

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Филиал ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» в г. Волжском  
ООО «ЛУКОЙЛ-Волгоградэнерго»  
Филиал ПАО «РусГидро» – «Волжская ГЭС»  
Филиал ПАО «Россети Юга» – «Волгоградэнерго»

**ЭНЕРГЕТИКА В УСЛОВИЯХ ЦИФРОВОЙ ТРАНСФОРМАЦИИ.  
НАУКА. ТЕХНОЛОГИИ. ИННОВАЦИИ**

III МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ

г. Волжский  
25–28 декабря 2023 г.

Сборник материалов конференции

УДК 621+628+681.5+378.1  
ББК 31

Программный комитет:  
Султанов М.М. (председатель), Болдырев И.А.,  
Иваницкий М.С., Зенина Е.Г., Кульков В.Г.

**Энергетика в условиях цифровой трансформации. Наука. Технологии. Инновации:** III Международная научно-практическая конференция, г. Волжский, 25–28 декабря 2023 г. / сборник материалов конференции. – Волжский: Филиал ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» в г. Волжском, 2024. – 107 с.

**ISBN 978-5-94721-173-3**

Материалы докладов, вошедшие в сборник, освещают актуальные проблемы развития энергетики в условиях цифровой трансформации в научной, технологической и инновационной сферах. Сборник предназначен для специалистов, работающих в энергетической отрасли, а также студентов, магистрантов, аспирантов и преподавателей технических вузов.

Материалы докладов, представленные авторами, сверстаны и при необходимости сокращены. Как правило, сохранена авторская редакция.

Печатается по решению Учебно-методического совета филиала ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» в г. Волжском.

УДК 621+628+681.5+378.1  
ББК 31

**ISBN 978-5-94721-173-3**

© Авторы, 2024  
© Филиал ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»  
в г. Волжском, 2024

## СТАБИЛИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ НАПРЯЖЕНИЙ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

*Ахметбаев Д.С.* – д-р техн. наук, доцент

*Иран Е., Нурлан Ш.* – магистранты

Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева,

г. Астана, Республика Казахстан

*АННОТАЦИЯ.* Современная тенденция развития электроэнергетических систем характеризуется внедрением оборудования FACTS, что может существенно изменять технологию обеспечения баланса узловых реактивных мощностей. В работе предлагается стабилизация желаемых напряжений узлов с позиции синтеза режимов по напряжению в неоднородной электрической сети на основе топологического метода. Путем преобразования узлового уравнения устанавливается аналитическая зависимость мощностей компенсирующих устройств в функции комплекса напряжений узлов.

*КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:* топология, дерево, коэффициенты распределения, узловые напряжения, мощности, компенсирующие устройства.

### *Введение*

Эффективность регулирования напряжения в электрических сетях определяется условиями обеспечения балансов узловых реактивных мощностей. Внедрение силовой электроники в состав нагрузки привело к увеличению доли потребителей без регулирующего эффекта по напряжению. С другой стороны, в качестве источников реактивной мощности установлены дискретно управляемые батареи статических конденсаторов на шинах 10-220 кВ [1–3]. В этих условиях, без обеспечения необходимых мер, существенно повышается вероятность нарушения статической устойчивости узла нагрузки.

Внедрение оборудования FACTS существенно изменяет технологию обеспечения баланса узловых реактивных мощностей [4, 5]. Плавное регулирование источников реактивной мощности позволяет стабилизировать напряжение заданного узла независимо от режима электрической системы.

Решение этой проблемы требует системного подхода к определению необходимых мощностей средств компенсации. В данной работе разрабатывается системный метод расчета необходимых мощностей компенсирующих устройств.

### *Алгоритм формирования коэффициентов токораспределения*

Топологический алгоритм формирования коэффициентов токораспределения, разработанный в [6], не нашел широкого применения на практике из-за сложности его реализации. Наиболее простой способ формирования коэффициентов распределения задающих токов сформулирован в работе, где матрица токораспределения формируется на основе топологического выражения [7]:

$$C = \frac{\sum F_{ij}}{\sum F}, \quad (1)$$

где  $\sum F_{ij}$  – алгебраическая сумма специфических деревьев  $i$ -й ветви относительно  $j$ -го узла;  $\sum F$  – арифметическая сумма всех возможных деревьев графа.

Алгоритм (1) реализован на компьютерной технике с поиском и определением величин всех возможных и специфических деревьев сложного графа электрической сети.

*Алгоритм формирования необходимых мощностей  
компенсирующих устройств*

Выражения для мощности компенсирующих устройств определяются на основе преобразования известных уравнений состояния электрической сети, которые записаны в матричной форме [8–10]:

$$U = U0 - C^T Z1 C \bar{U}_d^{-1} \bar{S}, \quad (2)$$

где  $U0$  – напряжение базисного узла;  $C$  – матрица комплексных коэффициентов распределения задающих токов;  $T$  – знак транспонирования матрицы;  $Z1 = \text{diag}(Z)$  – диагональная матрица комплексных сопротивлений ветвей;  $U_d = \text{diag}(U)$  – диагональная матрица сопряженного комплекса узловых напряжений;  $\bar{S}$  – вектор сопряженного комплекса узловых нагрузок.

Аналитическая зависимость между мощностями компенсирующих устройств и параметрами режима и сети может быть установлена на основе преобразования уравнения (2).

Если желательные значения напряжений узлов обеспечиваются путем регулирования мощности компенсирующих устройств, то уравнение (2) запишется в следующем виде [11–13]:

$$UG = U0 - C^T Z1 C \bar{U}_d^{-1} (\bar{S} - i \cdot QK), \quad (3)$$

где  $UG$  – комплексное значение напряжения, причем в определенных узлах модуль напряжения должен принимать желаемое значение;  $QK$  – реактивная мощность компенсирующих устройств в тех же узлах. Следует отметить, что вектор-столбец  $QK$  – реактивная мощность компенсирующих устройств в тех же узлах имеет ненулевые вещественные значения только в тех узлах, где задаются желаемые модули напряжения, в других узлах значения равны нулю.

*Реализация алгоритмов расчета необходимых мощностей  
компенсирующих устройств*

В данной работе приводятся результаты численного эксперимента, проведенного для реальной схемы сети 500-220 кВ филиала АО «КЕГОС», однолинейная схема которой представлена на рис. 1.

Расчетные параметры линии и параметры узловых нагрузок представлены в табл. 1, 2.

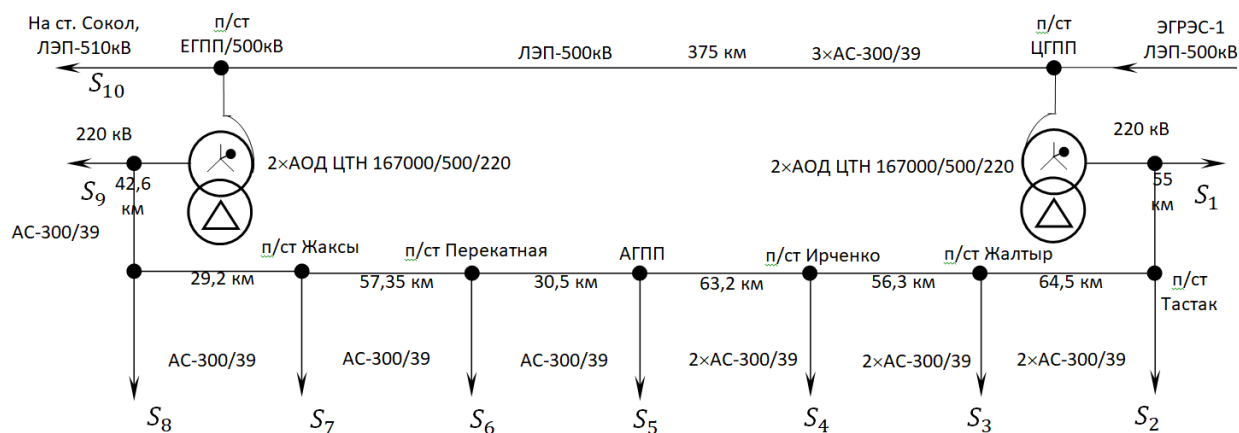


Рис. 1. Однолинейная схема участка сети 500-220 кВ

Таблица 1

**Расчетные параметры линии**

№ линии	Комплексные сопротивления $Z$ , Ом	Проводимости $b$ , См
1	$10,875 + 115,500i$	$6,76e - 4$
2	$2,913 + 183,380i$	0
3	$2,971 + 13,006i$	$1,45e - 4$
4	$3,484 + 15,253i$	$1,7e - 4$
5	$3,041 + 13,313i$	$1,48e - 4$
6	$3,412 + 14,939i$	$1,66e - 4$
7	$3,295 + 14,425i$	$8,00E - 05$
8	$6,185 + 27,100i$	$1,51e - 4$
9	$3,153 + 13,811i$	$7,70e - 5$
10	$4,603 + 20,148i$	$1,20e - 4$
11	$1,45 + 91,690i$	0

Таблица 2

**Параметры узловых нагрузок**

№ узла	Узловые нагрузки, МВА
1	$24,0 + 19,20i$
2	$50,4 + 24,39i$
3	$45,0 + 21,78i$
4	$46,0 + 22,26i$
5	$56,0 + 27,10i$
6	$47,7 + 23,08i$
7	$48,6 + 23,52i$
8	$49,5 + 23,96i$
9	$26,0 + 10,40i$
10	$700,0 + 180,00i$

В качестве исходных данных были использованы коэффициенты токораспределения, найденные по программе (представлены в табл. 3, 4).

Таблица 3

Матрица коэффициентов токораспределения  $C_{ij}, j = \overline{1,5}$

1	$-0,177 - 0,025i$	$-0,238 - 0,020i$	$-0,310 - 0,015i$	$-0,373 - 0,011i$	$-0,443 - 0,006i$
2	$-0,823 + 0,025i$	$-0,762 + 0,020i$	$-0,690 + 0,015i$	$-0,627 + 0,011i$	$-0,557 + 0,006i$
3	$0,177 + 0,025i$	$-0,762 + 0,020i$	$-0,690 + 0,015i$	$-0,627 + 0,011i$	$-0,557 + 0,006i$
4	$0,177 + 0,025i$	$0,238 + 0,020i$	$-0,690 + 0,015i$	$-0,627 + 0,011i$	$-0,557 + 0,006i$
5	$0,177 + 0,025i$	$0,238 + 0,020i$	$0,310 + 0,015i$	$-0,627 + 0,011i$	$-0,557 + 0,006i$
6	$0,177 + 0,025i$	$0,238 + 0,020i$	$0,310 + 0,015i$	$0,373 + 0,011i$	$-0,557 + 0,006i$
7	$0,177 + 0,025i$	$0,238 + 0,020i$	$0,310 + 0,015i$	$0,373 + 0,011i$	$0,443 + 0,006i$
8	$0,177 + 0,025i$	$0,238 + 0,020i$	$0,310 + 0,015i$	$0,373 + 0,011i$	$0,443 + 0,006i$
9	$0,177 + 0,025i$	$0,238 + 0,020i$	$0,310 + 0,015i$	$0,373 + 0,011i$	$0,443 + 0,006i$
10	$0,177 + 0,025i$	$0,238 + 0,020i$	$0,310 + 0,015i$	$0,373 + 0,011i$	$0,443 + 0,006i$
11	$0,177 + 0,025i$	$0,238 + 0,020i$	$0,310 + 0,015i$	$0,373 + 0,011i$	$0,443 + 0,006i$

Таблица 4

Продолжение матрицы коэффициентов токораспределения  $C_{ij}, j = \overline{6,10}$

1	$-0,511 - 0,001i$	$-0,639 + 0,008i$	$-0,704 + 0,012i$	$-0,799 + 0,019i$	$-0,887 + 0,007i$
2	$-0,489 + 0,001i$	$-0,361 - 0,008i$	$-0,296 - 0,012i$	$-0,201 - 0,019i$	$-0,113 - 0,007i$
3	$-0,489 + 0,001i$	$-0,361 - 0,008i$	$-0,296 - 0,012i$	$-0,201 - 0,019i$	$-0,113 - 0,007i$
4	$-0,489 + 0,001i$	$-0,361 - 0,008i$	$-0,296 - 0,012i$	$-0,201 - 0,019i$	$-0,113 - 0,007i$
5	$-0,489 + 0,001i$	$-0,361 - 0,008i$	$-0,296 - 0,012i$	$-0,201 - 0,019i$	$-0,113 - 0,007i$
6	$-0,489 + 0,001i$	$-0,361 - 0,008i$	$-0,296 - 0,012i$	$-0,201 - 0,019i$	$-0,113 - 0,007i$
7	$-0,489 + 0,001i$	$-0,361 - 0,008i$	$-0,296 - 0,012i$	$-0,201 - 0,019i$	$-0,113 - 0,007i$
8	$0,511 + 0,001i$	$-0,361 - 0,008i$	$-0,296 - 0,012i$	$-0,201 - 0,019i$	$-0,113 - 0,007i$
9	$0,511 + 0,001i$	$0,639 - 0,008i$	$-0,296 - 0,012i$	$-0,201 - 0,019i$	$-0,113 - 0,007i$
10	$0,511 + 0,001i$	$0,639 - 0,008i$	$0,704 - 0,012i$	$-0,201 - 0,019i$	$-0,113 - 0,007i$
11	$0,511 + 0,001i$	$0,639 - 0,008i$	$0,704 - 0,012i$	$0,799 - 0,019i$	$-0,113 - 0,007i$

При увеличении передаваемой мощности по ЛЭП-500 кВ наблюдается существенное снижение напряжения на шинах подстанции АГПП-220 кВ (рис. 2).

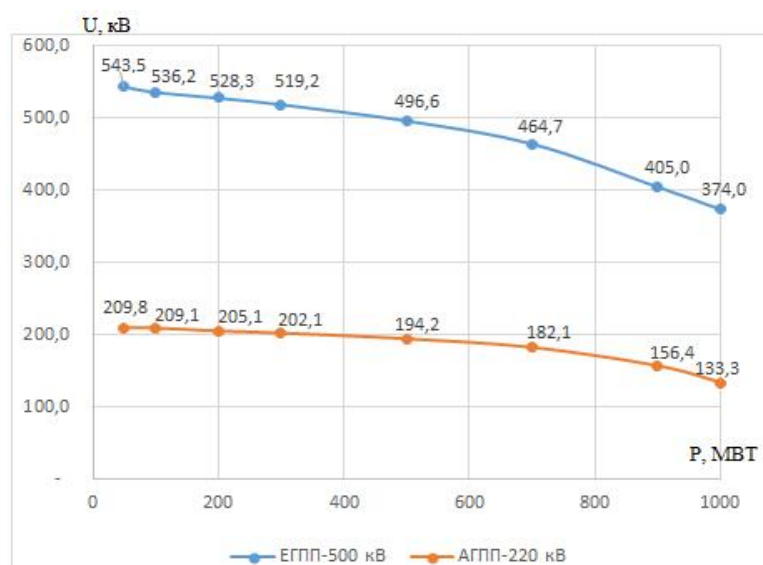


Рис. 2. Зависимость напряжения на шинах ЕГПП-500 кВ и АГПП-220 кВ без КУ от передаваемой мощности по ЛЭП-500 кВ

Предварительно задается уровень стабилизации напряжения в узлах, например на шинах подстанции АГПП-230 кВ и на шинах ЕГПП-510 кВ. Затем производится утяжеление режима путем увеличения передаваемой мощности по транзиту ЛЭП-500 кВ. На заданном диапазоне утяжеления режима должны поддерживаться уровни напряжения в заданных узлах. Необходимые значения реактивных мощностей компенсирующих устройств, устанавливаемых на подстанциях АГПП-220 кВ и ЕГПП-500 кВ, определяются решениями системы уравнений. Полученные значения реактивных мощностей компенсирующих устройств были проверены дополнительными расчетами установившихся режимов, которые показали погрешности в определении напряжения в пределах погрешности округления.

Результаты, полученные на основе разработанных алгоритмов определения реактивных мощностей компенсирующих устройств, приведены в табл. 5.

Таблица 5

**Мощности КУ и узловые напряжения по мере утяжеления режима**

Утяжеление режима, S, МВА		ЕГПП-500 кВ				АГПП-220 кВ			
$P$	$Q$	$U_{ж},$ кВ	$Q_{ку},$ Мвар	$U_{р},$ кВ	$d,$ град	$U_{ж},$ кВ	$Q_{ку},$ Мвар	$U_{р},$ кВ	$d,$ град
50	30	510	-226,496	510	-6,645	230	132,787	230	-18,331
100	60	510	-186,982	510	-7,783	230	133,291	230	-18,905
200	80	510	-144,963	510	-10,074	230	134,671	230	-20,070
300	100	510	-98,858	510	-12,390	230	136,559	230	-21,258
500	140	510	6,186	510	-17,117	230	141,955	230	-23,718
700	180	510	129,629	510	-22,007	230	149,708	230	-26,313
900	220	510	273,622	510	-27,115	230	160,158	230	-29,081
1000	260	510	374,259	510	-29,773	230	166,545	230	-30,545

Анализ полученных результатов показывает, что установка регулируемых компенсирующих устройств с достаточными диапазонами регулирования реактивными мощностями позволяют стабилизировать напряжения контролируемых узлов. Стабилизация уровня напряжения повышает надежность и качества электроэнергии с понижением потери активной мощности на ее транспорт.

Необходимый уровень стабилизации напряжения контролируемых узлов сети и типы компенсирующих устройств должны определяться на основе технико-экономического обоснования.

Из расчетов видно, что КУ, установленное на шинах 500 кВ ЕГПП, работает как в режиме потребления, так и в режиме генерации реактивной мощности в зависимости от передаваемой мощности по ЛЭП 500 кВ. КУ, установленное на шинах 220 кВ АГПП, работает только в режиме генерации реактивной мощности как в режимах наибольших, так и наименьших нагрузок.

