчивостью и потенциалом роста танцевальной студии. В перспективе можно ожидать дальнейшего проникновения технологий искусственного интеллекта для персонализации обучения, развития метавселенных для проведения виртуальных занятий и баттлов, а также интеграции носимых устройств в тренировочный процесс. Руководителям студий необходимо рассматривать инве-

стиции в ИТ не как затраты, а как ключевые инвестиции в будущее развитие своего бизнеса.

Литература

1. Иванов А.В. Цифровая трансформация сферы физической культуры и спорта // Наука и спорт: современные тенденции. – 2021. – Т. 9. – № 4. – С. 112-120.
2. Петрова С.М. Маркетинг в социальных сетях как инструмент продвижения образовательных услуг // Экономика и бизнес: теория и практика. – 2022. – № 3-2. – С. 145-149.
3. Сидоров К.Л. Управление клиентским опытом (CX) в сфере услуг на основе CRM-систем // Бизнес-информатика. – 2020. – № 1 (51). – С. 55-67.
4. Hwang, J., & Hwang, H. The Impact of VR Technology on Motor Learning in Dance Education: A Literature Review. // International Journal of Human Movement Science. – 2022. – Vol. 16, No. 1. – pp. 23-35.
5. Smith, J. The Digital Dance Studio: How Technology is Changing the Way We Learn and Teach Dance. // Journal of Dance Education. – 2021. – Vol. 21, Issue 3. – pp. 134-142.

*М.Ю. Лебедева, к.т.н., доц.; А.В. Кафтунова, студ.
(Филиал ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» в г. Смоленске)*

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ТУРИСТИЧЕСКИХ АГЕНТСТВ: СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ И ВЛИЯНИЕ НА КОНКУРЕНТОСПОСОБНОСТЬ

Туристическая индустрия является одной из наиболее динамично развивающихся отраслей мировой экономики и одновременно одной из самых зависимых от прогресса в области информационных технологий. Деятельность современного туристического агентства (ТА) кардинально отличается от работы его предшественников десяти- или двадцатилетней давности. Если ранее ключевыми активами были эксклюзивные договоры с туроператорами и личные связи, то сегодня основой конкурентоспособности становится эффективное использование цифровых инструментов.

Информационные технологии (ИТ) проникли во все бизнес-процессы турагентства: от маркетинга и привлечения клиентов до формирования продукта, продаж, обслуживания и пост-продажного сопровождения. Цифровая трансформация не только автоматизировала рутинные операции, но и породила новые форматы взаимодействия с потребителем, изменила его ожидания и требования. В данном контексте актуальность исследования роли и влияния ИТ на деятельность туристических агентств не вызывает сомнений [1]. Таким образом, становится очевидной важность комплексного анализа применения информационных технологий в деятельности туристических агентств, позволяющего выявлять ключевые тренды и проводить оценку их воздействия на операционную эффективность и стратегическую конкурентоспособность бизнеса.

Основу технологической инфраструктуры современного ТА составляют несколько классов информационных систем (см. рисунок 1).

Рассмотрим такие классы информационных систем, как глобальные дистрибутивные системы (GDS), CRM-системы, системы автоматизации back-office в деятельности туристических агентств.

GDS (Global Distribution System), такие как Amadeus, Sabre, Galileo и Travelport, исторически стали первым и самым значимым технологическим прорывом в индустрии. Эти системы представляют собой масштабные элек-

тронные базы данных, агрегирующие в режиме реального времени информацию о наличии авиабилетов, номеров в отелях, условиях проката автомобилей и других туристических услугах от тысяч поставщиков по всему миру [2].

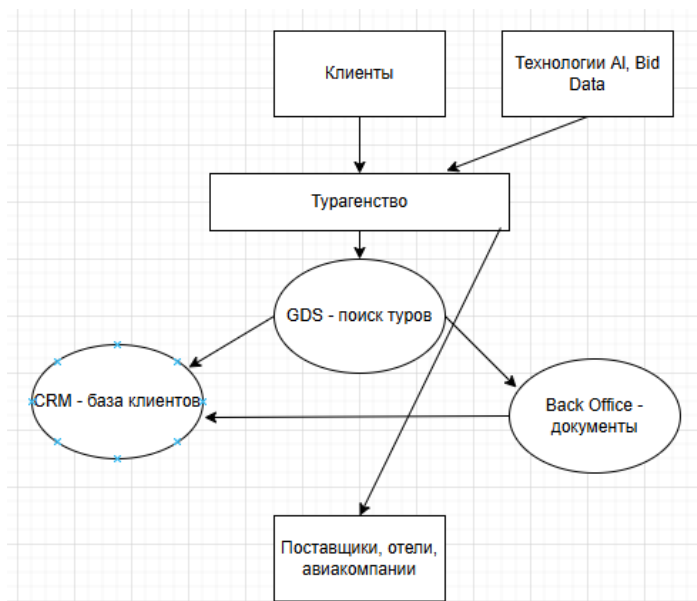


Рисунок 1 – Технологическая инфраструктура современного ТА

Использование GDS позволяет турагенту реализовывать следующие функции:

- мгновенно сравнивать тарифы и наличие мест у различных провайдеров;
- формировать сложные маршруты (complex itineraries);
- осуществлять моментальное бронирование и подтверждение;
- получать актуальную информацию о правилах авиакомпаний и иммиграционных требованиях.

Таким образом, GDS ликвидировали информационную асимметрию и предоставили малым и средним агентствам доступ к тем же ресурсам, что и крупным игрокам, существенно демократизировав рынок.

CRM-системы (Customer Relationship Management) стали центральным элементом для управления продажами и клиентской базой. В условиях высокой конкуренции удержание постоянного клиента стало выгоднее, чем привлечение нового.

Современные CRM-решения для туризма позволяют реализовывать следующие функции:

- вести детальную историю взаимодействий с каждым клиентом (предыдущие поездки, предпочтения, аллергии, особенности);
- сегментировать базу для таргетированных маркетинговых рассылок;
- автоматизировать процесс follow-up (напоминания о бронировании, рассылка писем с благодарностью, опросы после поездки);
- назначать задачи менеджерам и контролировать воронку продаж.

Интеграция CRM с другими системами (телефонией, email, мессенджерами) создает единое информационное пространство вокруг клиента.

Системы автоматизации back-office. К этому классу относятся специализированные программные комплексы (например, на платформах «Мегатек», «Само-тур» и др.), которые автоматизируют внутренние процессы, такие как: формирование отчетов, контроль кассовой дисциплины, взаиморасчеты с туроператорами и клиентами; автоматическое формирование договоров, ваучеров, страховых полисов; построение отчетов по ключевым показателям эффективности (KPI) – прибыльность менеджеров, конверсия, популярные направления. Данные системы минимизируют человеческий фактор, снижают количество ошибок и высвобождают время сотрудников для творческих и консультационных задач [3].

Помимо устоявшихся систем, на деятельность туристических агентств все больше влияют новые технологические тренды. Смартфон стал основным устройством для планирования и бронирования путешествий. Для турагентств это выражается в необходимости разрабатывать мобильные версии сайтов и собственные приложения; интегрироваться с мессенджерами (WhatsApp, Telegram) для коммуникации с клиентами; использовать технологии мобильного маркетинга (push-уведомления, геолокационные предложения) [4].

Мобильность обеспечивает постоянный контакт с путешественником не только на этапе продажи, но и во время самой поездки (напоминания о вылете, советы по месту назначения, экстренная поддержка).

Анализ больших массивов данных позволяет перейти от реактивного к проактивному обслуживанию.

AI-чаты и боты решают типовые запросы клиентов 24/7, сокращая нагрузку на менеджеров. Персонализация – алгоритмы машинного обучения анализируют поведение и предпочтения пользователей, чтобы предлагать максимально релевантные туры и дополнительные услуги (например, «клиентам, которым понравился этот отель в Греции, также бронировали экскурсию на Метеоры»). Прогнозная аналитика – прогнозирование спроса и динамики цен позволяет давать клиентам выгодные рекомендации по времени бронирования.

Турагентства могут использовать VR-туры для того, чтобы позволить клиенту «побывать» в отеле, на палубе круизного лайнера или на экскурсии до момента покупки. Это мощный инструмент для усиления доверия и снижения барьера совершения покупки.

Внедрение информационных технологий коренным образом изменило конкурентную среду и сами бизнес-модели турагентств. С появлением онлайн-бронировщиков (OTA – Online Travel Agencies, например, Booking.com, Aviasales) классические ТА столкнулись с прямой ценовой конкуренцией. Их выживание стало зависеть от способности предоставить добавленную стоимость, которую не могут дать алгоритмы [5].

Проведем сравнительный анализ по выбранным критериям, который систематизирует ключевые CRM-системы для туристического бизнеса (см. таблицу 1).

Таблица 1 – Сравнительный анализ CRM-систем для туристических агентств

Название CRM-системы	Критерии			
	Ключевые функциональные возможности	Цены / Наличие бесплатного тарифа	Преимущества	Недостатки
U-ON.Travel	Автозаполнение документов	От 699 руб./мес.; есть пробный период 14 дней	Лучшее соотношение цены и функциональности, ежедневные обновления, бесплатное обучение	Сложный и громоздкий интерфейс, много платных интеграций
МоиДокументы-Туризм	Единая база туристов, онлайн-оплата туров	От 6 600 руб./год	Широкий функционал, заточенный под турбизнес, понятный интерфейс	Устаревший дизайн, редкие обновления, поддержка не всегда оперативна
Простой бизнес	Универсальная CRM: тайм-менеджмент, клиентская база	От 300 руб./мес.; есть бесплатная версия и пробный период	Нет ограничений по числу пользователей, работает без интернета, оперативная поддержка.	Недостаточно развита кастомизация, нет функций управления рекламой
okoCRM	Конструктор чат-ботов	От 572 руб./мес. за сотрудника; есть бесплатная версия и пробный период 7 дней	Сильный акцент на автоматизацию, мобильное приложение, открытый API	Короткий пробный период для освоения всех инструментов

Анализ современных решений показывает, что рынок предлагает продукты с разной специализацией, функционалом и ценовой политикой.

ИТ в этом случае являются не заменой менеджера, а инструментом, который усиливает его экспертные качества, освобождая время от рутины для творческой и консультационной работы. Автоматизация рутинных операций (поиск, бронирование, документооборот) приводит к значительному снижению операционных издержек и увеличению скорости обслуживания. Менеджер может обрабатывать больше заявок с меньшими трудозатратами и с меньшим количеством ошибок. Это напрямую влияет на рентабельность бизнеса. Цифровые инструменты маркетинга (SEO, контекстная реклама, социальные сети) позволяют даже небольшому локальному агентству эффективно привлекать целевую аудиторию по всей стране или даже за рубежом, специализируясь на определенном направлении или типе отдыха.

Информационные технологии стали неотъемлемым и критически важным элементом экосистемы современного туристического агентства. Они трансформировали все этапы его работы: от поиска и сравнения вариантов до бронирования, оформления документов и пост-продажного обслуживания. Эволюция продолжается, если сначала ИТ автоматизировали процессы (GDS, back-office), затем подключили к ним клиента (онлайн-поисковики, CRM), то сегодня, с появлением AI и Big Data, технологии начинают предугадывать desires (желания и запросы клиентов) и предлагать решения (proactively). Успех турагентства в современных условиях определяется уже не только тем, используются ли информационные технологии для автоматизации бизнес-процессов, но в большей степени тем, насколько эффективно и стратегически грамотно осуществляется данные процессы. Технологии стерли барьеры для входа на рынок, но одновременно создали новые возможности для дифференциации. Выиграют в этой гонке те игроки, которые смогут совместить мощь цифровых инструментов с неподдельной человеческой экспертизой, креативностью и способностью выстраивать долгосрочные доверительные отношения с клиентом, превращая стандартную покупку тура в создание уникального и незабываемого путешествия.

Литература

1. Богданов Е.И., Орловская В.П. Информационные технологии в туристской индустрии. – М.: Академия, 2019. – 256 с.
2. Косолапов А.Б. Технологии и организация туроператорской и турагентской деятельности. – М.: КНОРУС, 2021. – 288 с.
3. Buhalis, D., & Law, R. (2008). Progress in information technology and tourism management: 20 years on and 10 years after the Internet—The state of eTourism research. *Tourism Management*, 29(4), 609–623.
4. Egger, R., & Buhalis, D. (Eds.). (2008). *eTourism Case Studies: Management and Marketing Issues*. Butterworth-Heinemann.
5. Иванов И.В. Влияние цифровой трансформации на конкурентные стратегии предприятий сферы туризма // Современная конкуренция. – 2020. – Т. 14. – № 5. – С. 91-105.

И.В. Лукашов, маг.; А.Н. Штемпель, асп.; С.А. Федулова, ст.пр.; Я.А. Федулов, к.т.н, доц.
(Филиал ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» в г. Смоленске)

ВЛИЯНИЕ СТРУКТУРЫ АМПЛИТУДНО-ЧАСТОТНЫХ ДАННЫХ НА ВЫБОР РЕГРЕССИОННОЙ МОДЕЛИ

В современной инженерии и технологиях анализ амплитудно-частотных данных занимает важное место в области производства датчиков и обработки сигналов. Эти данные находят широкое применение в производственном процессе, включая машиностроение, электронику и тестирование оборудования.

Эффективная обработка, интерпретация и дальнейшее использование таких данных требуют использования множества методов. Выбор подходящей регрессионной модели зависит от структуры данных, что подчёркивает необходимость глубокого анализа их характеристик.

Значимость проведения исследований в этой области обусловлена необходимостью повышения точности калибровки датчиков и оптимизации производственных процессов. Правильный выбор регрессионной модели может существенно повлиять на качество и надежность результатов. Понимание струк-

туры амплитудно-частотных данных позволяет точно подходить к выбору аналитических методов.

Экспериментальная установка для исследования АЧХ под названием ВС-421 включает в себя 2 специализированных стенда: низкочастотный APS 113-AB SHAKER и высокочастотный TIRA vib S 51110-C. Данные установки обеспечивают тестирование датчиков на широком диапазоне частот, что позволяет точно оценить поведение датчиков в производственном процессе. Каждый стенд оснащён эталонным датчиком, обеспечивающим ускорение в 10 м/с^2 , что позволяет измерять коэффициент преобразования Z ($\text{мВ}/(\text{м/с}^2)$) с высокой точностью.

Низкочастотный стенд APS предназначен для тестирования в диапазоне $0.5\text{-}40$ Гц. Он поддерживает максимальную амплитуду в 158 миллиметров, скорость до 1000 мм/с и максимальную нагрузку до 1.5 Кг. Воздушные подшипники обеспечивают почти нулевое трение, что важно для измерения данных датчиков с низким демпфированием.

Высокочастотный стенд TIRA охватывает диапазон $40\text{-}10000$ Гц с максимальной амплитудой в 4 миллиметра. Максимальная скорость до 1.2 м/с. Эффективно поддерживает нагрузку до 0.4 килограммов. Использует редкоземельные магниты, что обеспечивает высокую жёсткость по осевым направлениям.

Общий стенд ВС-421 позволяет проводить тестирование в широком диапазоне частот, обеспечивает непрерывное переключение между различными стендами. Использует частотную модуляцию, что позволяет практически моментально переключаться между соседними частотами.

Сбор АЧХ проводился на экспериментальных стендах в рамках производственного процесса [1]. Всего было протестировано 84 датчика на 44 частотах в диапазоне $0.5\text{-}10000$ Гц. Эталонные датчики, обеспечивающие ускорение 10 м/с^2 , использовались для калибровки и измерения коэффициента преобразования Z . Перед каждым запуском проводилось ожидание для зарядки внутренних ёмкостей и стабилизации переходного процесса прибор-датчик.

Опорное значение на частоте 200 Гц не должно отклоняться от $1 \text{ мВ}/(\text{м/с}^2)$ более, чем на 10% . Остальные значения не могут отклоняться более чем на 5% от опорного значения в диапазоне от 0.5 до 5000 Гц и не более, чем на 12.5% в диапазоне от 5000 до 10000 Гц.

Анализ данных выполнялся с использованием библиотек Pandas, NumPy, Matplotlib и Seaborn. Процесс включал следующие этапы:

- расчёт коэффициента вариации для оценки стабильности данных;
- построение описательной статистики;
- визуализация данных посредством графика размаха и гистограмм;
- выявление аномалий и межквартильного размаха;
- проверка нормальности распределения с тестом Шапиро-Уилка.

Были получены следующие результаты. На рисунке 1 показаны диаграммы размаха для каждой частоты.

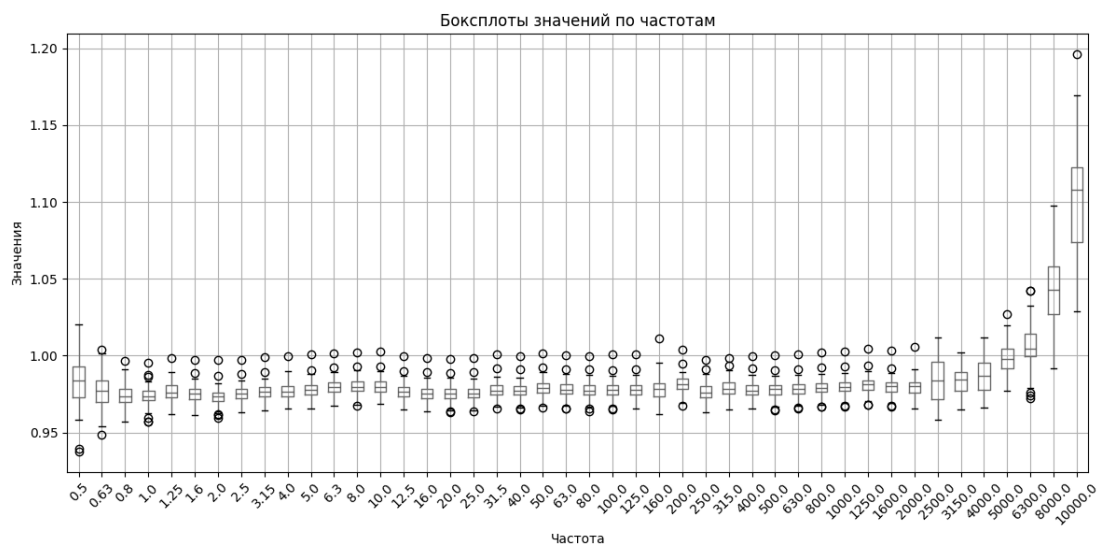


Рисунок 1 – Диаграммы размаха

Из рисунка 1 можно сделать вывод, что значения на частотах, начиная с частоты 2500 Гц сильно завышены по отношению к средним частотам, что обусловлено внутренним строением датчика и архитектурой сборки. Это может усложнить предсказания регрессионных моделей из-за разного масштаба данных. Так же наблюдается небольшое увеличение значений на крайне низких значениях, что может быть обусловлено медленным разгоном низкочастотного стенда. Количество выбросов на всех частотах незначительное, замена их на медианные значения может привести к некорректным результатам.

Для исследования нормальности распределений значений в пределах каждой частоты был проведен тест Шапиро-Уилка[2]. Этот статистический метод вычисляет значение W , основанное на взвешенной сумме разностей между упорядоченными значениями выборки и сопоставляет его с критическими значениями для определения p -value. Если p -value превышает заданный уровень значимости, который обычно составляет 0.05, распределение считается нормальным.

Псевдо - код Шапиро – Уилка предоставлен на рисунке 2.

```
for i, freq in enumerate(frequencies):
    row_values = values.iloc[i].dropna()
    if len(row_values) > 3:
        stat, p = shapiro(row_values)
        print(f"Частота {freq}: Shapiro-Wilk stat={stat:.4f}, p-value={p:.4f} (нормально, если p>0.05)")
```

Рисунок 2 – Псевдо - код анализа Шапиро – Уилка

После проведения теста было выявлено, что для высоких частот, которые представляют наибольший интерес для предсказания, p -value оказалась достаточно высокой, что облегчит дальнейшее предсказание значений на данных частотах.

Низкие значения на средних частотах можно обусловить «сдвигом» данных в более низкие или высокие значения. На рисунке 3 изображены гистограммы для некоторых частот из среднего диапазона.

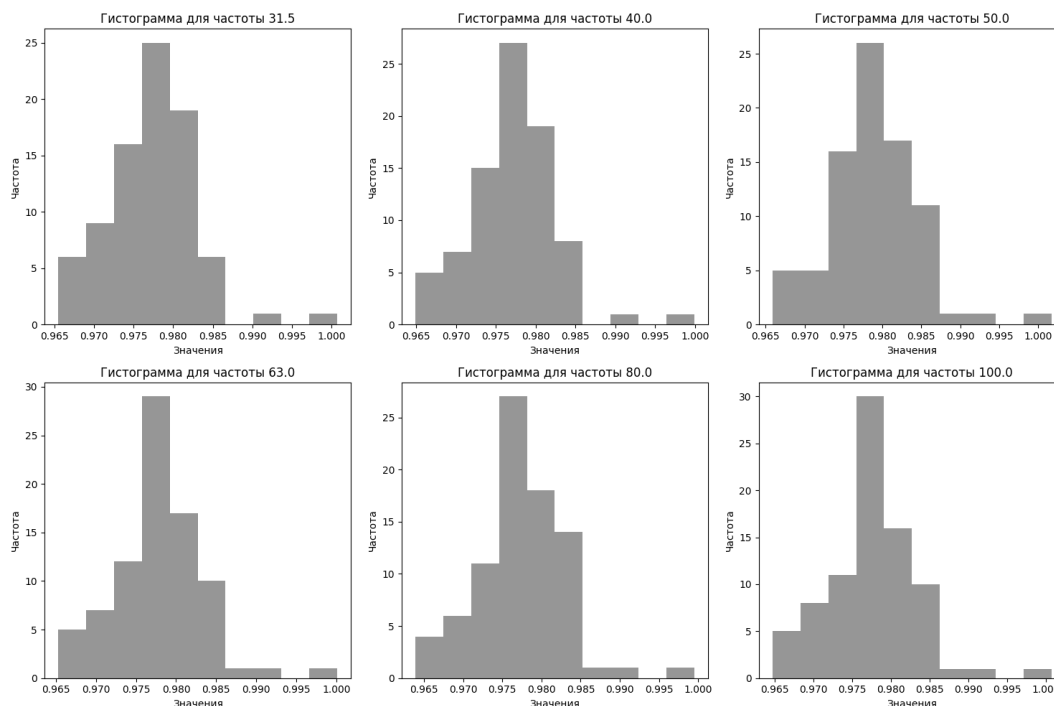


Рисунок 3 – Гистограммы распределения коэффициента

Из рисунка 3 можно сделать вывод, что данные на этих частотах преимущественно стремятся к низким значениям.

Далее был проведён корреляционный анализ. Его важность обусловлена тем, что позволяет выявить степень взаимосвязи между значениями коэффициента преобразования на разных частотах [3].

Псевдо - код корреляционного анализа предоставлен на рисунке 4.

```

correlation_matrix = initialize matrix of size (num_frequencies x
num_frequencies)
For i from 0 to num_frequencies - 1:
    For j from 0 to num_frequencies - 1:
        x = transposed_data[i]
        y = transposed_data[j]
        correlation_matrix[i][j] = pearson_correlation(x, y)

```

Рисунок 4 – Псевдо - код корреляционного анализа

На рисунке 5 показана корреляционная матрица для 44 частот.

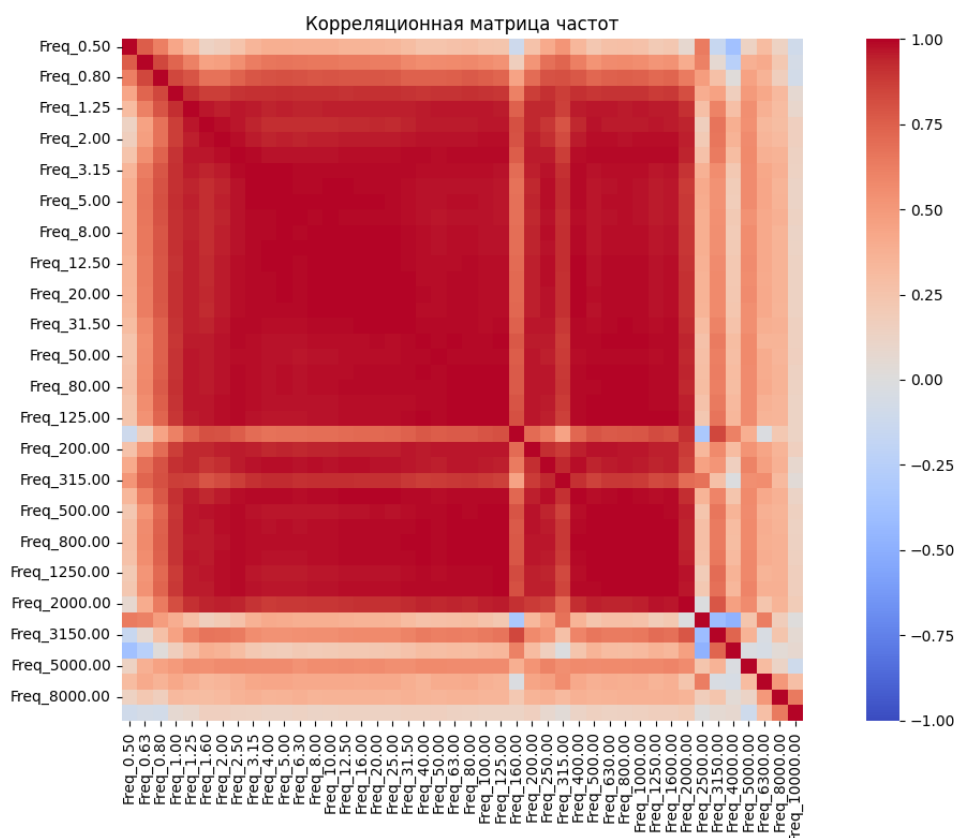


Рисунок 5 – Корреляционная матрица частот

Исходя из рисунка 5 можно сделать вывод, что частоты, начиная с 2500 Гц, слабо коррелируют с остальными. Это может указывать на нелинейные зависимости, ограничивающие применение традиционных регрессионных моделей.

Анализ данных в рамках производственного процесса выявил различия в структуре амплитудно-частотных характеристик в зависимости от частотного диапазона. На частотах 0.5-2000 Гц коэффициент вариации находится в пределах 1.62%, что указывает на относительно стабильное поведение датчиков. На высоких частотах показатель вырастает до 4.2%, отражая большую вариабельность. Тест Шапиро – Уилка подтвердил нормальность распределения, что позволяет использовать линейные модели на низких частотах с устойчивым результатом.

Корреляционный анализ показал низкую корреляцию между данными на частотах 2500-10000 Гц и остальными частотами. Это указывает на сложные нелинейные зависимости, что делает неприменимыми такие модели, как: линейная регрессия, гребневая регрессия Ridge, лассо регрессия LASSO, множественная регрессия. Данные линейные модели плохо справляются с нелинейными зависимостями, поскольку предполагают линейную связь между переменными, что приводит к значительным ошибкам при прогнозировании в условиях высокой вариабельности.

Исходя из этого, для точного предсказания в производственном процессе рекомендуется использовать методы машинного обучения, такие как: нейронные сети или полиномиальная регрессия. Данные методы могут быть адапти-

рованы для моделирования нелинейных зависимостей, улучшая точность калибровки датчиков на всех частотах.

Литература

1. Сидоров А.А. Калибровка и тестирование датчиков вибрации: монография / А.А. Сидоров. – СПб.: Лань, 2022.
2. Сергеев С.С. Статистические методы в анализе экспериментальных данных: учебник / С.С. Сергеев. – М.: Академия, 2019.
3. Козлов В.В., Смирнова Е.Е. Применение корреляционного анализа в обработке сигналов: статья / В.В. Козлов, Е.Е. Смирнова // Вестник московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия «Приборостроение». -2021-№3

*Е.Е. Маркелов, асп.; Е.В. Преображенский, к.т.н.; В.И. Галкин, д.т.н., проф.
(Московский авиационный институт, г. Москва)*

СИСТЕМА ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ДЛЯ ТЕХНОЛОГИИ ГОРЯЧЕЙ ОБЪЕМНОЙ ШТАМПОВКИ

Кузнечно-штамповочное производство остается одной из наиболее востребованных отраслей промышленности, позволяющей получать детали с высокими механическими свойствами. Ковка и горячая штамповка за счет интенсивных деформаций обеспечивают повышенную прочность и износостойкость изготавливаемых изделий. При этом технологический процесс может проводиться на разнообразном оборудовании, имеющемся на предприятии. Это могут быть молоты, кривошипные горячештамповочные или гидравлические прессы разного усилия. Однако от правильности выбора оборудования, инструментов и способа производства поковок зависит себестоимость, точность размеров, вероятность возникновения дефектов и другие параметры, отвечающие за качество детали. Особую важность приобретают навыки и практический опыт технолога. Но даже для начинающих специалистов необходим электронный помощник со справочной информацией и вариантами схем рабочей оснастки. Следовательно, перспективен подход, связанный с автоматизацией поиска решения для задач проектирования штампов и разработки процессов обработки металлов давлением. Выход в данной ситуации видится в использовании нового специализированного программного обеспечения, имеющего интуитивно понятный интерфейс и наглядно отображающего результаты с альтернативными вариантами производства поковок.