### *Выводы*

Установка управляемых компенсирующих устройств в сетях 500-220 кВ повышает режимную надежность электроэнергетических систем. Выполненные расчеты показывают высокий потенциал и эффективность управления перетоками реактивной мощностью в повышении качественных показателей электроэнергии.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Воропай, Н.И. Электроэнергетические системы будущего / Н.И. Воропай, А.В. Осак // Энергетическая политика. – 2014. – № 5. – С. 60–63.
2. Шакарян, Ю.Г. Установившиеся режимы работы электроэнергетических систем с устройствами FACTS / Ю.Г. Шакарян, В.К. Фокин, А.П. Лихачев // Электричество. – 2013. – № 12. – С. 2–13.
3. Голов, В.П. Применение регулируемой компенсации линии электропередачи / В.П. Голов // Известия вузов. Энергетика. – 1978. – № 6. – С. 3–8.
4. FACTS: Modeling and Simulation in Power Networks / E. Acha, C.R. Fuerte-Esquivel, H. Ambriz-Perez, C. Angeles-Camacho // 1<sup>st</sup> Edn., John Wiley and Sons Inc., New York, 2004.
5. Осак, А.В. Повышение режимной надежности распределительных электрических сетей за счет установки источников реактивной мощности и оптимального управления ими / А.В. Осак, Д.А. Панасецкий, Е.Я. Бузина // Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики. Исследование и обеспечение надежности систем энергетики. Вып. 68; отв. ред. Н.И. Воропай. – Иркутск: ИСЭМ СО РАН, 2017. – С. 535–544.
6. Гераскин, О.Т. Графы электрической сети и топологические формулы / О.Т. Гераскин // Известия АН СССР. Энергетика и транспорт. – 1971. – № 4. – С. 66–75.
7. Development of topological method for calculating current distribution coefficients in complex power networks / D.S. Akhmetbaev, O.A. Aubakir, Y.Zh. Sarsikeyev, B.A. Bainiyazov, M.A. Surkov, V.I. Rozhko, G.N. Ansabekova, A.S. Yerbolova, A.T. Suleimenov, M.S. Tokasheva // Results in Physics. – 2017. – № 7. – Pp. 1644–1649.
8. Джандигулов, А.Р. Реализация нового топологического алгоритма расчета коэффициентов токораспределения в сложных электрических сетях / А.Р. Джандигулов, Д.С. Ахметбаев // Программа для ЭВМ. Свидетельство о внесении сведений в государственный реестр прав на объекты, охраняемые авторским правом. – № 1552 от 31 января 2019 г.
9. Джандигулов, А.Р. Нахождение всех остовных графов заданного графа / А.Р. Джандигулов, Д.С. Ахметбаев // Программа для ЭВМ. Свидетельство о внесении сведений в государственный реестр прав на объекты, охраняемые авторским правом. – № 1551 от 31 января 2019 г.
10. Modeling the Set Mode of Complex Power Grid, Based on Infeed Coefficients / D. Akhmetbaev, A. Akhmetbaev, A. Suleymenov, M. Kolcun // Proceedings of the 9<sup>th</sup> International Scientific Symposium, 12–14.09.2017, Stará Lesná, Slovak Republic // Elektroenergetika. – 2017.
11. Akhmetbaev, D.S. Topological algorithm for forming nodal stresses of complex networks energy systems / D.S. Akhmetbaev, A.R. Ozhandigulov, A.D. Akhmetbaev // Web of Conferences 139, 01066 (2019).
12. Akhmetbaev, D.S. New Approaches to the Topological Method of Analysis of Electrical Networks / D.S. Akhmetbaev, A.O. Akhmetbaev, A.R. Ozhandigulov // International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies, Far East Con, 2019.
13. Системный метод расчета мощностей компенсирующих устройств в электрических сетях энергосистем / Д.С. Ахметбаев, А.Д. Ахметбаев, А.Р. Айдарова, Е.К. Утегенов // Методические вопросы исследования надежности больших систем: Вып. 69. Надежность



развивающихся систем энергетики: в 2 кн. Кн. 2; отв. ред. Н.И. Воропай. – Иркутск: ИСЭМ СО РАН, 2018. – С. 421–429.

## О ПОВЫШЕНИИ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ 1150 КВ ЭКИБАСТУЗ – КОКШЕТАУ

*Ахметбаев Д.С.* – д-р техн. наук, доцент

*Досжанов Н., Иран Е.* – магистранты

Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева,  
г. Астана, Республика Казахстан

*АННОТАЦИЯ.* В работе рассмотрены влияния натуральных параметров линии электропередачи 1150 кВ на изменения ее волновых характеристик и параметров режима. Исходные условия исследования определены на основе анализа параметров линии электропередачи 1150 кВ, работающей в настоящее время на напряжении 500 кВ. Результаты исследования показали, что синхронизация линии со стороны Экибастуза без шунтирующих реакторов невозможна. Вынужденный переход расщепления фаз с восьмипроводной системы к трем проводам участка Экибастуз – Кокшетау существенно изменяет волновые параметры рассматриваемого участка ЛЭП 1150 кВ. Участки Кокшетау – Кустанай – Челябинск работают с расщеплениями фаз в восьмипроводной системе. Явно выраженная неоднородность в целом электропередачи 1150 кВ требует разработки методов повышения ее пропускной способности.

*КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:* длинная линия, четырехполюсник, волновое сопротивление, волновая длина.

### *Введение*

Разработка алгоритмов управления режимами длинной линии электропередачи сверхвысокого напряжения непосредственно связана с исследованиями линии с распределенными параметрами. Электромагнитные явления, происходящие в линии, характеризуются волновым сопротивлением и волновой длиной, которые определяются решением дифференциального уравнения второго порядка, составленного для ее элементарного участка. При этом можно пренебречь активной проводимостью с целью упрощения математического описания длинной линии электропередачи, которое имеет вид [1]:

$$\begin{aligned} \dot{U}_1 &= \dot{U}_2 \cos \lambda + j \dot{I}_2 \dot{Z}_\lambda \sin \lambda; \\ \dot{I}_1 &= j \frac{\dot{U}_2}{\dot{Z}_\lambda} \sin \lambda + \dot{I}_2 \cos \lambda, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $\lambda = \omega \sqrt{L_0 C_0} l$  – волновая длина линии;  $l$  – длина линии;  $Z_\lambda = \sqrt{\frac{L_0}{C_0}}$  – волновое сопротивление.

*Натуральные волновые параметры электропередачи*

В работе рассматривается реальная электропередача Экибастуз – Челябинск с общей протяженностью линии около 1000 км, с промежуточными отборами мощности, которая моделировалась цепочечной схемой с длиной участков по 100 км с погонными параметрами:

$$r_0 = 0,011 \text{ Ом/км}, x_0 = 0,27 \text{ Ом/км}, b_0 = 4,38 \text{ мкСм /км}.$$

В качестве иллюстрации закономерностей изменений реактивной мощности и напряжения по линии рассмотрен участок линии Экибастуз – Кокшетау. В режиме натуральной мощности векторы тока и напряжения вдоль всей линии остаются постоянными по модулю. Изменение вектора напряжения по фазе вызывается падениями напряжения в элементах индуктивности, которые опережают на 90 градусов векторы тока в данной точке линии. Для приближенной оценки модуля вектора падения напряжения на воздушных линиях переменного тока с частотой 50 Гц справедливо выражение [2]

$$\Delta U_L \approx 0,001 \cdot l \cdot U. \quad (2)$$

Следовательно, индуктивное падение напряжения на участке Экибастуз – Кокшетау, с длиной воздушной линии 494,26 км, работающей на напряжении 500 кВ, составляет 247,13 кВ.

В режиме натуральной мощности вектор тока в линии по величине остается постоянным, а по фазе изменяется под действием емкостного тока на тот же угол, что и вектор напряжения. Емкостный ток линии равен

$$I_c = \omega C_0 \cdot l \cdot U, \quad (3)$$

который преобразуется для воздушных линий переменного тока с частотой 50 Гц и запишется в виде [2, 3]

$$I_c = 0,001 \cdot l \cdot I,$$

где  $I$  – ток линии в режиме натуральной мощности.

Отсюда видно, что емкостный ток линии длиной около 500 км равен половине нагрузочного тока линии.

После реконструкции участка ЛЭП 1150 кВ Экибастуз – Кокшетау электропередача моделируется цепочечной схемой с погонными параметрами:

$$r_0 = 0,029 \text{ Ом/км}, x_0 = 0,3496 \text{ Ом/км}, b_0 = 3,18 \text{ мкСм /км}.$$

Значения волновых сопротивлений электропередачи до и после реконструкции равны:

$$1) \text{ до реконструкции } Z_B = \sqrt{\frac{x_0}{b_0}} = \sqrt{\frac{0,27}{4,38}} \cdot 10^6 = 248,28 \text{ Ом};$$

$$2) \text{ после реконструкции } Z_B = \sqrt{\frac{x_0}{b_0}} = \sqrt{\frac{0,3496}{3,18}} \cdot 10^6 = 331,57 \text{ Ом}.$$

Натуральная мощность электропередачи Экибастуз – Кокшетау после реконструкции ЛЭП 1150 кВ существенно уменьшается и становится равной 754 МВт вместо 1007 МВт. Отсюда и возникает проблема о необходимости повышения пропускной способности участка электропередачи 1150 кВ Экибастуз – Кокшетау.

#### *Компенсация параметров линии электропередачи*

К технически работоспособным линиям относятся короткие линии или, в общем случае, линии, кратные полуволновой. С целью обеспечения устойчивости и пропускной способности электропередачи, отличной от естественной, искусственно изменяют ее параметры в ту или иную сторону с помощью компенсации. Под продольной компенсацией понимается изменение индуктивности линии по поперечной ее емкости [4]. Волновое сопротивление и волновая длина линии, имеющей продольную компенсацию, определяются в виде:

$$Z_\lambda = \sqrt{\frac{L_0 + \Delta L}{C_0}} = Z_{\lambda_0} \sqrt{1 + \frac{\Delta L}{L_0}}; \quad (4)$$

$$\lambda = \omega l_0 \cdot \sum \sqrt{(L_0 + \Delta L)C_0} = \lambda_0 \sqrt{1 + \frac{\Delta L}{L_0}}, \quad (5)$$

где  $L_0$ ,  $C_0$  – индуктивность и емкость единицы длины исходной линии;  $\Delta L$  – компенсационная добавка продольной индуктивности;  $Z_0$ ,  $\lambda_0$  – волновое сопротивление и волновая длина исходной линии;  $Z$ ,  $\lambda$  – волновое сопротивление и волновая длина компенсированной линии.

Из формулы (5) видно, что продольная индуктивная компенсация увеличивает естественную индуктивность линии и увеличивает ее волновую длину. Возрастает волновое сопротивление, что ведет к снижению натуральной мощности электропередачи (6):

$$P = \frac{U^2}{Z_\lambda} = \frac{U^2}{Z_0 \sqrt{1 + \frac{\Delta L}{L_0}}} = \frac{P_0}{\sqrt{1 + \frac{\Delta L}{L_0}}}. \quad (6)$$

Использование емкостной поперечной компенсации увеличивает волновую длину и одновременно ее пропускную способность.

$$\lambda = \omega l_0 \cdot \sqrt{(C_0 + \Delta C)L_0} = \omega l_0 \cdot \sqrt{L_0 C_0} \cdot \sqrt{1 + \frac{\Delta C}{C_0}} = \lambda_0 \sqrt{1 + \frac{\Delta C}{C_0}}, \quad (7)$$

$$P = \frac{U^2}{Z_\lambda} = \frac{U^2}{Z_{\lambda_0}} \cdot \sqrt{1 + \frac{\Delta C}{C_0}} = P_0 \sqrt{1 + \frac{\Delta C}{C_0}}. \quad (8)$$

Поперечная индуктивная компенсация уменьшает волновую длину и ее пропускную способность. Таким образом, совместно используя продольную и поперечную компенсацию, можно придать любые заданные наперед технические свойства для исходной линии [4].

#### *Выводы*

1. Полученные выводы могут быть использованы для произвольной длины физической линии.

2. Предложенные достаточно простые выражения позволяют проанализировать процессы, происходящие в длинной линии электропередачи.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Веников, В.А. Дальние электропередачи / В.А. Веников. – М.: Госэнергоиздат, 1960. – 312 с.
2. Электрические системы: в 3 т. Т. 3. Передача энергии переменным и постоянным током высокого напряжения / под ред. В.А. Веникова. – М.: Высшая школа, 1972. – 368 с.
3. Веников, В.А. Дальние электропередачи переменного и постоянного тока / В.А. Веников, Ю.П. Рыжов. – М.: Госэнергоатомиздат, 1985. – 272 с.
4. Технические и экономические характеристики настроенных электропередач / Г.В. Воробьев, Т.В. Заславская, А.Х. Калюжный, Э.С. Лукашов и др.; под ред. Щербакова. – Новосибирск: Наука, 1965. – 68 с.
5. Щербаков, В.К. Последовательно-параллельная схема связи промежуточных энерго-систем с дальними передачами / В.К. Щербаков, Г.В. Воробьев. – Новосибирск: НТОЭП, 1963. – 50 с.
6. Щербаков, В.К. Передача электроэнергии на расстояние 1500–3000 км / В.К. Щербаков. – Новосибирск: Сибирское отделение АН СССР, 1963. – 170 с.

### ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ И ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЕЙ

*Ахметбаев Д.С.*<sup>1</sup> – д-р техн. наук, доцент

*Досайбекова Н.*<sup>2</sup>, *Абдикарим Н.*<sup>2</sup> – магистранты

<sup>1</sup>Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева,  
г. Астана, Республика Казахстан

<sup>2</sup>Южно-Казахстанский университет им. М. Ауэзова,  
г. Чимкент, Республика Казахстан

*АННОТАЦИЯ. В работе анализируется системный подход повышения надежности и пропускной способности распределительных сетей в условиях*

роста потребляемой электрической энергии с обеспечением качества электроэнергии. Строительство новых подстанций и линий становятся острой проблемой для подключения вновь созданных потребителей. Поэтому использование существующих методов и средств повышения надежности и пропускной способности для реконструкций существующих распределительных сетей во многих случаях могут стать экономически выгодней, чем строительство новых линий и распределительных пунктов.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** качество электроэнергии, электрическая сеть, конденсаторное устройство

### Введение

Повышение качества электроэнергии в распределительной электрической сети в условиях роста нагрузки является актуальной проблемой [1]. С одной стороны, это объясняется тем, что электрические сети развиваются медленными темпами по сравнению с развитием потребителей электроэнергии, с другой – воздушные линии электропередачи напряжениями 10, 35 и 110 кВ охватывают значительную часть территории Казахстана и имеют огромную протяженность. В связи с этим встает вопрос о реконструкции существующих сетей с целью увеличения их пропускной способности. Острой проблемой также становится строительство новых линий для подключения вновь созданных потребителей с улучшением показателей качества электроэнергии [2]. Избежать этих проблем помогут разработки ряда мероприятий по модернизации существующих линий электропередачи с применением нового оборудования, в частности, устройств FACTS, оснащенных силовой электроникой.

### Анализ режимов существующей распределительной сети

Моделируется участок распределительной сети 10 кВ ПС 35/10 кВ «Валиханова», где производилось исследование. Однолинейная схема с параметрами сети представлена на рис. 1. Расчетные параметры сети приведены в табл. 1. Задача исследования заключается в определении мощностей компенсирующих устройств с целью обеспечения желаемого уровня напряжения каждого потребителя в области допустимых режимов.

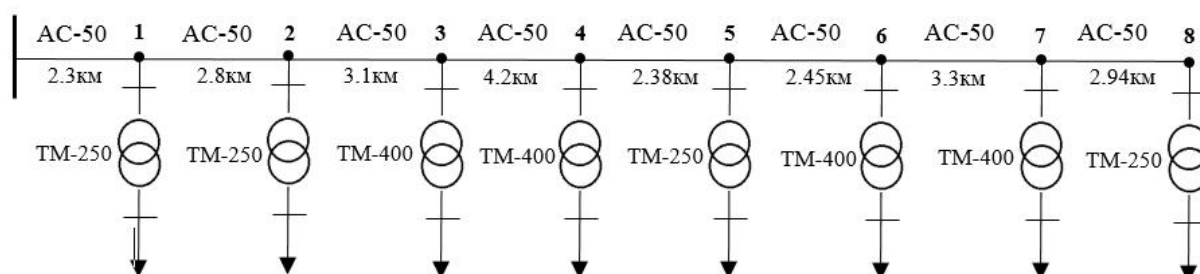


Рис. 1. Однолинейная схема распределительной сети

**Исходные данные линии электропередачи  
для расчета режима электрической сети**

№ участка	Марка и сечение провода	Длина, км	$R_0$ , Ом/км	$X_0$ , Ом/км	$Z$ , Ом
1	АС-50	2,30	0,595	0,392	$1,368 + j0,902$
2	АС-50	2,80	0,595	0,392	$1,666 + j1,098$
3	АС-50	3,10	0,595	0,392	$1,845 + j1,215$
4	АС-50	4,20	0,595	0,392	$2,499 + j1,646$
5	АС-50	2,38	0,595	0,392	$1,416 + j0,933$
6	АС-50	2,45	0,595	0,392	$1,458 + j0,960$
7	АС-50	3,30	0,595	0,392	$1,963 + j1,294$
8	АС-50	2,94	0,595	0,392	$1,749 + j1,152$

В настоящее время существенно возрастает потребляемая электроэнергия района, и ожидаемые узловые нагрузки представлены в виде матрицы

$$S = \begin{bmatrix} S_{p1} \\ S_{p2} \\ S_{p3} \\ S_{p4} \\ S_{p5} \\ S_{p6} \\ S_{p7} \\ S_{p8} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,123 - j0,034 \\ 0,120 - j0,031 \\ 0,189 - j0,042 \\ 0,185 - j0,052 \\ 0,111 - j0,037 \\ 0,184 - j0,057 \\ 0,193 - j0,047 \\ 0,126 - j0,031 \end{bmatrix}.$$

Анализ режимов производится решением топологического уравнения [3]

$$U = U_0 - C^T \cdot Z_B \cdot C \cdot U_d^{-1} \cdot S, \quad (1)$$

где  $C$  – прямоугольная комплексная матрица коэффициентов токораспределения;  $Z_B$  – диагональная матрица сопротивлений ветвей;  $U_d$  – диагональная матрица узловых сопряженных напряжений;  $S$  – матрица-столбец сопряженных мощностей узловых нагрузок и генераторов;  $U_0$  – напряжение базисного узла;  $T$  – знак транспонирования матрицы.

Для рассматриваемой сети матрица коэффициентов распределения квадратная и равна [2]

$$C = M^{-1}, \quad (2)$$

где  $M$  – первая матрица инциденций.

Принимая  $U_0 = 10,5$  кВ и напряжения узлов равными номинальным значениям, в режиме максимальных нагрузок имеем

$$U = U_0 - C^T \cdot Z_n \cdot C \cdot U_n^{-1} \cdot S = \begin{bmatrix} S_{p1} \\ S_{p2} \\ S_{p3} \\ S_{p4} \\ S_{p5} \\ S_{p6} \\ S_{p7} \\ S_{p8} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 10,302 - j0,066 \\ 10,085 - j0,138 \\ 9,87 - j0,209 \\ 9,633 - j0,285 \\ 9,53 - j0,318 \\ 9,444 - j0,347 \\ 9,371 - j0,373 \\ 9,346 - j0,382 \end{bmatrix} \text{ кВ.}$$

График отклонения напряжения максимального режима представлен на рис. 2.

$U$ , кВ

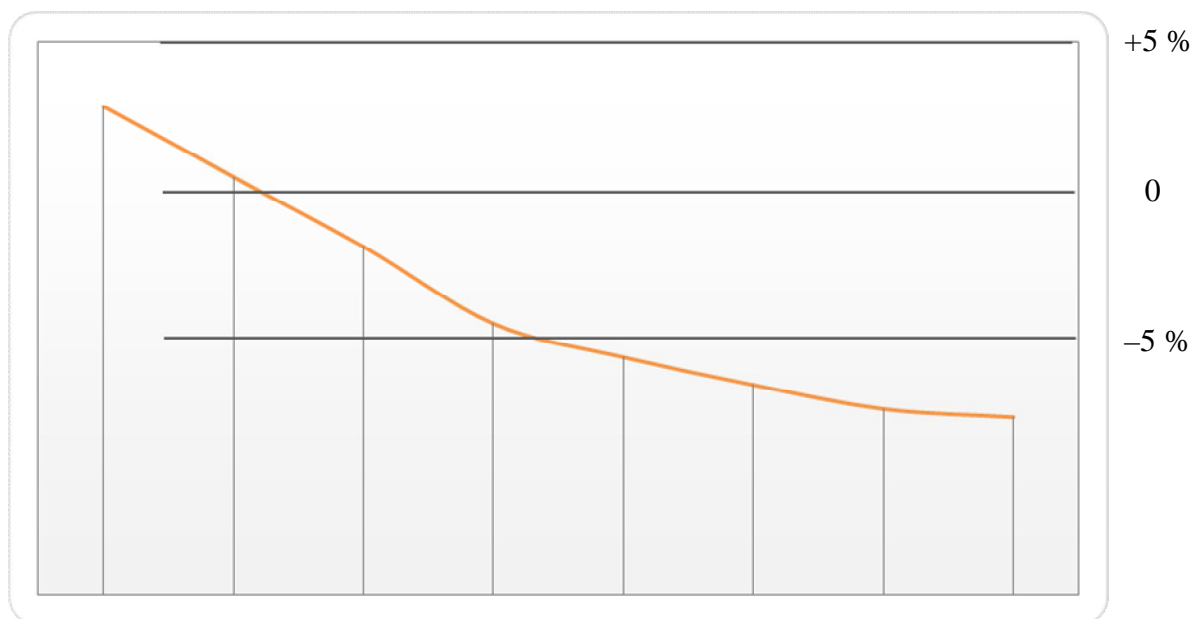


Рис. 2. График отклонения напряжения максимального режима

Из проведенных расчетов видно, что значения падения напряжения лежат в допустимых пределах только для первых пяти участков. Для всех остальных пунктов необходима компенсация. Предположим, что экономически обоснованные желаемые значения напряжения узлов заданы:  $U_{1ж} = 10,325$  кВ,  $U_{2ж} = 10,136$  кВ,  $U_{3ж} = 9,953$  кВ,  $U_{4ж} = 9,758$  кВ,  $U_{5ж} = 9,679$  кВ,  $U_{6ж} = 9,618$  кВ,  $U_{7ж} = 9,582$  кВ,  $U_{8ж} = 9,580$  кВ, и требуется найти мощности компенсирующих устройств, обеспечивающих заданный режим.

Если исходить из обеспечения желательных напряжений узлов, при известном их значении до компенсации реактивной мощности, то справедливо линейное уравнение [3, 4]

$$\omega_{U_i}(Q_k) = -U_{i\text{ж}} + U_i - \sum_{j=1}^n Z_{ij} \cdot U_{j\text{ж}}^{-1} \cdot Q_{kj} \cdot \sin \Psi_{ij} = 0, \quad (3)$$

где  $U_i$  – напряжение  $i$ -го узла до компенсации;  $X = Z \sin \psi$  – реактивное сопротивление сети.

Решение системы (3) относительно мощности компенсирующих устройств имеет вид, МВАр:

$$Q_{\text{ку}} = \begin{bmatrix} 0,075 \\ 0,069 \\ 0,074 \\ -0,148 \\ 0,319 \\ 0,120 \\ 0,005 \\ -0,144 \end{bmatrix}.$$

Установка статических компенсирующих устройств с мощностями, определенными выше, в соответствующие узлы схемы должна обеспечить желаемые значения напряжений. С целью проверки правильности утверждения следует провести расчеты режима с учетом реактивных мощностей компенсирующих устройств. Матрица узловых мощностей с учетом компенсирующих устройств, МВА, имеет вид

$$S = \begin{bmatrix} S_{p1} \\ S_{p2} \\ S_{p3} \\ S_{p4} \\ S_{p5} \\ S_{p6} \\ S_{p7} \\ S_{p8} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,123 - j0,041 \\ 0,12 - j0,038 \\ 0,189 - j0,032 \\ 0,185 - j0,2 \\ 0,111 - j0,282 \\ 0,184 - j0,063 \\ 0,193 - j0,042 \\ 0,126 - j0,171 \end{bmatrix},$$

а значения напряжений узлов, кВ, будут равными



$$U = U_0 - C^T \cdot Z_B \cdot C \cdot U_D^{-1} \cdot S = \begin{bmatrix} 10,335 \\ 10,151 \\ 9,964 \\ 9,753 \\ 9,678 \\ 9,591 \\ 9,501 \\ 9,5 \end{bmatrix}.$$

Для наглядности анализа полученные результаты представлены в табл. 1. Как видно из таблицы, значения узловых напряжений после установки компенсирующих установок соответствуют желаемым их значениям.

Полученный алгоритм определения мощности компенсирующих устройств позволяет регулировать напряжение каждого потребителя исходя из условий обеспечения экономически обоснованного уровня напряжения. Такой подход может стимулировать и повысит ответственность потребителей за поддержание качества потребляемой электроэнергии.

Таблица 1

Сравнительная оценка расчетов

Мощности узловых нагрузок $P + jQ$ , МВА	Напряжение узлов без учета компенсации $U$ , кВ	Желаемые значения узловых напряжений $U_{ж}$ , кВ	Мощности компенсирующих устройств $Q_{ку}$ , МВАр	Узловые мощности с учетом компенсации устройств $P + j(Q - Q_{ку})$ , МВА	Расчетные значения желаемых напряжений $U_{жр}$ , кВ	Погрешности, %
$0,123 + j0,034$	10,300	10,325	0,075	$0,123 - j0,041$	10,335	-0,010
$0,12 + j0,031$	10,085	10,136	0,069	$0,12 - j0,038$	10,151	-0,015
$0,189 + j0,042$	9,870	9,953	0,074	$0,189 - j0,032$	9,964	-0,011
$0,185 + j0,052$	9,633	9,758	-0,148	$0,185 + j0,2$	9,753	0,005
$0,111 + j0,037$	9,530	9,679	0,319	$0,111 - j0,282$	9,678	0,001
$0,184 + j0,057$	9,444	9,618	0,120	$0,184 - j0,063$	9,591	0,027
$0,193 + j0,047$	9,371	9,582	0,005	$0,193 - j0,042$	9,501	0,081
$0,126 + j0,031$	9,346	9,580	-0,140	$0,126 + j0,171$	9,500	0,080

### *Выводы*

Многовариантная задача определения мощности и места установки компенсирующих устройств может быть решена на основе системного подхода.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Управление качеством электроэнергии учеб. пособие / И.И. Карташев, В.Н. Тульский, Р.Г. Шамонов, Ю.В. Шарова. – М.: Издательский дом МЭИ, 2008. – 355 с.
2. Железко, Ю.С. Компенсация реактивной мощности и повышение качества электроэнергии / Ю.С. Железко. – М.: Электроатомиздат, 1985. – 224 с.
3. Ахметбаев, Д.С. Метод расчета установившихся режимов электрических сетей на основе коэффициентов токораспределения / Д.С. Ахметбаев // Электричество. – 2010. – № 11. – С. 23–27.
4. Ахметбаев, Д.С. Топологический метод формирования узловых уравнений в обращенной форме для электроэнергетических систем / Д.С. Ахметбаев, А.Д. Ахметбаев, А.С. Бердыгожин // Электричество. – 2018. – № 5. – С.18–27.

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВНЕДРЕНИЯ КОМБИНИРОВАННЫХ ДАТЧИКОВ ТОКА И НАПРЯЖЕНИЯ ДЛЯ БОРЬБЫ С ПЕРЕНАСЫЩЕНИЕМ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ**

*Бармина М.А.* – студент

*Плотников А.С.* – ст. преподаватель

Филиал ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» в г. Волжском

*АННОТАЦИЯ. В статье рассматривается проблема энергетики с точки зрения внедрения современных технологий, влияющих на безопасность работы сети, в частности, изучается вопрос перенасыщения трансформатора, а также рассматриваются преимущества модернизации сетей путем внедрения новых устройств – комбинированных датчиков тока и напряжения.*

*КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: датчики тока и напряжения, трансформатор, перенасыщение, модернизация, катушка Роговского.*

*ANNOTATION. This article examines the issues of energy from the perspective of implementing modern technologies that affect network safety, specifically addressing the issue of transformer saturation and the advantages of upgrading networks through the introduction of new devices – combined current and voltage sensors.*

*KEYWORDS: current and voltage sensors, transformer, saturation, upgrading, Rogowski coil.*

На сегодняшний день в России доля внедрения нового оборудования или модернизация старого находится на критически низком показателе в 15 %. Средний возраст оборудования составляет 34 года, а более 30 % от всего

оборудования старше 45 лет. Есть несколько причин отсутствия усовершенствования энергетической отрасли.

- *Страх.* Оборудование, заложенное во времена СССР, уже знакомо и привычно, стабильно обеспечивает потребителей электроэнергией, исправно работает на протяжении всего срока службы, несмотря на то что имеет выработанный на 100 % ресурс.

- *Отсутствие финансов.* Оборудование, которое закладывается в модернизацию, дорожает, из-за этого происходит увеличение затрат на строительство. С данной проблемой связана и экономия на энергетической сфере, путем замены старого оборудования ( $\geq 40$  лет) на такое же, только новое.

- *Кадровый дефицит.* Большая проблема энергетической отрасли – нехватка кадров, в частности молодого поколения. Взрослое поколение не стремится внедрять новые технологии и обучаться новому, их сложно переучить, это существенно влияет на внедрение новых технологий на предприятия. Также необходимо отметить, что энергетическая отрасль испытывает дефицит в специалистах, знающих свое дело.

Все вышесказанное ведет к снижению безопасности энергетической системы как для работы человека, так и для оборудования, установленного на предприятиях. Но внедрение нового является неотъемлемой частью нашей жизни, так как мир развивается и нам необходимо двигаться в сторону нового.

В данной статье рассмотрены тема насыщения (перенасыщения) трансформатора и один из способов ее решения с помощью современных комбинированных датчиков тока и напряжения.

Употребляя слово «трансформатор», стоит дать определение термину. Измерительный трансформатор – электрический трансформатор, предназначенный для измерения и контроля (например, в системах релейной защиты сетей) напряжения, тока или фазы электрического сигнала переменного тока промышленной частоты (50 или 60 Гц) в контролируемой цепи. Так как доля старого оборудования составляет большую часть нашей энергосистемы, данный прибор состоит из ферромагнитного сердечника и обмоток (первичной, вторичной). В привычном нам трансформаторе, именно начиная со строения, кроется определение насыщения и проблематика перенасыщения этого устройства. Материал, из которого выполнен сердечник, является ферромагнетиком, который обладает такими негативными свойствами, как насыщение, гистерезис, магнитострикция.

При подаче переменного напряжения на первичную обмотку оно создает переменное магнитное поле в сердечнике, которое, в свою очередь, индуцирует переменное напряжение на вторичной обмотке. Однако при достижении определенного значения напряжения магнитный поток в сердечнике трансформатора может достичь максимального значения, и дальнейшее увеличение напряжения уже не приводит к увеличению магнитного потока. Это состояние называется насыщением трансформатора. Оно оказывает негативное влияние на трансформатор, такое как нагрев обмоток, повышенные потери энергии, возникновение

шумов и помех, взрыв устройства. Таким образом, классические измерительные трансформаторы нельзя отнести к безопасным приборам.

Исследования в области перенасыщения измерительных устройств основываются на дополнительных устройствах для минимизации пагубных влияний или на применении совершенно новых технологий.

Российская научно-производственная группа компаний «Таврида-Электрик» специализируется не только на разработке, но и на научных исследованиях. Одной из таких разработок являются КДТН (комбинированные датчики тока и напряжения). Данная разработка позволяет забыть коэффициент трансформации, количество обмоток, мощность обмоток, класс точности обмоток, коэффициент безопасности, коэффициент предельной кратности, догрузочные сопротивления, изменение нагрузки, контроль токовых цепей, потери точности измерений при ОЗЗ (рис. 1).

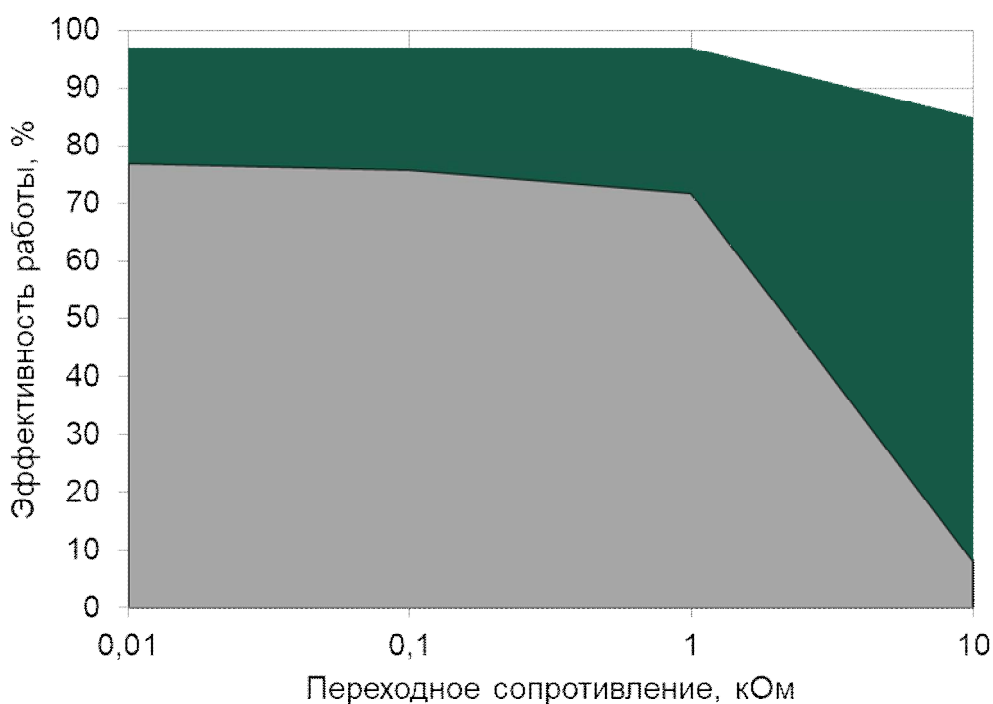


Рис. 1. Вольт-амперная характеристика КДТН

Номер госреестра: 72776-18.

Методика проверки: МП-НИЦЭ-008-22 (табл.).

#### Общие характеристики КДТН

Наименование характеристик	Значение
1	2
Для датчиков напряжения	
Наибольшее рабочее напряжение $U_{\text{раб}}$ , кВ	$12/\sqrt{3}$
Номинальное первичное напряжение $U_{\text{ном1}}$ , кВ	от $6/\sqrt{3}$ до $10/\sqrt{3}$

Окончание табл.

1	2
Диапазон коэффициента масштабного преобразования, мВ/кВ	от 30 до 35
Класс точности	0,5
Номинальная частота переменного тока, Гц	от 48 до 51
Для датчиков тока	
Номинальный первичный ток $I_{ном1}$ , А	50
Номинальный расширенный коэффициент первичного тока, $k_{ПРном}$	20
Диапазон коэффициента масштабного преобразования, В/кА	от 2,97 до 3,03
Класс точности	0,5S
Номинальная частота переменного тока, Гц	от 48 до 51

КДТН представляют собой три датчика фазных токов (катушки Роговского), три датчика фазных напряжений (емкостно-резистивные делители), датчик тока нулевой последовательности (рис. 2).



Рис. 2. Общий вид КДТН

Датчик фазных напряжений основан на делении высокого напряжения переменного тока первичной обмотки с помощью емкостного делителя напряжения. Преимущества: измерение на каждом присоединении, отсутствие феррорезонанса.

Датчик тока нулевой последовательности основан с целью защиты высоковольтных линий от однофазных КЗ. Контроль значения ЗИО на линии электросети. Преимущества: измерение тока от 0,1 А.

В датчике фазных токов используется катушка Роговского, которая состоит из провода, намотанного на немагнитный (без насыщения) сердечник. Основное отличие от классических трансформаторов – воздушный сердечник. Если в старых устройствах именно ферромагнетики являлись причиной насыщения, то в данных датчиках это невозможно, в результате чего характеристика

линейна. Катушка Роговского располагается вокруг проводника, через который проходит измеряемый ток. При прохождении первичного тока через катушку Роговского создается магнитный поток, который воздействует на обмотку катушки, в результате чего на выводах обмотки возникает напряжение. Величина этого напряжения пропорциональна изменению измеряемого тока.

Отличительная особенность катушки Роговского от традиционных трансформаторов тока в том, что выходным сигналом катушки Роговского является напряжение, пропорциональное производной измеряемого тока. Катушка Роговского работает на частоте основной гармоники, равной 50 Гц. Преимущества: отсутствие насыщения магнитопровода, широкий диапазон измерений, отсутствие остаточной намагничиваемости.

В общем случае КДТН работают в составе определенных устройств, таких как вакуумные выключатели, реклоузеры, ячейки КРУ. Рассматривать их эффективность стоит также в составе этих устройств, так как они являются незаменимым составляющим РЗА. Основное преимущество КДТН в сравнении с классическими ТТ – это безопасность как для человека, так и для самой сети.

1. Необслуживаемость персоналом.
2. Просматриваемость линии.
3. Устройства, не подверженные насыщению.

#### *Выводы*

Каждый год создаются и проектируются новые решения по усовершенствованию старого оборудования. Оставаясь на месте, не модернизируя производство и не внедряя современные технологии, мы можем потерять гораздо больше. Применяя же новые устройства, можно сделать жизнь не только проще, но и безопаснее – тому следует пример КДТН. Эти устройства решают проблемы не только перенасыщения, но и ряд других важных вопросов, связанных с безопасностью как персонала, так и оборудования.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Реклоузер вакуумный серии РВА/TEL: руководство по эксплуатации [Электронный ресурс]. – URL: [https://www.tavrida.ru/upload/iblock/e3c/3pvmgfgq5yunllo8edx85arw9z9455jdy/ter\\_recdoc\\_ug\\_10.pdf](https://www.tavrida.ru/upload/iblock/e3c/3pvmgfgq5yunllo8edx85arw9z9455jdy/ter_recdoc_ug_10.pdf).
2. Датчики тока и напряжения комбинированные VCS\_SMART\_1: описание типа средства измерений [Электронный ресурс]. – URL: <https://all-pribors.ru/docs/72776-18.pdf>.