Отметим, что в последние годы в нашей стране и за рубежом проведены многочисленные исследования по возможности использования искусственных нейронных сетей для интенсификации процессов в области горячей штамповки. Так, авторы из Германии [1] предложили интеллектуальный классификатор, который на основе загружаемой в него геометрической модели детали производит анализ и присваивает определенную группу. На следующем шаге применяется обученная нейронная сеть, соответствующая найденной группе, для помощи в проектировании формы поковки. Практически получается готовый ручей штампа, что, в свою очередь, позволяет провести численное моделирование методом конечных элементов и подтвердить бездефектность производства. Данный метод можно расширить на другие задачи, стоящие перед технологом.

Однако в то же время следует оценить все преимущества и недостатки подобных подходов, основанных на автоматизированном предложении решения для вопросов разработки технологии штамповки.

На первом этапе исследования проведен SWOT-анализ (от англ. Strengths Weaknesses Opportunities Threats) – хорошо зарекомендовавший себя метод стратегического планирования, позволяющий выделить сильные и слабые внутренние стороны, внешние риски и перспективы. Проведены опросы ведущих и начинающих специалистов в области обработки металлов давлением. Определено (рисунок 1), что большинство технологов являются уверенными пользователями персональных компьютеров, систем автоматизированного проектирования, и, в целом, позитивно относятся к новым технологиям, в частности к нейронным сетям. Программные средства позволят быстро создавать точную штамповую оснастку со всеми элементами, улучшив качество продукции и уменьшив вероятность ошибок при проектировании, а также снизив количество отходов производства. Но высказываются опасения, что лицензированные приложения будут дорогостоящими при переходе на новые версии (в том числе из-за роста потребностей в ресурсах ЭВМ), потребуют длительной экспертизы и сложного обучения, сохранится вероятность потери данных и ошибок совместимости при интеграции систем. Наиболее существенным ограничением является также то, что технолог окажется ограничен в творческом решении задач, а значит, потенциально откажется от ручного контроля результатов и прекратит поиск более рациональных вариантов.

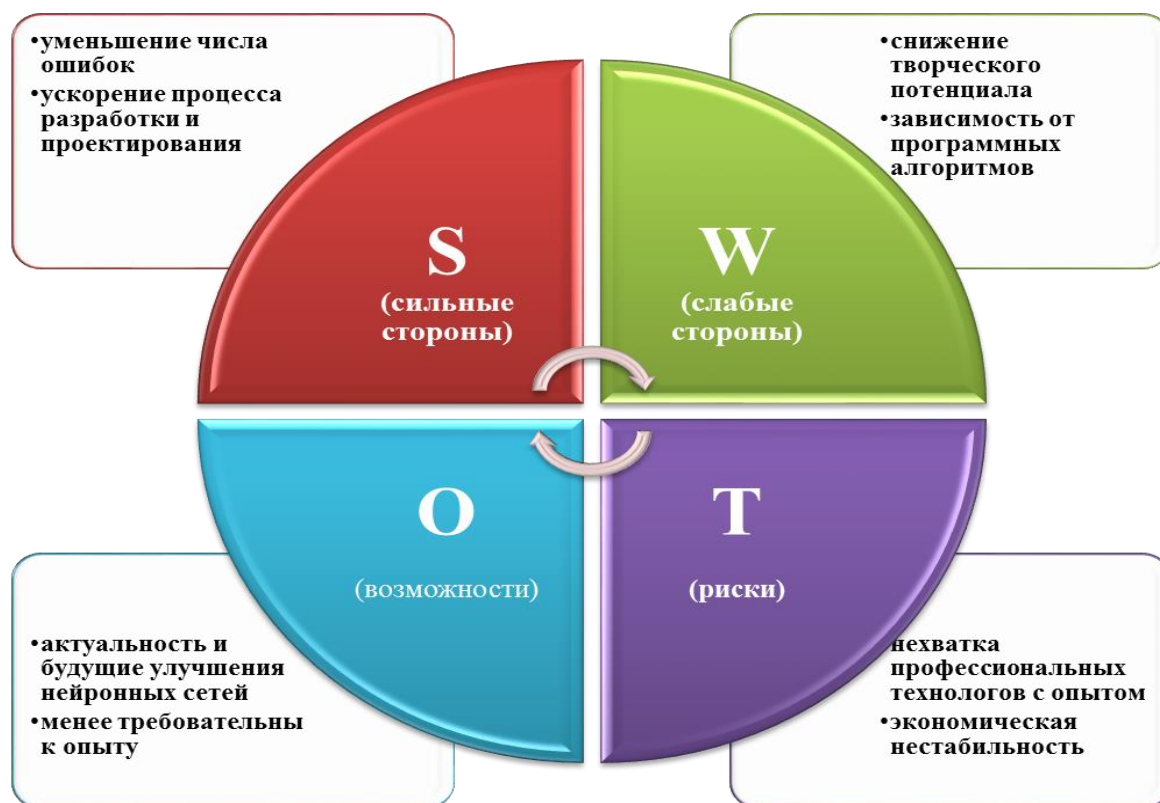


Рисунок 1 – Результаты оценки перспектив внедрения автоматизированных систем поддержки решений в области горячей объемной штамповки

Из внешних факторов стоит выделить возможности интеграции с умным производством, концепцией перехода к автоматизации («Индустрия 4.0»), возможностями изготовления деталей из новых материалов. К угрозам стоит отнести существенный недостаток на рынке труда профессиональных сотрудников с требуемым опытом производства и использования систем поддержки решений, конкуренция с традиционным производством, адаптация к новым технологиям и нестабильную экономическую ситуацию.

Проведенный SWOT-анализ не только подчеркивает наличие новых возможностей, но и подразумевает, что следует рассматривать сильные стороны как инструмент для снижения рисков. Так, интегрированные инструменты должны быть понятными инженерам, чтобы обучение проходило эффективно.

Поскольку перечисленные плюсы от внедрения более существенны, разработано новое программное обеспечение [2], позволяющее по загруженному чертежу осесимметричной детали подготовить форму поковки и спроектировать штамповую оснастку в SolidWorks. Пользователю после загрузки dxf-файла предоставляется возможность внести необходимые дополнительные параметры и после указания рабочего контура выполнить процесс анализа и проектирования (рисунок 2).

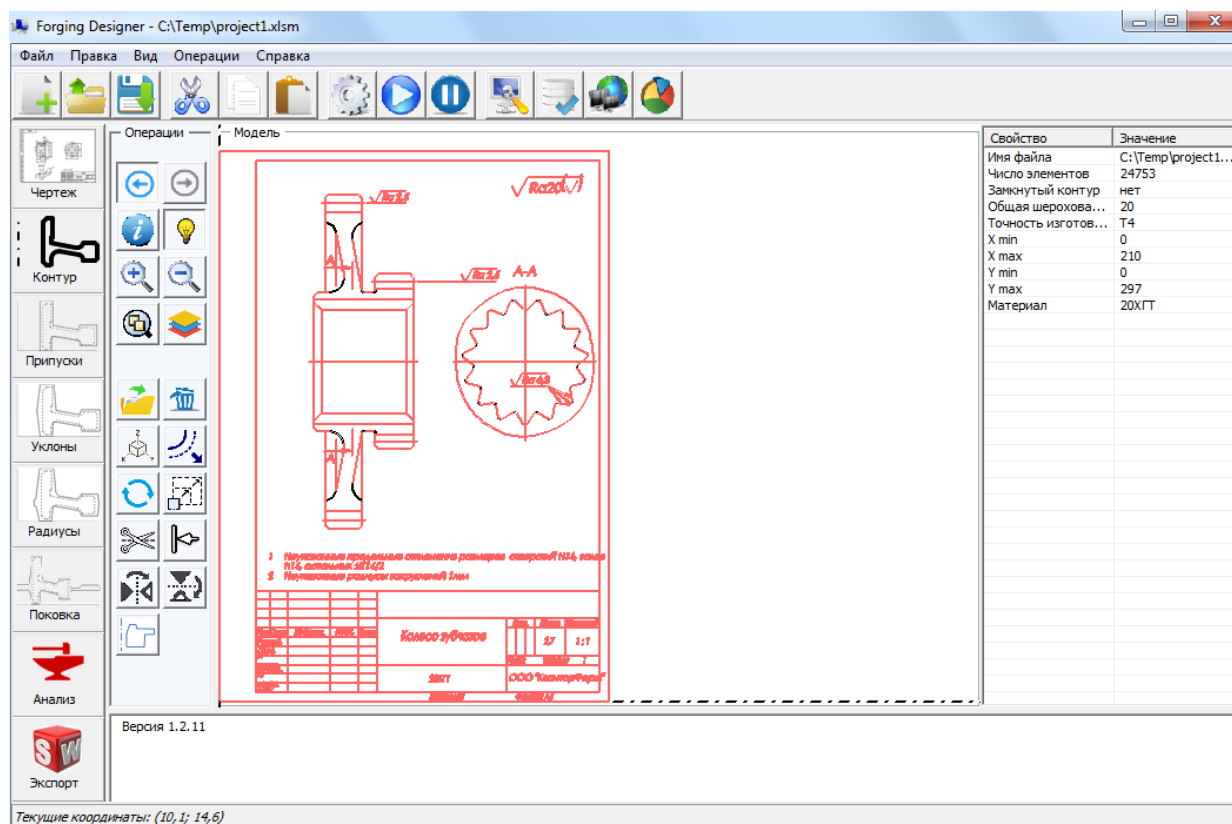


Рисунок 2 – Интерфейс разработанного предложения после загрузки dxf-файла с исходным контуром детали

Особенностью предлагаемого программного продукта является то, что по редактируемому каталогу оборудования подбираются наиболее эффективные варианты штамповки, а штамповочные уклоны, припуски на механическую обработку, допуски на размеры определяются в строгом соответствии с ГОСТ

7505-89. Опытному оператору дополнительно предназначены инструменты для ручного изменения определенных параметров. Поскольку расчет вариантов для двумерных задач выполняется менее чем за секунду, то пользователь имеет наглядное представление о том, как выбранный фактор влияет на геометрию поковки и коэффициент использования материала. Кроме того, до экспорта разработанной штамповой оснастки предлагается выполнить моделирование методом конечных элементов. В приложении предусматривается передача исходных данных (оборудование, спроектированный ручей штампов, подобранная заготовка и её материал) в QForm – российскую программу для численного анализа технологических процессов горячей штамповки.

В результате моделирования в QForm удается уточнить течение металла, убедиться в отсутствии дефектов, в достаточности усилия оборудования. Отметим, что экспорт геометрии штампов позволяет воспользоваться любыми другими доступными программами анализа. Например, предусмотрен отдельный алгоритм для прогнозирования эксплуатационных свойств детали [3], который может быть использован со многими современными приложениями, поддерживающими языки программирования.

Подтвержденная в ходе конечно-элементного анализа модель служит основой для проектирования штамповой оснастки. С разработанной системой поставляется библиотека из универсальных блоков штампов для молота, а также вставок для прессов. В результате экспорта геометрии и её открытия в SolidWorks удается получить готовую модель для производства оснастки на станках с числовым программным управлением. Кроме того, связанный с файлом чертеж позволяет оперативно подготовить требуемую технологическую документацию. Ещё одним преимуществом новой системы является взаимосвязь с электронными таблицами: выполненные расчеты коэффициента использования металла, рационального объема заготовки заносятся в ячейки подготовленной маршрутной карты, что существенно облегчает работу технолога. Сохранение проекта для повторного применения или обучения новых нейронных сетей также относится к положительным моментам.

Таким образом, выполнено исследование, подтвердившее целесообразность внедрения систем поддержки принятия решений для технологов, занимающихся разработкой процессов горячей объемной штамповки. Предложено новое программное обеспечение, решающее основные задачи для проектирования оснастки при производстве осесимметричных деталей из сталей. Показано, что алгоритмы обеспечивают высокопроизводительные расчеты с высокой точностью, формируя в автоматизированном режиме необходимые выходные файлы.

Литература

1. Hedicke-Claus, Yorek & Kriwall, Mareile & Stonis, Malte & Behrens, Bernd-Arno. Automated design of multi-stage forging sequences for die forging. //Production Engineering. 2023. 17. <https://doi.org/10.1007/s11740-023-01190-x>
2. Галкин В.И. и др. Разработка программного обеспечения для проектирования формы поволоков осесимметричных деталей из сталей. //Металлы. 2024. №4. С.85-93. <https://doi.org/10.31857/S0869573324048593>
3. Галкин В.И., Преображенский Е.В., Маркелов Е.Е., Ященко Б.Ю. Расчет эксплуатационных свойств деталей в процессе моделирования горячей объемной штамповки. //Технология легких сплавов. 2024. № 4. С. 66-72.

МАТРИЧНО-ПРОЕКЦИОННАЯ МОДЕЛЬ АКУСТИЧЕСКИХ УТЕЧЕК ИНФОРМАЦИИ В ЗАЩИЩЁННЫХ ПОМЕЩЕНИЯХ

В условиях усиления требований к защите конфиденциальной речевой информации всё большее значение приобретает проектирование выделенных помещений (например, переговорных комнат, залов совещаний, центров криптографической защиты), устойчивых к несанкционированным акустическим утечкам. Подобные утечки могут происходить как через строительные конструкции, так и посредством инженерных коммуникаций, создавая реальные риски компрометации информации.

На сегодняшний день большинство методик и нормативных документов, регламентирующих расчёт акустической защищённости на этапе проектирования, относятся к информации ограниченного распространения и недоступны для широкого круга специалистов. В то же время современный уровень развития прикладной акустики и вычислительных методов позволяет на основе открытых физических моделей распространения звука – в частности, законов затухания, дифракции и отражения акустических волн – построить достаточно точную и практически применимую расчётную схему. Предложенный в данной работе подход опирается исключительно на общедоступные формулы и дополняется рядом математических оптимизаций, обеспечивающих как вычислительную эффективность, так и адекватную пространственную детализацию результатов.

Для количественного описания распространения звуковой энергии в рамках предлагаемой модели используются два ключевых физических соотношения: закон геометрического затухания звуковой волны в однородной среде и выражение для коэффициента передачи звукового давления при переходе волны через границу раздела двух сред.

Согласно ГОСТ 31295.1-2005, при прохождении звуком чистого тона расстояния s начальное звуковое давление p , вследствие звукопоглощения атмосферой спадает по экспоненте как при распространении плоской звуковой волны в свободном звуковом поле. Звуковое давление p_e рассчитывают по формуле:

$$p_e = p_i \exp(-0,1151aS)$$

Выражение $\exp(-0,1151aS)$ означает, что трансцендентное число e возведено в степень, равную натуральному логарифму числа $0,1151 aS$. При этом константа $0,1151 = \frac{1}{10 \lg(e^2)}$.

Затухание уровня звукового давления L_p с расстоянием r от точечного источника в воздушной среде описывается с учётом как геометрического расхождения волн, так и диссипативных потерь в атмосфере:

$$L_p(r) = L_{p,0} - 20 \log_{10}(r) - \alpha r$$

где:

$L_{p,0}$ – уровень звукового давления на расстоянии 1 м от источника (дБ);

r – расстояние от источника до точки наблюдения (м);

α – коэффициент атмосферного поглощения (дБ/м), значение которого зависит от частоты звука, температуры и относительной влажности воздуха. В расчётах настоящей работы значения α принимаются в соответствии с данными, приведёнными в приложении ГОСТ 31295.1–2005.

При прохождении звуковой волны через границу раздела двух сред (например, воздух-ограждающая конструкция-воздух) часть энергии отражается, а часть передаётся. Для нормального падения плоской волны коэффициент передачи звукового давления τ определяется через характеристические акустические импедансы сред:

$$\tau = \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2}$$

где $Z_1 = \rho_1 c_1$ и $Z_2 = \rho_2 c_2$ – акустические импедансы первой и второй сред соответственно (ρ – плотность, c – скорость звука). Соответствующее снижение уровня звукового давления при переходе выражается как:

$$\Delta L = 20 \log_{10} |r|$$

На практике r редко высчитывается вручную, поскольку вычисления объёмные и изменения коэффициента в основном относительно мало и не превышает уровня допустимой погрешности, вместо этого принято использовать нормативный индекс изоляции воздушного шума, регулируемый на данный момент СП 23-103-2003. В рамках настоящей модели переход от R к эффективному коэффициенту передачи осуществляется через соотношение:

$$|r_{эфф}| = 10^{-R/20}$$

что позволяет интегрировать нормативные данные в единый вычислительный контур без необходимости детального моделирования внутренней структуры преграды.

Предложенный математический аппарат реализуется в виде вычислительной процедуры, ориентированной на оценку пространственного распределения акустических утечек из выделенного помещения. Методика предполагает дискретизацию контролируемого объёма: в пределах рабочей зоны помещения (условно – на высоте до 2 м от пола, что соответствует типичной зоне размещения говорящих) формируется равномерная трёхмерная сетка точек. Каждая

точка сетки условно рассматривается как возможный источник речевого шума с заданным начальным уровнем звукового давления $L_{p,0}$.

Для каждой такой точки последовательно выполняется проекция звуковой энергии на все потенциальные пути утечки – ограждающие конструкции (стены, перекрытия, окна), а также технические элементы, способные выступать в роли звукопроводящих каналов (вентиляционные решётки, трубы отопления, кабельные вводы и пр.). Для каждого направления рассчитывается итоговый уровень звукового давления за пределами помещения с использованием формул, приведённых выше.

В случае распространения звука по протяжённым твёрдым структурам (например, по металлическим трубам отопления или вентиляционным коробам), применяется упрощённая модель звуковода. Уровень звукового давления на выходе из звуковода длиной l оценивается как:

$$L_p(l) = L_{p,0} - \beta l - R_{\text{вых}}$$

где:

β – коэффициент затухания звука в материале звуковода (дБ/м), зависящий от его конструкции, плотности и внутреннего демпфирования (для типовых стальных труб в речевом диапазоне принимается $\beta \approx 0,1-0,3$ дБ/м);

$R_{\text{вых}}$ – индекс изоляции на выходе звуковода в окружающую среду (например, при переходе из трубы в воздух), определяемый по аналогии или на основе нормативных данных.

Расчёт выполняется с помощью программных средств (например, на языке Python, MATLAB или в среде специализированных САПР), что обеспечивает возможность автоматизированного построения тепловой карты утечек. Вместе с тем, при небольших размерах помещения и ограниченном числе путей утечки методика допускает ручной расчёт на бумаге – особенно на этапе предварительного проектирования.

Важно отметить, что в рамках данной модели отражённые волны не рассматриваются как независимые источники угрозы. С физической точки зрения, отражение от поверхностей сопровождается дополнительными потерями энергии (поглощением, рассеянием), а с математической – поле отражённой волны в точке возможной утечки не превышает поля, создаваемого ближайшим прямым источником, расположенным в той же зоне.

Предложенная методика обеспечивает формализованный расчёт акустической эффективности ограждающих конструкций и инженерных систем на этапе проектирования помещений с повышенными требованиями к ограничению распространения звука – таких как переговорные и совещательные залы. Основанная на общедоступных физических законах и нормативных данных ГОСТ, она учитывает, как прямое прохождение звука через стены, окна и перекрытия, так и его передачу по техническим звуководам. Благодаря алгоритмической прозрачности и дискретной структуре расчётная схема легко инте-

грируется в автоматизированные среды проектирования (BIM, CAD), что позволяет параметрически оценивать альтернативные решения и оперативно проверять соответствие заданным акустическим критериям. Методика тем самым способствует повышению обоснованности и технологичности проектирования акустически чувствительных интерьеров в рамках современных строительных практик.

Литература

1. Канев Н.Г. гашение звука системами пассивных и активных резонаторов в каналах, помещения и метасредах: дис. канд. физ.-мат. наук: 1.3.7. - Москва, 2023. - 380 с.

2. Лелюга О.В. Звукоизоляция ограждающих конструкций с учетом структурной звукопередачи: дис. канд. техн наук: 05.23.01. - Москва, 2019. - 193 с.

*М.А. Патенченкова, ст. пред.; Е.Д. Шумилин студ.
(филиал ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» в г. Смоленске)*

ИНТЕГРАЦИЯ VR/AR С BIM ДЛЯ УЛУЧШЕНИЯ ВИЗУАЛИЗАЦИИ И ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ С ПРОЕКТАМИ

Современная архитектурно-строительная отрасль переживает глубокую цифровую трансформацию, в центре которой находится технология информационного моделирования зданий (Building Information Modelling, BIM). BIM представляет собой интеллектуальный процесс, основанный на создании трёхмерной модели, содержащей не только геометрические параметры, но и исчерпывающую информацию о физических, функциональных, стоимостных и эксплуатационных характеристиках всех компонентов здания. Эта модель охватывает пространственные отношения, географическое положение, количественные данные и свойства строительных элементов, обеспечивая сквозное управление объектом на всех этапах его жизненного цикла - от концепции до демонтажа.

Несмотря на значительный потенциал BIM для повышения эффективности проектирования, координации, строительства и эксплуатации, традиционные методы визуализации BIM-моделей на экранах мониторов остаются ограниченными в передаче масштаба, глубины и пространственного контекста. Это особенно критично при работе с междисциплинарными проектами, где требуется точная интеграция архитектурных, конструктивных, инженерных (водопроводных, электрических и др.) решений. В качестве иллюстрации сложности подобной интеграции часто выступают санитарно-технические узлы - зоны с высокой плотностью пересечений инженерных систем, требующие детального моделирования и визуального контроля.

В этой связи перспективным и логичным шагом становится интеграция BIM с иммерсивными технологиями - виртуальной (Virtual Reality, VR) и дополненной (Augmented Reality, AR) реальностью. Такой синтез позволяет преодолеть разрыв между абстрактным цифровым представлением проекта и его физическим воплощением, обеспечивая новый уровень понимания, взаимодействия и контроля. VR погружает пользователя в полностью синтезированную среду, что особенно ценно на ранних стадиях проектирования для глубокого ситуационного анализа, проверки эргономики и принятия архитектурных решений. AR, в свою очередь, накладывает цифровую информацию (например, BIM-модель инже-

нерных сетей) на реальный мир через смартфоны, планшеты или AR-очки, кардинально меняя процессы строительства, контроля качества и технического обслуживания, предоставляя актуальные данные непосредственно в контексте рабочего места.

Функционал виртуальной и дополненной реальности, применяемый к BIM-модели, значительно расширяет возможности BIM в строительной отрасли. Он способствует достижению высокого уровня совместной работы, повышает точность принятия решений и обеспечивает контроль над проектом на основе иммерсивной и интерактивной среды.

Виртуальная реальность помогает не только визуализировать проект, но и дает возможность «прочувствовать» масштаб и пропорции пространства, делая концепцию постройки более наглядной и понятной для специалистов различных профилей, а также для заказчиков.

Особое значение интеграция BIM с VR/AR приобретает на этапе эксплуатации зданий, известном как управление объектами (Facility Management, FM). Этот этап, являющийся важнейшей фазой жизненного цикла, традиционно недооценивался на стадии проектирования, отчасти из-за слабого участия эксплуатирующего персонала в ранних фазах проекта. Технология BIM, в частности её седьмое измерение (7D BIM), призвана решить эту проблему, аккумулируя данные для FM, включая графики технического обслуживания, гарантийные обязательства и инструкции по эксплуатации [1].

Связь 7D BIM с технологиями VR и AR открывает новые горизонты для эффективного управления. Исследования показывают, что VR является наиболее используемой технологией в контексте 7D BIM, особенно для задач, связанных с техническим обслуживанием и обучением персонала.

Разработанные прототипы VR-приложений для FM доказали свою эффективность в задачах локализации оборудования и выполнения корректирующих действий, позволяя сэкономить время, усилия и средства.

Однако широкому внедрению интегрированных BIM-VR/AR решений препятствует ряд серьезных вызовов. Наиболее острыми являются проблемы концептуального, технического и финансового характера, а также сопротивление изменениям со стороны персонала.

Ключевым техническим барьером выступает проблема интероперабельности данных между BIM-платформами и игровыми движками (Game Engines), на которых, как правило, строятся иммерсивные VR/AR-среды.

Особенно ярко потенциал интеграции BIM с иммерсивными технологиями проявляется в проектировании и реализации сложных фасадных систем. Как отмечают практики в области архитектурного проектирования, использование BIM в сочетании с параметрическим моделированием позволяет не только точно контролировать геометрическую сложность фасадов, но и автоматизировать создание рабочей документации, что критически важно для промышленного производства элементов облицовки. При этом интеграция с AR/VR открывает дополнительные возможности: за счёт иммерсивной визуализации заказчики и инженеры могут оценить не только форму, но и восприятие фасада в реальном

масштабе и при различных условиях освещения. По данным WFM Media (2024), такие подходы значительно повышают качество координации между архитекторами, инженерами и подрядчиками, позволяя выявлять конструктивные несогласования и эстетические недостатки ещё до начала изготовления компонентов. Это, в свою очередь, снижает количество дефектов, сокращает затраты на переделки и способствует созданию более инновационных и устойчивых архитектурных решений.

Процесс преобразования параметрических BIM-моделей в полигональные сетки, понятные игровым движкам, часто сопровождается потерей семантических данных и метаданных, что ставит под угрозу функциональность VR/AR-приложений в контексте 7D BIM. Для AR дополнительной проблемой является удобство и эргономика носимых устройств, а для VR - ограничения, накладываемые возможностями самих игровых движков.

Несмотря на существующие трудности, быстрое развитие технологий и снижение стоимости оборудования открывают новые перспективы для дальнейшего распространения AR/VR в строительной отрасли.

Будущее, по мнению исследователей, лежит в создании комплексных цифровых экосистем, объединяющих BIM, FM, Интернет вещей (IoT) и иммерсивные технологии в единой виртуальной среде.

Такая интеграция позволит не только визуализировать статичную модель, но и взаимодействовать с «живым» цифровым двойником здания, получая в реальном времени данные с датчиков IoT и управляя инженерными системами через интуитивно понятный VR/AR-интерфейс. Для успешной реализации этого потенциала необходимо дальнейшее развитие стандартов обмена данными, создание более совершенных инструментов для автоматизированной передачи информации из BIM в игровые движки и разработка принципов проектирования VR-приложений, ориентированных на поддержку полного жизненного цикла здания.

На строительной площадке ключевую роль играет интеграция BIM с дополненной реальностью для решения задач координации и контроля качества. Технология BIM-AR позволяет выявлять расхождения между проектом и фактическим состоянием возводимого объекта в режиме реального времени. Например, с помощью планшета или AR-очков прораб может наложить модель инженерных коммуникаций на уже смонтированные конструкции и мгновенно обнаружить отклонения или пропущенные элементы [2].

Это напрямую связано с процессом выявления коллизий (clash detection), который в традиционном BIM-процессе происходит на этапе проектирования, но с AR его можно продолжить и на стройплощадке, обеспечивая непрерывный цикл контроля и корректировки.

Подобные системы уже доказали свою эффективность в снижении числа переделок и повышении точности монтажа, особенно в проектах с высокой плотностью инженерных систем, таких как фасады или сантехнические узлы.

Таким образом, интеграция BIM с VR и AR выходит далеко за рамки простой визуализации. Она формирует целостную цифровую экосистему, охваты-

вающую все этапы жизненного цикла здания - от совместного проектирования с конечными пользователями и безопасного обучения персонала до точного строительства и эффективного технического обслуживания. Каждое из этих направлений подтверждает, что синергия этих технологий является не просто трендом, а фундаментальным сдвигом в парадигме проектирования, строительства и эксплуатации зданий [3].

Литература

1.Абдулхамидов Р. Б., Беяков А. А., Бурцев Д. А. Интеграция технологий дополненной и виртуальной реальности (AR/VR) для визуализации сложных объектов и процессов // КиберЛенинка. — 2022. — URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/integratsiya-tehnologiy-dopolnennoy-i-virtualnoy-realnosti-ar-vr-dlyavizualizatsii-slozhnyh-obektov-i-protsessov/viewer> (дата обращения: 28.09.2025).

2.BIM's Integration with Emerging Technologies [Электронный ресурс] // WFM Media. — 2024. — URL: <https://wfmmedia.com/bims-integration-with-emerging-technologies/> (дата обращения: 28.09.2025).

3.Информационное моделирование зданий: современные подходы и перспективы развития: сб. науч. тр. / под ред. А. В. Пономарёва. — Екатеринбург: Изд-во УрФУ, 2020. — 124 с. — ISBN 978-5-6043063-9-0. — URL: https://elar.urfu.ru/bitstream/10995/97295/1/978-5-6043063-9-0_2020_003.pdf (дата обращения: 28.09.2025).

*А.В. Полячков, к.т.н., доцент.; В.А. Бахман, асп.
(Филиал ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» в г. Смоленске)*

СИСТЕМА АВТОМАТИЗАЦИИ ИЗМЕРЕНИЙ И НАПИСАНИЯ ПРОГРАММ ДЛЯ КООРДИНАТНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ МАШИН

Координатно-измерительные машины (КИМ) играют важнейшую роль в производстве и контроле качества. Они позволяют точно измерять размеры деталей, обеспечивая соответствие заданной конструкции. Тем не менее, процесс использования КИМ, а именно написание измерительных программ, часто сталкивается с существенными проблемами: длительное время разработки программ и влияние человеческого фактора, которое может привести к ошибкам. Также существуют следующие особенности, которые приходится учитывать при использовании КИМ:

- большая номенклатура изделий, размеры которых необходимо контролировать в условиях мелкосерийного производства;
- разброс в габаритах от сравнительно небольших проверяемых изделий, по сравнению с измерительным столом, до образцов, полностью занимающих измерительное пространство;
- отклонение, потенциально возможное, положения на измерительном столе размещения проверяемых образцов, при автоматическом нахождении детали щупом;
- индивидуальные программы управления КИМ для всей номенклатуры проверяемых образцов изделий.