## ДИАГНОСТИКА РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ НА ОСНОВЕ МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

*Бондаренко Н.В.* – студент

*Галицкий Д.С.* – ст. преподаватель

Филиал ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» в г. Волжском

*АННОТАЦИЯ.* В статье рассматривается перспектива внедрения искусственного интеллекта в микропроцессорную релейную защиту. Освещены значительные преимущества и глубокий потенциал искусственных нейронных сетей (ИНС). Исследованы ключевые характеристики ИНС, такие как параллельная обработка информации, обучаемость и их способность адаптироваться к изменениям в нормальных параметрах системы.

*КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:* нейросетевое моделирование, перцептрон, обучение релейной защиты, машинное обучение.

*ABSTRACT.* This article explores the perspective of integrating artificial intelligence into microprocessor-based relay protection systems. The significant advantages and profound potential of artificial neural networks (ANNs) are highlighted, including their key characteristics such as parallel information processing, trainability, and adaptability to changes in normal system parameters. The study focuses on neural network modeling, perceptron technology, and the application of machine learning in relay protection training.

*KEYWORDS:* neural network modeling, perceptron, relay protection training, machine learning.

### *Введение*

Фрэнк Розенблатт в 1957 году впервые предложил архитектуру искусственной нейронной сети, названную перцептроном, в качестве модели для обучения с учителем. В то время никто не мог предположить, насколько будут актуальны и незаменимы нейросети в будущем.

В настоящее же время можно с уверенностью сказать, что искусственные нейронные сети (ИНС) обладают значительными возможностями и глубоким потенциалом. Они способны обрабатывать информацию параллельно, в отличие от последовательной обработки, что существенно ускоряет процесс.

Одной из ключевых характеристик искусственных нейронных сетей является их обучаемость, в рамках которой настраиваются связи между нейронами. Используемые в различных областях, таких как распознавание образов, прогнозирование и экономика, искусственные нейронные сети, применяемые в релейной защите автоматизированных систем, могут самостоятельно определять уставки срабатывания на основе анализа примеров аварийных режимов. Это отличается от традиционной релейной защиты, где уставки рассчитываются и устанавливаются заранее.

Кроме того, искусственные нейронные сети обладают способностью адаптироваться к изменениям нормальных параметров работы системы, таким как отключение части нагрузки. Благодаря возможности прогнозирования система релейной защиты на основе искусственных нейронных сетей может сокращать или полностью устранять временные задержки перед срабатыванием защиты еще до возникновения короткого замыкания.

На сегодняшний день искусственный интеллект становится одним из самых популярных направлений в развитии информационных технологий.

*Преимущества машинного обучения  
в диагностике релейной защиты*

1. *Выявление аномалий и неисправностей.* Машинное обучение позволяет создавать модели, способные обнаруживать аномалии и неисправности в работе релейной защиты. Это особенно полезно для оперативного выявления потенциальных проблем, которые могут привести к сбоям в системе.

2. *Автоматизация диагностики.* Алгоритмы машинного обучения обеспечивают автоматизацию процесса диагностики релейной защиты. Это ускоряет выявление неисправностей, снижает нагрузку на операторов и сокращает время реакции на проблемы, что важно для обеспечения непрерывности работы электроэнергетических систем.

3. *Адаптивность к изменениям.* Модели машинного обучения способны адаптироваться к изменениям в работе электроэнергетических систем. Они могут учитывать изменения в нормальных параметрах работы, что делает диагностику более гибкой и эффективной, особенно в условиях динамичной среды.

4. *Предсказание потенциальных отказов.* Машинное обучение позволяет создавать прогностические модели, которые способны предсказывать потенциальные отказы в релейной защите. Это дает возможность оперативно принимать меры по предотвращению сбоев и обеспечивает более надежную работу системы защиты.

*Недостатки машинного обучения*

1. *Отсутствие стандартной методологии определения уставок.* Машинное обучение не всегда предоставляет явные стандартные методики определения уставок срабатывания защиты. Это может создавать трудности в интерпретации результатов и требовать дополнительных усилий для настройки алгоритмов под конкретные условия.

2. *Не всегда точные решения.* В зависимости от качества обучающих данных и выбора модели результаты машинного обучения могут быть не всегда точными. В некоторых случаях алгоритмы могут давать ложные срабатывания или упускать реальные проблемы, что создает потребность в постоянном улучшении и настройке системы.

3. *Сложность интерпретации решений.* Модели машинного обучения, особенно глубокие нейронные сети, могут быть сложными в интерпретации. Операторы системы могут столкнуться с трудностью объяснения принятых



алгоритмом решений, что затрудняет понимание причин возможных неисправностей и принятие соответствующих мер.

4. *Требуется большое количество обучающих данных.* Для достижения высокой точности и эффективности работы моделей машинного обучения требуется большое количество обучающих данных. В некоторых случаях сложно собрать достаточное количество репрезентативных данных, особенно при редких событиях, таких как аварийные режимы электрической сети.

#### *Пример использования ИНС*

Нейросетевое моделирование МТЗ. Для этого при пороге срабатывания в 300 А используем выборку, состоящую из значений токов в каждой из фаз электрической сети, и соответствующий механизм срабатывания МТЗ при значении хоть одного из фазных токов, превосходящих порог в 300 А. Для обучения ИНС генерируются значения токов каждой из фаз с использованием независимых случайных нормально распределенных величин со средним значением 300 А и полушириной распределения 30 А.

Схема нейросетевой модели на основе персептрона показана на рисунке. На входные нейроны подаются значения токов каждой из фаз электрической сети. На выходе ИНС вычисляет значение, соответствующее сигналу срабатывания МТЗ.

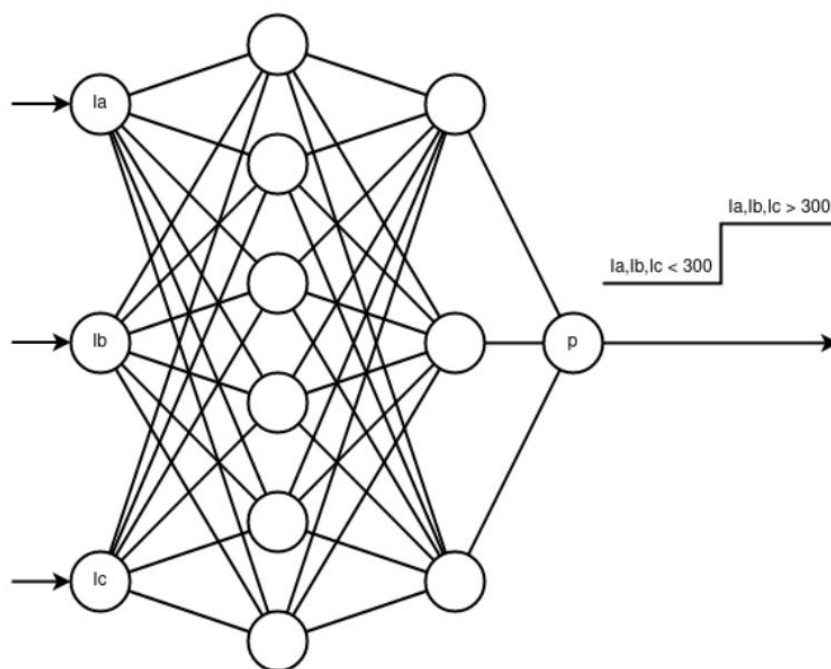


Рисунок. Структура ИНС для МТЗ

Как показано на рисунке, данной конфигурации ИНС достаточно для распознавания режимов МТЗ превышения порога для трех фаз. Данная нейромодель может обучаться с помощью выборки, состоящей минимум из 500 значений тока в каждой из фаз электрической сети. При этом погрешность в определении порога срабатывания не превышает 1 А. Для обучения использован

алгоритм упругого обратного распространения (resilient back propagation, Rprop), который обеспечивает быструю и точную сходимость решаемой задачи.

#### *Выводы*

В статье была исследована возможность интеграции искусственного интеллекта в микропроцессорную релейную защиту. Проанализированы основные плюсы и минусы различных технологий искусственного интеллекта и на основе этого проведенного анализа сделаны выводы относительно целесообразности интеграции нейронных сетей в функциональность релейной защиты.

Искусственные нейронные сети обладают заметными преимуществами по сравнению с алгоритмами, основанными на элементах нечеткой логики и генетических алгоритмах.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ivanov, S. Neuro Algorithm Accuracy Evaluation for The Anomalies Detecting in Over-current Protection Operation / S. Ivanov, M. Nikandrov, A. Lariukhin // International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon), 2021. – Pp. 116–120.
2. Автоматизация устройств микропроцессорной релейной защиты на основе использования нейросетевых технологий / В.Н. Сизых, А.В. Данеев, М.В. Востриков, К.В. Менакер // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2021. – № 11. – С. 324–337.
3. Основин, Д.И. Применение информационных признаков короткого замыкания в логике работы микропроцессорной релейной защиты / Д.И. Основин // Научно-техническое и экономическое сотрудничество стран АТР в XXI веке. – 2023. – Т. 2. – С. 39–45.

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ВОЗБУЖДЕНИЯ СИНХРОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ**

*Ботов Д.А.* – студент

*Зенина Е.Г.* – канд. техн. наук, доцент

Филиал ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» в г. Волжском

*АННОТАЦИЯ. Современные электростанции сталкиваются с вызовами динамично меняющегося энергетического сценария, что подчеркивает важность разработки и совершенствования систем автоматического регулирования возбуждения синхронных генераторов. Данная тема является актуальным направлением исследований, поскольку эффективное функционирование этих систем прямо влияет на стабильность и надежность электроснабжения. В статье, с помощью программного комплекса SiminTech представлены зависимости напряжения возбуждения от изменения уставок и тока возбуждения.*

*КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: синхронный генератор, система возбуждения, напряжение возбуждения, переходные процессы.*

**ABSTRACT.** Modern power plants face the challenges of a dynamically changing energy scenario, which emphasizes the importance of developing and improving automatic excitation control systems for synchronous generators. This topic is a current area of research, since the effective operation of these systems directly affects the stability and reliability of power supply. The article, using the SiminTech software package, presents the dependences of the excitation voltage on changes in settings and excitation current.

**KEYWORDS:** synchronous generator, excitation system, excitation voltage, transient processes.

В последние десятилетия наблюдается стремительное развитие энергетической отрасли, направленное на повышение эффективности производства и передачи электроэнергии. Одним из ключевых элементов этого процесса в электроэнергетике являются синхронные генераторы – основной источник электроэнергии на многих электростанциях. Математическая модель синхронного генератора в программном комплексе SiminTech представлена на рис. 1.

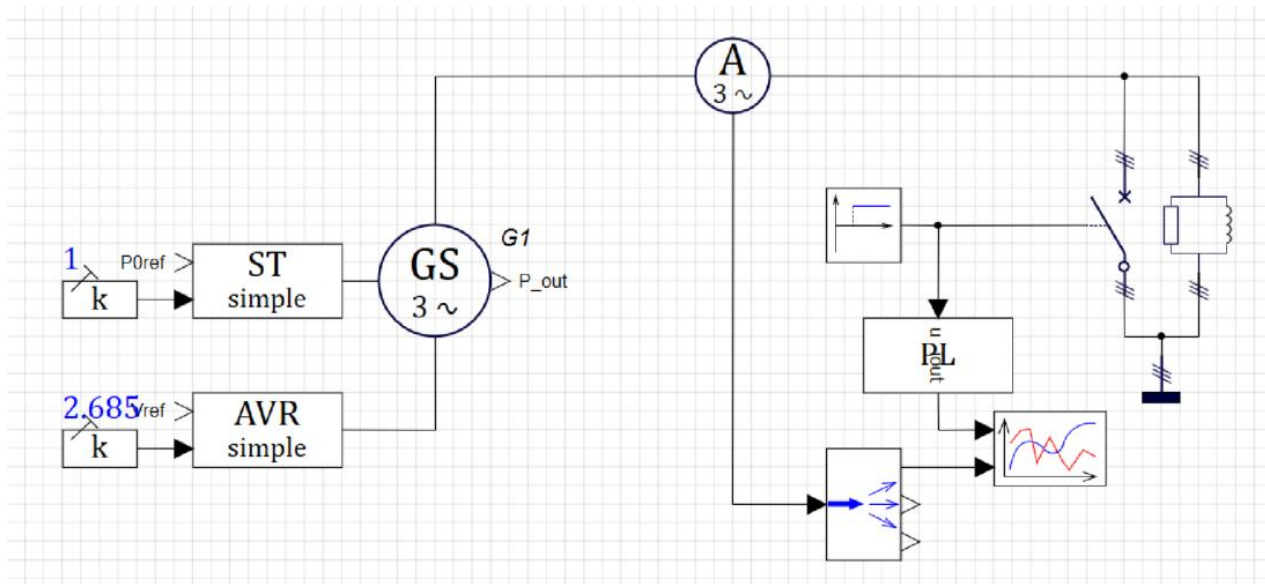


Рис. 1. Математическая модель синхронного генератора в программном комплексе SiminTech

Современные технологии требуют от энергосистемы более точного и динамичного регулирования процессов, а именно систем автоматического регулирования возбуждения синхронных генераторов. Основные требования к данной системе – надежность при любых условиях эксплуатации, простота в управлении и обслуживании, стабильность и быстрая переходная характеристика.

Система возбуждения характеризуется номинальным током и номинальным напряжением возбуждения, которое соответствует номинальному режиму работы электрической машины.

Параметры автоматических систем регулирования возбуждения (АРВ), которые влияют на напряжение возбуждения:

- изменение уставок по напряжению;
- ток возбуждения;
- мощность возбуждения;
- предельное напряжение.

В комплексной программе SiminTech рассмотрены параметры, которые в большей мере влияют на изменение напряжения возбуждения.

*1. Изменение уставки по напряжению  
для разных коэффициентов загрузки выпрямителя*

В программном комплексе SiminTech выполнена математическая модель зависимости напряжения возбуждения от изменения уставок по напряжению, представленная на рис. 2. Осциллограмма данной модели показана на рис. 3.

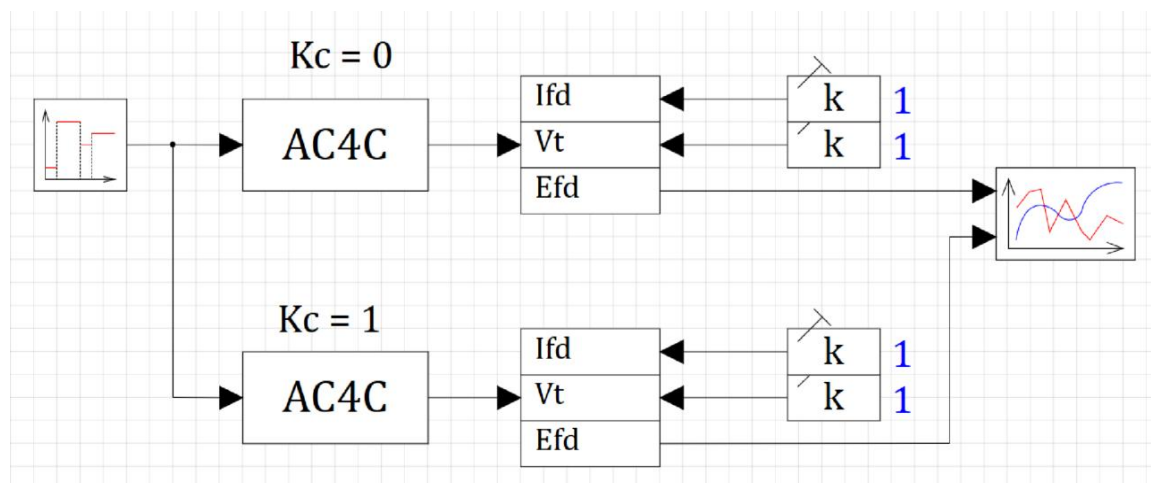


Рис. 2. Зависимость напряжения возбуждения при изменении уставки по напряжению

При моделировании получена зависимость напряжения возбуждения  $E_{FD}$  при изменении уставки по напряжению  $V_{REF}$  для разных коэффициентов загрузки выпрямителя  $K_C$ . Значение напряжения генератора  $V_t = 1$  о. е., тока возбуждения  $I_{FD} = 1$  о. е. (рис. 3).

На интервале времени от 0 до 50 сек. значение напряжения возбуждения  $E_{FD}$  стремится от начального значения, равного 0, к установившемуся значению, определяемому по выражению

$$E_{FDуст} = K_a \cdot (V_{REF} - V_t) = 200 \cdot (0,99 - 1) = 2, \quad (1)$$

где  $E_{FDуст}$  – уставка напряжения возбуждения;  $K_a = 200$  – коэффициент усиления выхода регулятора.