Перечисленные выше особенности процесса измерений учитываются при работе КИМ. Тем не менее, для реального производства актуально повышение эффективности процесса работы КИМ в производственном процессе.

Для повышения эффективности применения КИМ в условиях производства необходимо автоматизировать процесс программирования КИМ для постоянно меняющейся номенклатуры проверяемых изделий и адаптивно подстраивать его

под фактическое размещение проверяемых образцов на измерительном столе [1].

Относительно размещения образцов на рабочем столе сделаем следующее замечание. Для измерений с использованием КИМ предполагается точное положение измеряемого изделия на измерительном пространстве. Это позволяет получить точные результаты. При этом сохраняется погрешность, вызванная параметрами КИМ и точностью позиционирования образца контролируемого изделия.

К размещению контролируемого образца привязана программа управления КИМ.

Для написания программы для программирования КИМ используются описания контролируемых изделий. Эти описания могут представлять собой как электронные 2D и 3D модели, так и чертежи в своем классическом виде – бумажного носителя.

Известны из опыта работы авторов по написанию программ для контрольно-измерительных машин следующие проблемы, которые также влияют на эффективность работы:

- каждая новая программа, написанная программистом, требует тестирования на реальных деталях;
- время процесса измерения любого из контролируемых изделий обычно требуется минимизировать.

Тестирование каждой новой программы управления можно считать в условиях «штучного» производства nepозволительной роскошью.

Оптимизация по быстрдействию самого процесса измерения предполагает знания возможностей инструментария КИМ и конструкции контролируемого изделия [2].

Предлагаются следующие способы повышения эффективности использования КИМ: разделение стола КИМ на зоны, автоматизация написания измерительных программ с помощью технологий машинного зрения.

Разделение рабочего стола на несколько логических зон позволяет оператору заранее указать область на столе, где будет находиться измеряемая деталь, что значительно упрощает процесс поиска и начала измерений.

Например, стол может быть условно разделен на сетку, состоящую из 9, 16 или большего количества зон (в зависимости от размера рабочей области машины). Оператору достаточно указать, в какой зоне находится деталь, и машина автоматически начнет поиск внутри этой области, используя измерительный щуп.

Автоматический поиск детали базируется на алгоритмах навигации. Щуп машины сканирует указанную зону, находя объект для измерения. После этого КИМ начинает выполнять запрограммированные действия по заданным точкам. Этот подход минимизирует время, необходимое для точного позиционирования щупа, избавляя оператора от необходимости вручную корректировать положение детали или координатную программу.

Другим, более масштабным способом является автоматизация написания измерительных программ с помощью технологий машинного зрения. В данном подходе используется распознавание чертежей через библиотеки, такие как OpenCV и EasyOCR, с дальнейшей обработкой данных и автоматическим созданием программы измерений.

Основой способа является обработка чертежей деталей, которые традиционно используются в производстве. Этапы автоматизации включают несколько шагов: распознавание чертежа, обработка полученных данных, разработка программы управления КИМ.

С помощью машинного зрения программа анализирует изображение чертежа, выделяя формы, размеры, текстовые пометки и другие элементы. Все изученные данные – геометрия детали, размеры и текстовые обозначения - передаются для обработки. Программа преобразует полученную информацию в формат, удобный для написания измерительных команд.

На основании обработанных данных разрабатывается алгоритм измерения, который выполняет координатно-измерительная машина. Программа включает последовательность перемещений щупа, точки измерений и методы контроля.

Распознавание чертежей исключает необходимость построения измерительных программ вручную. Оператору нужно лишь загрузить чертеж в программу, а вся обработка данных выполняется автоматически.

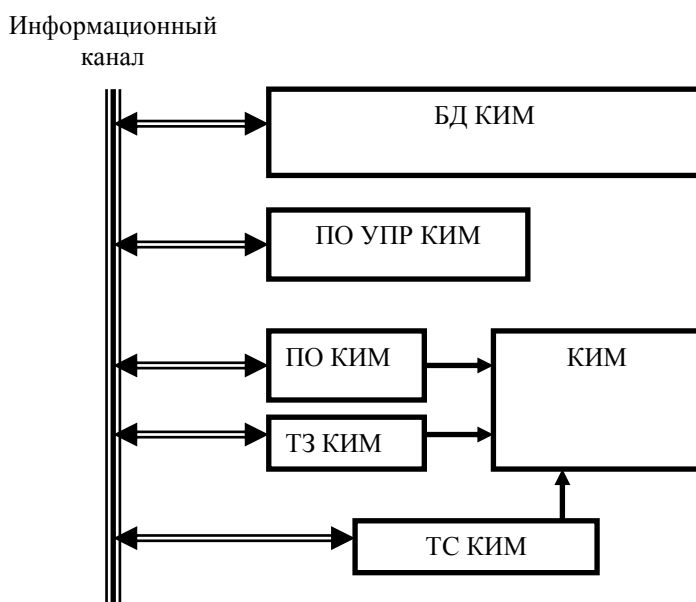


Рисунок 1 – Структура автоматизированной системы КИМ

Способ позволяет значительно сократить время, необходимое для разработки измерительных программ. Это особенно полезно при работе с большим количеством деталей, которым требуются уникальные программы.

Основной сложностью данного способа является необходимость разработки ПО, которое будет полностью интегрировано с базами данных и управлением КИМ.

Структура системы автоматизации измерений с использованием КИМ может иметь следующий вид (рисунок 1).

Структура системы автоматизации состоит из координатно- измерительной машины КИМ, Программного обеспечения КИМ (ПО КИМ), технического зрения КИМ (ТЗ КИМ), транспортной системы КИМ (ТС КИМ), базы данных КИМ (БД КИМ), Программного обеспечения разработки программы управления КИМ (ПО УПР КИМ).

База данных КИМ содержит:

- параметры КИМ и ее измерительных инструментов;
- разработанные программы управления КИМ для проверяемых изделий;
- изображения образцов изделий на измерительном столе КИМ.

Техническое зрение позволяет получать с высоким разрешением изображения объектов на измерительном столе КИМ. Это могут быть изображения изделий проходящих процесс измерений с нескольких проекций. Это могут быть чертежи изделий в бумажной форме [3].

Программное обеспечение КИМ реализует программу измерения образцов изделий.

Программное обеспечение программы управления КИМ генерирует программу, которая управляет процессом измерения КИМ.

Транспортная система обеспечивает перемещение изделий на измерительный стол КИМ и снятие с него.

Информационный канал позволяет сопрячь все компоненты системы.

Такая модульная структура позволяет получить целый набор ценных качеств системы.

Система может быть масштабируема. Можно работать с несколькими КИМ, Разными системами технического зрения, различными программами управления и генерации программ управления.

Наличие универсальности обеспечивается доступностью замены части оборудования и программного обеспечения.

Система потенциально хорошо управляема на уровне отдельных компонентов и всей в целом. Возможна реализация элементов самоуправления.

Совместимость системы позволяет использовать различное программно-аппаратное обеспечение. Система может быть неоднородной (гетерогенной).

Для реализации всех потенциальных возможностей системы автоматизации КИМ необходимо использование известных и разработка новых методов математического моделирования. Возможно использование систем искусственного интеллекта, работающих по стандартным поисковым алгоритмам с использованием базы данных КИМ, а также других математических методов, которые позволят получить наиболее высокую скорость и точность процесса в работе координатно-измерительной машины.

Литература

1. Воробьев В.Е. Современные методы координатных измерений. - М.: Стандартинформ, 2020. - 284 с.
2. Забусов В.И. Автоматизация измерений в машиностроении. - М.: Машиностроение, 2021. - 380 с.
3. Иванов А.А. Программирование координатно-измерительных машин. - М.: Высшая школа, 2020. - 290 с.

с.

ОЦЕНКА БИЗНЕС-РИСКОВ МОШЕННИЧЕСТВА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СИНТЕТИЧЕСКОГО ГОЛОСА

Внедрение интеллектуальных технологий открывает новые горизонты для бизнеса при автоматизации производственных систем и их мониторинге [1, 2]. Однако эти технологии в последние годы все чаще используются для создания угроз информационной безопасности организаций, что требует развития организационных и технических методов противодействия и снижения ущерба от инцидентов информационной безопасности [3].

С развитием больших языковых моделей (Large Language Model, LLM) и их доступностью все большую актуальность приобретает противодействие высокотехнологическим атакам – голосового «deepfake», атаке с помощью имитации голоса различных людей, вызывающих доверие у атакуемой стороны.

Дипфейк в общем случае представляет собой синтетический медиаконтент, созданный с помощью технологии глубокого машинного обучения, с целью подделки или имитации реального объекта или человека. Частным случаем технологии является дипфейк-аудио, принцип которого заключается в генерации LLM любого речевого фрагмента на основании небольшой исходной аудиозаписи целевого голоса [4], а учитывая, что бизнес, особенно в сфере финансовых услуг, телемаркетинга и удаленной работы, все больше полагается на голосовую коммуникацию, такой контент особенно опасен. Следует отметить, что традиционные методы верификации по голосу здесь становятся уязвимыми и это создает прямую угрозу информационной и, как следствие, экономической безопасности компаний. В связи с этим актуальной становится задача оценки возникающих, в связи с этим, бизнес-рисков и разработка организационно-технических мер защиты, интегрируемых в экономические информационные системы.

Ключевой проблемой в рассматриваемой теме является наличие таких кибератак на бизнес, при которых злоумышленник с помощью синтетического голоса, имитирующего голос руководителя, сотрудника или клиента, могут инициировать несанкционированные финансовые операции, получать доступ к конфиденциальной информации или наносить репутационный ущерб компании. Трудности в решении проблемы вызывает высокий уровень убедительности и низкой стоимости атак, а также отсутствия у большинства организаций готовых процедур и технологий для противодействия угрозам.

По данным системного интегратора «Информзащита» в 2024 случаи атак с применением технологии дипфейк увеличилось на 13%, что кратно 5,7 тыс. случаев. Чаще всего атаки совершаются на клиентов финансовых платформ и банков. По данным отчета об отношении потребителей к дипфейкам и клонировании голоса за 2023 год чуть более четверти считают, что у данной технологии нет положительных качеств. По данным отчета Signicat, за последние три

года попытки мошенничества с использованием дипфейков выросли и составили 6,5% от общего числа попыток мошенничества [5, 6].

С целью структурированного анализа потенциального негативного воздействия мошенничества с применением синтетического голоса была разработана классификация рисков. В качестве критерия группировки выступил тип ущерба, наносимого бизнес-процессам и активам компании. Данный подход позволяет не только идентифицировать угрозы, но и определить приоритеты при разработке защитных мер, фокусируясь на рисках с наиболее критичными последствиями. Результат проведенной работы представлен в таблице 1.

Таблица 1 – Риски мошенничества с использованием дипфейк-аудио

Группа	Конкретные проявления	Потенциальный ущерб
Финансовые риски	Прямые денежные потери от несанкционированных переводов по поддельному голосовому распоряжению	Прямой финансовый ущерб, убытки
Операционные риски	Нарушение бизнес-процессов из-за получения ложных команд, блокировка системы	Простои, срыв сделок, нарушение контрактных обязательств
Репутационные риски	Публикация компрометирующих аудиозаписей, подрывающих доверие клиентов и партнеров	Падение рыночной стоимости активов, утрата деловой репутации
Риски нарушения конфиденциальности	Получение доступа к коммерческой тайне путем имитации голоса сотрудника, имеющего права доступа	Утечка интеллектуальной собственности, потеря конкурентных преимуществ
Юридические риски	Возможность использования синтетического голоса для фальсификации доказательств в суде	Судебные издержки, административная ответственность

Эффективное противодействие угрозам с применением дипфейк-аудио требует комплексного подхода, основанного на принципе Defense-in-Depth (или «защита в глубину»). Данный принцип заключается в создании многоуровневой системе безопасности, где каждый эшелон защиты компенсирует возможные недостатки предыдущего. Система предлагаемых мер условно делится на три ключевых уровня: предотвращение инцидента, обнаружение атаки и минимизация ущерба, включает технические и организационные регламенты. Предлагаемая система мер представлена на рисунке 1.

Первым этапом в борьбе с угрозой является процесс предотвращения инцидента, цель которого заключается в максимальном усложнении возможностей атаки для злоумышленника и минимизации возможных путей её реализации. Этап подразумевает внедрение системы мониторинга открытых источников для ограничения утечек образцов голоса ключевых сотрудников и внедрение процессов авторизации систем, которые анализируют не только сходство голоса с этанолом, но и микродвижения гортани, артефакты дыхания, характерные для живого человека, что позволяет отличить запись или синтез. Установление

строгого правила «любое голосовое распоряжение, связанное с переводом средств или доступом к конфиденциальной информации, должно подтверждаться через альтернативный, защищенный канал» и четкое определение уровней конфиденциальности данных и процедур их запроса по голосовому каналу являются организационными мерами данного этапа.

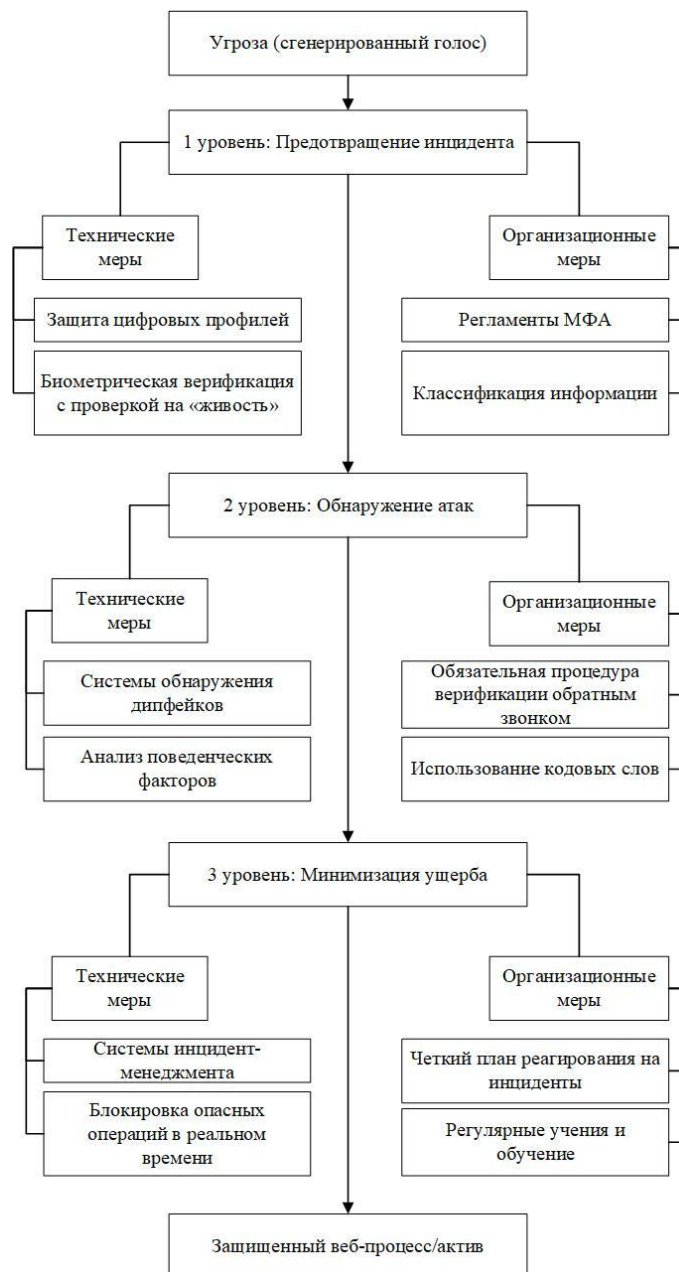


Рисунок 17 – Многоуровневая система защиты от мошенничества с применением дипфейк-аудио

В ситуации, когда на первом этапе принятые меры не сработали, следует применять второй этап, который подразумевает обнаружение атак. Этот уровень призван максимально быстро определить попытку мошенничества. Интеграция в корпоративные АТС или системы записи разговоров специализированного ПО, которое в реальном времени анализирует аудиопоток на наличие цифровых артефактов, несвойственных человеческой речи и системы, которая оценивает не

только голос, но и контекст вызова (нетипичное время, неестественная манера речи, отклонение от стандартных формулировок) является техническими мерами, необходимыми на данном этапе. С точки зрения организационных мер следует закрепить в инструкциях правило «получив критическое распоряжение, сотрудник обязан перезвонить отправителю по официальному номеру телефона из базы данных компании для подтверждения» и ввести практики использования заранее оговоренных кодовых слов или фраз, которые должны быть произнесены для подтверждения легитимности запроса в стрессовой или нестандартной ситуации.

Для купирования инцидента и исключения случаев его повторения был выделен третий этап. На данном этапе следует выполнить настройку правил, которые при срабатывании детективных систем автоматически блокируют подозрительные операции, оповещают службу безопасности и запускают процедуры расследования, и интеграцию систем защиты с финансовыми модулями ERP-систем для приостановки платежей, инициированных по голосовой команде, до их ручной проверки. Для сотрудников и службы безопасности следует разработать пошаговый алгоритм, который позволит четко определить ключевые моменты действий при подозрении на мошенничество, также следует проводить учебные тревоги с имитацией атак для отработки навыков сотрудников и повышения их бдительности.

Предложенный комплекс организационно-технических мер информационной защиты и многоуровневая система защиты от мошенничества с применением дипфейк-аудио могут быть взяты за основу при разработке стратегии управления рисками информационной безопасности в экономических информационных системах, особенно в высокорисковых секторах, таких как финансы и телекоммуникации.

Литература

1 Кириллова Е. А., Пучков А. Ю., Минин В. С., Ярцев Д. Д. Нейро-нечеткая модель ресурсного обеспечения инновационной деятельности промышленного предприятия // Прикладная информатика. 2024. Т. 19. № 5. С. 126–142. DOI: 10.37791/2687-0649-2024-19-5-126-142.

2 Пучков А.Ю. Оптимизация нейросетевой модели оценки состояния технологической системы переработки рудного сырья // Энергетика, информатика, инновации – 2024 (математическое моделирование и информационные технологии в производстве и строительстве, микроэлектроника и оптотехника). Сб трудов XIV-ой Межд. науч.-техн. конф.. В 3 т. Т 2. – 2024. – 287с. С. 111 – 116.

3 Дли М. И., Пучков А. Ю., Окунев Б. В., Тищенко И. И. Алгоритм стеганографической защиты информации в видеофайлах на основе диффузионно-вероятностной модели с шумоподавлением // Прикладная информатика. 2024. Т. 19. № 3. С. 125–143. DOI: 10.37791/2687-0649-2024-19-3-125-143.

4 Воронин И.А., Гаврин Д.П. Дипфейки: современное понимание, подходы к определению, характеристике, проблемы и перспективы [Электронный ресурс] // cyberleninka.ru: URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/dipfeyki-sovremennoe-ponimanie-podhody-k-opredeleniyu-harakteristiki-problemy-i-perspektivy> (дата обращения 20.09.2025).

5 Дипфейк-атаки на финансовый сектор выросли на 13% [Электронный ресурс] // RUSSIAN BUSINESS: URL: <https://rb.ru/news/deepfake-fraud-13/> (дата обращения 20.09.2025).

6 Отчет об отношении потребителей к дипфейкам и клонированию голоса 2023 [Электронный ресурс] // Искусственный интеллект Российской Федерации: URL: https://ai.gov.ru/knowledgebase/etika-i-bezopasnost-ii/2023_otchet_ob_otnoshenii_potrebiteley_k_dipfeykam_i_klonirovaniyu_golosa_2023_deepfake_and_voice_clone_consumer_sentiment_report_2023_voicebot_research/ (дата обращения 20.09.2025).

МОДЕЛЬ ФОРМИРОВАНИЯ БАЗЫ ПРЕЦЕДЕНТОВ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПЕРЕРАБОТКОЙ РУДНОГО СЫРЬЯ

Работа выполнена в рамках государственного задания, проект № FSWF-2023-0012

Одним из важных факторов обеспечения технологического суверенитета России выступает модернизация производств по переработке минерального сырья, создающих ресурсную базу для многих отраслей промышленности. Поэтому актуальной исследовательской задачей служит разработка новых алгоритмов управления технологическими линиями на основе применения современных методов обработки и анализа данных, способствующих повышению ресурсной и энергетической эффективности указанных производств.

Большой потенциал в сфере совершенствования алгоритмов управления технологическими объектами сейчас показывает применение интеллектуальных методов анализа данных, позволяющих извлекать из доступной контрольно-измерительной информации закономерности, выявление которых недоступно классическим методам регулирования, основанных на пропорционально-интегрально-дифференциальных законах [1].

Объектом исследования в представляемой работе выступает сложная, химико-энерготехнологическая система (ХЭТС) переработки фосфатного, мелкорудного сырья, на выходе которой получают желтый фосфор – ценное сырье для химической промышленности и производства удобрений для сельского хозяйства. Предмет исследования – информационные процессы, обеспечивающие управление ХЭТС.

Целью исследования выступало создание программного инструмента для автоматизации наполнения базы знаний ситуационных моделей управления ХЭТС на основе прецедентов.

Ситуационные модели на основе прецедентов (СМОП) накапливают опыт (прецеденты) управления объектами, а затем используют его для выработки решений при возникновении ситуаций, «похожих» на те, что были ранее, а для учета неопределенности входных данных применяют варианты систем нечеткого вывода [2].

В ХЭТС входят несколько технологических агрегатов: тарельчатый гранулятор (в нем происходит формирование сырых окатышей из мелкодисперсного рудного сырья), многокамерная обжиговая машина конвейерного типа (предназначена для высокотемпературного обжига сырых окатышей) и рудно-термическая печь (в ее активной зоне проводится плавление обожженных окатышей и выделением желтого фосфора в виде газообразной фракции). Структурная схема системы управления ХЭТС на основе прецедентных ситуационных моделей показана на рисунке 1. Она состоит из физической (выделена серыми скругленными прямоугольниками) и информационной частей. Физическая часть содержит ХЭТС, контрольно-измерительные приборы и автоматика (КИП и А), исполнительные механизмы (ИМ). Состав информационной части, обеспечи-

вающей расчет алгоритмов управления, включает в себя следующие модули: препроцессинг технологических данных (ПТД); выбор прецедента из базы прецедентов (БП) и его применение (ВП); иерархическую систему нечеткого вывода (ИСНВ), на вход которой поступают технологические переменные x после препроцессинга, дискриминатор (Д), рассчитывающий разность (ошибку) Δ между реакцией y_1 ИСНВ и y_2 ВП; анализатор ошибки (АО), в котором принимается решение о том, чтобы занести сформированные в ИСНВ новые нечеткие правила (которые в данном случае можно рассматривать как прецеденты реакции на неизвестные ранее входные данные x) или оставить БП без обновления.

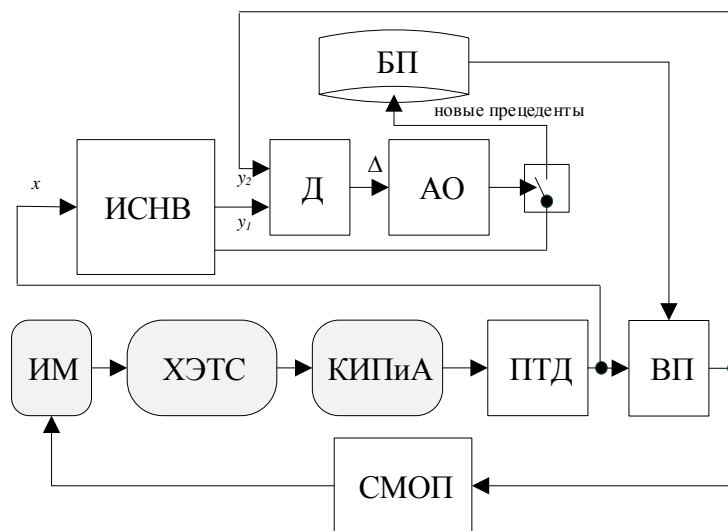


Рисунок 1 – Структура системы управления на основе СМОП

Система нечеткого вывода реализована в виде иерархической структуры, содержащей отдельные FIS (Fuzzy inference system), отражающие отдельные технологические агрегаты ХЭТС. Структурное подобие модели и объекта повышает адекватность модели, что обусловило выбор именно такой структуры ИСНВ для нечеткой модели ХЭТС, представленной на рисунке 2.

В среде Matlab имеется возможность обучать ИСНВ, что соединяет преимущества нечеткой логики (интерпретируемость получаемых результатов логического вывода) и аппарата искусственных нейронных сетей (автоматическое обучение на имеющихся данных). Кроме того, большая база правил одной FIS снижает ее возможность обобщения, а применение ИСНВ дает возможность выполнить декомпозицию обучения одной большой FIS на подгонку на данных нескольких FIS меньших размеров в дереве. Это делает ИСНВ эффективнее одной FIS в вычислительном отношении и их легче интерпретировать по сравнению с одной FIS с тем же количеством входов, что и у ИСНВ.

В модели ХЭТС на основе ИСНВ предусмотрено формирование базы правил нечетких прецедентов для двух каналов – массового расхода рудного сырья и потребляемой энергии. Эти технологические данные разделяются при препроцессинге. Массовые расходы обозначены на рисунке 2 как: Gr для грануля-

тора DG, M_p для обжиговой машины СТСМ, E_r для руднотермической печи ОТФ. Потребление энергии агрегатами учитывается каналами E_g , E_m и E_r для гранулятора, обжиговой машины и руднотермической печи, соответственно.

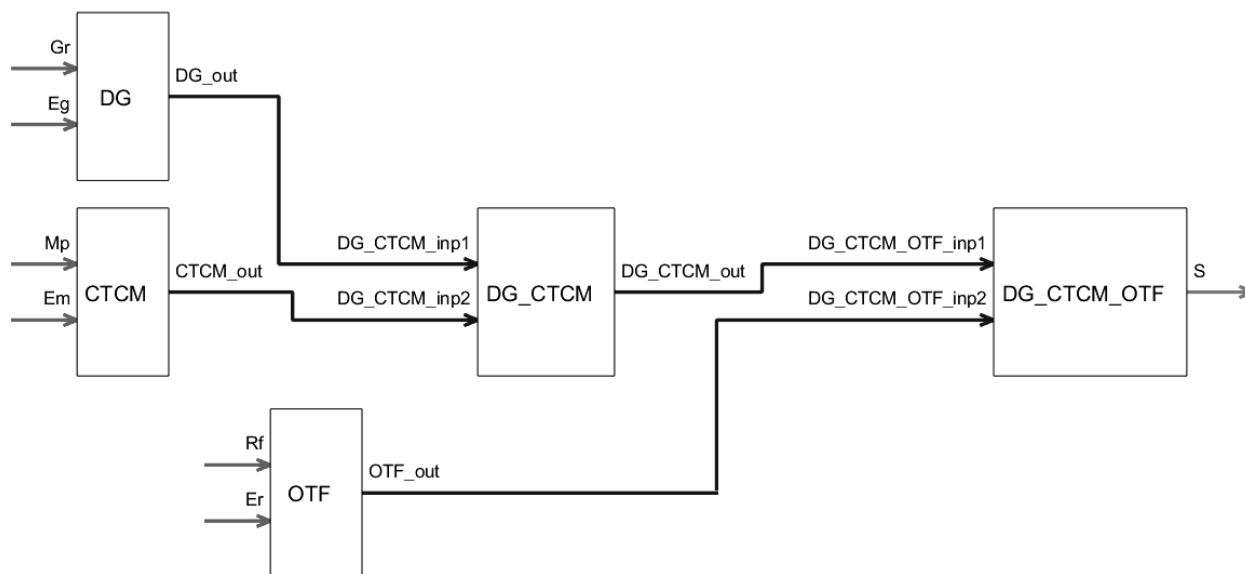


Рисунок 2 – Модель ХЭТС на основе ИСНВ

Блоки DG_СТСМ и DG_СТСМ_ОТФ обобщает результаты нечеткого вывода предыдущих FIS в ИСНВ, а выходная переменная s выступает как обобщенная характеристика, используемая для принятия решения о целесообразности занесения сформированных в процессе обучения ИСНВ нечетких правил в базу прецедентов.

Внутренние переменные, необходимые для организации между блоковой связи содержат в окончании имен обозначения *out* и *inp*, отражающие их наименования в программе, реализующей структуру ИСНВ.

Для апробирования предложенной модели формирования базы прецедентов системы управления переработкой рудного сырья был разработан программный инструмент в среде Matlab. Генерация обучающих примеров проводилась с использованием динамической модель ХЭТС в среде Simulink [3] – были сгенерированы обучающие данные для ИСНВ, всего 5000 примеров, из них 4000 для тренировки ИСНВ (для FIS применялся алгоритм Мамдани) и по 500 для валидации и тестирования. Во время обучения настраиваются параметры функций принадлежности и формируются правила нечеткого логического вывода. Для настройки применялся метод *particleswarm* – метод оптимизация роем частиц.

Проведенные эксперименты показали, что применение настройки ИСНВ на новых наборах данных, в которых присутствовали отклонения тренда от тех, на которых проходило обучение, позволяло снизить ошибку Δ на выходе дискриминатора и, соответственно, выполнять добавление скорректированных правил нечеткого вывода в базу прецедентов, что будет способствовать повышению точности системы управления ХЭТС в целом.

Полученные результаты показали, что предложенная модель формирования базы прецедентов на основе иерархической нечеткой системы для ситуационных моделей управления переработкой рудного сырья позволяет повысить точность воспроизведения реакции ХЭТС на различные входные данные и может быть применена в информационном обеспечении системы управления переработкой мелкорудного сырья.

Литература

1. Дли М. И., Пучков А. Ю. Интеллектуальная модель комплексной технологической системы переработки рудных отходов // Двадцать первая Национальная конференция по искусственному интеллекту с международным участием, КИИ-2023 (Смоленск, 16-20 октября 2023 г.). Труды конференции. В 2-х томах. Т.1. – Смоленск: Принт-Экспресс, 2023. – 410 с. С. 356-365.
2. Борисов В. В., Авраменко Д. Ю. Нечеткое ситуационное управление сложными системами на основе их композиционного гибридного моделирования // Системы управления, связи и безопасности. 2021. № 3. С. 207-237. DOI: 10.24412/2410-9916-2021-3-207-237.
3. Пучков А. Ю., Прокимнов Н. Н., Рысина Е. И., Шутова Д. Ю. Нейрорегулятор комплексной технологической системы переработки рудных отходов // Прикладная информатика. 2023. Т. 18. № 5. С. 91–105. DOI: 10.37791/2687-0649-2023-18-5-91-105.

*М.А. Столяренко, студ.; Б.В. Окунев, к.т.н., доц.
(Филиал ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» в г. Смоленске)*

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ОНЛАЙН-СЕРВИСОВ ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦИИ РАБОТЫ ОТБОРОЧНОЙ КОМИССИИ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ОРГАНИЗАЦИИ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

В современных условиях приемная компания в ВУЗах характеризуется высоким уровнем конкуренции, большим потоком информационных запросов от абитуриентов и их родителей, а также оперативным взаимодействием подразделений института друг с другом. От эффективности взаимодействия напрямую зависит имидж ВУЗа, удобство подачи документов и уровень удовлетворенности будущих студентов.

В качестве примера можно привести филиал ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» в г. Смоленске в период приемной кампании. Сотрудники отборочной комиссии: ответственный секретарь, его заместители и операторы, в день обрабатывают более тысячи запросов и звонков от абитуриентов, осуществляют прием документов и регистрацию будущих студентов во внутренней информационной системе, а также консультируют по правилам поступления. В пиковые периоды, а именно в июле – августе, нагрузка на операторов увеличивается в разы, что приводит к ошибкам при регистрации данных, а также к появлению очередей в отборочной комиссии. В моменты пиковой загрузки помимо основных задач на операторов также ложится обязанность информационной поддержки абитуриентов посредством телефонного разговора. Многочисленные обращения от поступающих содержат вопросы разного характера: начиная от сроков подачи документов и заканчивая вопросами заселения и оплаты обучения. Зачастую сотрудники отборочной комиссии некомпетентны в таких вопросах и требуется переадресация звонка в другой отдел филиала или же в головной ВУЗ. В настоящее время данный процесс осуществляется вручную – оператор называет абитуриенту номер телефона необходимого отдела и просит перезвонить туда

самостоятельно. Такая схема коммуникации является неудобной как для сотрудников, так и для абитуриентов. Для последних она неудобна тем, что будущие студенты или их законные представители могут не дозвониться до нужного отдела филиала, что приведет к потере их времени, формированию впечатления недостаточной координации между подразделениями в институте и, как следствие, потери имиджа института в целом. Для операторов подобная система означает дополнительную нагрузку, необходимость повторения одной и той же информации несколько раз, возникновение очередей в отборочной комиссии.

На рисунке 1 проиллюстрированы усредненные данные по количеству обращений абитуриентов и их законных представителей за период приемной кампании смоленского филиала МЭИ в 2024 году.



Рисунок 1 – Усредненные среднесуточные обращения абитуриентов в 2024 году

Как видно по данным рисунка около трети звонков, поступающих в отборочную комиссию смоленского филиала МЭИ, требует переадресации в другие подразделения филиала или головного МЭИ, что обуславливает необходимость внедрения унифицированной системы для маршрутизации поступающих вызовов.

Для повышения эффективности коммуникации в образовательной организации предлагается внедрение онлайн-сервисов, построенных на базе технологий распознавания речи, обработки естественного языка и поведенческой аналитики. В качестве такого онлайн-сервиса можно привести систему Visper, представляющую из себя облачную платформу интеллектуальной голосовой связи, предназначенную для обработки и переадресации между подразделениями филиала образовательной организации входящих телефонных звонков. Данная система позволит не только принимать поступающие звонки от абитуриентов и их законных представителей, но и распределять их между подразделениями, компетентными по конкретному вопросу поступающего, обеспечивая единый стандарт обслуживания [1].

Принцип работы платформы заключается в использовании голосового

меню (IVR). После установленного соединения абитуриент слышит короткое приветствие и краткую инструкцию, содержащее популярные группы вопросов от абитуриентов: сроки подачи документов, расписание вступительных испытаний, заселение в общежитие, порядок оплаты обучения и т.д. В зависимости от темы обращения, которую выберет абитуриент, звонок будет перенаправлен в компетентное подразделение филиала или головного МЭИ. При этом сохраняется возможность ручного вмешательства оператора – он самостоятельно может принять звонок и перенаправить его внутри системы на другой номер телефона соответствующего подразделения.

Кроме того, к преимуществам Visper можно отнести наличие в нем аналитического модуля, позволяющего отслеживать время ожидания ответа, длительность самого разговора, а также частоту обращения по каждой группе вопросов, что позволит руководству как смоленского филиала в отдельности, так и всего МЭИ в целом прогнозировать нагрузку в период пика (июль – август), выявлять проблемные места и корректировать на этой основе материалы, размещаемые на сайте приемной комиссии МЭИ и отборочной комиссии СФ МЭИ, а также в социальных сетях.

На рисунке 2 представлена схема организации обработки звонков после внедрения системы Visper.

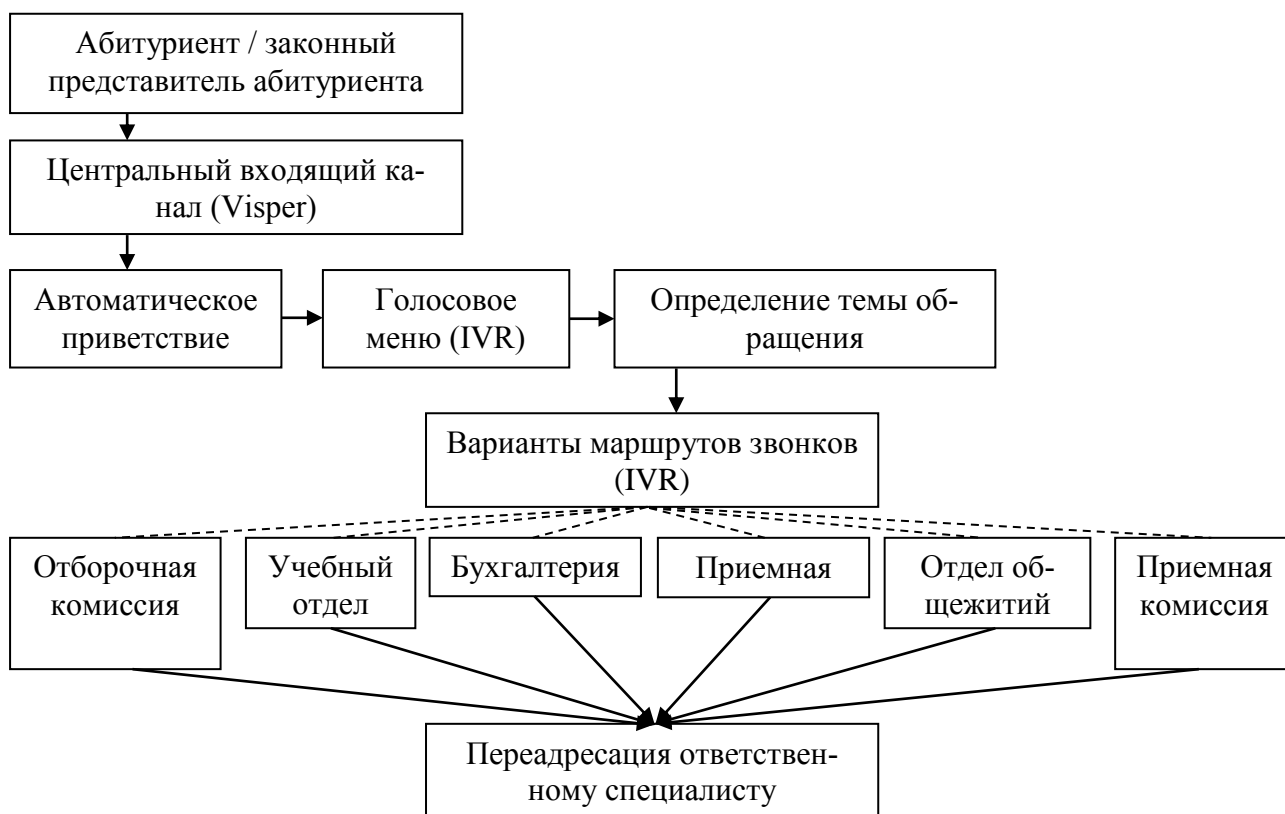


Рисунок 2 – схема организации обработки звонков после внедрения системы Visper

После запуска системы в работу планируется [2]:
 – снижение нагрузки на операторов отборочной комиссии;

- сокращение времени на прием обращения от абитуриента;
- обеспечение прозрачности коммуникаций за счет аналитики системы.

Таким образом, проблема организации взаимодействия между подразделениями в смоленском филиале МЭИ заключается в отсутствии единой системы коммуникации, позволившей централизованно обрабатывать входящие обращения от абитуриентов и их законных представителей и направлявшей их в необходимые подразделения ВУЗа. При традиционном способе взаимодействия с абитуриентами отсутствует возможность подсчета нагрузки на конкретное подразделение ВУЗа, определения наиболее популярных тем обращений, а также времени ожидания. Кроме того, распределение обращений от абитуриентов вручную создает перегрузку операторов, влекущее за собой снижение качества консультаций и потерю будущих студентов. Именно поэтому, внедрение системы Visper в работу отборочной комиссии смоленского филиала МЭИ позволит сократить время ответа на запросы абитуриентов, а также повысит имидж ВУЗа в целом.

Литература

1 Автоматизация работы приемной комиссии с помощью чат-бота [Электронный ресурс] // Витрина РОСТА. URL: <https://витринароста.рф/blog/cases/upravlenie/avtomatizatsiya-raboty-priemnoy-komissii/> (дата обращения 01.10.2025).

2 Романов Е.А. Внедрение бережливых технологий в работу приемной комиссии // Инновационное развитие профессионального образования. 2025. №3 (47). С. 106 – 114.

*М.А. Столяренко, студ.; А.Ю. Пучков, к.т.н., доц.
(Филиал ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» в г. Смоленске)*

ВЫЯВЛЕНИЯ АНОМАЛИЙ В ФИНАНСОВЫХ ВРЕМЕННЫХ РЯДАХ НА ОСНОВЕ МОДЕЛИ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

Выявление аномалий (Anomaly Detection, AD) в данных востребовано в различных прикладных областях, так как способствует своевременному обнаружению тенденций развития контролируемых процессов, не соответствующих ожидаемым параметрам [1]. Финансовые временные ряды отражают процессы, связанные с динамикой биржевых котировок или других финансовых инструментов, а анализ этих рядов позволяет извлекать ценную информацию, которая способствует своевременному принятию решений о реформировании финансового портфеля и принятию упреждающих управленческих решений. Наличие аномалий в данных временных рядов представляет собой коллективные (групповые) или точечные отклонения (выбросы) от остальных данных, не соответствующие принятым представлениям о допустимых значениях или состояниях. Такие аномалии могут свидетельствовать о непредвиденном развитии процессов, отражаемых финансовыми рядами, а их выявление и интерпретация заслуживают отдельного внимания при проведении анализа, поэтому AD в финансовых временных рядах представляет собой актуальную задачу исследований, решение которой способствует повышению точности прогнозов развития рыночных ситуаций и принятию обоснованных решений при управлении финансовыми портфелями.

Цель исследования состояла в разработке архитектуры нейронной сети,

которая была бы более «легковесной», чем SOTA-модели выявления аномалий в финансовых рядах, но в тоже время обеспечивала сопоставимую с ними точность. Новизна полученных результатов исследования заключается в предложенной архитектуре нейронной сети и структуре нейросетевой модели выявления аномалий в финансовых рядах.

Современная финансовая отрасль характеризуется высокой динамичностью, неопределенность и сложными нелинейными зависимостями, поэтому аномалии могут проявляться либо как в резком увеличении количества значений, так и в значительном их выпадении из устоявшихся закономерностей. В финансовой сфере АД позволяет также выявлять манипулирование рынками, системные сбои, которые могут повлечь за собой риски как негативного. Так и положительного развития рыночной конъюнктуры.

Для наиболее эффективного обнаружения аномалий во временных рядах крайне отвраимо понимать и различать их типы. Для каждого типа могут потребоваться различные подходы, реакция на них также будет различной. Выделяют 3 типа аномалий во временных рядах [2]:

- точечные аномалии (отдельные точки последовательности значительно отклоняются от ожидаемых значений);

- контекстные аномалии (совокупность точек последовательности, которые в своем ряду создают отклонение от ожидаемого поведения, однако в отдельности каждая точка может не казаться аномальной);

- интервальные аномалии (аномалии паттернов) (множество точек в рамках определенного интервала, которые отклоняются от ожидаемого поведения);

- новизна (ненаблюдаемая закономерность, которая возникает впервые в рассматриваемом ряду).

Задача выявления аномалий в финансовых временных рядах исторически решалась с помощью классических статистических моделей, которые позволяют предсказывать сезонность и будущие значения рядов. К таким методам для анализа временных рядов относят: анализ Z-балла, скользящие средние, методы стандартного отклонения, экспоненциальное сглаживание [3]. Однако у классических статистических моделей существует ряд недостатков: плохая адаптация к нелинейным зависимостям; сложность адаптации к динамически изменяющейся ситуации на рынке; неустойчивость к шуму. Помимо этого, классические статистические модели требуют ручной предварительной подготовки данных к анализу, что весьма трудоемко и может приводить к ошибкам ввиду неаккуратности выполнения расчетов и группировки данных.

Поэтому, в настоящее время широкое распространение для выявления аномалий в финансовых временных рядах получили модели машинного обучения. Среди них наибольшее внимание со стороны исследователей получили искусственные нейронные сети, обеспечивающие высокую точность выявления аномалий, прогнозирования развития процессов и рисков в различных прикладных областях [4]. Автоматизация настройки нейросетевых моделей на данных делает их применение намного более удобным, чем классические статистические модели, а широкий спектр архитектур нейронных сетей дает воз-

возможность подстраиваться по особенностям предметной области, учитывая контекст контролируемых процессов при АД.

Проведенный обзор источников показал, что выявление аномалий хорошо осуществляется нейросетевыми архитектурами типа «автоэнкодер» [5]. В ее основе содержится две нейросети: кодер, который формирует из входных данных скрытое представление, обычно, меньшей размерности, чем входные данные, и декодер, который «разворачивает» скрытое представление в выходные данные, которые сеть учится воспроизводить такими же. Как и входные, с минимальной ошибкой. Структура нейросетевой модели АД на основе автоэнкодера представлена на рисунке 1.

На вход модели подается набор входных данных, представленных матрицей X , с выхода снимается матрица Y , которая должна быть как можно ближе к X – этому обучается автоэнкодер в процессе подгонки его параметров. В дискриминаторе анализируется величина ошибки e , вычисление которой может проводиться как евклидово расстояние, но более предпочтительно нахождение дивергенции Кульбака-Лейбнера, которое дает более точное сопоставление локальных распределений входных и выходных данных. Это сравнение осуществляется в блоке дискриминатора, на выходе которого формируется разностная матрица-ошибки, рассчитываемая как дивергенция Кульбака-Лейблера относительно минимального элемента матрицы разности:

$$KL_k = \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n (|X_{i,j} - Y_{i,j}|)_k \log \frac{(|X_{i,j} - Y_{i,j}|)_k}{(\min |X_{i,j} - Y_{i,j}|)_k},$$

где n, m – количество строк и столбцов в матрицах X и Y (предполагается, что их количеств одинаково), k – номер набора данных, если рассматривается только один набор (одно окно, взятое на временной оси ряда), то $k = 1$.

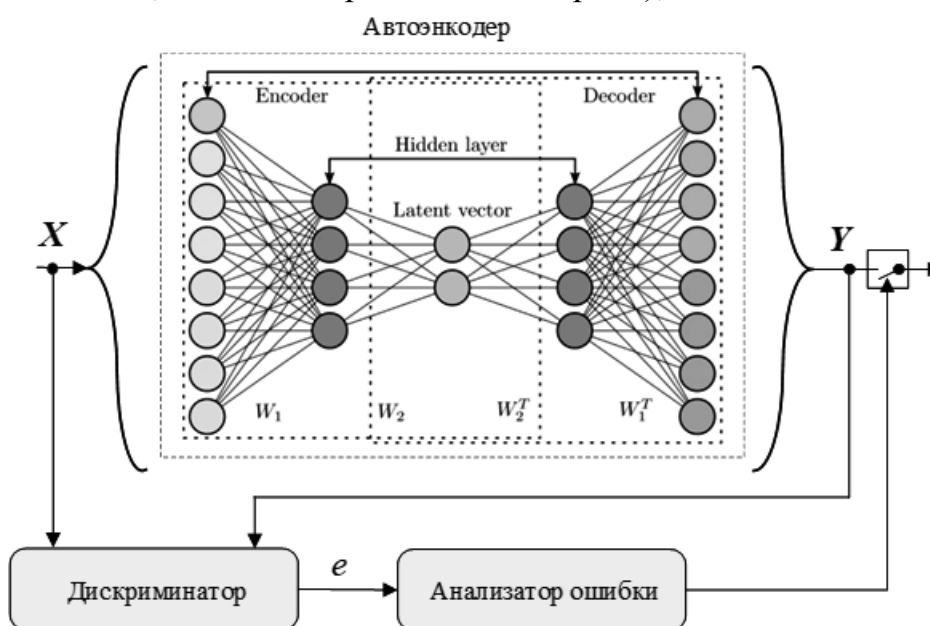


Рисунок 1 – Структура нейросетевой модели АД

Для апробирования предложенной модели была выбрана программная среда MatLAB, архитектура предложенного автоэнкодера показана на рисунке 2.

В основе архитектуры лежат слои двунаправленной долгой краткосрочной памяти (Bidirectional long short-term memory, BiLSTM) для рекуррентной нейронной сети – такие слои изучают двунаправленные долгосрочные зависимости между временными шагами временного ряда, что ускоряет обучение, так как нейросеть обучается на полном временном ряду на каждом шаге тренировки.

Кодер состоит из следующих слоев: `sequenceInputLayer` – входной слой, принимающий последовательности данных, в данном случае X ; `bilstmLayer` – слой двунаправленной долгой краткосрочной памяти из 128 ячеек BiLSTM; `reluLayer` – слой функций активации типа выпрямленного линейного блока (Rectified Linear Unit, ReLU). Скрытое состояние содержит слой двунаправленной долгой краткосрочной памяти из 32 ячейки BiLSTM, то есть меньше, чем в кодере, чем достигается формирование сжатого представления входных последовательностей, учитывающего наиболее важные особенности X , необходимые для восстановления входных данных в декодере. Он содержит: слой `bilstmLayer` из 128 ячеек (столько же, как и на входе, чем обеспечивается выравнивание формы данных на входе и выходе); слой `reluLayer`; полносвязный слой `fullyConnectedLayer`, который умножает входные данные `bilstmLayer` на матрицу весов, а затем добавляет вектор смещения, чем обеспечивает тонкую настройку сети на входные данные; `regressionLayer` – регрессионный слой, вычисляющий среднеквадратическую ошибку потерь для задач регрессии.

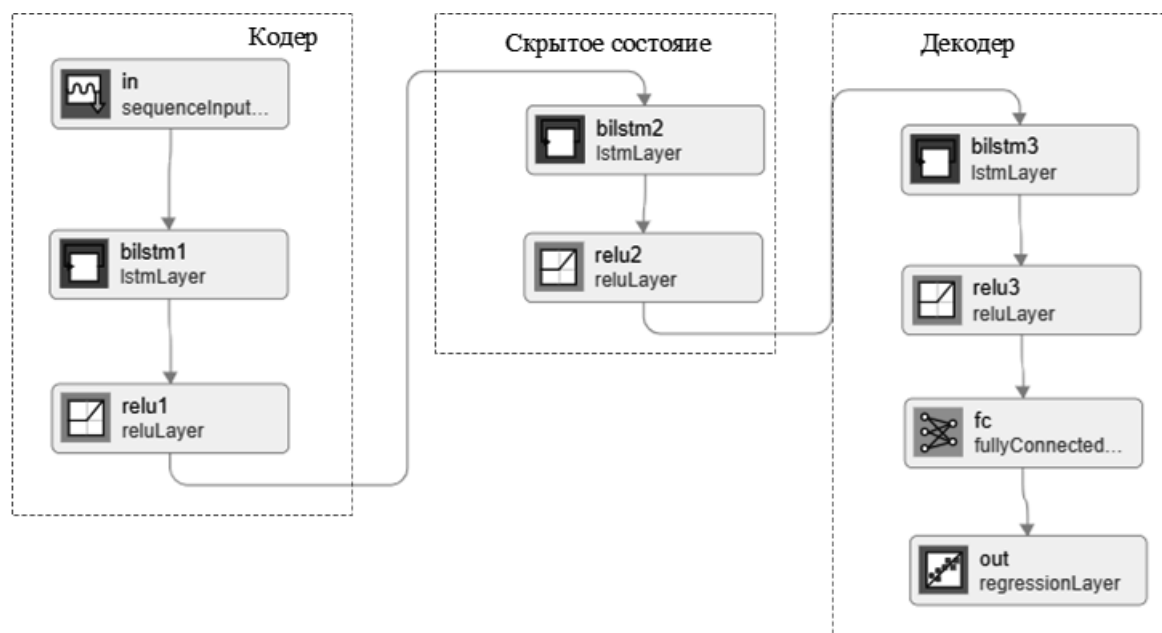


Рисунок 2 – Архитектура автоэнкодера

Анализатор на рисунке 1 срабатывает при выявлении большей, чем на нормальных данных, ошибки между входной и выходной последовательностями, что служит индикатором выявления аномалии.

Модельный эксперимент проводился на основе данных с сайта инвестиционной компании «ФИНАМ» (<https://www.finam.ru/>). Для эксперимента формировались 3000 одномерных последовательностей курса американского доллара (приняты за нормальные данные, без аномалий) длиной $h=20$, характери-

зующих временное окно, на котором будут анализироваться наличие аномалий. Обучение на нормальных данных проводилось в течение 50 эпох, была достигнута среднеквадратичная ошибка 0.865. Тестовая выборка содержала 500 последовательностей, из них 250 нормальных данных и столько же с аномалией, которая моделировалась как аддитивное наложение шума, несвойственного нормальным данным.

Классы сбалансированы (поровну последовательностей с аномалиями и без), поэтому для оценки качества выявления аномалий применялась метрика F1, которая достигла значений 0.89, что сопоставимо с известными современными моделями, но учитывая относительную «легкость» предложенной нейронной сети (61 тысяча обучаемых параметров) по сравнению с передовыми моделями (имеющими сотни тысяч и миллионы обучаемых параметров), полученный результат можно считать может весьма хорошим.

Предложенная нейросетевая модель выявления аномалий в финансовых временных рядах может найти применение в разведочном анализе временных рядов в различных прикладных областях для выявления аномалий, которые потом могут детектироваться уже более сложными моделями для уточнения и интерпретации.

Литература

1. Василькова М.А., Пучков А.Ю. Метод обнаружения аномалий в данных энергопотребления частного сектора // Энергетика, информатика, инновации – 2021 (электроэнергетика, электротехника и теплоэнергетика, математическое моделирование и информационные технологии в производстве, микроэлектроника и оптотехника). Сб. трудов XI -ой Межд. науч.-техн. конф. В 2 т. Т 1. – 2021. – 616 с. С. 55 – 59.
2. Wu J., Wang C., Zhang Z. et al. Patterns in time series to image phase and multi-step forecasting of financial indices. J. King Saud Univ. Comput. Inf. Sci. 2025. 37:59. p. 1 – 20.
3. Sánchez-Almeyda, C., González-Bueno, J., Koval, V. et al. Predicting financial distress in the food production sector: a dual-model approach using Z-score and O-score methods. Discov Sustain 6, 731 (2025). DOI: 10.1007/s43621-025-01348-w.
4. Пучков А. Ю., Дли М. И., Прокимнов Н. Н., Соколов А. М. Интеллектуальная модель управления рисками нарушения характеристик электромеханических устройств в многостадийной системе переработки рудного сырья // Прикладная информатика. 2023. Т. 18. № 1. С. 22–36. DOI: 10.37791/2687-0649-2023-18-1-22-36
5. Irazábal, J., Salazar, F., Silva-Cancino, N. et al. Detection of outliers in dam monitoring time series with autoencoders. J Civil Struct Health Monit 15, 1771–1792 (2025). DOI: 10.1007/s13349-025-00910-4.

*А.А. Тютюнник, к.э.н., доц.; Н.В. Дроздов, студ.
(филиал ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» в г. Смоленске)*

АНАЛИЗ И СРАВНЕНИЕ ПРОГРАММНЫХ СРЕДСТВ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ВЕБ-ПРИЛОЖЕНИЙ ОРГАНИЗАЦИИ

В современном мире популярность веб-приложений с каждым годом увеличивается. Они предлагают различные сервисы и услуги, для запуска которых используются различные устройства, имеющие доступ к сети Интернет: от персональных компьютеров до мобильных устройств. Рост их популярности сопровождается увеличением числа атак на веб-приложения со стороны злоумышленников, которые могут производить их исходя из собственных интересов. Известно множество случаев атак на веб-приложения в мире, которые приводили к различным последствиям: похищение данных людей, финансовые потери, репутационные и юридические последствия для организаций и другим. Например, в 2020 году произошла крупная DDoS-атака на Amazon Web Services.

Она длилась 3 дня и достигла скорости до 2,3 терабайта в секунду. В результате компания понесла огромные финансовые убытки [1].

Атаки на веб-приложения непосредственно связаны с их уязвимостями, которые ежедневно используются злоумышленниками по всему миру. Для их устранения используются различные средства в том числе и программные. Они работают в составе программного обеспечения, и к ним, например, относятся: антивирусное программное обеспечение (ПО), программы для шифрования данных, межсетевые экраны и многие другие.

Целью использования программных средств обеспечения безопасности веб-приложений является защита данных, пользователей, бизнес-процессов от различного вида угроз и уязвимостей.

Использование программных средств обеспечивают сохранение информационной безопасности веб-приложения. В их состав входят:

- системы предотвращения вторжений (IPS) – анализируют трафик и блокируют подозрительные действия в режиме реального времени;
- антивирусное ПО – предназначены для предупреждения о возможности заражения вредоносным файлом и программами;
- файрвол – осуществляет отслеживание и фильтрацию трафика;
- интегрированное ПО – это ПО, которое встроено в операционную систему устройства;
- системы управления уязвимостями – позволяют идентифицировать, оценивать и управлять существующими уязвимостями в ПО;
- брандмауэр (межсетевой экран) - контролирует трафик, выступает в роли фильтра или прокси-сервера, осуществляя блокировку подозрительных соединений;
- VPN – предназначен для скрытой передачи файлов по сети и др.
- ПО для шифрования данных – предназначены для шифрования данных как в процессе передачи, так и в состоянии покоя, чтобы защитить информацию от несанкционированного доступа;
- инструменты для тестирования на проникновение - позволяют проводить тестирование на уязвимости и выявлять слабые места в веб-приложениях;
- программные средства для аудита и мониторинга безопасности – ведут журналы событий, анализируют логи и мониторят активности со стороны пользователей, чтобы выявить аномалии;
- инструменты для управления идентификацией и доступом - решения, которые применяются для управления правами доступа пользователей к определённым ресурсам веб-приложений и др.

Программные средства применяются для различных целей, поэтому в научной литературе существует множество классификаций по разным признакам. По функциональному признаку выделяют следующую классификацию, которая представлена на рисунке 1 [2].