На интервале времени от 50 до 52 сек. значение напряжения возбуждения  $E_{FD}$  стремится от значения  $-2$  к новому установившемуся значению, определяемому по выражению

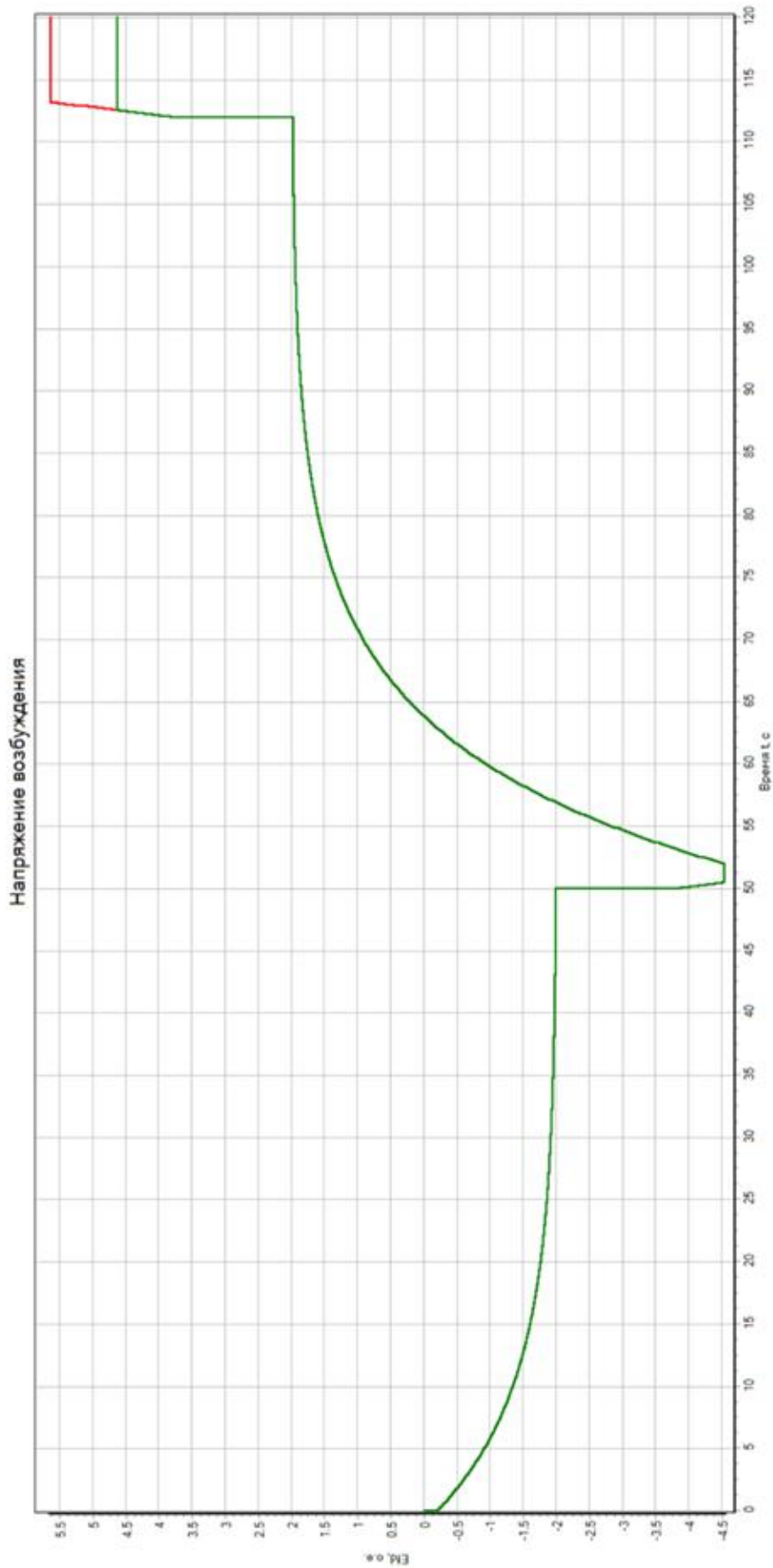


Рис. 3. Зависимость напряжения возбуждения при изменении уставки по напряжению

$$E_{FD_{уст}} = K_a \cdot (V_{REF} - V_t) = 200 \cdot (0,9 - 1) = -20, \quad (2)$$

однако, учитывая ограничение  $E_{FD} \geq V_{Rmin}$ ,  $E_{FD}$  становится равным  $-4,53$ , где  $V_{Rmin}$  – минимальное значение выхода регулятора, о. е.

На интервале времени от 52 до 112 сек. значение напряжения возбуждения  $E_{FD}$  стремится от значения  $-4,53$  к установившемуся значению, определяемому по выражению

$$E_{FD_{уст}} = K_a \cdot (V_{REF} - V_t) = 200 \cdot (1,01 - 1) = 2. \quad (3)$$

На интервале времени от 112 до 120 сек. значение напряжения возбуждения  $E_{FD}$  стремится от значения 2 к новому установившемуся значению, определяемому по выражению

$$E_{FD_{уст}} = K_a \cdot (V_{REF} - V_t) = 200 \cdot (1,1 - 1) = 20, \quad (4)$$

однако, учитывая ограничение  $E_{FD_{уст}} \leq V_{Rmax} - K_C \cdot I_{FD}$ ,  $E_{FD}$  становится равным:

$$- \text{ для } K_C = 0: E_{FD} = 5,64 - 0 \cdot 1 = 5,64; \quad (5)$$

$$- \text{ для } K_C = 1: E_{FD} = 5,64 - 1 \cdot 1 = 4,64, \quad (6)$$

где  $V_{Rmax}$  – максимальное значение выхода регулятора, о. е.;  $I_{FD} = 1$  о. е. – ток возбуждения генератора.

Длительность и характер переходных процессов определяются соответствующими передаточными звеньями с постоянными времени  $T_A$ ,  $T_B$  и  $T_C$ .

## 2. Изменение тока возбуждения генератора

В программном комплексе SiminTech выполнена математическая модель зависимости напряжения возбуждения от тока возбуждения, представленная на рис. 4. Осциллограмма данной модели показана на рис. 5.

При моделировании получена зависимость напряжения возбуждения  $E_{FD}$  при изменении тока возбуждения генератора  $I_{FD}$  для разных коэффициентов интегрирующего звена ПИ-регулятора  $K_{ir}$ . Значение напряжения генератора  $V_t = 1$  о. е.

На интервале времени от 0 до 100 сек. значение напряжения возбуждения  $E_{FD}$  для  $K_{ir} = 0$  стремится от начального значения, равного 0, к значению, определяемому по выражению

$$\begin{aligned} E_{FD_{уст}} &= K_a \cdot (K_p + K_{ir} \cdot t) \cdot (K_{REF} - V_t) \cdot F_{EX}(I_{FD}) = \\ &= 120 \cdot (4,88 + 0 \cdot t) \cdot (1,005 - 1) \cdot 1 = 2,928, \end{aligned} \quad (4)$$

где  $E_{FD_{уст}}$  – уставка напряжения возбуждения;  $K_a = 120$  – коэффициент усиления выхода регулятора;  $K_p = 1$  – коэффициент усиления по напряжению канала компенсации;  $t$  – время срабатывания;  $I_{FD} = 1$  – ток возбуждения. Для  $K_{ir} = 1$

$E_{FD}$ , учитывая ограничение  $E_{FD} \leq E_{FDmax}$ , увеличивается до достижения  $E_{FDmax}$ , равного 4,4, где  $E_{FDmax}$  – максимальное напряжение возбуждения, о. е.

В момент времени 100 сек.  $I_{FD}$  устанавливается равным 48,8, а сигнал  $F_{EX}$  – равным 0 (в соответствии с внешней характеристикой выпрямителя  $F_{EX} = 0$  для  $K_C \cdot I_{FD} / V_E = 0,1 \cdot 48,8 / 4,88 = 1 \geq 1$ ).

После этого на интервале времени от 100 до 110 сек. значения напряжений возбуждения  $E_{FD}$  стремятся от значений 2,928 для  $K_{ir} = 0$  и 4,4 для  $K_{ir} = 1$  к значению, равному 0.

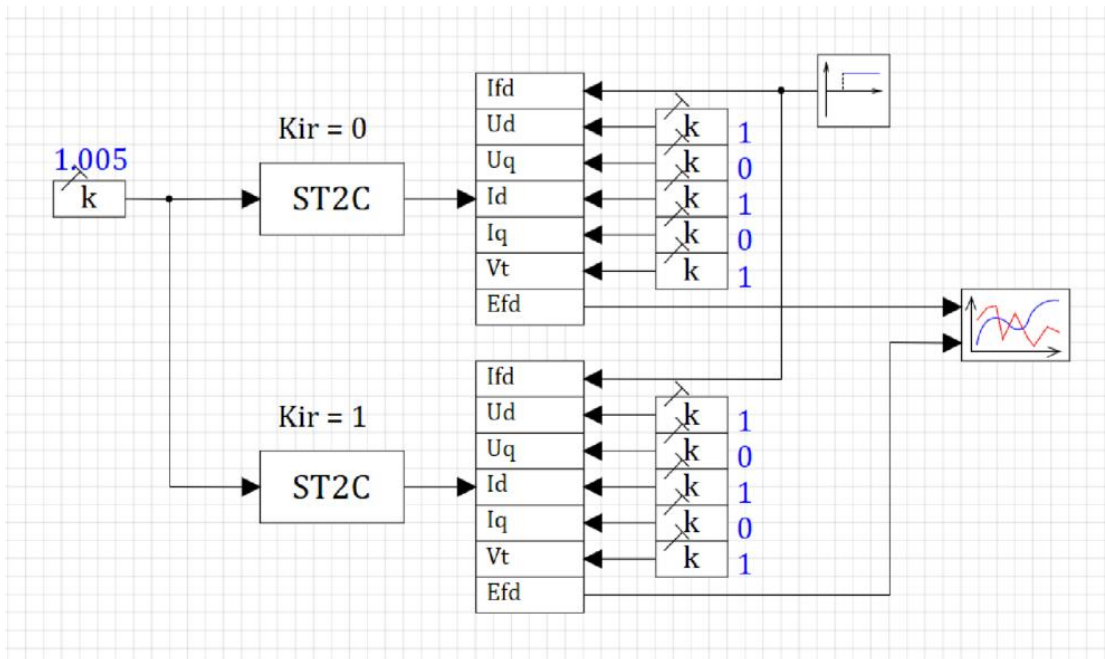


Рис. 4. Зависимость напряжения возбуждения при изменении тока возбуждения

Длительность и характер переходных процессов определяется соответствующими передаточными звеньями, включая обратную связь, с постоянными времени  $T_A$ ,  $T_B$ ,  $T_C$ ,  $T_E$  и  $T_F$ .

#### Выводы

Таким образом, автоматическое регулирование возбуждения играет ключевую роль в обеспечении стабильности и надежности энергосистемы. Рассмотренная система позволяет эффективно управлять уровнем возбуждения генератора, что, в свою очередь, влияет на выходную мощность и стабильность напряжения. С учетом постоянных изменений в нагрузке и условий, таких как внезапные колебания нагрузки или отключения генераторов, разработка и совершенствование систем автоматического регулирования становятся актуальной задачей для инженеров и исследователей в области электроэнергетики. На основании проанализированных данных в комплексной программе SiminTech можно разработать и усовершенствовать систему автоматического регулирования системы возбуждения синхронного генератора, что позволит повысить стабильность работы единой энергосистемы страны.

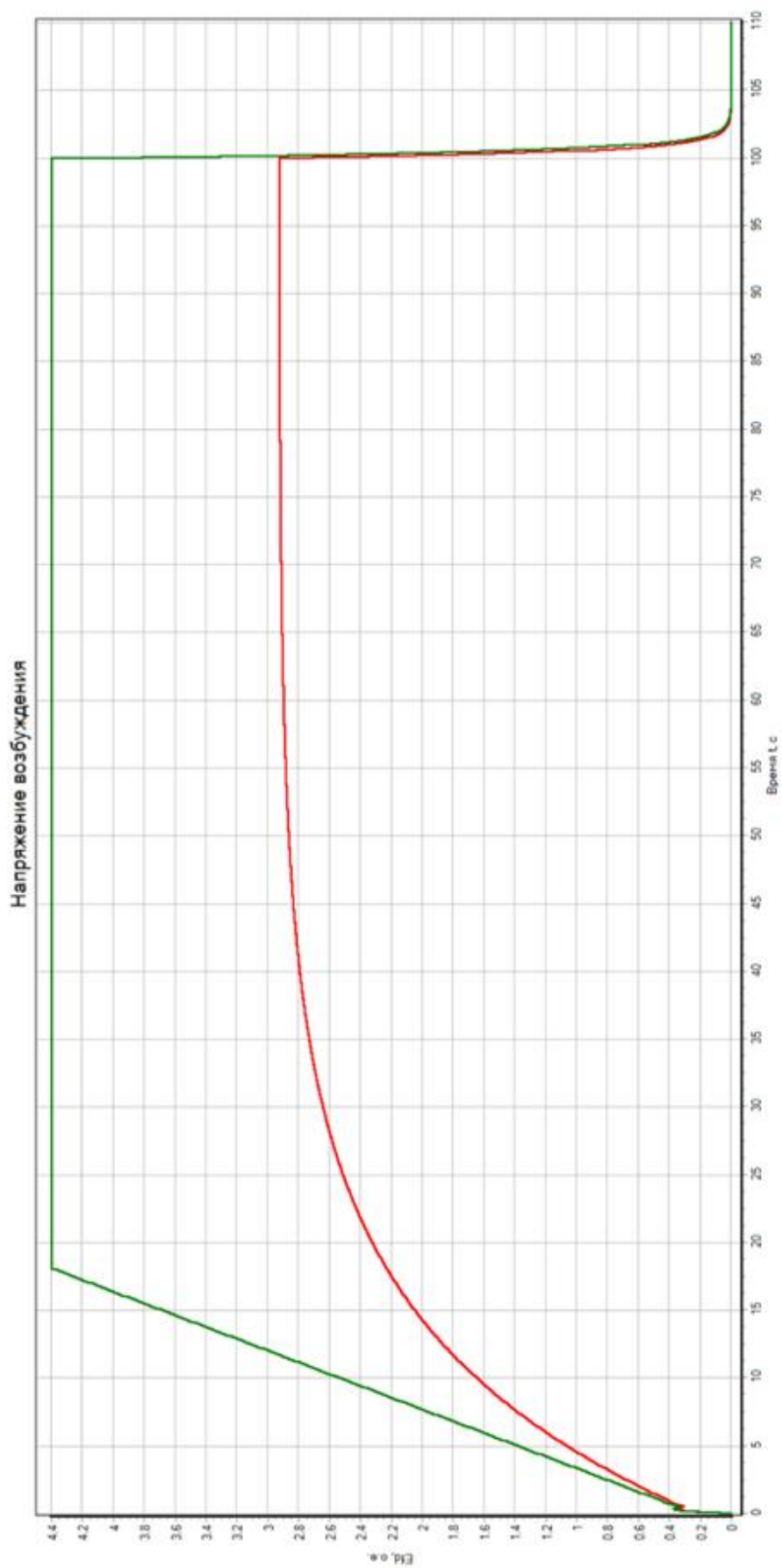


Рис. 5. Зависимость напряжения возбуждения при изменении тока возбуждения



## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Комплексная программа SiminTech [Электронный ресурс]. – URL: <https://simintech.ru>.
2. Николаева, С.И. Системы возбуждения синхронных генераторов: учеб. пособие [Электронный ресурс] / С.И. Николаева. – Волгоград: Волгоградский ГАУ, 2019. – 72 с. – URL: <https://e.lanbook.com/book/139230>.

## АНАЛИЗ РАБОТЫ АДАПТИВНОЙ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ И АЛГОРИТМ ЕЕ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ

*Николаевский С.А.* – студент

*Зенина Е.Г.* – канд. техн. наук, доцент

Филиал ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» в г. Волжском

*АННОТАЦИЯ.* В данной статье рассматривается способ работы адаптивной релейной защиты и алгоритм ее функционирования. Освещены основные принципы работы адаптивной релейной защиты. Приведен алгоритм функционирования защиты с адаптивной уставкой.

*КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:* адаптивные уставки, цифровая защита, формирование адаптивных уставок

*ANNOTATION.* This article discusses the method of operation of adaptive relay protection and its functioning algorithm. The main principles of operation of adaptive relay protection are illuminated. The functioning algorithm of protection with adaptive settings is provided.

*KEYWORDS:* adaptive settings, digital protection, formation of adaptive settings.

В последние несколько лет ведется активная работа по разработке новых методик расчета параметров срабатывания релейной защиты и автоматики для замены устаревших руководящих указаний, которые были разработаны более полувека назад. Одно из направлений в цифровизации электросетевого комплекса группы компаний «Россети» заключается в автоматизации процесса расчета токов короткого замыкания и параметров срабатывания. Главная цель такой автоматизации состоит в увеличении чувствительности защитной системы путем постоянного расчета текущего нагрузочного режима и учета конфигурации сети в момент возникновения аварии. Этот подход также позволяет снизить количество ошибочных расчетов, исключив человеческий фактор.

Сейчас становится очевидным, что для достижения такой цели наилучшим способом является переход на адаптивные защитные системы и формирование адаптивных уставок срабатывания. Под адаптацией в релейной защите и автоматике понимается способность формирования уставки срабатывания на основе параметров предаварийного нагрузочного режима.

### *Основные принципы работы адаптивной релейной защиты*

1. *Мониторинг параметров сети.* Адаптивная релейная защита непрерывно контролирует основные параметры электросети, такие как ток, напряжение, мощность, частота и другие. Эти параметры могут быть измерены с помощью различных датчиков и измерительных устройств.

2. *Анализ данных.* Собранные данные о параметрах электросети анализируются алгоритмами защиты для определения текущего состояния системы и обнаружения нештатных ситуаций. С помощью этих алгоритмов происходит идентификация возможных аварийных событий и предварительная оценка их серьезности.

3. *Принятие решения.* В зависимости от результатов анализа данных адаптивная релейная защита принимает решение о необходимости вмешательства для предотвращения аварийных ситуаций. Это может включать в себя переключение реле или срабатывание автоматического отключения питания.

4. *Реакция на изменения.* Одной из главных особенностей адаптивной релейной защиты является ее способность адаптироваться к изменяющимся условиям работы электросети. Принцип работы базируется на динамическом изменении параметров и настройках реле в реальном времени в зависимости от изменяющихся условий, таких как нагрузка, состав системы и др.

5. *Надежность и быстрота действия.* Адаптивная релейная защита обеспечивает высокую надежность и быстрое срабатывание при возникновении аварийных ситуаций. Благодаря своей способности к адаптации, она способна быстро и точно реагировать на изменения в сети и предотвращать развитие аварий.

Таким образом, принцип работы адаптивной релейной защиты состоит в непрерывном мониторинге параметров электросети, анализе данных, принятии решений и адаптации к изменяющимся условиям для обеспечения надежной и быстрой защиты от аварийных ситуаций.

В самом процессе формирования адаптивных уставок РЗА можно выделить два подхода:

– полная автоматизация расчетов сети на внешнем сервере и формирование на их основе уставок защит для автоматической их записи в устройства РЗА. Наличие информационных связей между подстанциями (ПС) и отдельными элементами электрической системы позволяет поднять эффективность таких расчетов, например при реконфигурировании системы или после аварийных коммутаций в ней;

– расчет уставок на базе получаемых текущих величин тока и напряжения непосредственно в терминале защиты.

Следует отметить, что процесс расчета в алгоритмах первого подхода производится специальными вычислительными серверами вне устройства защиты, что весьма затрудняет получение текущих уставок в реальном масштабе времени при изменении параметров режима сети.

Алгоритм функционирования защиты с адаптивной уставкой представлен на рисунке. Датчики тока устанавливаются на воздушной линии электропередачи, на каждой фазе в начале линии в месте расположения защиты. Данные от датчиков непрерывно передаются устройству релейной защиты.