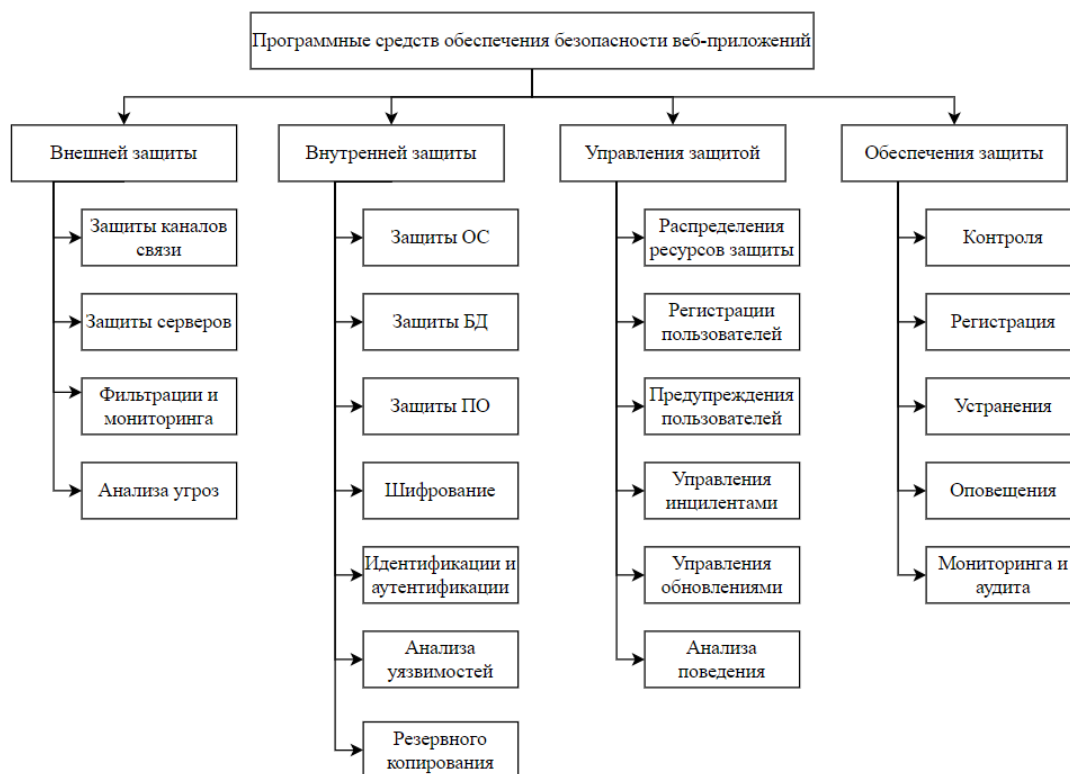


Рисунок 1 – Классификация программных средств обеспечения безопасности веб-приложений по функциональному признаку

Применение одних лишь программных средств не способно полностью устранить все угрозы и уязвимости веб-приложений. Они являются лишь частью комплекса мер по обеспечению информационной безопасности с такими средствами, как аппаратные, организационные и физические, и подчиняются ряду принципов. Например, соответствие законодательным положениям, выявление конфиденциальной информации, определение и разграничение прав доступа, установление персональной ответственности и т.д.

Рассмотрим конкретные решения, которые входят в состав программных средств обеспечения безопасности веб-приложений [3-4].

Для выявления и устранения уязвимостей могут использоваться инструменты для анализа защищённости. Среди них можно выделить следующие:

- **Karkinos** – это инструмент, который позволяет проводить тестирование на проникновение, а также проводить другие тесты безопасности. Состоит из нескольких модулей, которые позволяют проводить данные тесты. Из особенностей можно выделить то, что данный инструмент позволяет производить кодирование и декодирование символов в нескольких форматах, а для взлома хэшей используется база из более чем 15 миллионов паролей, которые можно редактировать. Совместим с ОС Linux и Windows;

- **Sifter** – совмещает в себе несколько инструментов для тестирования на проникновение, а также включает модули для сканирования уязвимостей. Набор модулей позволяет проводить тестирование на проникновение с возможностью проведения быстрого сканирования уязвимостей, проверки межсетевых экранов

и многое другое. Использует Attack Surface Management (ASM) для отображения поверхности атаки. Позволяет работать с различными ОС и платформами;

- Metasploit – программное средство, позволяющее тестировщикам выявлять и исправлять найденные уязвимости систем. Имеет возможность расставления приоритетов рисков при проверке уязвимостей по замкнутому циклу. Тестирования могут проводиться для сканирования и создания обычной нагрузки, так и выполнения эксплойтов. Из особенностей: имеет встроенный сканер обнаружения для сканирования TCP-портов, сканер ошибок и уязвимостей для выявления возможных мест атак, а также способен исправлять выявленные уязвимости. Совместим с Linux, Windows и MacOS;

- Sn1per – инструмент тестирования на проникновение, который специализируется на командах безопасности и специалистах в области безопасности. Как и Sifter использует ASM. Способен на выявленных угрозах выполнять эксплойтов, автоматически собирает такие данные, как whois, ping и DNS, а также даёт возможность управлять уязвимостями из одного места.

Для анализа защищённости существует множество различных решений, каждое из которых обладает своими функциональными возможностями, достоинствами и недостатками, что может подходить для решения различных задач. Данными инструментами можно проводить комплексные тесты на проникновение, выявлять и устранять уязвимости, изучать поверхность атак и автоматизировать процессы по обеспечению безопасности.

Файрвол веб-приложений или Web application firewall (WAF) – это программные средства, которые применяются для защиты веб-приложений от различных угроз и атак. Принцип действия состоит в отсеивании нежелательного трафика из общего потока и его фильтрация на запросы приложений, сайтов и пользователей. Некоторые существующие решения приведены в таблице 1, а также представлено их сравнение.

Таблица 1 – Файрволы

Название	Платформа	Основные функции	Преимущества	Недостатки
AWS WAF	Облачный сервис от Amazon	Защита от DDoS-атак, фильтрация трафика, настройка правил на основе IP-адресов, URI, заголовков и т.д.	Легкая интеграция с другими сервисами AWS, масштабируемость, гибкость настройки	Зависимость от облачной инфраструктуры AWS, дополнительные затраты на использование.
Cloudflare WAF	Облачный сервис	Защита от DDoS-атак, автоматическое обновление правил безопасности, защита от OWASP Top 10	Простота использования, высокая производительность, глобальная сеть серверов	Ограниченные возможности настройки для сложных сценариев, возможные проблемы с совместимостью
Imperva WAF	Облачный и локальный вариант	Защита от OWASP Top 10, DDoS-защита, управление API	Высокая эффективность в обнаружении и блокировке атак, хорошая аналитика	Стоимость может быть высокой для малых и средних организаций

F5 Advanced WAF	Локальное решение и облачный вариант	Защита от атак на приложения, управление трафиком, анализ поведения пользователей	Гибкость настройки, интеграция с другими решениями F5	Сложность в настройке и управлении
-----------------	--------------------------------------	---	---	------------------------------------

Файрволы могут различаться по видам (облачные, локальные и гибридные), что по большей части определяет их функциональные возможности, а также достоинства и недостатки использования. Их применение позволяет защитить веб-приложение от различных угроз (например, DDoS-атак, угроз OWASP и др.).

Средства управления уязвимостями – это специальные инструменты, помогающие анализировать и устранять различного рода уязвимости в веб-приложении. Среди них можно выделить следующие решения:

- Nessus – коммерческий сканер уязвимостей. Основные функции: сканирование на наличие уязвимостей, анализ конфигураций, предоставление отчётов. Из его преимуществ: возможность различных проверок, регулярные обновления базы уязвимостей, а из недостатков: стоимость для небольших организаций;

- OpenVAS – сканер уязвимостей с открытым исходным кодом. Позволяет проводить сканирование и создавать отчёты. Преимущества: бесплатность, активное сообщество разработчиков. Недостатки: может быть менее понятным для пользователей по сравнению с коммерческими аналогами, требует настройки;

- Qualys Vulnerability Management – является облачным сервисом. Способен производить сканирование на уязвимости, управлять обновлениями и составлять отчёты о безопасности. Из его преимуществ: простота использования, автоматизация процессов. Из минусов – стоимость;

- Rapid7 Nexpose – коммерческое ПО для сканирования уязвимостей. Производит сканирование сетей и приложений на уязвимости, управление рисками. Преимущества: понятный интерфейс, хорошая интеграция с другими продуктами компании. Недостаток – высокая стоимость;

- OWASP ZAP – инструмент с открытым исходным кодом для тестирования безопасности веб-приложений. Его основными функциями являются перехват трафика, автоматизированное сканирование на уязвимости. У данного программного средства активное сообщество, а также оно поддерживает OWASP, но функционал меньше, чем у других платных инструментов.

Средства управления уязвимостями могут различаться по модели распространения, при этом каждая из них имеет свои особенности и недостатки. На практике их можно использовать по отдельности или в сочетании друг с другом, что позволяет избежать недостатков, связанных с конкретным решением. Коммерческие решения предлагают более широкий функционал, а бесплатные инструменты – гибкую настройку и доступность.

Существуют российские программные средства обеспечения безопасности веб-приложений, которые также могут использоваться наравне с импортными решениями. Некоторые из решений представлены на рисунке 2.

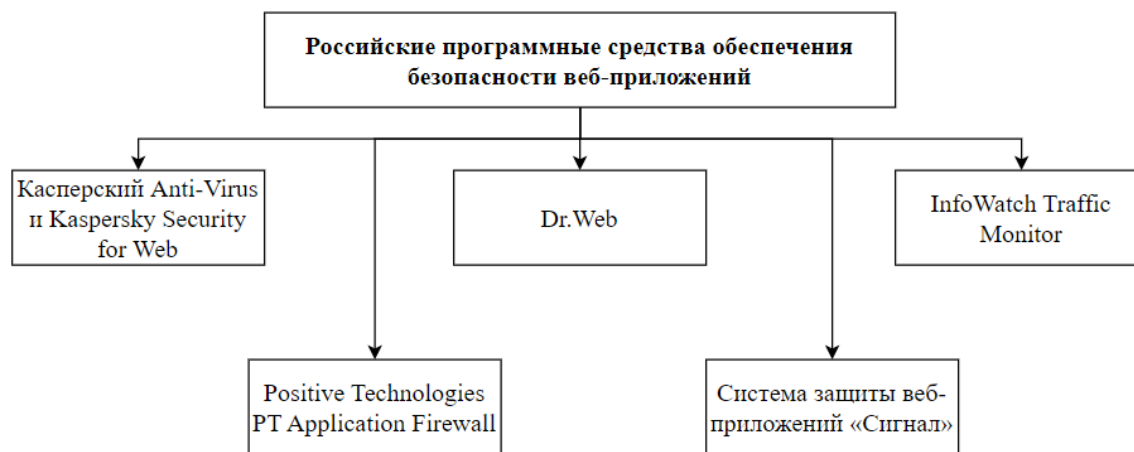


Рисунок 2 – Российские программные средства обеспечения безопасности

Отечественные программные решения обеспечивают технологическую независимость и позволяют гибко настраивать системы защиты с учётом специфики и требований в нашей стране. Это особенно актуально в наше время, когда Россия сталкивается с санкциями со стороны зарубежных государств и ставит приоритет на импортозамещение. Они позволяют заменить или дополнить импортные средства, обеспечить соответствие требованиям законодательства и регуляторов, повысить устойчивость инфраструктуры. Их наличие позволяет расширить выбор организаций и адаптировать систему безопасности веб-приложений под определённые условия (бюджет, требования по лицензированию, политика информационной безопасности компании).

Таким образом, был проведён сравнительный анализ программных средств обеспечения безопасности веб-приложений. Атаки на веб-приложения возникают из-за различных корыстных целей злоумышленников, а направлены они на угрозы и уязвимости систем. Целью программных средств является защита данных, пользователей, бизнес-процессов от различного вида угроз и уязвимостей, а в их состав входит множество инструментов, что доказывает разнообразие признаков для классификаций. Сами эти решения могут различаться по различными признакам, а также иметь свои особенности, поэтому решение о выборе программных средств остаётся за теми, кому принадлежит веб-приложение. Для проведения тестирования на проникновении лучше всего подходит Sn1per, который позволяет автоматизировать сбор информации, и Metasploit, для управления уязвимостями – Nessus и Qualys для корпоративного применения, а OpenVAS и OWASP ZAP для бесплатной настройки и интеграции, для предотвращения утечек и контроля трафика – AWS WAF и Cloudflare WAF. Отдельное внимание заслуживает российское ПО для обеспечения безопасности веб-приложений, поскольку в текущих условиях они активно развиваются и используются в нашей стране.

Литература

1 Топ-5 крупнейших DDoS-атак в истории интернета: их масштаб реально поражает [Электронный ресурс] // TRASHBOX.RU: URL: <https://clck.ru/3GhmiA> (дата обращения 18.06.2025).

2 Программные средства защиты [Электронный ресурс] // StudFile: URL: <https://studfile.net/preview/5470123/page:4/> (дата обращения 19.06.2025).

3 Кальченко Д.М., Заливин А.Н., Федоров А.В. Анализ программных и программно-аппаратных средств для защиты информации в информационных системах органов государственной власти // Научный результат. Информационные технологии. 2023. № 4. С. 3-11. ISSN 2518-1092. Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. - URL: <https://e.lanbook.com/journal/issue/351044> (дата обращения: 18.06.2025).
4 Best Application Security Software [Электронный ресурс] // SOURCEFORCE: URL: <https://sourceforge.net/software/application-security/> (дата обращения 19.06.2025).

*А.А. Тютюнник, к.э.н., доц.; Е.И. Матюшенков, студ.
(Филиал ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» в г. Смоленске)*

ПРОБЛЕМЫ ВНЕДРЕНИЯ РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩИХ И ТОЧНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ВОЗДЕЛЫВАНИЯ ЛЬНА-ДОЛГУНЦА СМОЛЕНСКОЙ ОБЛАСТИ

Лён-долгунец остаётся для Смоленской области одной из базовых культур, от которой непосредственно зависят занятость, загрузка перерабатывающих мощностей и экспортный потенциал. В последние годы регион регулярно фигурирует среди лидеров по площадям и валовому выпуску льнопродукции, что объективно усиливает спрос на технологические решения, обеспечивающие снижение себестоимости и стабилизацию качества волокна в условиях роста цен на материальные ресурсы и увеличивающейся климатической неопределённости. В этих условиях внедрение ресурсосберегающих и точных подходов рассматривается не как конъюнктурная инновация, а как инструмент поддержания конкурентоспособности хозяйств и отрасли в целом.

Под ресурсосберегающими технологиями в льноводстве обоснованно понимают системно организованный комплекс приёмов рационального использования топлива, удобрений, воды и средств защиты растений, то есть гербицидов, фунгицидов и инсектицидов, при сохранении целевых параметров урожайности и качества волокна. Точное (прецизионное) земледелие выступает эволюционной формой данного подхода и предполагает дифференцированное управление агрооперациями на основе внутрислоевой неоднородности. В качестве технологической базы используются глобальные навигационные спутниковые системы, такие как GPS и ГЛОНАСС, с режимом RTK, обеспечивающим сантиметровую точность позиционирования от базовой станции. Также применяются методы дистанционного зондирования, почвенные и машинные датчики, а также специализированное программное обеспечение (ПО) для аналитики и формирования карт-заданий. Ключевым механизмом выступает Variable Rate Application (VRA). Эта технология дифференцированного внесения семян и удобрений по картам-заданиям, позволяет перейти от усреднённых норм к адаптивному управлению производственным процессом. Накопленная практика агропромышленного комплекса (АПК) демонстрирует экономический эффект и повышение технологической дисциплины при корректной настройке контуров мониторинга [6].

В качестве первоочередного ограничителя выступает дефицит валидных исходных данных. Формирование сопоставимых карт урожайности, продуктивности и агрохимического состояния почв требует минимум двух вегетационных сезонов наблюдений, унификации методик отбора, стабилизации ге-

опривязки и межсезонной калибровки индексов вегетации. При отсутствии такой базы эффективность VRA по известкованию, азотному питанию или коррекции нормы высева оказывается статистически незначимой, а в ряде случаев приводит к систематическим смещениям управленческих решений. В льноводстве, учитывая высокую зависимость культуры от «окон» выполнения операций, ошибки картирования транслируются в выраженную пространственную неоднородность стояния и вариативность свойств тресты и волокна [7]. Технологическая дисциплина процесса возделывания является критическим фактором производственной устойчивости. Строгость календарных сроков посева, ранней химической прополки, валки, вымочки и подъёма тресты обуславливает узкие допуски по времени и параметрам операций. Нарушение регламентов повышает риск полегания, усиливает вариабельность морфологических показателей и усложняет калибровку алгоритмов дозирования и технологических скоростей. Указанная зависимость подробно фиксируется в профильной учебно-научной литературе и подтверждается практиками хозяйств, где сбой одного технологического окна нивелирует преимущества даже при наличии современного парка машин [5].

Эдафо-климатические условия региона, а именно дерново-подзолистые кислые почвы, периоды переувлажнения и прохладные весны, способствуют усилению внутриполевой вариабельности агрофизических и агрохимических показателей. В таких условиях применение универсальных моделей и шаблонных пороговых значений ведет к снижению как прогностической мощности, так и управленческой значимости аналитики. В связи с этим возникает необходимость в разработке локализованных методик, адаптированных к микроразнообразию поля и сортовой специфике, а также в расширении программ мониторинга для повышения устойчивости агросистемы к колебаниям параметров среды.

Инженерное обеспечение процессов остаётся системным ограничителем. Значительная часть эксплуатируемой техники не поддерживает протокол ISOBUS, представляющий собой унифицированную цифровую шину для связи трактора, орудия и терминала. Кроме того, она не оснащена средствами секционного отключения, точного ШИМ-дозирования, основанного на принципе широтно-импульсной модуляции подачи, а также стабильными системами автоведения по высокоточным траекториям (РТК-руление). Для льноводства это является критически важным аспектом, поскольку отклонения от заданной нормы и глубины посева, неустойчивость рабочей скорости и перекрытия проходов формируют неоднородность густоты стояния и геометрию стебля. Эти факторы, в свою очередь, напрямую. Модернизация парка и интеграция отечественных систем управления осуществляются поступательно, однако процесс требует капитальных вложений и времени на подготовку персонала к работе с картами-заданиями и телеметрическими данными [8]. Экономическая целесообразность внедрения точного земледелия оценивается с учётом полной стоимости владения. Формирование полноценного технологического контура, включающего РТК-покрытие на основе сети базовых станций, сенсорное оборудование, аналитическое программное обеспечение и сервисное сопровожде-

ние, требует существенных первоначальных инвестиций. Для сельхозпредприятий среднего масштаба окупаемость проекта чаще всего достигается в течении нескольких сезонов. Необходимым условием для этого является стабильный сбыт льнопродукции и строгое соблюдение технологических регламентов. При этом такие факторы, как волатильность рыночных цен и погодные риски, могут значительно увеличивать фактический срок окупаемости инвестиций. В этой связи особую актуальность приобретают кооперационные модели, например, совместное использование РТК-сетей, сервисных центров и лабораторий, а также меры адресной государственной поддержки, направленные на снижение финансового порога входа в технологии точного земледелия [8].

Кадровый вопрос выступает определяющим для достижения высокой эксплуатационной эффективности. Практическая реализация принципов точного земледелия требует от специалистов наличия междисциплинарных знаний в области агрономии, почвоведения, агрофизики и анализа данных. Дефицит таких кадров на местах зачастую приводит к неоптимальной настройке систем управления, вынужденному возврату к усреднённым нормам внесения материалов после первых неудачных экспериментов с дифференцированным применением и, как следствие, к снижению уровня доверия к рекомендациям, получаемым из аналитических систем. Решением данной проблемы может стать создание региональных центров компетенций и сервисной поддержки, которые призваны восполнить существующие методические пробелы и обеспечить стабильную эксплуатацию технологических решений.

На межхозяйственном уровне сохраняется дефицит унифицированных стандартов обмена агроданными и синхронизации логистики. Перерабатывающие предприятия предъявляют строгие требования к однородности партии и срокам доставки тресты, тогда как разная цифровая зрелость хозяйств генерирует очереди и потери качества. Актуальными выглядят внедрение согласованных форматов данных (зоны управления, задания на посев/внесение, фактические карты урожайности), увязанных с требованиями переработчиков и производственными календарями, а также формирование кластеров, где инфраструктура точного земледелия и сервис создаются на кооперативной основе [1, 2, 4].

Несмотря на указанные ограничения, в Смоленской области формируются благоприятные условия для масштабного внедрения передовых агротехнологий. Концентрация посевных площадей и устойчивый рост производства создают необходимый экономический эффект масштаба. Это позволяет стандартизировать ключевые процессы: развертывание региональных РТК-сетей, проведение систематического почвенного картирования, ведение цифровых паспортов полей, а также унификацию моделей сортового размещения и известкования кислых почв. Активный трансфер лучших практик и использование обобщенных федеральных данных значительно ускоряют адаптацию технологий к местным условиям и минимизируют характерные для начального этапа риски [3]. Рациональная стратегия внедрения предполагает последовательное выполнение этапов. На первом этапе формируется достоверная информационная база, для

чего требуется два-три сезона для мониторинга вегетации и влажности, проведения агрохимического обследования с определением кислотности и содержания элементов питания, а также сбора фактических карт урожайности. Второй этап включает пилотное внедрение технологии дифференцированного внесения материалов на участках с выраженной неоднородностью и ежегодную корректировку границ управляемых зон по полученным результатам. Третий этап предусматривает постепенную модернизацию машинно-тракторного парка, а четвертый направлен на подготовку механизаторов и агрономов для работы с картами заданиями и чек-листами технологических операций, особенно критичных для льноводства, таких как посев, химическая прополка, уборка и первичная переработка [6]. Для объективной оценки эффективности внедрения целесообразно заранее установить ключевые метрики: экономию топлива и материалов в расчете на гектар, показатели равномерности всходов и стеблестоя, снижение variability качества волокна, долю операций, выполненных по картам заданиям, а также частоту отклонений от регламентов с обязательным анализом их причин.

В целом барьеры на пути внедрения ресурсосберегающих и точных технологий в льноводстве Смоленской области носят комплексный характер, затрагивая информационные, технологические, инженерные, экономические и кадровые аспекты. Их преодоление требует системного подхода, интегрирующего такие элементы, как данные, модели, техника, персонал и процессы, при активном взаимодействии сельхозпроизводителей, переработчиков и органов управления АПК. При условии целенаправленной поддержки и последовательной реализации этапов внедрения можно ожидать устойчивого снижения издержек, стабилизации качества продукции и предсказуемой окупаемости инвестиций в новые технологические решения [1].

Литература

- 1 Смоленская область занимает ведущие позиции по льноводству // Смоленская газета. 2025. URL: <https://smolgazeta.ru/countryside/130486-smolenskaya-oblast-zanimaet-vedushchie.html> (дата обращения: 05.09.2025).
- 2 Смоленская область лидирует по производству льна // СенатИнформ. 2025. URL: https://senatinform.ru/news/smolenskaya_oblast_lidirueta_po_proizvodstvu_lna/ (дата обращения: 05.09.2025).
- 3 Краткие итоги выращивания льна-долгунца в РФ в 2024 году // ФГБУ «Россельхозцентр». Информационный листок. 2025. URL: <https://rosselhocenter.ru/ob-uchrezhdenii/filialy/tsentralnyy-okrug/moskva/predstavleny-kratkie-itogi-vyrashchivaniya-lna-dolguntsa-v-rossiyskoj-federatsii-v-2024-godu/> (дата обращения: 05.09.2025).
- 4 Краткие итоги выращивания льна-долгунца... (по данным ФГБУ «Россельхозцентр») // Департамент по сельскому хозяйству Смоленской области. 2025. URL: <https://selhoz.admin-smolensk.ru/news/kratkie-itogi-vyrashchivaniya-lna-dolgunca-na-territorii-rossijskoj-federacii-v-2024-godu-po-dannym-fgbu-rosselhocentr/> (дата обращения: 05.09.2025).
- 5 Глушаков С.Н. Агробиологические основы производства и переработки льна-долгунца: учеб. пособие. Смоленск: СГСХА, 2017. 152 с.
- 6 Точное земледелие (прецизионное земледелие): определение и основы // Институт агрофизики РАН. 2024.
- 7 Гриц Н.В. и др. Цифровизация сельского хозяйства: тенденции и перспективы // Общее земледелие и растениеводство. 2022.
- 8 «Цифра» на грядке: RTK, мониторинг и эффекты цифровизации // Вестник АПК. 2025. URL: <https://vestnikapk.ru/articles/aktualno/tsifra-na-gryadke/> (дата обращения: 05.09.2025).
- 9 Как нейросети становятся драйвером роста для аграриев // РБК. 2024. URL: https://www.rbc.ru/technology_and_media/20/09/2024/66e2ab529a7947ebe5383c93 (дата обращения: 05.09.2025).

ОГРАНИЧЕНИЯ СИСТЕМНО-ДЕЯТЕЛЬНОСТНОГО ПОДХОДА ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ СИСТЕМ «VUCA-МИРА»

Современная управленческая и инженерная практики всё чаще описывает внешнюю среду как «VUCA-мир», используемый для описания внешней среды как волатильный, неопределённый, сложный и неоднозначный. Данная основополагающая теория сформировалась в ответ на растущую нелинейность и информационную перегруженность принятия решений, а также ускорение технологических и социальных циклов [1]. В подобных условиях к моделям предъявляются требования не столько статической устойчивости, сколько способности к объяснению происходящего и совместной адаптации действий в условиях динамично меняющейся среды. качестве методологической основы для такого моделирования закономерно рассматривается системно деятельностный подход (СДП), поскольку он исходит из первичности деятельности как формы организации мышления и преобразования реальности. Однако применение СДП для моделирования систем VUCA-типа выявляет ряд методологических ограничений, которые требуют дополнительного изучения и компенсации. Теоретической основой СДП традиционно выступает теория деятельности А.Н. Леонтьева, в которой деятельность трактуется как целостная система, объединяющая мотив, цель, действия и операции, а личность понимается в качестве ее внутреннего компонента [3]. В методологическом направлении, развитием Г.П. Щедровицким (СМД-методология), были разработаны инструменты организационно деятельностного мышления. К их числу относятся организационно деятельностные игры (ОДИ), проектировочно рефлексивные процедуры, а также схемы мыследеятельности [4]. Указанный методологический аппарат демонстрирует высокую эффективность в ситуациях, требующих согласования позиций субъектов, нормирования целей и формирования проектных позиций. В то же время VUCA-контекст, для которого характерны текучесть системных границ и сложная, рекурсивная структура причинно-следственных связей, порождает специфические вызовы к применению системно деятельностного подхода [5].

Первым ограничением системно деятельностного подхода является его принципиальная ориентированность на человека как сознательного субъекта, способного формулировать цели. Однако в сетевых и мультиагентных конфигурациях VUCA-систем значительную роль играют гибридные акторы, такие как платформы, алгоритмы, модели машинного обучения и распределенные сообщества. Их целеполагание не сводится к воле единого субъекта, что размывает традиционное разделение на проектировщика и объект проектирования. Возникает методологическая трудность в разделении проектировщика и проектируемого объекта, особенно когда сам процесс проектирования интегрирован в платформенно алгоритмические контуры воздействия [6]. Это создает риск нормативной предвзятости моделей, при которой доминирующей становится

организационно усиленная конструкция деятельности.

Второе ограничение связано со склонностью СДП к использованию жестких циклов целеполагания и нормирования. В условиях VUCA-среды цели часто требуют постоянной корректировки, а обратные связи проявляются с переменными лагами. Жесткая последовательность фаз проекта не успевает за изменениями среды, что создает необходимость скользящего целеполагания. Российская проектная практика последних лет демонстрирует сдвиг в сторону гибридных контуров управления, комбинирующих человеческую рефлексивность с формальными системами мониторинга, что трансформирует планы в само-обновляющиеся артефакты [2]. Однако в рамках классических организационно-деятельностных игр поддержание такого живого плана сопряжено со значительными издержками, обусловленными длительными согласовательными процедурами и зависимостью от квалификации модераторов.

Третья проблема заключается в том, что типовые постановки задач в рамках СДП демонстрируют высокую эффективность на уровне концептуальных схем и организационных регламентов, но слабо интегрируются с формально вычислительными моделями. В ситуациях, требующих проведения сценарного анализа, оценки диапазонов возможных исходов на основе данных, приоритет отдается имитационным, агент-ориентированным и гибридным моделям, включая цифровых двойников. Российские исследования в области кризисного управления и цифровых двойников фиксируют смещение акцента с описательных моделей деятельности на вычислимые макеты процессов [4]. При отсутствии такого вычислимого компонента модели, построенные на принципах СДП, рискуют остаться лишь картами смыслов, пригодными для согласования позиций, но непригодными для прогнозирования и опережающего управления.

Четвертым вызовом является недостаточная воспроизводимость и трассируемость артефактов СДП. ОДИ и другие процедуры СДП производят обширные наборы схем, однако в VUCA-среде важно не только достичь консенсуса между участниками, но и формализованно связать выработанную позицию с исходными данными, допущениями и метриками оценки эффекта. При отсутствии четкой цепочки доказательств повышает риск ретроспективной рационализации решений. Эта проблема особенно актуальна в сферах, связанных с обеспечением безопасности и устойчивости, где регуляторы и компании активно развивают рискориентированные механизмы, опираясь на данные и быстрые экспериментальные циклы. В данном контексте СДП требует интеграции с формальными методами риск-инжиниринга.

Пятое ограничение касается когнитивных аспектов. Системно-деятельностный подход требует интенсивных рефлексивных сессий и значительных затрат на коллективную мыслительную работу. В условиях VUCA-реальности это вступает в противоречие с проблемой перегрузки внимания. Возникает объективная потребность в распределенной когнитивной архитектуре, где часть аналитических функций делегируется алгоритмам визуализации и машинного обучения, а другая часть сохраняется за экспертными практиками человека. Поскольку СДП как методология не содержит встроенного места для алгорит-

мических субъектов, его операционализация требует явного включения искусственных интеллектуальных агентов и вычислимых моделей.

На практике это означает необходимость методологической гибридизации. Концептуальный уровень системно деятельностного подхода обеспечивает постановку задач, определение интересов и формирование проектных норм. На вычислительном уровне применяются имитационные и агент-ориентированные модели, позволяющие проводить сценарный анализ и оценивать распределение возможных исходов. Операционный уровень реализуется через цифровые двойники и аналитические платформы, связывающие теоретические построения с фактическими данными. Интеграция этих уровней достигается посредством единого паспорта модели, фиксирующего цели, допущения, источники данных и границы применимости, что обеспечивает воспроизводимость результатов. Процедура реализуется через двойной контур моделирования. Внешний контур, основанный на СДП, формирует нормативные рамки и ценностные ориентиры. Внутренний вычислительный контур проверяет реализуемость установленных норм в условиях наблюдаемой динамики среды. Российские исследования подтверждают актуальность таких интегративных подходов, соединяющих ценностные основания с формальными методами анализа [1].

Особую сложность представляет адаптация методологии к требованиям оперативности. Классические СДП-сессии проектировались как многочасовые/многодневные интенсивы. В VUCA-контур нужно встроить «микро-ОДИ»: короткие, но регулярные циклы пересборки позиций, синхронизированные с событиями среды и обновлением данных. Это уже происходит в областях, где ставка делается на устойчивость цепочек поставок и организационную анти-хрупкость: здесь ценится не единовременная «сборка программы действий», а устойчивость механизма пересборки. Такой переход снижает транзакционные издержки СДП и улучшает сопряжение с непрерывной аналитикой.

Таким образом, ограничения СДП при моделировании систем VUCA-типа можно суммировать как: зависимость от субъектно-нормативной рамки в условиях сетевых гибридных акторов; временной рассинхрон между циклами нормирования и динамикой среды; слабая связка с вычислительными методами для работы с нелинейностью; проблемы воспроизводимости артефактов и трассируемости решений; и высокие когнитивные/организационные издержки. Компенсация этих ограничений требует структурной гибридизации: проектно-рефлексивные процедуры СДП для смысловой сборки и легитимации норм; вычислимые модели и цифровые двойники для проверки управляемости и оценки рисков; потоковые данные для постоянной коррекции целей и параметров. Данный синтез методологий создает основу для устойчивого управления в условиях неопределенности. Результатом становится не «модель мира», а «модель-как-процесс», способная удерживать и переопределять норму в ответ на возмущения. Именно такая архитектура наиболее реалистична для российских организаций, действующих в пространстве VUCA/BANI-факторов. На рисунке 1 представлена архитектура двойного контура моделирования VUCA-систем, которая демонстрирует интеграцию системно-деятельного и вычислительного

ПОДХОДОВ.

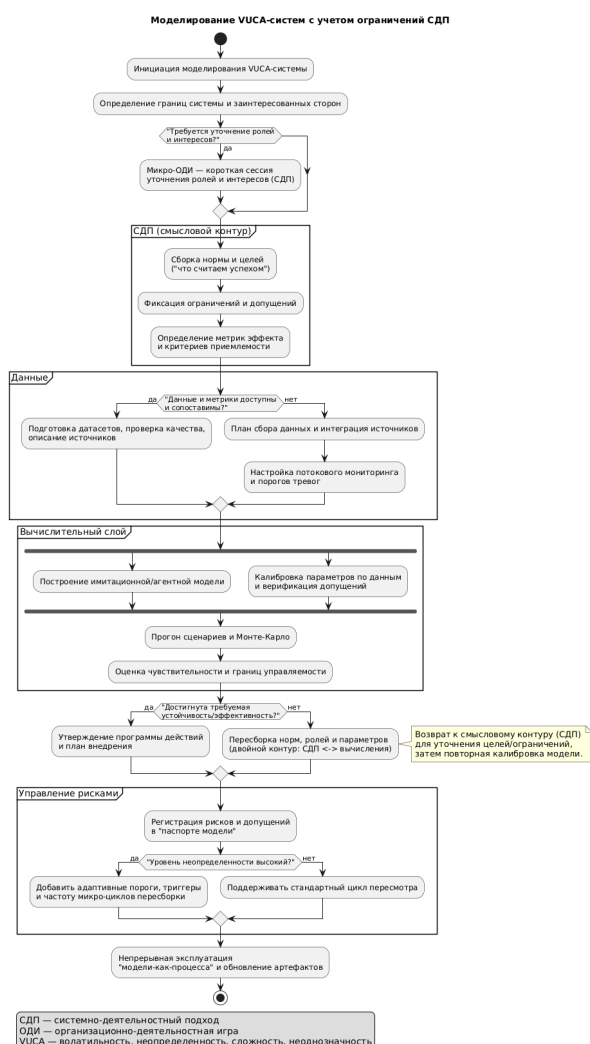


Рисунок 1 – Двойной контур моделирования VUCA-систем: сопряжение системно-деятельностного и вычислительного слоёв

Литература

1. Цифровая трансформация в промышленности. VUCA-мир // Secuteck.ru. 2022. URL: <https://www.secuteck.ru/articles/cifrovaya-transformaciya-v-promyshlennosti-vuca-mir> (дата обращения: 02.10.2025).
2. VUCA-мир, BANI-мир и «великое увольнение»: как жить и работать в эпоху нестабильности // Habr. 2023. URL: <https://habr.com/ru/articles/722680/> (дата обращения: 02.10.2025).
3. Леонтьев А.Н. Деятельность. Сознание. Личность. М.: Политиздат, 1975. 304 с. URL: <https://www.marxists.org/russkij/leontiev/1975/dyeatyelnost/deyatelnost-soznyanie-lichnost.pdf> (дата обращения: 02.10.2025).
4. Щедровицкий Г.П. Организационно-деятельностная игра как новая форма организации и метод развития коллективной мыследеятельности // Методы исследования, диагностики и развития международных коллективов. М., 1983. с. 48.
5. Комментарий психолога к трудам и дням Г.П. Щедровицкого // НИУ ВШЭ, Публикации. 2013. URL: <https://publications.hse.ru/view/90630142> (дата обращения: 02.10.2025).
6. Домашенко Г.А. Адаптация стратегий в условиях неопределённости и глобальных изменений // CyberLeninka. 2025. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/adaptatsiya-strategiy-v-usloviyah-neopredelennosti-i-globalnyh-izmeneniy> (дата обращения: 02.10.2025).

МАЛЫЕ ПРЕДПРИЯТИЯ КАК АКТОРЫ ОТКРЫТЫХ ИННОВАЦИОННЫХ ЭКОСИСТЕМ

В современном мире экономика знаний характеризуется переходом от закрытых, иерархических моделей инновационного процесса к открытым сетевым инновационным экосистемам (ОИЭ). В основе данной парадигмы, разработанной Г. Чесбро [1], лежит принцип комбинирования внутренних и внешних идей путем внедрения для ускорения инновационного процесса. В ОИЭ создание инноваций всегда результат сотрудничества. В процесс вовлечены самые разные участники, такие как крупный бизнес, малые и средние предприятия (МСП), университеты, инвесторы и конечные потребители. Особую роль в сети играют малые предприятия. Их особенностью являются мобильность, готовность к риску и способность быстро адаптироваться. Работая в связке с более крупными структурами, МСП вынуждены делиться своими наработками, что создает серьезную угрозу утечки интеллектуальной собственности. Потеря контроля над ключевыми активами может привести к подрыву их конкурентоспособности. Именно поэтому так важно найти способ, который позволил бы малым предприятиям активно участвовать в открытых инновациях, но при этом надежно защищал бы их права на результаты собственных разработок.

Открытая инновационная экосистема представляет собой динамичную и саморегулирующуюся сеть независимых экономических агентов, тесно связанных между собой общей целью создания новой ценности. Достигается это все за счет кооперации и совместного использования ресурсов и знаний [2]. В отличие от линейной модели, такая экосистема функционирует по нелинейным принципам, где ключевую роль в генерации идей играют обратные связи и случайные взаимодействия. Малые предприятия выступают в этой системе важнейшим активом, выполняя ряд критически важных функций. Обладая узкой специализацией и высокой концентрацией экспертизы, они часто становятся генераторами прорывных знаний и технологий. Кроме того, малый бизнес служит «испытанием», где с минимальными издержками тестируются рискованные бизнес-модели и новые рыночные ниши, что зачастую недоступно для крупных корпораций. Малые предприятия также эффективно связывают фундаментальную науку, представленную университетами, с областью прикладных разработок, выступая драйвером внедрения научных открытий. Их природная гибкость позволяет быстро адаптироваться к изменениям рыночной ситуации и технологическим трендами, тем самым повышая общую адаптивность всей экосистемы.

На рисунке 1 представлена обобщенная архитектура открытой инновационной экосистемы, наглядно иллюстрирующая положения малых предприятий в сложной системе многосторонних взаимодействий.

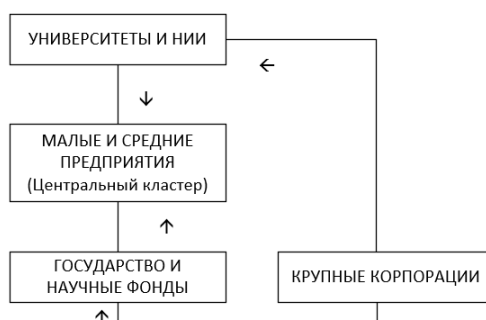


Рисунок 1 – Архитектура открытой инновационной экосистемы и место малых предприятий в системе взаимодействий

Анализ представленной схемы выделяет основные типы потоков, циркулирующих между малыми предприятиями и другими участниками экосистемы. Центральное место в системе занимают информационные потоки, связанные с обменом научно-техническими знаниями и критически важной рыночной информацией. Наряду с ними значимое положение занимают финансовые потоки, представленные инвестициями венчурных фондов и крупных корпораций, а также государственными грантами. Особую роль играют кадровые потоки, материализующиеся через создание совместных рабочих групп и обмен специалистами, а также материально-технические потоки, включающие поставку опытных образцов, прототипов и специализированного оборудования. Эффективность интеграции малого бизнеса в экосистему оказывается напрямую зависимой от его способности координировать эти разнородные потоки, что особенно актуально в условиях рисков утечки конфиденциальной информации, составляющей коммерческую тайну.

На рисунке 2 представлен вклад МСП в инновационный процесс модели «Ворота инноваций» [3]. Модель визуализирует траекторию развития инновации от стадии зарождения идеи до коммерческой реализации, детализируя при этом точки взаимодействия малых предприятий с другими акторами экосистемы и демонстрируя специфику циркулирующих между ними потоков.

Модель охватывает последовательность ключевых стадий инновационного процесса. Его начальная фаза связана с фундаментальными и поисковыми исследованиями, где основными акторами традиционно выступают университеты и академические институты. При этом малые инновационные предприятия, в особенности созданные при вузах, вносят свой вклад через прикладную интерпретацию полученных фундаментальных результатов. На следующем этапе, стадии прикладных исследований и опытно-конструкторских работ (НИОКР) [4], роль малых предприятий становится ключевой. Именно они зачастую берут на себя основные риски, связанные с разработкой технологии, созданием работоспособного прототипа и проведением первоначальных испытаний. Финансовая поддержка на этой стадии может осуществляться из различных источников, включая собственные средства предприятия, инвестиции и фондов, а также целевое финансирование со стороны крупных корпораций.

Дальнейшее развитие инновации происходит на стадии валидации техно-

логии и вывода продукта на рынок. После создания прототипа возникает необходимость доказать его жизнеспособность в реальных условиях, для чего крупные компании нередко предоставляют МСП доступ к своей производственной базе и каналам сбыта, выступая в роли первого клиента в рамках стратегии «пилотного внедрения». Завершающая стадия модели связана с организацией массового производства и масштабированием технологии [5]. Здесь к процессу активно подключаются крупные промышленные предприятия, обладающие необходимыми ресурсами для серийного выпуска. На этом этапе возможны различные сценарии развития для малого предприятия: оно может продолжить самостоятельное развитие технологии, войти в стратегический альянс с крупным игроком или стать объектом поглощения.

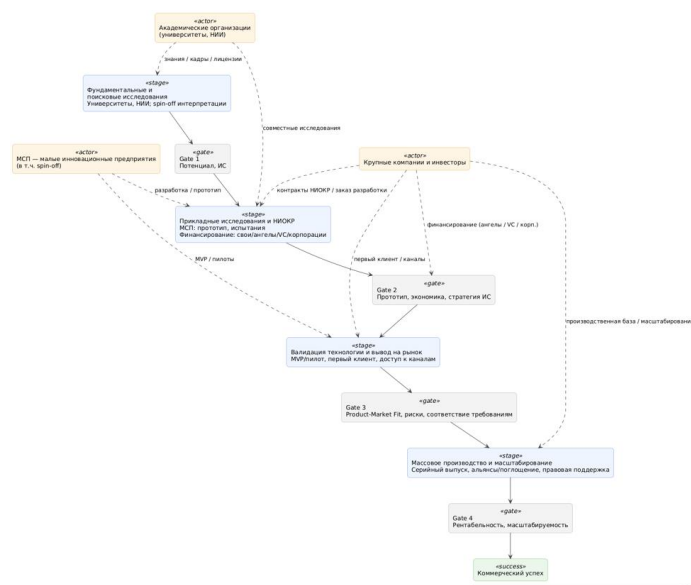


Рисунок 2 – Модель «Ворота инноваций»: трансформация идей в коммерческие продукты при участии малых предприятий

На каждой стадии функционируют «ворота», т.е. контрольные точки, где происходит оценка жизнеспособности проекта и принятие решения о продолжении финансирования и работы. Малые предприятия, проходя эти «ворота», должны демонстрировать не только технологическую состоятельность, но и надежную систему защиты своей интеллектуальной собственности.

Ключевой парадокс вовлеченности МСП в открытые инновационные экосистемы состоит в их вынужденной двойственной позиции. С одной стороны, генерация новой ценности требует от них активного обмена знаниями и компетенциями. С другой стороны, этот самый обмен ставит под угрозу интеллектуальную собственность, которая может быть незаконно присвоена более мощными участниками экосистемы, такими как крупные корпорации. Помимо этого, значительную сложность представляет юридическое оформление соавторства и размывание прав на результаты совместной деятельности. Операционные и финансовые риски, связанные с невыполнением партнерами обязательств, также ложатся непропорционально тяжелым бременем именно на малый бизнес, угрожая срывом проектов и прямыми убытками.

В качестве решения данной проблемы следует использовать внедрение современных цифровых инструментов, в частности блокчейн-архитектуры. Ее потенциал видится в создании децентрализованных, прозрачных и неизменяемых реестров для учета прав на интеллектуальную собственность и фиксации всех транзакций в рамках коллаборации. Конкретный механизм предполагает, во-первых, регистрацию любого вклада с помощью хэширования и временной метки, что формирует неоспоримое доказательство первенства. Во-вторых, управление взаимодействием может быть направлено смарт-контрактам, в которые кодируются все условия сотрудничества, что позволяет автоматизировать выплаты и передачу прав по достижении заранее определенных этапов. Это не только снижает транзакционные издержки на юридическое сопровождение, но и повышает общий уровень доверия за счет прозрачности операций для всех участников.

Таким образом, исследование подчеркивает неотъемлемую роль МСП как катализатора прорывных инноваций в ОИЭ, чему способствуют их гибкость и склонность к риску. Однако для раскрытия этого потенциала необходимы адаптивные институциональные и технологические условия, обеспечивающие безопасность и справедливость кооперации. Предложенная блокчейн-модель представляет собой перспективный подход к минимизации ключевых рисков и созданию благоприятной среды для укрепления конкурентоспособности национальной инновационной системы. В дальнейшем актуальным видится развитие методик оценки эффективности взаимодействия МСП в ОИЭ и проектирование отраслевых моделей блокчейн-платформ.

Литература

1. Чесбро Г. Открытые инновации: создание прибыльных технологий. Пер. с англ. – М.: Поколение, 2022.
2. Авдулов П.В., Кулькин А.М. Инновационные экосистемы в мировой экономике: теория и практика. – М.: ИМЭМО РАН, 2021.
3. Гумеров Э.А., Алексеева Т.В. Блокчейн-архитектуры системы IoT предприятия. Прикладная информатика. 16 № 5 (95). 2021. С. 16-32.
4. Батьковский М.А., Колесников Ю.С. Малый инновационный бизнес в национальной экономике: механизмы интеграции в глобальные цепочки создания стоимости. Инновации. 2020. № 5 (259). С. 54–61.
5. Adner R. Match Your Innovation Strategy to Your Innovation Ecosystem. Harvard Business Review. 2006. Vol. 84. No. 4. P. 98–107.

*А.А. Тютюнник к.э.н., доц.; Е.А. Чернова, студ.
(Филиал ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» в г. Смоленске)*

ОБРАТНАЯ СВЯЗЬ КАК СИСТЕМООБРАЗУЮЩИЙ ФАКТОР В МЕТОДИКЕ ПОСТЕПЕННОЙ ФОРМАЛИЗАЦИИ ЗАДАЧИ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ

В современном мире системы управления характеризуются высокой сложностью, нелинейностью, а также высокую динамичность, которая включает в себя существенную структурную и функциональную нелинейность, а также высокую динамичность протекающих в них процессов. Традиционный подход к их моделированию, состоящий из возможности однократной и полной формализации, демонстрирует ограниченную эффективность. Все это обосновано наличием скрытых факторов и неполнотой исходных данных на начальных

стадиях исследования, что формирует области неопределенности в поведении системы. При такой ситуации задача разработки и внедрения методик, которые обеспечивают поэтапное уточнение и детализацию моделируемого объекта, играет особую актуальность.

В рамках подобных повторяющихся методик обратная связь преобразуется из элемента, функционирующего в контуре управления системы, в основной системообразующий фактор, определяющий сам процесс построения её модели. Она выступает ключевым механизмом, который обеспечивает целостность, управляемость и сходимости процесса познания системы. Целью исследования является системный анализ роли обратной связи в контексте методики постепенной формализации задачи моделирования систем управления и оценка её влияния на результаты адекватности и практической применимости разрабатываемой системы.

Методика постепенной формализации задачи предполагает разбиение процесса моделирования на ряд последовательных итераций [1]. Каждая итерация направлена на решение конкретной, частично формализованной подзадачи. Переход между этапами осуществляется на основе анализа результатов предыдущего шага, что и составляет суть используемой обратной связи. Основные этапы методики и циркуляции обратной связи в ней представлены на рисунке 1.

Представленная архитектура показывает трехэтапный процесс формализации задачи моделирования систем управления, где каждый из этапов образует управление с собственной обратной связью. Поток формализации реализуется через последовательное преобразование содержательной постановки задачи в концептуальную, а затем в формальную модель. Параллельно со всем функционируют контуры верификации и валидации, которые обеспечивают корректировку соответствующих этапов на основе проверки практической деятельности. Особенностью архитектуры является, что каждый контур обратной связи может инициировать уточняющие итерации своего уровня детализации, что непосредственно обеспечивает необходимую глубину проработки при сохранении целостности методологического подхода.

Системообразующая обратная связь высшего порядка осуществляет коррекцию методологии формализации на основе интегральной оценки результатов всех этапов. Данный механизм обеспечивает адаптацию процесса моделирования к выявленным особенностям системы и уточняемым требованиям.

Системообразующая функция обратной связи реализуется через её специфическое проявление на каждом этапе процесса формализации, представленного на рисунке 1. На начальном этапе происходит формулировка целевых установок моделирования и идентификация базовых контуров системы управления. Обратная связь формируется посредством экспертных оценок и взаимодействия с лицом, принимающим решение [2]. Ключевая функция обратной связи на данной стадии заключается в верификации полноты и непротиворечивости исходных предпосылок. Например, отсутствие корректирующего воздействия обратной связи на данной стадии приводит к генерации семантически неадекватной

МОДЕЛИ.

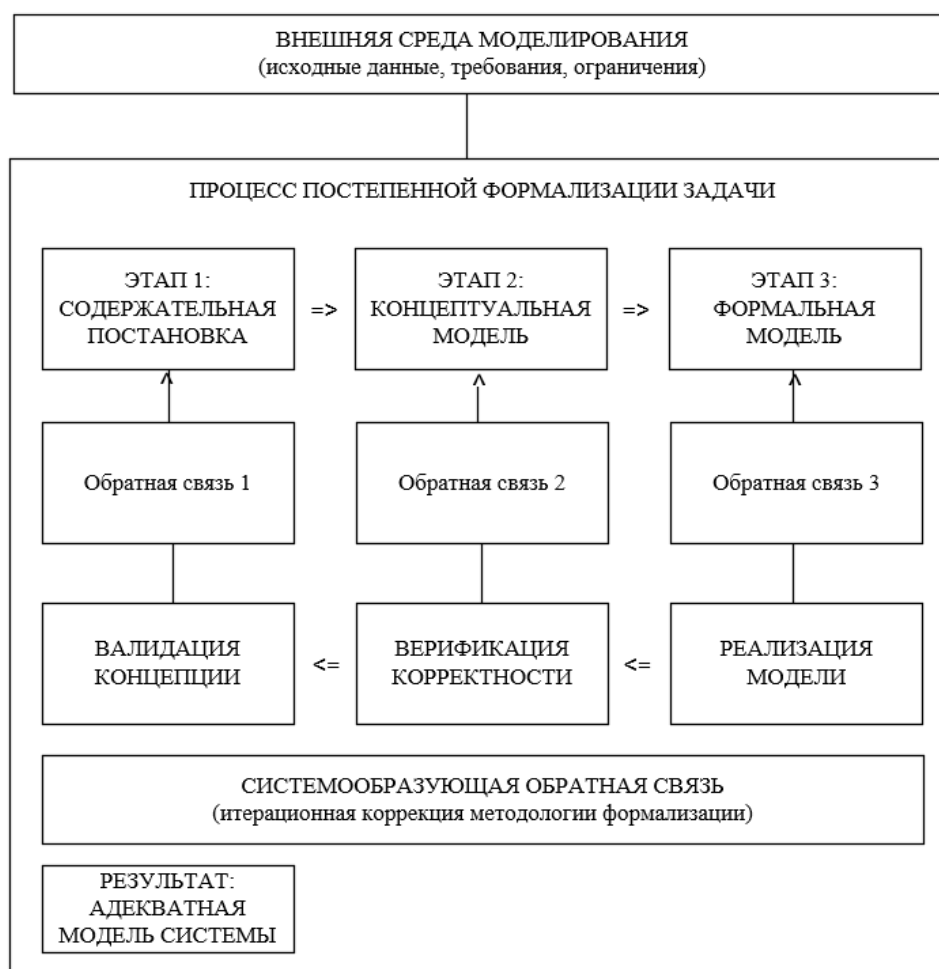


Рисунок 1 – Архитектура процесса постепенной формализации с системообразующими обратными связями

Этап разработки концептуальной модели характеризуется идентификацией системных элементов, установлением структурных связей и формулировкой гипотез о функциональных особенностях объекта. Обратная связь проявляется через процедуры валидации концептуального представления относительно сформулированных целей моделирования. Обнаружение скрытых факторов, не учтенных в первоначальной концепции (например, внешние возмущающие воздействия), активирует механизм итерационного уточнения модели перед переходом к формализации.

На стадии формализации и построения математической модели осуществляется выбор математического аппарата (системы дифференциальных уравнений, теория графов, агентное моделирование) и формальное описание системы. Обратная связь приобретает технический характер, реализуясь через: верификацию изоморфизма между концептуальными связями и их математическими представлениями; оценку корректности и разрешимости полученных уравнений; проверку соответствия формальной модели исходным данным. При выявлении чрезмерной сложности модели обратная связь инициирует процедуру парамет-

рической агрегации или структурной редукции при сохранении системообразующих свойств.

Ключевой этап, где обратная связь выполняет интегративную функцию. Дифференциация осуществляется по двум направлениям [3]. Во-первых, верификация (проверка технической корректности) обеспечивает соответствие функционирования модели заявленным спецификациям через тестовые процедуры и контрольные примеры. Во-вторых, валидация (проверка содержательной адекватности) устанавливает степень соответствия поведения модели свойствам реального объекта через сравнительный анализ с эталонными данными.

Расхождения, выявленные в процессе валидации, служат основанием для рекурсивного возврата на предыдущие этапы формализации. Циклический процесс «моделирование → анализ результатов → корректировка на основе обратной связи» продолжается до достижения статистически значимого уровня адекватности модели. Таким образом, обратная связь на каждом этапе выполняет не только корректирующую, но и структурообразующую функцию, обеспечивая согласованность переходов между различными уровнями абстракции в процессе моделирования.

В качестве демонстрации эффективности предлагаемого подхода рассмотрим фрагмент процесса моделирования системы управления нагрузкой веб-сервера.

Первая итерация инициируется постановкой задачи оценки среднего времени отклика сервера. На этапе формализации применяется базовая модель типа М/М/1, предполагающая пуассоновский характер входящего потока запросов и экспоненциальное распределение времени обслуживания. Проведенная валидация на исторических данных выявляет статистически значимое расхождение между модельными и реальными показателями в условиях пиковых нагрузок, что свидетельствует о недостаточности исходных предпосылок. Вторая итерация активируется по каналу обратной связи и предполагает структурное усложнение модели до формата М/М/п с введением множественных каналов обработки. Результаты валидации демонстрируют улучшение соответствия в стандартных режимах работы, однако сохраняется систематическая погрешность, обусловленная неучтенными поведенческими факторами - эффектом терпимости пользователей при возрастании времени ожидания. Третья итерация интегрирует в модель механизм обратной связи по длине очереди, реализующий стратегию ограничения запросов при достижении критического порога. Данная модификация, являющаяся прямым следствием анализа предыдущих итераций, позволяет адекватно воспроизводить нелинейные эффекты системы управления нагрузкой [4].

Представленный кейс иллюстрирует способность механизма обратной связи направлять процесс формализации по траектории последовательного усложнения модели, обеспечивая поэтапное включение релевантных системных факторов.

Проведенное исследование позволяет констатировать, что обратная связь выполняет не вспомогательную, а детерминирующую роль в методике посте-

пенной формализации задач моделирования. Будучи интегрированной в архитектуру процесса, она обеспечивает синхронизацию и содержательную связность последовательных этапов формализации, формирование замкнутого контура управления процессом познания системы и адаптивную коррекцию уровня абстракции модели на основе эмпирических данных

Эффективность предлагаемого подхода подтверждается повышением адекватности и практической релевантности создаваемых моделей, минимизацией рисков генерации семантически неполноценных решений, а также инкрементальным выявлением латентных свойств и структурных взаимосвязей сложных систем.

Таким образом, системная интеграция каналов обратной связи на всех уровнях процесса моделирования представляет собой необходимый элемент методологии современного системного анализа, обеспечивающий конвергенцию к адекватному представлению моделируемого объекта. Дальнейшие исследования целесообразно направить на формализацию критериев оценки эффективности обратных связей для различных классов моделей.

Литература

- 1.Советов Б.Я., Яковлев С.А. Моделирование систем: Учебник для вузов. - М.: Высшая школа, 2021.
- 2.Волкова В.Н., Денисов А.А. Теория систем и системный анализ: Учебник для вузов. - М.: Юрайт,
- 3.Тютюнник А.А., Харламов П.С. Финансово-информационные потоки в территориальных научно-промышленных кластерах: эффект снижения финансового риска при обеспечении безопасности передачи данных // Актуальные вопросы современной науки. – 2023. – № 5. – С. 112-125.
- 4.Афанасьев В.Г. Общество: системность, познание и управление. – М.: Политиздат, 2022.

*А.В. Устиненкова, маг, А.Ю. Пучков, к.т.н., доцент
(филиал ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» в г. Смоленске)*

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СЕГМЕНТАЦИЯ КЛИЕНТОВ МЕТОДАМИ RFM-АНАЛИЗА

Управление клиентской базой является главным процессом на рынках B2C и B2B, поскольку от эффективности данной деятельности напрямую зависит устойчивое развитие организации. Особую значимость процесс приобрел на фоне цифровой трансформации рынка, когда традиционные подходы к удержанию клиентов начали уступать место решениям на основе анализа больших данных и поведенческих паттернов.

В условиях роста конкуренции и цифровизации организации из третичного сектора экономики, предоставляющие услуги конечным потребителям (B2C) и бизнесу (B2B), столкнулись с необходимостью пересмотра подходов к сегментации клиентской базы. Классические методы сегментирования рынка по потребителям (географические, социально-экономические, психографические, ситуационные, демографические и поведенческие) оказываются недостаточно эффективными для прогнозирования потребительского поведения. Дополнительно в B2B-сегменте необходимо учитывать многоуровневую структуру принятия решений и комплексные критерии выбора поставщика услуг.

Для решения проблемы предлагается разработка программного решения для автоматизированной сегментации клиентов на основе комбинации RFM-анализа (Recency Frequency Monetary — давность, частота, деньги) и алгоритмов машинного обучения с последующей интерпретацией полученных кластеров. Данный подход позволяет преодолеть ограничения классических методов сегментирования за счет использования объективных количественных показателей клиентского поведения и адаптивных алгоритмов классификации.