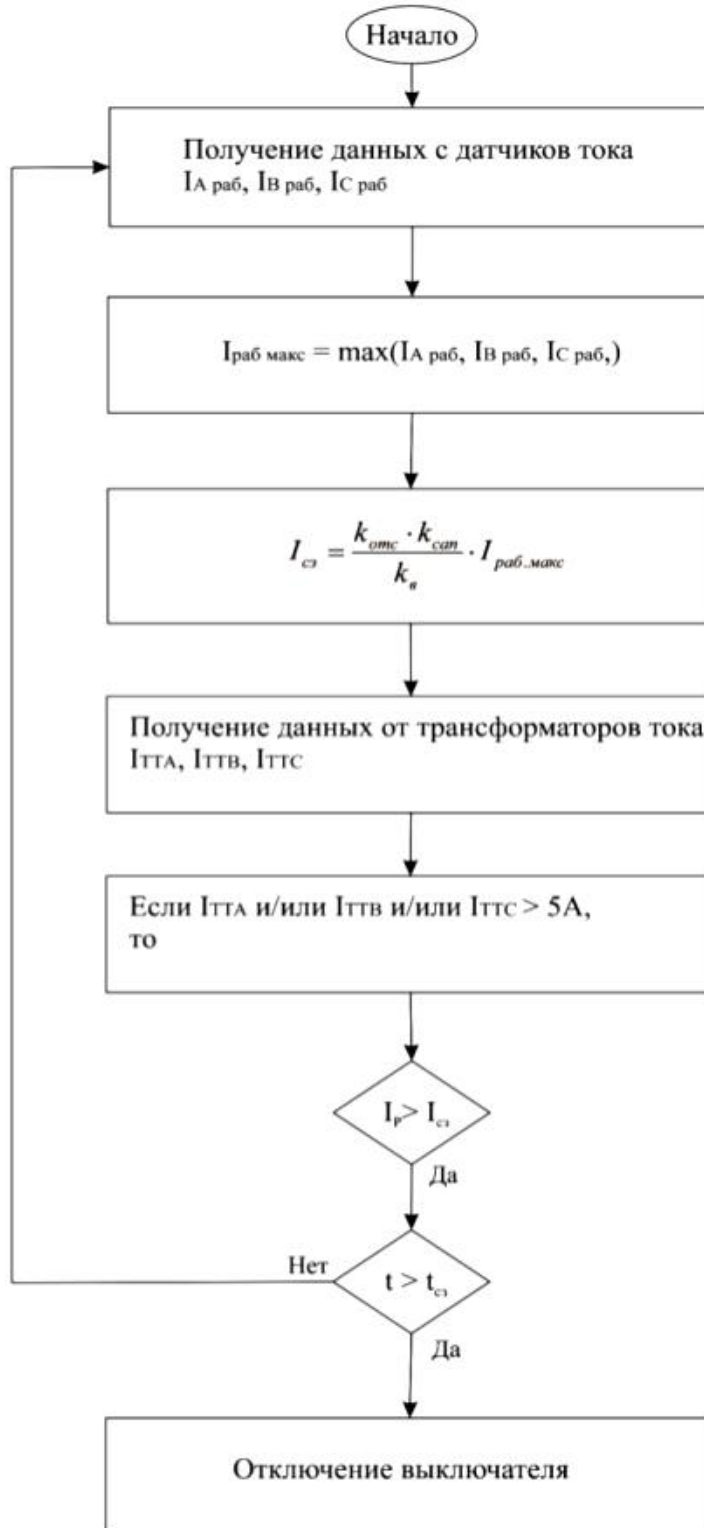


Рисунок. Алгоритм функционирования защиты с адаптивной уставкой

В статье был проведен анализ работы адаптивной релейной защиты и алгоритм ее функционирования, проанализированы принципы работы адаптивной релейной защиты и подходы к формированию адаптивных уставок РЗА.

Контроль вторичных параметров трансформаторов тока позволяет не только определить вид повреждения, но и избежать ложного срабатывания резервной защиты при запуске двигателей, следствием чего является увеличение рабочих токов в несколько раз, оперируя корректной информацией о ситуации на ВЛ.

#### *Выводы*

Адаптивные уставки релейной защиты обладают рядом преимуществ по сравнению с обычными уставками. Они автоматически настраиваются под изменяющиеся условия в сети, обеспечивая быструю и точную реакцию на изменения в нагрузке или параметрах системы. Благодаря своей гибкости адаптивные уставки также обеспечивают улучшенную защиту оборудования и возможность легкой настройки для оптимальной работы релейной защиты.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Диагностика линии электропередачи / Ю.Я. Лямец, В.И. Антонов, В.А. Ефремов, Г.С. Нудельман, Н.В. Подшивалин // Электротехнические микропроцессорные устройства и системы. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 1992. – С. 9–33.
2. Концепция развития релейной защиты, автоматики и автоматизированных систем управления технологическими процессами электросетевого комплекса группы компаний «Россети» [Электронный ресурс]. – М., 2022. – URL: <https://www.rosseti.ru/upload/iblock/1da/2igrtje3suvjhgtjr8ubv5v7jauxqinl.pdf>.
3. Автоматизация устройств микропроцессорной релейной защиты на основе использования нейросетевых технологий / В.Н. Сизых, А.В. Данеев, М.В. Востриков, К.В. Менакер // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2021. – № 11. – С. 324–337.
4. Ефремов, В.А. Адаптивные уставки для реле тока и напряжения / В.А. Ефремов, А.В. Ефремов, С.А. Таныгин // Релейная защита и автоматизация. – 2023. – № 01.
5. Правила устройства электротехнических установок. – М.: Энергия, 1985. – 480 с.

### **РАЗРАБОТКА И ПРИМЕНЕНИЕ УСТРОЙСТВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТА ПОВРЕЖДЕНИЯ НА ЛЭП С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВОЛНОВЫХ МЕТОДОВ**

*Ребров Е.Н.* – студент

*Шибитов В.С.* – доцент кафедры Энергетики  
Филиал ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» в г. Волжском

*АННОТАЦИЯ.* В статье представлены результаты применения устройств определения мест повреждения на ЛЭП. Для этого предложены к использованию волновые методы, алгоритм системы ВОМП с контролем напряжения.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** устройства определения мест повреждения, волновые методы.

Переход от использования отдельных устройств для определения мест повреждения воздушных линий электропередачи с помощью волнового метода, где каждое устройство предназначено для одной линии, к системе определения мест повреждения на основе двустороннего измерения с устройствами, подключенными к трансформаторам напряжения на шинных подстанциях, позволяет обнаруживать повреждения на любой линии, подключенной к данной системе шин, с помощью одного устройства. Это способствует сокращению общего количества устройств для выявления мест повреждений электросети.

Важным фактором, способствующим значительному сокращению времени восстановления работы воздушной линии (ВЛ) электропередачи после аварийного отключения, является точное определение мест короткого замыкания (КЗ) на этой линии.

Существует несколько методов определения места повреждения (ОМП), однако наиболее точным является волновой метод, основанный на измерении периода распространения электрической волны от места короткого замыкания до концов линии.

Среди всех переходных процессов, происходящих в энергосистеме, волновые процессы в высоковольтных линиях отличаются кратковременностью, продолжительность которой варьируется от нескольких микросекунд до нескольких миллисекунд.

Волновые процессы связаны с распространением электрических волн, возникающих вследствие короткого замыкания в линиях электропередачи, атмосферного разряда или переключений в электроэнергетической системе. Внезапные и значительные изменения напряжения, по меньшей мере в одной точке высоковольтной линии (рис. 1), вызывают образование электрической волны, которая распространяется в противоположных направлениях от этой точки.

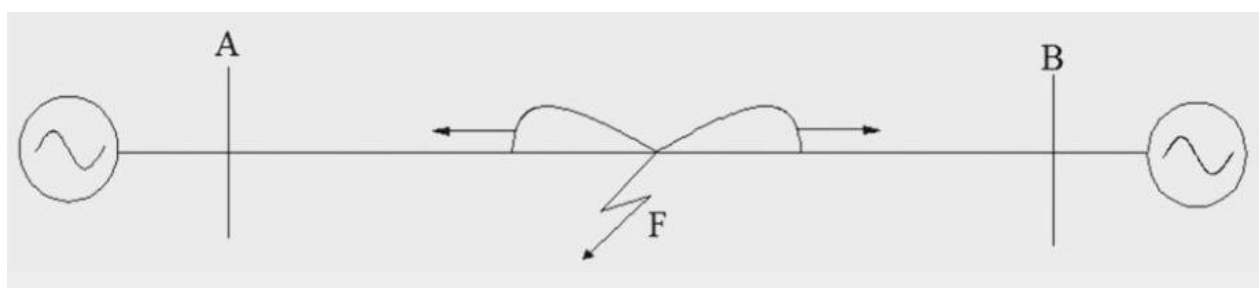


Рис. 1. Распространение электромагнитной волны в точке КЗ

Метод двустороннего измерения отличается от других методов тем, что он использует информацию от исходной волны, возникшей в месте КЗ, которая до сих пор не искажена отражаемыми волнами от узловой точки сетей. Расстояние

$l$  от места повреждения до конца ВЛ длиной  $L$  в процессе применения данного метода определяется с помощью выражения

$$l = \frac{L}{2} - \frac{t_2 - t_1}{2} \cdot v = \frac{L}{2} - \frac{\Delta t}{2} \cdot v, \quad (1)$$

где  $t_1$  и  $t_2$  – текущие значения времени прибытия электромагнитной волны соответственно к началу и концу воздушной ЛЭП;  $v$  – скорость распространения электрической волны.

Переход от индивидуальных устройств ВОМП двустороннего измерения, где для каждого защищаемого линии необходимо два измерительных терминала, до системы ВОМП двустороннего измерения с подстанциями ТН шин, способствует снижению общего количества устройств ВОМП, которые решают одну и ту же проблему. Чтобы оценить эффективность разработанной системы ВОМП в сравнении с двусторонними устройствами ВОМП, можно применить следующее соотношение расчета:

$$d = 2n - k, \quad (2)$$

где  $n$  – количество ВЛ, управляемых системой ОМП;  $k$  – количество узлов, которые примыкают к ВЛ, управляемых системой ОМП.

Из представленной зависимости видно, что системе ВОМП, при увеличении количества ВЛ, потребуется меньшее количество терминалов ОМП в сети (рис. 2), чем традиционная установка терминалов ОМП на двух терминалах ОМП для установки в сети каждой ВЛ.

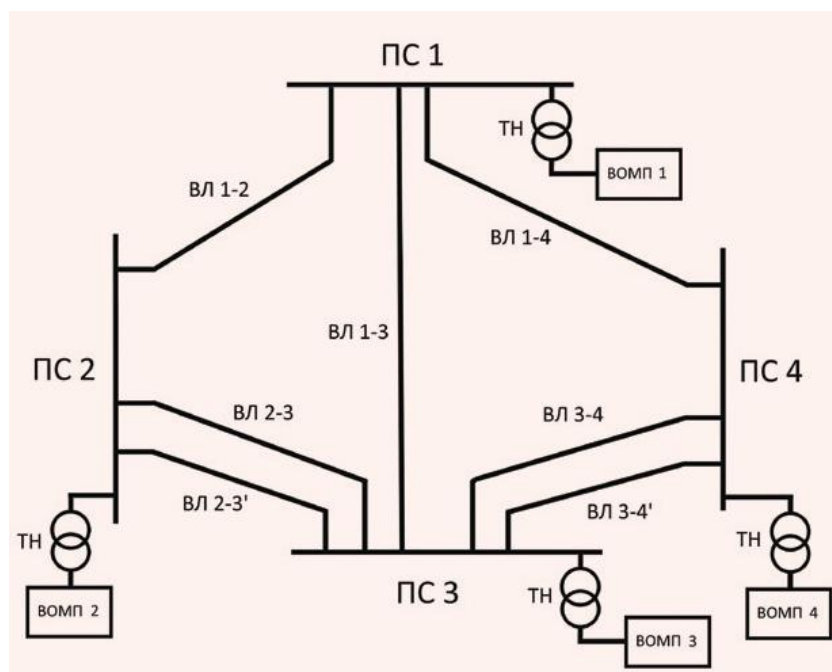


Рис. 2. Схема размещения терминалов системы ВОМП при измерении сигналов напряжения на шинах ПС

В устройствах ВОМП осуществляется обработка мгновенных значений напряжений и токов каждой фазы ЛЭП, синхронизируемых во времени с помощью глобальной системы позиционирования GPS/GLONASS, которые преобразовываются в токи и напряжения независимых волновых каналов.

В алгоритм системы ВОМП с контролем напряжения входят [1]:

- измерение напряжения фаз ВЛ при помощи ТН на шинах ПС;
- выделение аварийных и волновых составляющих напряжения;
- синхронизация этих показателей;
- обмен меток времени прихода напряжения фронта к каждому концу ВЛ;
- расчет расстояния к месту КЗ, после того как селективная защита ВЛ сработала в соответствии с формулой (1).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Разработка и применение устройств определения места повреждения на линиях электропередачи с использованием волновых методов / В.Ф. Лачугин, Д.И. Панфилов, С.Г. Попов, П.С. Платонов, В.Г. Алексеев, Н.Г. Ключкин, А.Н. Подшивалин // Энергия единой сети. – 2021. – № 5–6 (60–61). – С. 50–67.

2. Система волнового определения места повреждения, подключенная к трансформаторам напряжения системы шин / В.Ф. Лачугин, П.С. Платонов, В.Г. Алексеев, М.В. Вазюлин, Н.Н. Митрофанов, С.Г. Попов, С.А. Арутюнов, Н.Г. Ключкин, А.С. Шеметов // Электрические станции. – 2021. – № 1. – С. 21–30.

### **ПРИМЕНЕНИЕ КАТУШЕК РОГОВСКОГО В МИКРОПРОЦЕССОРНЫХ УСТРОЙСТВАХ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ**

*Сорокин Н.А.* – студент

Филиал ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» в г. Волжском

*АННОТАЦИЯ.* В статье представлены современные подходы к измерению токов в цепях релейной защиты с применением катушек Роговского.

*КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:* катушки Роговского, датчики Роговского, энергетика, релейная защита.

*ABSTRACT.* The paper presents modern approaches to measuring currents in relay protection circuits using Rogowski coils.

*KEYWORDS:* Rogowski coils, Rogowski sensors, power engineering, relay protection.

Для надежной работы электрических сетей и вследствие правильной работы устройств релейной защиты необходимы точные, надежные измерительные датчики. Самым популярным на сегодняшний день решением выступают классические трансформаторы тока. Однако с появлением современных

микропроцессорных устройств релейной защиты все чаще выбор падает на альтернативные датчики тока.

Это происходит вследствие несовершенства классических трансформаторов тока. Они обладают нелинейной вольт-амперной характеристикой, большим напряжением при размыкании на выводах, что может быть опасно для персонала. Также при использовании с МУРЗ трансформаторы тока обладают слишком высоким уровнем сигнала, что требует применения промежуточных трансформаторов.

Все эти причины в совокупности заставляют задуматься об использовании альтернативных датчиков тока.

Таким датчиком может выступать катушка Роговского. Чтобы понять принцип работы катушки Роговского, достаточно заметить, что при движении зарядов в окружающем пространстве возникает переменное электромагнитное поле. Регистрируя вторичные эффекты от наведенного поля, можно получить измеряемые данные о параметрах импульса.

Для получения информации о величине и форме импульсного тока по наведенному переменному магнитному полю применяется пояс Роговского.

Катушка Роговского – это катушка тороидального вида, расположенная вокруг первичного провода [1]. Конструкция петли Роговского схожа с конструкцией трансформатора тока, но с отличием в том, что вторичная обмотка датчика намотана на воздушный сердечник.

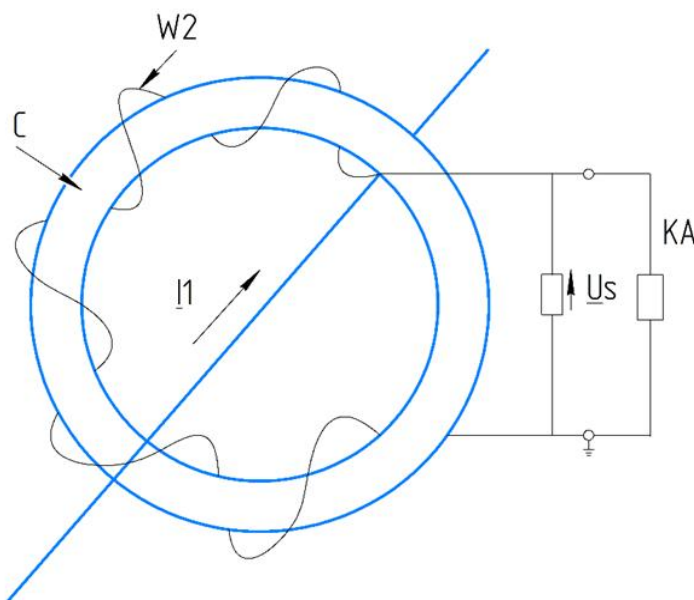


Рисунок. Катушка Роговского

Катушка Роговского состоит из обмотки  $W2$ , намотанной на немагнитный сердечник  $C$ . Катушка размещается вокруг проводника  $I1$ , по которому протекает ток  $I1$ , который нужно измерить (рисунок) [2].



Еще одним отличием катушки Роговского от трансформатора тока является выходной сигнал. У классического ТТ это ток, пропорциональный измеряемому. У катушки Роговского выходным сигналом будет напряжение, пропорциональное скорости изменения тока.

$$U = -M \frac{dl_1}{dt}, \quad M = \mu_0 \cdot n \cdot S,$$

где  $M$  – взаимная индуктивность;  $\mu_0$  – магнитная проницаемость;  $n$  – число витков обмотки;  $S$  – площадь поперечного сечения сердечника.

Можно увидеть, что пояс работает как импульсный трансформатор. Проводник с током, который мы хотим исследовать, является его первичной обмоткой, а пояс Роговского является вторичной обмоткой. Известно, что трансформаторы хорошо передают форму сигнала (при условии, что сигнал находится в рабочем диапазоне). Если в первичной обмотке протекает синусоидальный ток, форма и величина выходного сигнала трансформатора зависят от временных характеристик исходного сигнала, конструкции трансформатора и характеристик подключенной нагрузки [3].

Проанализировав все преимущества и недостатки датчика тока, можно сделать вывод, что катушки Роговского компенсируют недостатки классических трансформаторов тока.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фесенко, М.Е. Катушка Роговского как альтернативный измерительный орган в релейной защите / М.Е. Фесенко, В.Г. Скорик // Научно-техническое и экономическое сотрудничество стран АТР в XXI веке. – 2021. – Т. 2. – С. 63–67.
2. Лебедев, В.Д. Исследование погрешностей измерения тока поясом Роговского на основе математического и физического моделирования / В.Д. Лебедев, А.А. Яблоков, А.Е. Нестерихин // Вестник ИГЭУ. – Иваново. – 2013. – Вып. 6. – С. 30–34.
3. Устинов, Д.А. Повышение эффективности применения систем электроснабжения / Д.А. Устинов, Б.Н. Абрамович // Современные образовательные технологии в подготовке специалистов для минерально-сырьевого комплекса: Сборник трудов конференции». – СПб. – 2018. – С. 992–997.

### РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ РАЗЛИЧНЫХ СИСТЕМ ЗАЗЕМЛЕНИЯ НЕЙТРАЛИ В СЕТЯХ 6-35 КВ

*Ефимов В.В.* – студент

*Зенина Е.Г.* – канд. техн. наук, доцент

Филиал ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» в г. Волжском

*АННОТАЦИЯ.* В статье представлена модель участка энергетической сети в программном комплексе MATLAB Simulink, на базе которого производится сравнение свойств работы заземления нейтрали с целью выявления общих качеств и параметров применения данных режимов.

*КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:* энергосистема, сети среднего напряжения, нейтраль, моделирование энергосети, короткое замыкание.

На сегодняшний день самыми разветвленными сетями являются сети среднего напряжения 6-35 кВ, входящие в состав районных и местных электрических сетей. Данные сети электропередачи являются связующим звеном между энергосистемой и конечным потребителем, и аварийное отключение данных сетевых комплексов приводит к финансовым потерям при недоотпуске электроэнергии потребителям, в связи с чем необходимо обеспечить высокую надежность сетей среднего напряжения.

Статистика отключений по основным элементам электроэнергетического комплекса представлена на рис. 1, где половина технологических нарушений приходится на воздушные линии электропередачи – 51 %, одна треть на кабельные линии – 32 %, и одна шестая на аварии в подстанциях – не более 17 % [1, с. 67].

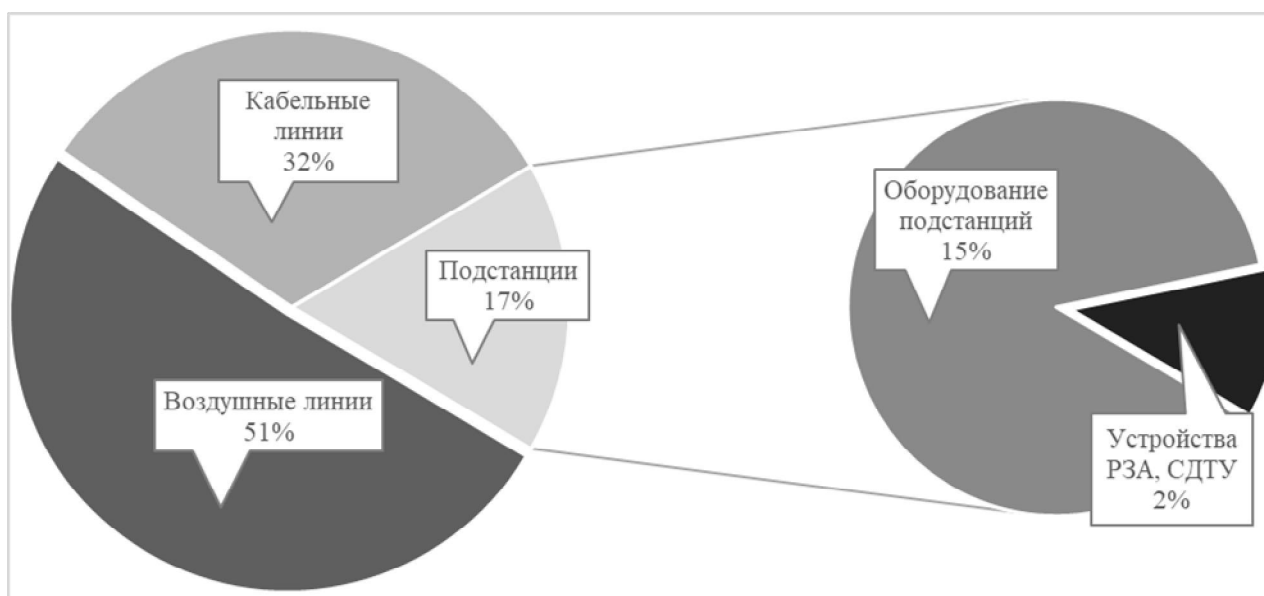


Рис. 1. Статистика аварийных отключений по элементам электрических сетей 6-35 кВ

Одними из главных аспектов восстановления энергосистемы при аварийных ситуациях являются: быстрая и избирательная работа релейной защиты и точное определение места повреждения. На данный момент в России большинство сетей среднего напряжения 6-35 кВ выполняется с изолированной нейтралью, а в крупных городах – через дугогасящий реактор [2, с. 13].

Изучая мировой опыт эксплуатации сетей среднего напряжения, можно увидеть, что наряду с изолированной нейтралью во многих зарубежных странах широко применяется заземление нейтрали через резистор [3, с. 95].

При аварийном режиме с изолированной нейтралью могут возникать однофазные замыкания на землю (ОЗЗ), которые хоть и не являются аварийными ситуациями, позволяющими по приказу Минэнерго № 289 эксплуатироваться

в данном ненормальном режиме до двух часов [4, с. 21], но представляют значительную опасность для людей и электрооборудования. ОЗЗ могут привести к возникновению феррорезонансных процессов, перенапряжений, пробоя изоляции и ее ускоренного старения, а также к возможному двойному замыканию на землю. Ввиду малых значений переходных процессов при ОЗЗ осложняется работа релейных защит и устройств определения места повреждения. При этом изолированная нейтраль выполняет важную работу по ограничению токов нулевой последовательности и своим наличием исключает переход данных гармоник из высоковольтных сетей к потребителям и наоборот [5, с. 335].

Для моделирования районной электроэнергетической сети 10-35 кВ с возможностью изменения системы заземления нейтрали была создана модель в программном комплексе MATLAB Simulink, представленная на рис. 2 [6].

Для моделирования выбран режим короткого замыкания вблизи питающей подстанции 110/35 кВ на линии электропередачи 35 кВ. К данной схеме были применены различные способы заземления нейтрали, сняты осциллограммы переходных процессов, произведены расчеты по определению емкостного сопротивления участка сети, равного  $X_C = 3,66$  Ом. Сопротивление низкоомного заземления нейтрали выбрано из соотношения, что сопротивление нейтрали должно быть меньше емкостного сопротивления сети  $R_N \leq X_C$ , принято  $R_N = 2$  Ом. Для высокоомного заземления нейтрали аналогично принимается неравенство  $R_N > X_C$ , высокоомное сопротивление нейтрали принято  $R_N = 10$  Ом [4, с. 97].

Осциллограмма амплитудных напряжений трехфазного короткого замыкания с изолированной нейтралью представлена на рис. 3, осциллограмма токов короткого замыкания – на рис. 4.

#### *Выводы*

Таким образом, разработанная компьютерная модель реализует компьютерную симуляцию участка электроэнергетической системы 10-35 кВ. Произведена первичная апробация модели на примере трехфазных коротких замыканий. Задачами для дальнейшего исследования на основе заявленной модели являются стандартизация и унификация выбора комплекта релейных защит для каждого из типовых вариантов схем заземления нейтрали с выявлением достоинств и недостатков работы таких комплектов защит.

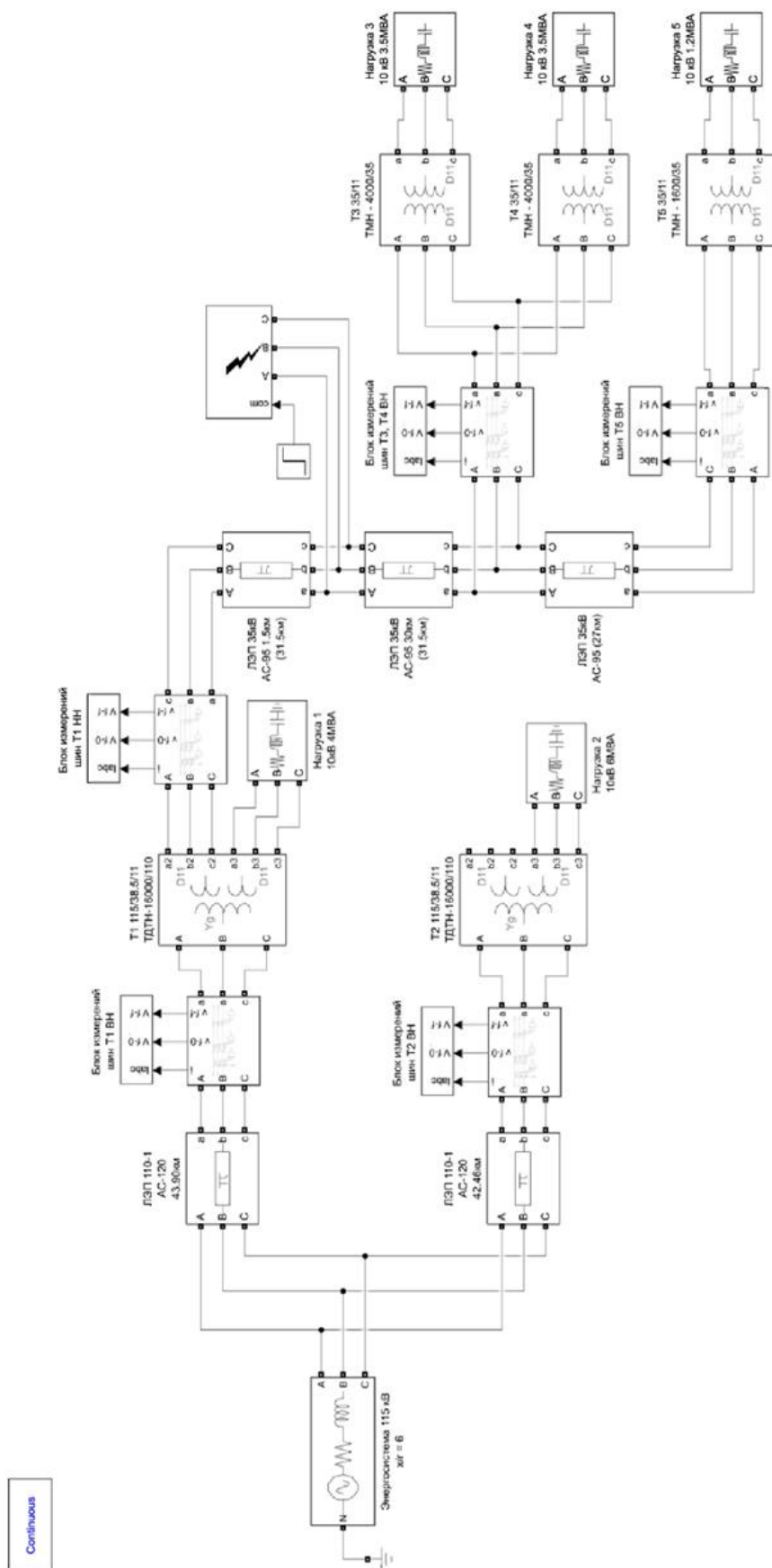


Рис. 2. Модель сети среднего напряжения в программном комплексе MATLAB Simulink

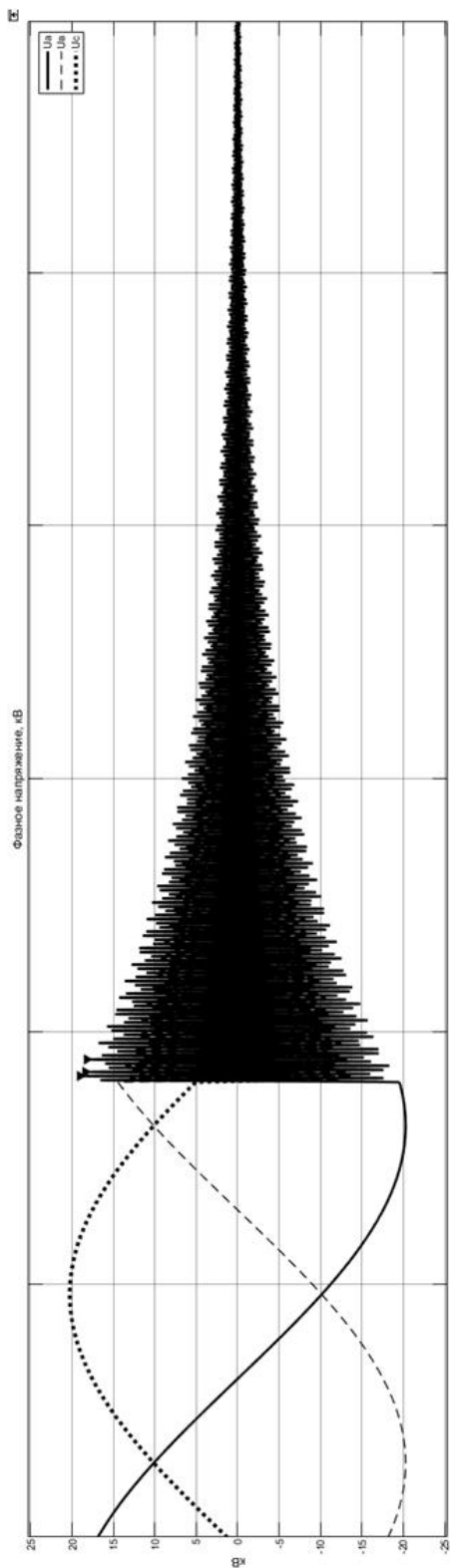


Рис. 3. Осциллограмма амплитудных напряжений трехфазного короткого замыкания с изолированной нейтралью

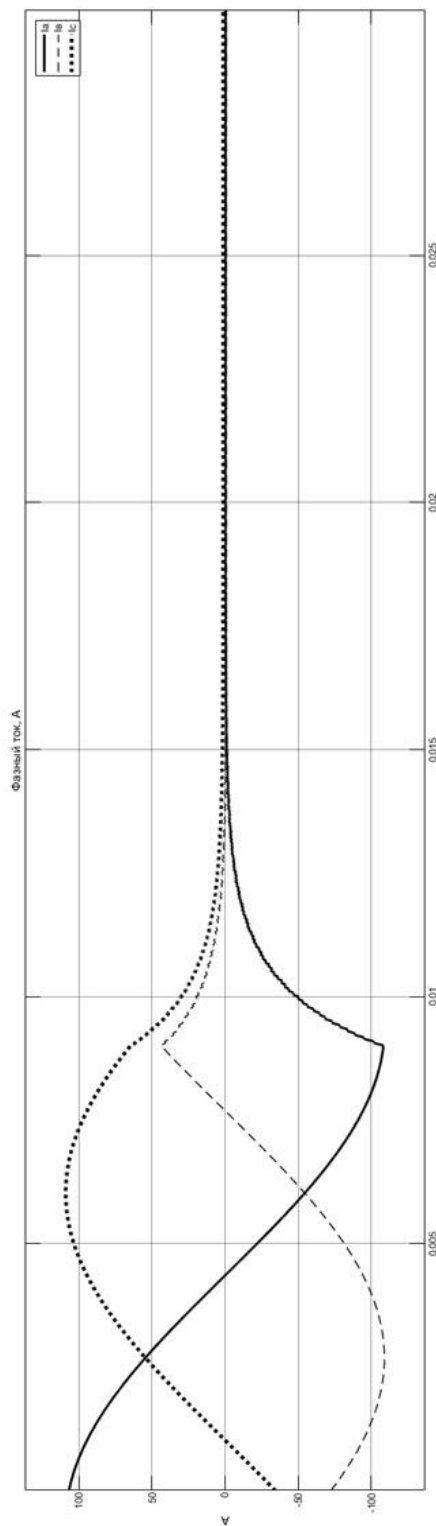


Рис. 4. Осциллограмма амплитудных токов трехфазного короткого замыкания с изолированной нейтралью

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Федотова, А.А. Анализ статистических показателей аварийности / А.А. Федотова // Экономика, бизнес, инновации: сборник статей X Международной научно-практической конференции. – 2019. – С. 66–69.
2. Валов, В.Н. Организация релейной защиты при переводе городских сетей 6-10 кВ с компенсацией емкостного тока на низкоомное резистивное заземление нейтрали / В.Н. Валов, А.И. Ширковец, Д.С. Кудряшов // Энергетик. – 2016. – № 9. – С. 13–17.
3. Евминов, Л.И. Резистивное заземление нейтрали в распределительных сетях 6-35 кВ / Л.И. Евминов, Т.В. Алферова // Агротехника и энергообеспечение. – 2019. – № 4. – С. 94–108.
4. Приказ Минэнерго РФ от 30.06.2003 г. № 289 «Об утверждении Инструкции по предотвращению и ликвидации аварий в электрической части энергосистем».
5. Исследование процессов при металлических и дуговых ОЗЗ в условиях резистивно-заземленной и изолированной нейтрали в сети 6 кВ ПС «Карьерная-2» ОАО «Разрез Тугнуйский» / М.В. Ильиных, А.И. Ширковец, А.А. Кузьмин, И.Е. Волокитин // Горный информационно-аналитический бюллетень (науч.-тех. журнал). – 2011. – № 4. – С. 344–360.
6. Терёхин, В.В. Т-Моделирование в системе MATLAB: учеб. пособие / В.В. Терёхин // Кемеровский государственный университет. – Новокузнецк: Кузбассвузиздат, 2004. – 376 с.

## ОБЗОР УСТРОЙСТВ АОПО И ИХ ВОЗМОЖНОЕ ПРИМЕНЕНИЕ НА ПС

*Баженова А.А.* – студент  
Филиал ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» в г. Волжском

*АННОТАЦИЯ.* В статье представлен анализ устройств АОПО, требования к ним, их принцип работы и выбор уставок. Рассмотрены разные компании, производящие шкафы с функциями АОПО и их возможное применение на ПС.

*КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:* автоматика ограничения перегрузки оборудования, уставки, противоаварийная автоматика, подстанция.

*ANNOTATION.* This article presents an analysis of AOPO devices, their requirements, their principle of operation and the choice of settings. Various companies producing cabinets with AOPO functions and their possible application on PS are considered.

*KEYWORDS:* automation of equipment overload limitation, setpoints, emergency automation, substation.

В большинстве промышленно развитых стран наблюдается рост электропотребления и усложнение условий для строительства электросетей. В связи с этим очень важным становится развитие технологий, которые позволяют эффективно использовать уже существующие электрические сети, без необходимости строительства новых подстанций и линий электропередачи, либо перенести такое строительство на более поздний срок.

Для предотвращения и устранения недопустимой перегрузки элементов электросетей в аварийных режимах использование противоаварийной автоматики (ПА) является необходимым. Устройства автоматики ограничения перегрузок оборудования (АОПО) выполняют следующие функции: изменение конфигурации электрической сети, отключение части потребителей электроэнергии (приоритет отдается потребителям, надежность которых позволяет временно прекратить электроснабжение), отключение оборудования (линий электропередачи, трансформаторов), а также управление загрузкой/разгрузкой/ограничением генерации.

Автоматика ограничения перегрузки оборудования (АОПО) – это устройство противоаварийной автоматики, предназначенное для предотвращения недопустимой по величине и длительности токовой нагрузки линий электропередачи и электросетевого оборудования.