В основе предлагаемого решения лежит классический метод сегментации клиентской базы – RFM-анализ, включающий в себя три ключевых показателя клиентского поведения:

1. Recency (давность) – измеряет время, прошедшее с момента последней транзакции клиента (рассчитывается как разница в днях между текущей датой и датой последнего взаимодействия). Чем меньше значение показателя, тем выше вероятность повторного обращения клиента, что делает этот показатель наиболее значимым параметром текущей вовлеченности.

2. Frequency (частота) – отражает интенсивность взаимодействий клиента с организацией за фиксированный период (рассчитывается как общее количество совершенных транзакций). Высокое значение показателя отражают стабильность отношений и степени лояльности со стороны клиента.

3. Monetary (деньги) – какую сумму тратит за определённый период (расчет осуществляется путем суммирования всех произведенных платежей) [1], позволяет оценить экономическую значимость каждого клиента для бизнеса.

К преимуществам RFM-анализ можно отнести простоту интерпретации результатов, минимальные требования к объему исходных данных, а также возможность интеграции с различными аналитическими платформами. Однако классический RFM-анализ субъективен в определении границ сегментов и статичности модели, не адаптирующейся к изменениям в клиентском поведении.

Среди подходов к адаптации моделей к изменяющейся внешней среде сейчас в разных предметных областях наиболее успешно применяется концепция машинного обучения, что позволяет автоматизировать подстройку моделей под меняющиеся условия [2, 3].

Для преодоления выявленных ограничений предлагается создать гибридную модель, которая объединит RFM-анализ с алгоритмами машинного обучения, что обеспечит объективность сегментирования клиентов за счет использования адаптивных алгоритмов кластеризации и при этом сохранит интерпретируемость результатов, характерную для RFM-анализа.

Логика работы системы представляет собой последовательность из шести ключевых этапов, представленных на рисунке 1.

На первом этапе происходит сбор, предобработка и валидация входных данных: проверка на положительность числовых значений и корректность дат, что обеспечивает высокое качество исходных данных для последующего анализа. Для каждой транзакции фиксируется набор обязательных атрибутов, приведенный в таблице 1.

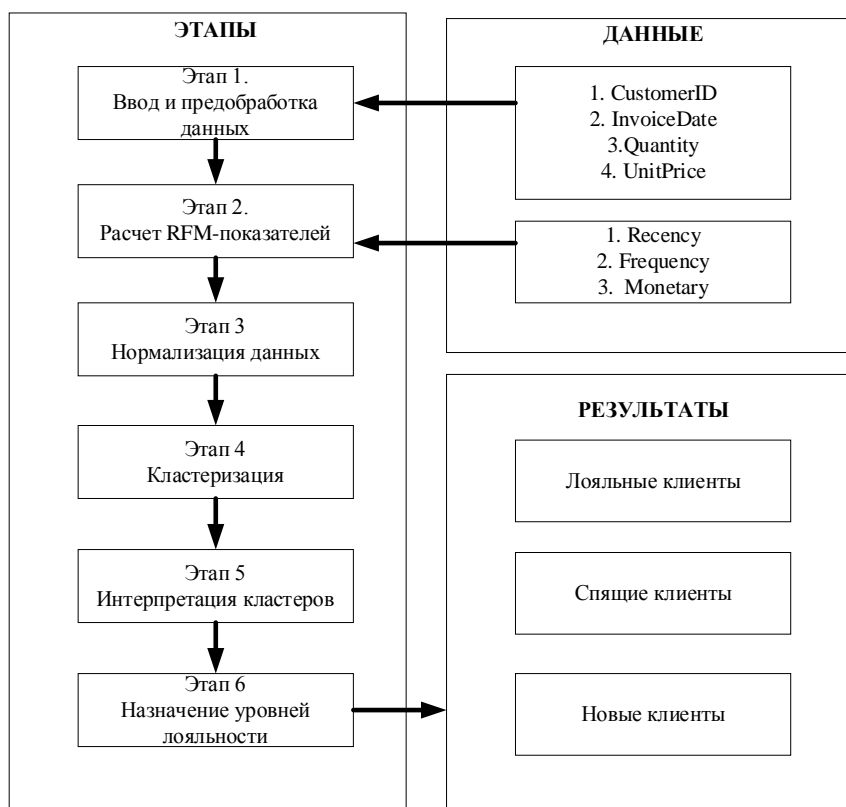


Рисунок 1 – Обобщенная блок-схема алгоритма работы гибридной модели RFM-анализа

На втором этапе производится расчет ключевых метрик. После чего данные преобразуются таким образом, что каждый признак имеет среднее значение, равное нулю, и стандартное отклонение, равное единице. Этот шаг является обязательным для алгоритмов машинного обучения, основанных на расчете расстояний (таких как к-средних), так как предотвращает доминирование признаков с большей дисперсией и размерностью (например, деньгами) над остальными.

Таблица 1 – Атрибуты данных

Название атрибута	Описание
CustomerID	Уникальный идентификатор клиента
InvoiceDate	Дата совершения транзакции
Quantity	Количество приобретенных единиц услуги/товара
UnitPrice	Цена за единицу

Четвертый этап – кластеризация клиентов. Для объективного разделения клиентов на сегменты применяется алгоритм к-средних. В системе реализован метод «локтя», который автоматически анализирует динамику суммы квадратов внутрикластерных расстояний при увеличении числа кластеров. Алгоритм анализирует вторые производные уменьшения суммы квадратов внутрикластерных расстояний и выбирает оптимальное k в точке «излома» графика, где

последующее добавление кластеров перестает давать существенное снижение метрики, что свидетельствует о нецелесообразности дальнейшего усложнения модели. После определения оптимального алгоритма к-средних обучается на нормализованных данных, и каждому клиенту присваивается метка кластера.

Пятый этап – интерпретация и визуализация результатов. После присвоения клиентам меток кластеров система проводит автоматический анализ характеристик каждого сегмента. Для этого вычисляются средние значения R, F, M для каждого кластера. Ключевым отличием предлагаемого подхода является использование формализованной бизнес-логики для автоматической классификации кластеров. В системе реализованы четкие правила интерпретации, основанные на экспертных знаниях и отраслевых практиках (таблица 2).

Шестой, дополнительный этап – назначение уровней лояльности. Для разделения клиентов внутри выявленных сегментов система рассчитывает интегральный RFM-балл для каждого клиента. Процесс заключается в присвоении клиенту ранга (от 1 до 3) по каждому из показателей R, F, M на основе их положения относительно квантилей (0.25, 0.5, 0.75). Далее баллы по всем трем метрикам суммируются, и на основе итогового значения клиентам присваиваются уровни лояльности: 1-3 балла – «Bronze»; 4-5 баллов – «Silver»; 6-7 баллов – «Gold»; 8-9 баллов – «Platinum». Это позволяет проводить двухуровневый анализ, выявляя как крупные стратегические сегменты, так и тактические подгруппы для точечного маркетинга.

Таблица 2 – Правила интерпретации

Тип кластера	Критерии классификации	Бизнес-интерпретация	Рекомендуемые мероприятия
Лояльные клиенты	recency < 30 and frequency > 3 and monetary > 100	Клиенты с недавними покупками, высокой активностью и значительной денежной ценностью	Программы премиальной лояльности, эксклюзивные предложения, персональный менеджмент
Спящие клиенты	recency > 60	Клиенты с высокой давностью последней покупки, требующие реактивации	Специальные кампании по восстановлению предложения с ограниченным сроком
Новые клиенты	recency < 30 and frequency < 2	Клиенты с недавними, но единичными покупками, обладающие потенциалом роста	Welcome-программы, образовательный контент, стимулирование повторных покупок
Смешанные	Все остальные случаи	Клиенты, не попавшие в четко в критерии	Дополнительный анализ, тестовые маркетинговые кампании

Для демонстрации функционала работы и тестирования системы был сформирован набор транзакционных данных, содержащий информацию о покупках четырех клиентов за период с июля 2025 года по сентябрь 2025 года. Также у пользователя есть возможность вручную вводить необходимые значения транзакций и проводить их дальнейших анализ, для этого ему необходимо

заполнить по каждой транзакции: ID клиента; дата заказа; количество; цена за единицу.

На рисунке 4а представлен результат ввода тестовых данных, преобразования данных и разделение клиентов на кластеры. Далее система на основании принятых правил (таблица 2) интерпретирует кластеры (рисунок 4б):

1. Кластер 0 «Спящие клиенты». Клиенты данной группы характеризуются большой разницей в днях между текущей датой и датой последнего взаимодействия (91 день) при средней частоте покупок. Это указывает на то, что они ранее были активны, но в настоящее время утратили интерес к услугам/товарам организации. Для их возврата рекомендуется использовать кампании повторного вовлечения – например, напоминания, специальные акции или персонализированные предложения.

2. Кластер 1 «Лояльные клиенты». Это наиболее ценная группа с высокой денежной ценностью (318 руб.) и минимальной недавностью (0 дней), что свидетельствует об их активной вовлеченности. Для поддержания и усиления лояльности таких клиентов эффективны программы лояльности, эксклюзивные предложения и премиальный сервис.

3. Кластер 2 «Смешанная группа». Клиенты этого кластера демонстрируют средние показатели по недавности и частоте, что может указывать на их переходный статус или разнородность состава. Для точной настройки стратегии взаимодействия с ними необходим дополнительный анализ и проведение тестовых кампаний.

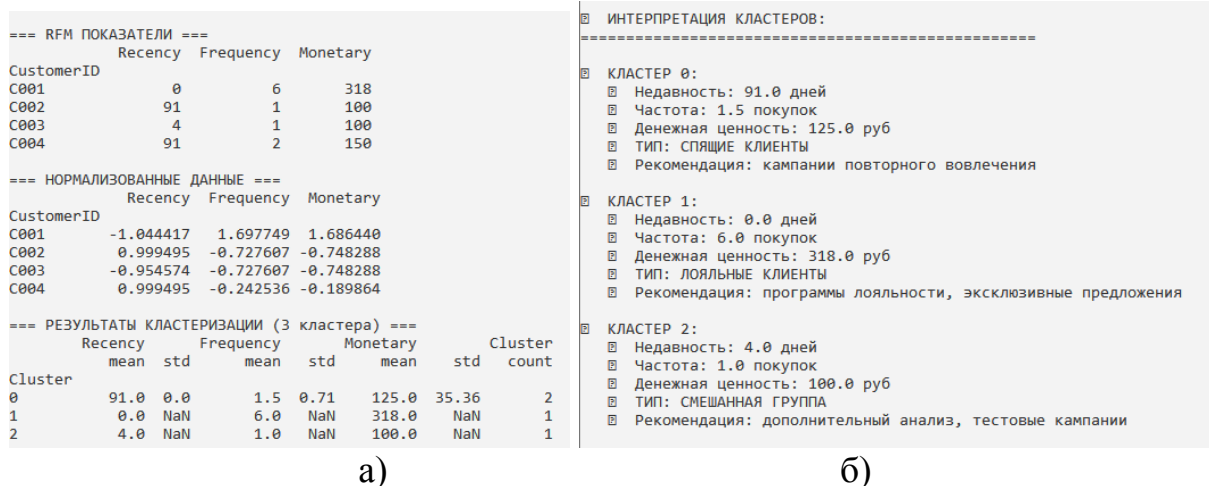


Рисунок 4 – Вывод программы этапов 1-5

После проведения всех расчетов система выводит характеристики найденных кластеров, как показано на рисунке 5.

ПРОСТАЯ ВИЗУАЛИЗАЦИЯ КЛАСТЕРОВ						СРАВНЕНИЕ КЛАСТЕРОВ:	
СВОДКА ПО КЛАСТЕРАМ:						Recency:	
Кластер	Клиентов	Recency	Frequency	Monetary	Тип	Кластер 1:	0.0 *****
0	2.0	91.0	1.5	125.0	Спящие	Кластер 2:	4.0 *****
1	1.0	0.0	6.0	318.0	Лояльные	Кластер 0:	91.0 *
2	1.0	4.0	1.0	100.0	Новые	Frequency:	
РАСПРЕДЕЛЕНИЕ КЛИЕНТОВ ПО КЛАСТЕРАМ:						Кластер 1: 6.0	
Кластер 0: 2 клиентов (50.0%)						Кластер 0: 1.5	
Кластер 1: 1 клиент (25.0%)						Кластер 2: 1.0	
Кластер 2: 1 клиент (25.0%)						Monetary:	
=== УРОВНИ ЛОЯЛЬНОСТИ ===						Кластер 1: 318.0 *****	
Silver: 2 клиентов						Кластер 0: 125.0 *****	
Platinum: 1 клиент						Кластер 2: 100.0 *****	
Bronze: 1 клиент							

Рисунок 5 – Визуализация данных

Разработанное в ходе исследования программное решение, основанное на интеграции RFM-анализа и машинного обучения, успешно решает поставленную задачу автоматизированной сегментации клиентов. Модель объективно выделяет целевые группы, используя алгоритм k-средних для кластеризации, и обеспечивает содержательную бизнес-интерпретацию результатов за счет формализованных правил классификации, что подтверждается тестированием на реальных данных и позволяет эффективно категоризировать клиентов для последующего персонализированного взаимодействия.

Литература

1. Гусаров А. Как провести анализ клиентской базы по методике RFM? [Электронный ресурс] //GUSAROV. URL: <https://gusarov-group.by/kak-provesti-analiz-klientskoj-bazy-po-metodike-rfm/> (дата обращения: 14.10.2025)
2. Пучков А.Ю., Соколов А.М. Прогноз оттока клиентов организации на основе методов машинного обучения // ЭНЕРГЕТИКА, ИНФОРМАТИКА, ИННОВАЦИИ – 2018 (электроэнергетика, электротехника и теплоэнергетика, математическое моделирование и информационные технологии в производстве). Сб. трудов VIII-ой Межд. науч.-техн. конф. В 3 т. Т 1. – Смоленск «Универсум», 2018. – 321 с. С. 298 – 302.
3. Chen, Qa., Zhao, X., Zhang, X. et al. Driving forces of digital transformation in chinese enterprises based on machine learning. Sci Rep 14, 6177 (2024). <https://doi.org/10.1038/s41598-024-56448-w>

*Е.Л. Царегородцев, к. т. н., доцент.; Д.С. Буренков, магистрант
(Филиал ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» в г. Смоленске)*

МОДЕЛЬ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ РЕЖИМОВ СЖИЖЕНИЯ И КОМПРИМИРОВАНИЯ СЖИЖЕННОГО ПРИРОДНОГО ГАЗА НА РОССИЙСКИХ ГАЗОРАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ И АВТОМОБИЛЬНЫХ ГАЗОНАПОЛНИТЕЛЬНЫХ КОМПРЕССОРНЫХ СТАНЦИЯХ

Актуальность использования сжиженного природного газа (СПГ) и компримированного природного газа (КПГ) обусловлена их высокой экологичностью, экономической выгодой и значительным потенциалом снижения углеродного следа в транспортном секторе. Локальное сжижение газа на газораспределительных станциях (ГРС) и автомобильных газонаполнительных компрессорных станциях (АГНКС) обеспечивает гибкость и оперативность снабжения, позволяет эффективно развивать инфраструктуру альтернативных топлив, снижая зависимость от централизованных крупных производств и минимизируя логистические затраты [1, 3472]. Это способствует расширению при-

менения СПГ и КПП в региональном транспорте и промышленности, поддерживая устойчивое энергетическое развитие.

Сжиженный природный газ (СПГ) приобретает все большее значение как экологически чистое и перспективное моторное топливо. На газораспределительных станциях высокого давления процесс сжижения природного газа может осуществляться с использованием открытого цикла Клода, при котором газ сжимается, охлаждается в теплообменниках и расширяется в турбодетандере с дросселированием и частичным конденсированием [2, 3468]. В настоящее время подробно рассмотрены два режима сжижения - при давлении выше и ниже критического, что влияет на термодинамический характер дросселирования и эффективность процесса.

В то же время недостаточно акцентировано внимание на том, что критически важным фактором в этих процессах является поддержание оптимального температурного режима и предотвращение формирования газовых гидратов, напрямую влияющих на выход сжиженного природного газа и его экономическую эффективность [3, 8].

Решение обозначенной проблемы достигается посредством применения математических моделей и алгоритмов, которые обеспечивают проектирование оптимальных режимов функционирования технологического цикла с целью максимизации выхода сжиженного природного газа.

Дополнительно подчеркнем необходимость проведения комплексной очистки природного газа от высококипящих фракций и строгого соблюдения нормативных требований к качеству СПГ, используемого в качестве моторного топлива.

Рассмотрим некоторые особенности технологических схем работы современных газораспределительных станций и автомобильных газонаполнительных компрессорных станций с целью формирования представления об эффективности их режимов работы.

Современные газораспределительные станции ГРС представляют собой комплекс технического оборудования с основными функциональными узлами: переключение потоков газа, очистка от твердых и жидких примесей, подогрев, редуцирование (понижение) высокого давления, измерение расхода и одоризация газа.

Технологические схемы могут включать одно-, двух- или трехступенчатое понижение давления в зависимости от конкретных требований и параметров подачи. На станции устанавливаются автоматизированные системы управления и контроля, элементы безопасности и связи с диспетчерскими службами. Очистка газа обычно организована с применением пылеуловителей, сепараторов влаги и адсорберов, что снижает риск образования гидратов и повреждения оборудования.

Газ после очистки и снижения давления поступает к потребителю с требуемыми параметрами давления и качеством. Автономные блоки в блочно-комплектном исполнении позволяют быстро монтировать и запускать станции с минимальным участием персонала.

Автомобильные газонаполнительные компрессорные станции (АГНКС) предназначены для компримирования природного газа до высоких рабочих давлений (обычно 200–250 бар) с целью его последующей дозаправки автотранспорта. Технологическая схема включает многоступенчатые компрессоры с промежуточным охлаждением, системы очистки от пыли, влаги и легких углеводородных примесей, а также герметизацию оборудования для минимизации утечек. Очистка также важна для обеспечения качества газа и безопасности использования в баллонах автомобилей. Установки оснащаются системами автоматической диагностики, контролем параметров и экологической безопасности.

Источниками выбросов служат компрессоры, газозаправочные колонки и сливные устройства, что требует регулярного технического обслуживания и применения современных экологических решений для минимизации выбросов в атмосферу.

Таким образом, технологические схемы ГРС и АГНКС имеют свои особенности в зависимости от назначения: ГРС ориентированы на снижение давления и подготовку газа к распределению, а АГНКС - на высокое давление и очистку для автозаправок при сохранении экологической безопасности и высокого качества топлива.

Ниже представлен анализ достоинств и недостатков режимов работы газораспределительных станций (ГРС) и автомобильных газонаполнительных компрессорных станций (АГНКС) на основе анализа их технологических и экономических характеристик (сравнительная таблица 1):

Данные, представленные в таблице 1, позволяют наглядно увидеть сравнительные преимущества и ограничения обеих типов установок, что важно для выбора оптимального варианта в зависимости от целей эксплуатации и технических условий.

Таблица 2 – Достоинства и недостатки режимов работы газораспределительных станций (ГРС) и автомобильных газонаполнительных компрессорных станций (АГНКС)

Показатель	Газораспределительные станции (ГРС)	Автомобильные газонаполнительные компрессорные станции (АГНКС)
Основная функция	Снижение давления, очистка и распределение природного газа	Компримирование и заправка автомобилей компримированным газом
Технологическая схема	Многоступенчатое снижение давления, очистка, одоризация	Многоступенчатое компримирование с охлаждением и очисткой
Особенности компрессирования	Обычно редуцирование давления с возможностью охлаждения	Высокое давление компрессирования (200–250 бар) с промежуточным охлаждением
Очистка газа	Механическая фильтрация, осушка, удаление углеводородов	Фильтрация, сепарация влаги, удаление примесей для высокого качества КПП
Экологические аспекты	Минимизация утечек, системы сброса и контроля выбросов	Герметизация оборудования, контроль утечек, регулярное ТО
Основные источники	Продувочные клапаны, системы	Компрессоры, газозаправочные

ки выбросов	контроля и аварийные сбросы	колонки, сливные устройства
Площадь и энергозатраты	Требуют значительных площадей и энергии	Компактные, но энергозатратные компрессоры
Экономические аспекты	Высокие капитальные вложения, эксплуатационные расходы	Относительно низкие вложения, но затратные на обслуживание
Преимущества	Надежность и стабильность распределения, техническая зрелость	Мобильность, экологичность, высокая адаптивность для автотранспорта
Недостатки	Комплексность оборудования, большие площади и капиталы	Ограниченная производительность, необходимость частого ТО

Таким образом, определение эффективности режимов сжижения и компримирования природного газа и анализ влияния параметров давления, температуры и очистки на качество продуктов в газораспределительных станциях (ГРС) и автомобильных газонаполнительных компрессорных станциях (АГНКС) имеют ключевое значение по следующим причинам:

1. Повышение выхода продукции и снижение энергетических затрат. Оптимизация давления и температуры в технологических циклах напрямую влияет на коэффициент сжижения газа и эффективность компрессоров, что уменьшает удельное энергопотребление и повышает экономическую эффективность процессов.

2. Обеспечение высокого качества сжиженного и компримированного газа. Контроль параметров очистки влияет на предотвращение образования гидратов, содержание влаги и примесей, что критично для надежности и безопасности последующего использования СПГ и КПГ в качестве моторного топлива.

3. Снижение экологической нагрузки. Оптимальные режимы работы уменьшают выбросы вредных веществ, предотвращают утечки газа и способствуют соблюдению природоохранных нормативов.

4. Техническая надежность и безопасность установки. Правильно настроенные режимы снижают риск аварий и повреждений оборудования, поддерживая стабильность и долговечность технологических комплексов.

5. Влияние на выбор оборудования и проектную документацию. Полученные данные помогают выбирать компрессоры, холодильное оборудование и системы очистки с учетом реальных условий эксплуатации для максимальной производительности и устойчивости.

Соответственно, точное определение эффективности и влияния параметров на процессы сжижения и компримирования - фундаментальный этап для повышения энергетической, экологической и экономической эффективности ГРС и АГНКС, обеспечивающий конкурентоспособность и устойчивое развитие газотранспортной инфраструктуры.

В данной работе авторами предлагается новая модель оценки эффективности режимов сжижения и компримирования сжиженного природного газа (СПГ) применительно к российским газораспределительным станциям (ГРС) и автомобильным газонаполнительным компрессорным станциям (АГНКС), осно-

ванная на комплексном термодинамическом, энергетическом и экологическом анализе.

Основными компонентами модели являются:

1. Термодинамическая часть:

- использование уравнения состояния реального газа с учетом коэффициента сверхсжимаемости (z-factor) для метана, как главного компонента природного газа;

- моделирование циклов сжижения (например, с использованием открытого цикла Клода) и компрессирования с многоступенчатым охлаждением.

- введение параметров: давления p_1, p_2, p_1, p_2 , температуры $T_1, T_2, \dots, T_1, T_2, \dots$, энтальпии и энтропии потоков на ключевых стадиях.

2. Энергетика:

- расчет энергозатрат на компрессию и охлаждение, учет изоэнтропических КПД компрессоров и детандеров;

- вычисление коэффициента сжижения — отношение массы СПГ к исходному потоку;

- определение удельной энергии на тонну СПГ/КПГ с учетом технологических потерь.

3. Качество продукта:

- анализ влияния параметров очистки на содержание влаги, высококипящих углеводородов, что влияет на стабильность и безопасность продуктов;

- мониторинг деградации качества при хранении и транспортировке (учет испаряемости, особенно для СПГ).

4. Экологические показатели:

- оценка выбросов метана и иных загрязнителей в зависимости от режима работы и технического состояния оборудования;

- введение коэффициентов утечек и вероятности аварий.

Многофакторный индекс эффективности (ИЭ) рассчитывается по формуле:

$$\text{ИЭ} = w_1 \cdot \eta_{\text{энерг}} + w_2 \cdot Q_{\text{выход}} + w_3 \cdot K_{\text{качество}} - w_4 \cdot E_{\text{выбросы}}$$

где:

$\eta_{\text{энерг}}$ - энергетическая эффективность (напр., выход продукта на потребленную энергию);

$Q_{\text{выход}}$ - массовый выход СПГ/КПГ;

$K_{\text{качество}}$ - коэффициент качества (функция параметров очистки и состава);

$E_{\text{выбросы}}$ - уровень экологических выбросов;

w_i - веса, задаваемые в зависимости от приоритетов эксплуатации.

Применение модели: модель позволит оценить и сравнить разные режимы работы ГРС и АГНКС по интегральному индексу эффективности.

Поможет выявить оптимальные параметры давления, температуры и степени очистки с учетом специфики российских климатических и технических условий.

Способствует инженерному принятию решений по модернизации оборудования и снижению энергетических затрат и экологического следа.

Достоинствами предложенной новой модели является:

- комбинирование термодинамического, энергетического и экологического анализа в единой комплексной оценке;
- адаптация под реальные характеристики российского природного газа и эксплуатационные условия.
- поддержка гибкого изменение весовых коэффициентов для фокусировки на экономике, безопасности или экологии.

Модель базируется на современных исследованиях, математических моделях циклов сжижения, и реализации процессов на российских малотоннажных установках СПГ и АГНКС.

Литература

1. Буренков, Д. С. Сходства и отличия свойств сжиженного углеводородного газа и сжиженного природного газа при применении в качестве топлива для систем газо- и теплоснабжения / Д. С. Буренков // Научный аспект. – 2024. – Т. 28, № 7. – С. 3471-3475.
2. Буренков, Д. С. Эффективные технологии транспортировки и хранения природного газа / Д. С. Буренков // Научный аспект. – 2024. – Т. 28, № 7. – С. 3467-3471.
3. Гончаров, М. В. Совершенствование технологии подготовки сжатого газа с применением моделирующей системы / М. В. Гончаров, Д. С. Буренков, Н. А. Новиков // Components of Scientific and Technological Progress. – 2025. – № 2(104). – С. 6-10.

*Е.А. Чернова, студ.; А.Ю. Пучков, к.т.н., доц.
(Филиал ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» в г. Смоленске)*

ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ МНОГО-АГЕНТНЫХ СИСТЕМЫ В ЭКОНОМИЧЕСКОМ АНАЛИЗЕ

Повышение надежности и возможностей экономических информационных систем на основе многоагентных систем (Multi-agent system, MAS) представляет собой наиболее перспективное направление исследований в области практического применения искусственного интеллекта (Artificial Intelligence, AI). С появлением концепции агента как сущности, способной воспринимать окружающую среду и действовать в ней, агентно-ориентированные системы привлекли значительное внимание научного сообщества. Исторически в данной области доминировали системы, основанные на обучении с подкреплением, где агенты выполняли простые, четко определенные задачи с ограниченным взаимодействием с окружающей средой [1]. Однако данный подход имеет ограниченную адаптивность и масштабируемость при решении сложных, многофакторных проблем, что стимулировало поиск более современных и интерактивных решений [2].

Актуальность представляемого исследования обусловлена потребностью в получении характеристик, позволяющих еще на этапе эскизного проектирования экономических информационных систем осуществлять обоснованный выбор методического аппарата для выбора и создания гибких и эффективных инструментов экономического моделирования, адекватно отражающих сложность взаимодействий реальных экономических субъектов в условиях неопределенности и динамичных изменений рыночной среды.

Целью работы является выявление и анализ ключевых особенностей применения интеллектуальных MAS на основе больших языковых моделей (Large Language Model, LLM), как одного из универсальных инструментов AI для задач экономического моделирования и анализа.

Выбор LLM обоснован продемонстрированным в последние несколько лет исключительным потенциалом в области рассуждений и планирования [3]. Это позволило создать агентов на основе LLM, способных к восприятию сложных окружений, принятию сложных окружений, принятию обоснованных решений и выполнению действий в интерактивной среде. Мотивированные этими успехами, агенты на основе LLM достигли значительных успехов во взаимодействии со сложными средами и решении нетривиальных задач в различных приложениях. Особенно важным аспектом здесь является то, что MAS на основе LLM были предложены как ключевой путь для использования коллективного интеллекта при сохранении специализации отдельных агентов, что способствует созданию более сложных и автономных систем [3].

С учетом отмеченных аспектов применения LLM в MAS становится обоснованным для создания новых, гибких и точных инструментов моделирования в современных экономических приложениях, способных отразить сложность взаимодействия реальных экономических субъектов.

В экономике множественные специализированные агенты наделены уникальными характеристиками и целями, взаимодействуют и конкурируют для достижения задач, имитируя поведения реальных экономических субъектов. Первой ключевой особенностью применения MAS на основе LLM можно назвать их способность к имитации сложного, нелинейного поведения реальных экономических субъектов, включая кооперацию, конкуренцию и модификацию, что выходит за рамки традиционных моделей [4]. Данный процесс подчеркивает важность коммуникации между агентами, рассуждений на основе знаний и опыта, а также осмысления действий для личностного роста в интерактивной среде.

Благодаря улучшенным возможностям понимания текста и сложного принятия решений, агенты на основе LLM наделяются атрибутами, такими как ресурсы, информация и предпочтения, для имитации принятия решений людьми или экономическими субъектами. Это позволяет проводить глубокие экономические и финансовые исследования. Для сравнения экономического поведения LLM с поведением реальных людей. LLM размещают в различных экономических сценариях, таких как игра диктатора или вопросы минимальной заработной платы. Это позволяет получить новые достижения в экономике. Исследования фокусируются на планировании и кооперации в интерактивном поведении. Используется теория поведенческих игр для изучения кооперации и координации в LLM через повторяющиеся игры, выявляя устойчивые поведенческие признаки и способность LLM адаптировать стратегии на основе социальных предпочтений. Особое внимание уделяется изучению интерактивного поведения агентов планированию и кооперации.

Другой особенностью применения интеллектуальных MAS на основе LLM

(MAS-LLM) в экономическом моделировании и анализе является интеграция принципов поведенческой экономики и теории игр. Это позволяет агентам LLM демонстрировать социальные предпочтения и адаптивные стратегии в повторяющихся взаимодействиях, приближая модель к реальности. Для моделирования конкурентной среды предлагается универсальная структура, например, виртуальный город с двумя типами агентов: ресторанами и клиентами. Такая среда позволяет реализовать классические экономические теории социального обучения, в том числе эффект Матфея («богатые становятся богаче»), что делает MAS-LLM способными имитировать коммуникации, учет опыта предыдущих действий на основе осмысления результатов прошлых операций, что в перспективе способствует созданию более реалистичных и сложных симуляций для экономического анализа.

Для применения MAS-LLM они структурируются вокруг пяти основных модулей, определяющих их функциональность. На рис. 1 представлена архитектура MAS-LLM, включающая следующие компоненты: профиль агента, восприятие, самостоятельное действие, взаимодействие и эволюцию.

Профиль агента определяет фундаментальные характеристики агента, такие как роль в системе, уели и предпочтения. Например, в экономической стимуляции профиль агента включает его ресурсы, склонность к риску и доступную информацию.

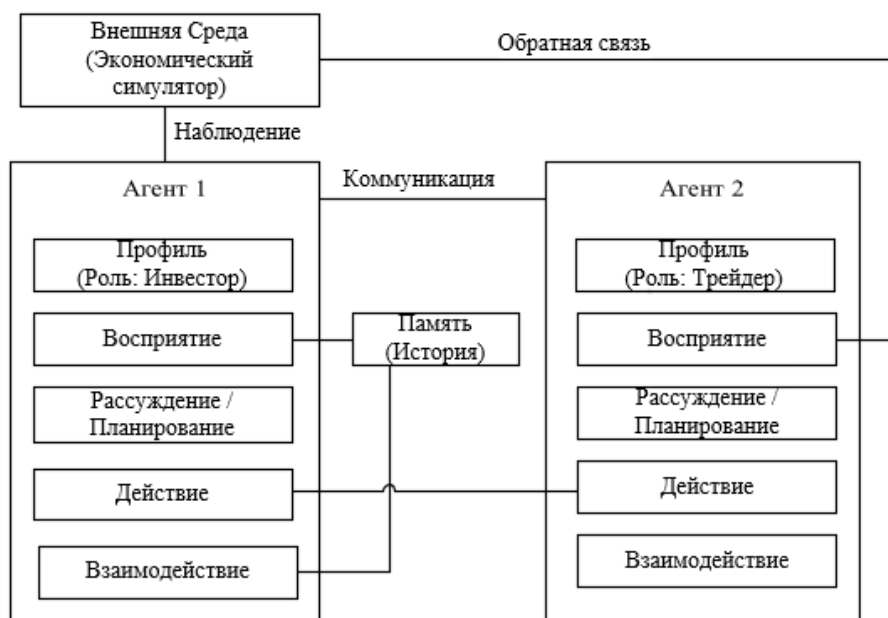


Рисунок 1 – Архитектура MAS-LLM

Модуль восприятия отвечает за информацию, полученную из внешней среды. Данные поступают различных форматов: визуальные, текстовые или аудио. Агент трактует информацию для формирования представления о текущем состоянии среды.

Важным модулем является модуль самостоятельного действия, который на основе принятой информации и внутреннего состояния агент осуществляет планирование и выполняет действия. Модуль самостоятельного действия ис-

пользует возможности LLM для генерации последовательных шагов, направленных на достижение поставленных целей.

Реализация взаимодействия является ключевым модулем для MAS-LLM, который обеспечивает связь между агентами. Взаимодействие принимает различные формы кооперации (совместного решения задач), координации (согласование действий) или конкуренции. LLM генерирует естественно-языковые сообщения, позволяющие агентам согласовывать, обмениваться информацией и заключать соглашения.

Еще одной особенностью MAS-LLM является ее модульная архитектура, которая обеспечивает гибкость и масштабируемость системы за счет четкого разделения функций восприятия, действия, взаимодействия и эволюции агентов. И конечным модулем является эволюция. Данный модуль отвечает за адаптацию агента на основе полученного опыта. Путем анализа результатов своих действий и обратной связи от среды, агент корректирует свои стратегии, обновляет знания и совершенствует поведение.

Указанные особенности применения интеллектуальных многоагентных системы в экономическом моделировании и анализе демонстрирует ряд их значительных преимуществ, позволяя агентам успешно имитировать поведение участников рынка, проявлять адаптацию к изменяющимся условиям, демонстрировать кооперацию и конкуренцию в соответствии с принципами теории игр, а также способствуя формированию реалистичных рыночных паттернов. Однако есть ряд вызовов, требующих решения в будущих исследованиях, к ним относятся обеспечение точности и надежности принимаемых агентами решений, интерпретируемости их поведения, а также учет этических аспектов. Перспективными направлениями исследований является интеграция с другими моделями AI, например, графовыми нейронными сетями [5], улучшающими способности экономических информационных систем к долгосрочному прогнозу и планированию, анализу финансовых рисков.

Литература

1. Пучков А. Ю., Дли М. И., Тиндова М. Г. Метод решения обратной задачи кинематики на основе обучения с подкреплением при управлении роботами-манипуляторами // Прикладная информатика. 2023. Т. 18. № 6. С. 120–133. DOI: 10.37791/2687-0649-2023-18-6-120-133.
2. Arık, O.A., Toğa, G. & Atalay, B. Reinforcement Learning Based Acceptance Criteria for Metaheuristic Algorithms. *Int J Comput Intell Syst* 18, 207 (2025). <https://doi.org/10.1007/s44196-025-00924-2>
3. Sornlertlamvanich, V. Enhancing large language models: alleviating knowledge deficiency with external knowledge and semantically aware reasoning (SAR). *Knowl Inf Syst* (2025). <https://doi.org/10.1007/s10115-025-02485-4>
4. Агент-ориентированные модели / В. Л. Макаров, А. Р. Бахтизин, Е. Д. Сушко [и др.]. – Москва : Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Государственный академический университет гуманитарных наук», 2022. – 196 с.
5. Tan, Z., Liu, S., Liu, Q. et al. Modeling ESG-driven industrial value chain dynamics using directed graph neural networks. *Financ Innov* 11, 113 (2025). <https://doi.org/10.1186/s40854-025-00783-y>

ПРИМЕНЕНИЕ 3D-ПЕЧАТИ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

Строительство – одна из самых консервативных отраслей промышленности. Как столетиями вручную возводились каменные и кирпичные стены, так этот процесс продолжается зачастую и до сих пор.

3D-печать в строительстве – это новая производственная технология, которая основана на послойном нанесении материалов – экструзии. Экструзия – процесс продавливания сырьевой массы через формирующую печатающую головку 3D-принтера. Такая технология называется аддитивной.

С помощью 3D-принтеров в настоящее время возводят малоэтажные дома, элементы зданий для многоэтажного строительства, мебель, предметы интерьера, ограждения и многое другое [1,2].

Аддитивные технологии способны заменить традиционные методы возведения зданий:

1. Процесс строительства значительно ускоряется по сравнению с традиционными методами.
2. Автоматизация процессов и минимальные отходы позволяют значительно сократить расходы на рабочую силу и материалы.
3. Открываются возможности для создания сложных архитектурных форм.
4. Точное количество использованных материалов снижает строительные отходы в том числе и вредных, и делают новые технологии более экологичными.
5. Автоматизация позволяет свести к минимуму ошибки, связанные с ручными процессами, что значительно повышает качество работы.
6. Новые технологии позволяют строить в труднодоступных местах.

В строительстве применяется три основные технологии 3D-печати: послойное экструдирование, спекание (селективное спекание) и напыление/компонентная склейка (стереолитография).

Началом развития 3D-печати можно считать проект компании *Countour Crafting Corp*, которая представила концепцию послойного возведения конструкций в строительстве в 1998 году.

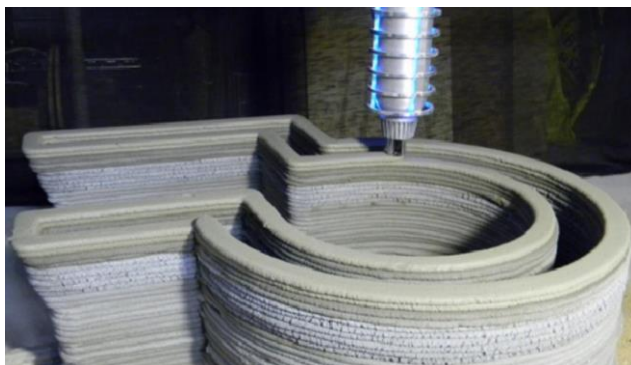


Рисунок 1 – Изготовление конструкции методом послойного экструдирования

Активное использование в строительстве 3D-печати началось в 2014 году. Китайская компания *Shanghai Win Sun Decoration Design Engineering Co* представила сразу 10 домов, которые были возведены с применением 3D-печати [3,4].

Целиком напечатанный на принтере российский дом впервые был построен в 2017 году в подмосковном Ступино компанией *ApisCor*. Это дом круглой формы, площадью 38 кв. метров. Работы заняли два месяца, но непосредственно печать велась примерно сутки (рисунок 2).



Рисунок 2 – Дом российской компании *ApisCor*

Сейчас в России на разных стадиях готовности насчитывается несколько проектов: в Москве, Зеленодольске, Ейске, Туле, Элисте, под Ярославлем, в Сочи.

На рисунке 3 представлен двухэтажный дом в Подмосковье (застройщик «3D-строй») с усиленным фундаментом и общей площадью дома 198 кв. метров. Стройка велась бетоном методом полевой печати.

3D-технологии имеют перспективы развития в разных странах мира, например, в ОАЭ собираются построить 25% объектов посредством 3D- технологий к 2030 году



Рисунок 3 – Двухэтажный дом в Подмосковье

Для 3D-печати в строительстве используют специальные принтеры, которые разделяют по двум классификациям: по месту применения и по типу принтера [5, 6].

Согласно первой классификации, 3D-принтеры бывают:

- уличные, которые устанавливают непосредственно на строительной площадке, чтобы возводить малоэтажные здания высотой 1-3 этажа, например, частные дома, магазины, административные корпуса или коммерческие здания, в том числе крупноформатные склады/цеха;

- цеховые, которые размещают стационарно, фактически – это мобильная производственная линия;

- лабораторные, как правило, адаптированные для обучения и НИОКР.

По второй классификации 3D-принтеры бывают:

- порталные, придающие высокую жесткость конструкции и максимальное качество/производительность на большой области печати;

- роборука или скара. Эти принтеры печатают более сложные по конфигурации изделия. Однако производительность и область печати у них меньше, чем у порталных;

- мобильные, которые передвигаются по строительной площадке без ручной перестановки, например, на гусеничной платформе.

Сегодня для 3D-печати в строительстве используют три типа материалов:

1. Товарный бетон, адаптированный для 3D-печати с помощью специальных добавок, что снижает стоимость смеси. Такое снижение затрат на материалы расширит возможности 3D-печати в строительстве, потому что технология станет дешевле.

2. Готовая сухая смесь. Это самый популярный материал. Ее преимущество состоит в простом производстве и высоких потребительских характеристиках: прочности, морозостойкости, долговечности. Недостаток – стоимость значительно превосходит стоимость товарного бетона.

3. Нестандартный бетон. Например, зеленый бетон – это геополимер, где цемент, заменяется на компоненты, так называемые промышленные дымы. Этот материал дороже, чем предыдущие, но прочнее и экологичнее, так как позволяет минимизировать углеродный след от строительства.

Несмотря на перечисленные преимущества, в применении 3D-технологий существуют проблемы, к которым можно отнести:

- высокая стоимость оборудования, которая компенсируется быстрой работой оборудования и быстрой окупаемостью;

- габариты строящегося объекта ограничиваются размерами принтера;

- высокие требования к составу бетонной смеси, так как конструкция должна быть прочная и жесткая;

- строительство ограничивается относительно теплым временем года, что вызывает затруднения в северных областях;

- отсутствует нормативная и законодательная базы применения 3D-принтера для массовой застройки.

Таким образом, несмотря на неоспоримые преимущества, применения 3D-печати в строительной сфере существует ряд проблем, решение которых будет способствовать развитию аддитивных строительных технологий.

Литература

1. Симакова Е.А., Селякова А.И., Кравченко Д. Применение 3D - печати в строительстве. Инженерные исследования. 2021. №1(1). с/3-11/ <http://eng-res.ru>
2. Лохмутов Н. Д., Куличков Д. В., Ермолаева В. В. Перспектива развития 3D-печати в строительстве // Молодой ученый. 2018. № 23 (209). С. 177-179.
3. Безруков М. 3D - печать в строительстве: опыт и примеры использования. <https://tn.ru>
4. Османов С.Г., Колотиенко М.А. К вопросу о возможностях и области рационального применения технологии 3D-печати строительных конструкций // Инженерный вестник Дона. 2019. № 9 (60). С. 64.
5. Максимов Н.М., Аддитивные технологии в строительстве: оборудование и материалы // Аддитивные технологии 2017. №4. С.54-62.
6. Москалев И.В. Перспективы 3D-печати бетона в строительстве// Молодой ученый.-2023.-№47(494).-с.40-41.-URL: <https://moluch.ru/archive/494/494/107968/>

СОДЕРЖАНИЕ
СЕКЦИЯ 1
ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

1. Андреенков Е.С. РАСЧЕТ ТОКОВ ОДНОФАЗНЫХ ЗАМЫКАНИЙ В ЭЛЕКТРОУСТАНОВКАХ ДО 1 кВ С УЧЕТОМ РАСТЕКАНИЯ ОБРАТНОГО ТОКА В ЗЕМЛЕ 3
2. Вайтеленок Л.В., Лемешева А.А. АНАЛИЗ ТЕХНИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ МОЩНОСТИ И ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ НА ОСНОВЕ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ 6
3. Вайтеленок Л.В., Церковный Р.С. АНАЛИЗ МЕТОДОВ РАСЧЕТА ВРЕМЕНИ ДО НАСЫЩЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ ТОКА 10
4. Гришечкин А.А., Назаров А.А., Кавченков В.П. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОБЪЁМА НАГРУЗКИ ПРИ ВВОДЕ ГРАФИКОВ ВРЕМЕННОГО ОТКЛЮЧЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДИСТАНЦИОННОГО УПРАВЛЕНИЯ В РЕЖИМЕ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ 15
5. Т.И. Дубровская, ведущий инженер; В.С. Ковженкин, к.т.н., доцент (Филиала ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» в г. Смоленске) ОСОБЕННОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ И РАСЧЕТОВ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ СВЕРХВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ (СВН) 20
6. Дубровская Т.И., Петров В.С. ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ ЭЭС С УЧЕТОМ ТЕХНИЧЕСКИХ И ЭКОНОМИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ 23
7. Жаворонков И.В., Зирюкин В.И., Климов К.С. АДАПТИВНЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ОБЪЕКТАМИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ 27
8. Зирюкин В.И., Жаворонков И.В., Климов К.С. МЕТОДИКА РЕАЛИЗАЦИИ СИСТЕМЫ СКАЛЯРНОГО УПРАВЛЕНИЯ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СИСТЕМЫ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ 33
9. Ковалев А.И., Вайтеленок Л.В. ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ СОВРЕМЕННЫХ ВЫКЛЮЧАТЕЛЕЙ-РАЗЪЕДИНИТЕЛЕЙ 35
10. Коротких А.А., Моликов П.А. ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СЕТИ (SMART GRIDS): ТЕХНОЛОГИИ И РЕШЕНИЯ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ И УСТОЙЧИВОСТИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ 41
11. Соколов И.Н., Солопов Р.В. ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ ТРАНСФОРМАТОРОВ ПО ДАННЫМ ВИБРАЦИОННОЙ ДИАГНОСТИКИ 44

СЕКЦИЯ 2
ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

1. Баловнев Д.И., Козлов М.Н. ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА ПРИ РАБОТЕ НА УНИВЕРСАЛЬНОМ ПИТАНИИ 49

2.	<i>Быков А.А., Щеглов И.Д. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА АВТОМАТИЗАЦИИ ЧАСТОТНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ В СЕРВОДВИГАТЕЛЯХ</i>	51
3.	<i>Кудряшов А.С., Рожков В.В. ПРИМЕНЕНИЕ СИСТЕМ ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ В ЗАДАЧАХ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДА</i>	55
4.	<i>Курилин С.П., Борисов В.В. ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МОДУЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ</i>	58
5.	<i>Курилин С.П., Жарков А.П. РАЗРАБОТКА МОДУЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ДЛЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ УСТАНОВОК МЕТАЛЛУРГИИ</i>	62
6.	<i>Ларькина Т.С. ВЛИЯНИЕ ВНЕДРЕНИЯ ЭЛЕКТРОМОБИЛЕЙ И СТАНЦИЙ ДЛЯ ИХ ПОДЗАРЯДКИ НА ЭНЕРГОСИСТЕМУ РОССИИ</i>	66
7.	<i>Магидов Р.Е., Рожков В.В. НАСТРОЙКА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЧАСТОТНЫМ ПРИВОДОМ СВЕРЛИЛЬНОГО СТАНКА</i>	70
8.	<i>Максимкин В.Л., Шулакова Д.А. ПУТИ СНИЖЕНИЯ МАССОГАБАРИТНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ СИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ</i>	74
9.	<i>Силаев Д.П., Саватеева И.С. АНАЛИЗ РАБОТЫ ДВУХДВИГАТЕЛЬНОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА УСТАНОВКИ БЕССЛИТКОВОЙ ПРОКАТКИ</i>	78
10.	<i>Федотов В.В., Рожков В.В. ВОЗМОЖНОСТИ ПОСТРОЕНИЯ ТРЕХФАЗНОГО ТРАНЗИСТОРНОГО МОСТОВОГО ВЫПРЯМИТЕЛЯ С ВЫСОКИМ КПД КАК ЗВЕНА ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЧАСТОТЫ</i>	81

СЕКЦИЯ 3 ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА

1.	<i>Галковский В.А., Лобанов С.М. АНАЛИЗ РАБОТЫ СИСТЕМ ОТОПЛЕНИЯ МНОГОЭТАЖНОГО ЗДАНИЯ</i>	87
2.	<i>Галковский В.А., Силков Я.С. МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВОДЯНЫХ ТЕПЛОВЫХ СЕТЕЙ</i>	90
3.	<i>Кабанова И.А., Мудрякова А.И. ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ В ПЛИНТУСНЫХ СИСТЕМАХ ОТОПЛЕНИЯ</i>	94
4.	<i>Киселева А.И., Голузова И.В., Ткачева У.А. СПОСОБЫ ВЫСВОБОЖДЕНИЯ РЕЗЕРВОВ МОЩНОСТИ ТЕПЛОВОЙ СЕТИ</i>	98
5.	<i>Киселева А.И., Голузова И.В., Ткачева У.А. ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ ПРИ КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЯХ</i>	101
6.	<i>Козлов Н.С., Новиков Г.Ю. СПОСОБЫ ОПТИМИЗАЦИИ РЕЖИМОВ ПРОИЗВОДСТВА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ И ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИИ НА ТЭЦ</i>	106

7. Куликов А.Е., Кабанова И.А. ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ И НАДЁЖНОСТИ ТЕПЛОГЕНЕРИРУЮЩИХ УСТАНОВОК ПУТЁМ ВНЕДРЕНИЯ КОНТАКТНЫХ ТЕПЛОУТИЛИЗАЦИОННЫХ УСТАНОВОК 108
8. Лазуков С.А., Кабанова И.А. РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ ГИБРИДНОЙ СИСТЕМНОЙ УТИЛИЗАЦИИ ТЕПЛА ЦОД ДЛЯ НУЖД ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ 112

СЕКЦИЯ 4

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ПРОИЗВОДСТВЕ И СТРОИТЕЛЬСТВЕ

1. Андреев М.А., Гришин И.С., Родяхин Г.С., Шеховцов В.В. ОБНАРУЖЕНИЕ АНОМАЛИЙ В РАБОТЕ ФИЗИЧЕСКОГО ОБЪЕКТА С ПОМОЩЬЮ АЛГОРИТМА ISOLATION FOREST 115
2. Андреев М.А., Гришин И.С., Родяхин Г.С., Шеховцов В.В. АЛГОРИТМЫ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ КАК ЯДРО DATA-DRIVEN ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА 117
3. Борисов Э.К., Рысина Е.И. ПОВЫШЕНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ СЕТЕЙ К КИБЕРУГРОЗАМ: АНАЛИТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ И НАПРАВЛЕНИЯ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ МЕХАНИЗМОВ ЗАЩИТЫ 120
4. Верзун Н.А., Колбанёв М.О., Салиева А.Р. СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ АЛГОРИТМОВ АКУСТИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ ПРОМЫШЛЕННОГО ОБОРУДОВАНИЯ 123
5. Воробьев М.С., Бобков В.И. ПРИМЕНЕНИЕ КОНФОРМНЫХ ОТОБРАЖЕНИЙ И ОБОБЩЁННЫХ ТЕЛЕГРАФНЫХ УРАВНЕНИЙ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ВЧ-СИГНАЛА В ОБОЛОЧКАХ СИЛОВЫХ КАБЕЛЯХ 125
6. Денисов В.Н., Новикова М.А. ВЛИЯНИЕ УТОЧНЕНИЯ НЕЛИНЕЙНОСТИ НА ОЦЕНКУ ХАРАКТЕРИСТИК КАВИТАЦИОННОГО ПУЗЫРЬКА 129
7. Денисов В.Н., Новикова М.А. РАЗРАБОТКА СТРУКТУРНОЙ СХЕМЫ ИССЛЕДОВАНИЯ КАВИТАЦИИ В SIMINTECH 135
8. Жужгина И.А., Лакомова Д.В. ЦИФРОВАЯ ТРАНСФОРМАЦИЯ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ КАК ИНСТРУМЕНТ ПЕРЕХОДА К ТЕХНОЛОГИЧЕСКОМУ СУВЕРЕНИТЕТУ 139
9. Каракулька А.А. ГЕЙМДЕВ В СИСТЕМЕ ОБРАЗОВАНИЯ (КРАТКИЕ ТЕЗИСЫ) 143
10. Колабская Д.А., Зедаина А.В. ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ КАК ИНСТРУМЕНТ ОПТИМИЗАЦИИ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ В ИНДУСТРИИ ПРОИЗВОДСТВА ОДЕЖДЫ 147

11. Коротких А.А., Моликов П.А. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЗЕЛЁНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ (ЗЕЛЁНЫХ КРЫШ, ВЕРТИКАЛЬНОГО ОЗЕЛЕНЕНИЯ) НА ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ ЗДАНИЙ В ГОРОДСКИХ УСЛОВИЯХ 150
12. Коротких А.А., Моликов П.А. ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ ЗДАНИЙ: ПРОГНОЗИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ 154
13. Лебедева М.Ю., Кафтунцова А.В. ВЛИЯНИЕ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ НА ТРАНСФОРМАЦИЮ УПРАВЛЕНЧЕСКИХ И ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ ПРОЦЕССОВ В ТАНЦЕВАЛЬНЫХ СТУДИЯХ 157
14. Лебедева М.Ю., Кафтунцова А.В. ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ТУРИСТИЧЕСКИХ АГЕНТСТВ: СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ И ВЛИЯНИЕ НА КОНКУРЕНТОСПОСОБНОСТЬ 160
15. Лукашов И.В., Штемпель А.Н., Федуллова С.А., Федулов Я.А. ВЛИЯНИЕ СТРУКТУРЫ АМПЛИТУДНО-ЧАСТОТНЫХ ДАННЫХ НА ВЫБОР РЕГРЕССИОННОЙ МОДЕЛИ 164
16. Маркелов Е.Е., Преображенский Е.В., Галкин В.И. СИСТЕМА ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ДЛЯ ТЕХНОЛОГИИ ГОРЯЧЕЙ ОБЪЕМНОЙ ШТАМПОВКИ 169
17. Окунев Б.В., Иванов Е.С. МАТРИЧНО-ПРОЕКЦИОННАЯ МОДЕЛЬ АКУСТИЧЕСКИХ УТЕЧЕК ИНФОРМАЦИИ В ЗАЩИЩЁННЫХ ПОМЕЩЕНИЯХ 173
18. Патенченкова М.А., Шумилин Е.Д. ИНТЕГРАЦИЯ VR/AR С ВІМ ДЛЯ УЛУЧШЕНИЯ ВИЗУАЛИЗАЦИИ И ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ С ПРОЕКТАМИ 176
19. Полячков А.В., Бахман В.А. СИСТЕМА АВТОМАТИЗАЦИИ ИЗМЕРЕНИЙ И НАПИСАНИЯ ПРОГРАММ ДЛЯ КООРДИНАТНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ МАШИИ 179
20. Пучков А.Ю., Борисова А.А. ОЦЕНКА БИЗНЕС-РИСКОВ МОШЕННИЧЕСТВА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СИНТЕТИЧЕСКОГО ГОЛОСА 183
21. Пучков А.Ю. МОДЕЛЬ ФОРМИРОВАНИЯ БАЗЫ ПРЕЦЕДЕНТОВ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПЕРЕРАБОТКОЙ РУДНОГО СЫРЬЯ 187
22. Столяренко М.А., Окунев Б.В. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ОНЛАЙН-СЕРВИСОВ ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦИИ РАБОТЫ ОТБОРОЧНОЙ КОМИССИИ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ОРГАНИЗАЦИИ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ 190
23. Столяренко М.А., Пучков А.Ю. ВЫЯВЛЕНИЯ АНОМАЛИЙ В ФИНАНСОВЫХ ВРЕМЕННЫХ РЯДАХ НА ОСНОВЕ МОДЕЛИ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ 193
24. Тютюнник А.А., Дроздов Н.В. АНАЛИЗ И СРАВНЕНИЕ ПРОГРАММНЫХ СРЕДСТВ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ВЕБ-ПРИЛОЖЕНИЙ ОРГАНИЗАЦИИ 197

25.	<i>Тютюнник А.А., Матюшенков Е.И. ПРОБЛЕМЫ ВНЕДРЕНИЯ РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩИХ И ТОЧНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ВОЗДЕЛЫВАНИЯ ЛЬНА-ДОЛГУНЦА СМОЛЕНСКОЙ ОБЛАСТИ</i>	203
26.	<i>Тютюнник А.А., Матюшенков Е.И. ОГРАНИЧЕНИЯ СИСТЕМО-ДЕЯТЕЛЬНОСТНОГО ПОДХОДА ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ СИСТЕМ «VUCA-МИРА»</i>	207
27.	<i>Тютюнник А.А., Чернова Е.А. МАЛЫЕ ПРЕДПРИЯТИЯ КАК АКТОРЫ ОТКРЫТЫХ ИННОВАЦИОННЫХ ЭКОСИСТЕМ</i>	211
28.	<i>Тютюнник А.А., Чернова Е.А. ОБРАТНАЯ СВЯЗЬ КАК СИСТЕМО-ОБРАЗУЮЩИЙ ФАКТОР В МЕТОДИКЕ ПОСТЕПЕННОЙ ФОРМАЛИЗАЦИИ ЗАДАЧИ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ</i>	214
29.	<i>Устиненкова А.В., Пучков А.Ю. АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СЕГМЕНТАЦИЯ КЛИЕНТОВ МЕТОДАМИ RFM-АНАЛИЗА</i>	218
30.	<i>Царегородцев Е.Л., Буренков Д.С. МОДЕЛЬ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ РЕЖИМОВ СЖИЖЕНИЯ И КОМПРИМИРОВАНИЯ СЖИЖЕННОГО ПРИРОДНОГО ГАЗА НА РОССИЙСКИХ ГАЗОРАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ И АВТОМОБИЛЬНЫХ ГАЗОНАПОЛНИТЕЛЬНЫХ КОМПРЕССОРНЫХ СТАНЦИЯХ</i>	223
31.	<i>Чернова Е.А., Пучков А.Ю. ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ МНОГОАГЕНТНЫХ СИСТЕМЫ В ЭКОНОМИЧЕСКОМ АНАЛИЗЕ</i>	228
32.	<i>Широких Т.В. ПРИМЕНЕНИЕ 3D-ПЕЧАТИ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ</i>	232

Научное издание

ЭНЕРГЕТИКА, ИНФОРМАТИКА, ИННОВАЦИИ – 2025
(электроэнергетика, электротехника, теплоэнергетика, математическое моделирование,
информационные технологии в производстве и строительстве)
Сб. трудов XV Межд. науч.-техн. конф.
Сборник трудов в 3-х томах
Том 1

Подписано в печать 19.11.2025 г.
Формат 60x84^{1/16}. Тираж 100 экз. Печ. л. 15,1.

Издательство «Универсум»
Отпечатано в издательском секторе филиала МЭИ в г. Смоленске
214013 г. Смоленск, Энергетический проезд, 1

ISBN 978-5-91412-557-5