Устройство АОПО должно обеспечивать следующие возможности:

1) срабатывание при обнаружении превышения заданного тока в любой фазе защищаемого элемента при заданной температуре окружающей среды. Установление заданной задержки перед срабатыванием УВ;

2) фиксацию токовой нагрузки пофазно;

3) установку не менее двух ступеней контроля токовой нагрузки (для каждой ступени также должна быть возможность установки нескольких задержек перед срабатыванием);

4) установку не менее трех групп уставок по току;

5) изменение уставок (групп уставок) как на самом устройстве, так и дистанционно и автоматически в зависимости от изменения температуры окружающей среды или других заданных условий.

АОПО регулирует ток во всех фазах, чтобы предотвратить симметричную перегрузку. Если ток превышает заданную уставку, начинается отсчет времени. По истечении этого времени принимаются различные управляющие воздействия. Если допустимая длительность перегрузки составляет 20 мин. и более, то установка АОПО не требуется. В таком случае оперативно-диспетчерский персонал сможет устранить перегрузку. Для определения параметров аппаратуры ограничения пускового тока (АОПО) используются следующие значения:

–  $I_1$  или  $I_{\text{СИГН}}$  – значение первоначального (сигнального) тока пуска;

–  $t_1$  или  $t_{\text{СИГН}}$  – время задержки для срабатывания первой (сигнальной) ступени (9,0–10,0 сек.);

–  $I_{\text{CP}}$  – значение тока пуска для второй и последующих ступеней;

–  $t_{\text{УВ}n}$  – время срабатывания  $n$ -й ступени.

В каждом конкретном случае выбирается уставка времени в зависимости от типа оборудования и возможных аварийных ситуаций в сети. Для высоковольтных линий (ВЛ) уставка обычно составляет 10 сек. с шагом 5 сек. В случае необходимости шаг выбирается больше, например при дистанционной регулировке температуры (ДРТ). Время срабатывания АОПО регулируется относительно времени работы релейной защиты и автоматических выключателей.

$$I_1 = 0,9 \cdot I_{\text{длит.доп}}, \quad (1)$$

где  $I_{\text{длит.доп}}$  – длительно допустимый ток.

$$I_1 = \frac{K_n \cdot I_{\text{длит.доп}}}{K_v}, \quad (2)$$

где  $K_n$  – коэффициент надежности (1,20);  $K_v$  – коэффициент возврата токового реле (0,82–0,99).

На сегодняшний день сертифицированную проверку прошли девять компаний: АО «ТеконГруп», ООО НПП «ЭКРА», ООО «АББ Силовые и Автоматизированные Системы», АО «Институт автоматизации энергетических систем», ООО «Прософт-Системы», АО «Чебоксарский электроаппаратный завод», ООО «Релематика», ООО «НПП Бреслер», ООО «ЦИР ИЭ».

Микропроцессорные устройства релейной защиты и автоматики серии ТЕКОН 300 с функциональным типом исполнения ТЕКОН 3ХХЕА выполняют автоматическое ограничение перегрузки оборудования. Чтобы это осуществить, они преобразуют входные сигналы напряжения и тока в цифровые коды, обрабатывают их и отображают результаты измерений на ЖК-дисплее. Результаты измерений и их обработки передаются по дискретным и цифровым интерфейсам связи на управляющие механизмы, информационные системы и/или системы управления более высокого уровня. Программно-конфигурируемые функции включают измерение, регистрацию, контроль параметров режима, релейную защиту, управление, автоматику, сигнализацию и диагностику энергетических объектов на основе библиотеки алгоритмов.

Локальные устройства противоаварийной автоматики (ЛПА) на базе КПА-М являются одним из наиболее популярных продуктов АО «ИАЭС». Они могут быть использованы как самостоятельные устройства для обнаружения аварийных и ненормальных режимов и создания управляющих воздействий, а также как периферийные устройства, обеспечивающие функционирование централизованных систем аварийной противоаварийной автоматики.

Устройства противоаварийной автоматики с локальными функциями на базе КПА-М производятся в виде комплексов или шкафов, которые могут включать одну или несколько функций. Наиболее востребованные на рынке наборы функций, доступные на устройствах ЛПА, включают:

- автоматическое локальное управление регулированием (АЛАР);
- автоматическое объединение и присоединение неисправных линий (АОПН с УРОВ);
- защита от несимметрии фаз (ЗНПФ);
- функция ограничения нагрузки (ФОЛ);
- автоматическое управление регулированием (АУР);
- автоматическое чтение счетчика режимного объема (АСР);
- автоматическое объединение и присоединение (АОПО).



Терминалы серии «ЭКРА 200» предназначены для использования в следующих случаях:

- защита оборудования станций и подстанций в схемах генерации и передачи мощности, в генерирующих установках металлургической и нефтегазовой промышленности, а также для управления и автоматизации;
- построение комплексных систем локальной и централизованной аварийной автоматики для электростанций и подстанций, а также для управления аварийными режимами энергоузлов;
- регистрация аналоговых и логических сигналов при возмущениях в энергосистеме на электрических станциях и подстанциях;
- управление выключателем и коммутационными аппаратами, блокировка оперативных действий, сбор и обработка информации;
- организация систем связи, передачи данных и команд между объектами мониторинга и контроля технического состояния оборудования на электрических станциях, подстанциях и промышленных предприятиях.

Принципиальная схема ступени представлена на рисунке.

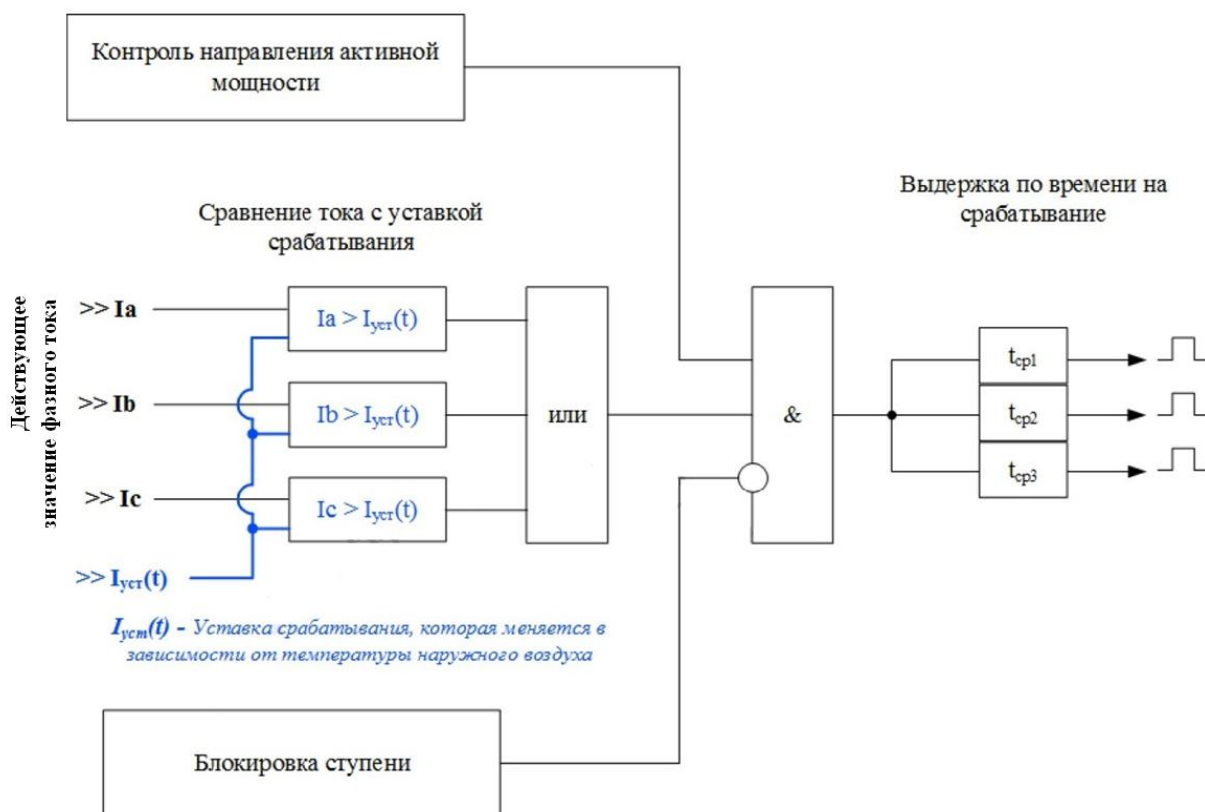


Рисунок. Принципиальная схема ступени

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ Р 55105-2012. Единая энергетическая система и изолированно работающие энергосистемы. Оперативно-диспетчерское управление.
2. Автоматическое противоаварийное управление режимами энергосистем. Противоаварийная автоматика энергосистем.

3. Сертификация микропроцессорных устройств автоматики ограничения перегрузки оборудования (АОПО). СОЕЭС.

4. Руководство по эксплуатации: терминалы микропроцессорные серии «ЭКРА 200». ООО НПП «ЭКРА».

5. Руководство по эксплуатации терминала «ТЕКОН 300». ЗАО «ТеконГруп».

## РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ НАГРЕВА ПРОВОДА И ИЗМЕНЕНИЯ СТРЕЛЫ ПРОВЕСА ВОЗДУШНОЙ ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ В ПРОЦЕССЕ ПРОТЕКАНИЯ ТОКА

*Жалнина В.Ю.* – студент

*Зенина Е.Г.* – канд. техн. наук, доцент

Филиал ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» в г. Волжском

*АННОТАЦИЯ.* Работа посвящена разработке математической модели, позволяющей оценить изменение температуры провода и стрелы провеса линии электропередачи в зависимости от величины протекающего тока и других воздействующих факторов. Полученная модель может иметь важное практическое значение для определения коэффициента коррекции, позволяющего минимизировать погрешность, возникающую при определении места повреждения на воздушной линии электропередачи.

*КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:* стрела провеса провода, уравнение теплового баланса, провод, тепловой поток, математическая модель.

*ABSTRACT.* This work is devoted to the development of a mathematical model that allows us to estimate the temperature change of the wire and the sag boom of an electric transmission line depending on the magnitude of the flowing current and other influencing factors. The resulting model may be of great practical importance for determining the correction factor, which minimizes the error that occurs when determining the location of damage on an overhead power line.

*KEYWORD:* wire sag boom, heat balance equation, wire, heat flow, mathematical model.

Существует несколько причин возникновения тепловых процессов в линиях электропередачи: первая – тепловыделение в результате протекания тока; вторая – теплообмен с окружающей средой.

Тепловые процессы в проводах описываются с помощью уравнения теплового баланса, которое может быть записано в виде

$$q_{\text{тепл.ист}} = q_{\text{нагр}} + q_{\text{конв}} + q_{\text{изл}} \quad (1)$$

где  $q_{\text{тепл.ист}}$  – тепловой поток источника, Вт;  $q_{\text{нагр}}$  – тепловой поток нагрева провода, Вт;  $q_{\text{конв}}$  – тепловой поток конвективной теплоотдачи, Вт;  $q_{\text{изл}}$  – поток теплового излучения нагретым проводом, Вт.

Определим по отдельности составляющие уравнения теплового баланса. Уравнение теплового потока источника показывает количество тепла, которое выделяется в проводе в процессе протекания по нему тока:

$$q_{\text{тепл.ист}} = I^2 \cdot R_{20} \cdot (1 + \alpha \cdot (T_{\text{окр}} + \theta - 20)), \quad (2)$$

где  $I$  – величина тока, протекающего по проводу, А;  $R_{20}$  – сопротивление провода при температуре 20 °С, Ом;  $\alpha$  – температурный коэффициент сопротивления провода, 1/°С;  $T_{\text{окр}}$  – температура окружающего воздуха, °С;  $T$  – температура провода, °С;  $\theta$  – разность температур провода и окружающей среды, °С.

Первое слагаемое уравнения теплового баланса – тепловой поток нагрева провода. Оно характеризует процесс нагрева провода в зависимости от его массы и теплоемкости и описывается уравнением

$$q_{\text{нагр}} = (c_c \cdot m_c + c_a \cdot m_a) \cdot \frac{d\theta}{dt}, \quad (3)$$

где  $c_c$  – удельная теплоемкость стальной части провода, Вт·с/кг·°С;  $c_a$  – удельная теплоемкость алюминиевой части провода, Вт·с/кг·°С;  $m_c$  – масса стали в проводе, кг;  $m_a$  – масса алюминия в проводе, кг;  $t$  – время протекания тока по проводу, с.

Следующее слагаемое, тепловой поток конвективной теплоотдачи, определяет количество тепла, которое распространяется в процессе движения воздуха:

$$q_{\text{конв}} = \alpha \cdot \theta, \quad (4)$$

где  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м<sup>2</sup>·К).

Удельный тепловой поток конвективной теплоотдачи для провода линии электропередачи при скорости ветра, равной 1 м/с, приближенно определяется формулой

$$q'_{\text{конв}} = 2,5\theta^{1,25} \cdot \left( \frac{293}{T + 273} \right)^{1,25}. \quad (5)$$

Еще один метод передачи тепловой энергии во внешнюю среду – тепловое излучение. Такой вид излучения имеет непрерывный диапазон с одним максимумом, позиция которого зависит от температуры тела (закон Стефана – Больцмана).

$$q'_{\text{изл}} = \sigma \cdot \varepsilon \cdot ((T + 273)^4 - (T_{\text{окр}} + 273)^4), \quad (6)$$

где  $\sigma = 5,6697 \cdot 10^{-8}$  – постоянная Стефана – Больцмана, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $\varepsilon$  – относительный коэффициент излучения.

Определим суммарный удельный тепловой поток конвекцией и излучением:

$$q'_\Sigma = \sigma \cdot \varepsilon \cdot \left( (T + 273)^4 - (T_{\text{окр}} + 273)^4 \right) + 2,5\theta^{1,25} \cdot \left( \frac{293}{T + 273} \right)^{1,25}. \quad (7)$$

Полученное выражение можно аппроксимировать в логарифмических осях  $(\ln \theta, \ln q'_\Sigma)$ , в результате чего будет получена кривая, описываемая следующим выражением:

$$\ln q'_\Sigma = h \cdot \ln \theta + \omega, \quad (8)$$

где  $\omega$  – коэффициент, зависящий от температуры окружающей среды;  $h = 1,25$  – угловой коэффициент прямой, принятый для алюминиевых и медных проводов.

Согласно статистическим экспериментальным данным, при изменении температуры окружающего воздуха в промежутке от  $-40$  °C до  $+40$  °C коэффициент  $\omega$  может быть определен по формуле

$$\omega = f + g \cdot T_{\text{окр}}, \quad (9)$$

где  $f = 4,45$  и  $2,875$  – постоянный коэффициент для медных и алюминиевых проводов соответственно;  $g = 0,0175$  и  $0,003$  – постоянный коэффициент для медных и алюминиевых проводов соответственно.

Суммарный тепловой поток конвективной теплоотдачи и теплового излучения определяется следующим образом:

$$q_\Sigma = q'_\Sigma \cdot P = \omega \cdot P \cdot \theta^h, \quad (10)$$

где  $P$  – периметр сечения провода, м.

Определим периметр, с учетом того что расчет производится для проводов круглого поперечного сечения:

$$P = \sqrt{4\pi S}, \quad (11)$$

где  $S$  – площадь поперечного сечения провода, мм<sup>2</sup>.

В результате всех произведенных преобразований представим уравнение теплового баланса в виде следующей зависимости:

$$(c_c \cdot m_c + c_a \cdot m_a) \cdot \frac{d\theta(t)}{dt} = I^2 \cdot R_{20} \cdot (1 + \alpha \cdot (T_{\text{окр}} + \theta(t) - 20)) - \omega \cdot P \cdot \theta(t)^h. \quad (12)$$

Построение математической модели было выполнено в программном комплексе Mathcad для провода марки АС-240/39. Результат и процесс моделирования представлены на рис. 1.

Исходные данные, используемые для разработки модели, представлены в табл.

Удельная теплоемкость провода:

$$C := C_a \cdot m_a + C_c \cdot m_c = 711.57$$

Коэффициент зависящий от температуры окружающей среды:

$$\omega := f_k + g \cdot T_{окр} = 2.938$$

Given

$$C \left( \frac{d}{dt} \theta(t) \right) = I^2 \cdot R_{20} \cdot [1 + \alpha_c \cdot (T_{окр} + \theta(t) - 20)] - \omega \cdot P \cdot \theta(t)^h$$

$$\theta(0) = 0$$

$$\theta := \text{Odesolve}(t, 7000)$$

$$T(t) := \theta(t) + T_{окр}$$

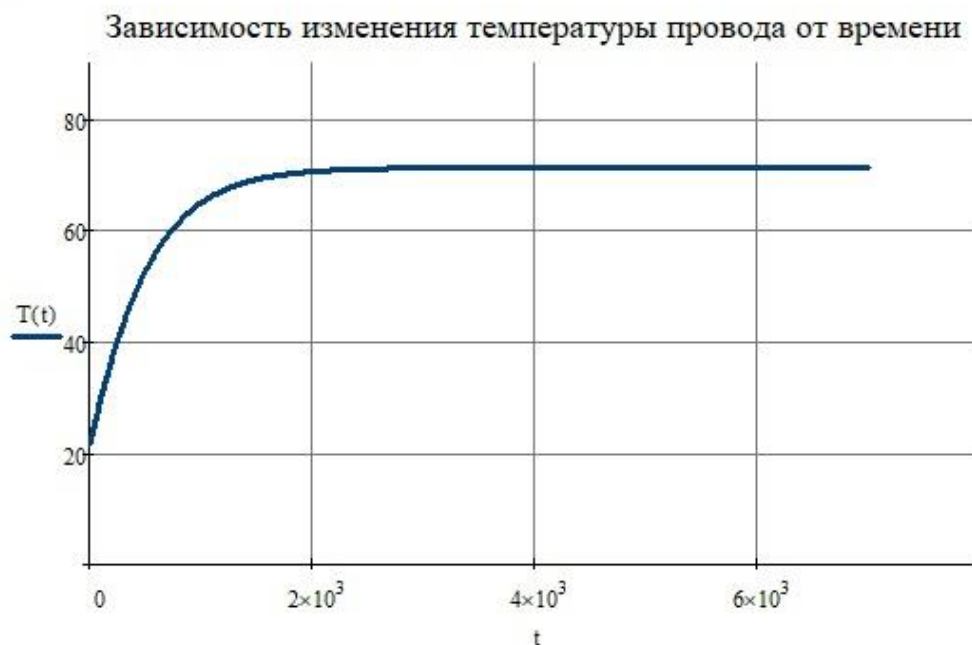


Рис. 1. Математическая модель нагрева провода марки АС-240/39 при протекании тока величиной 700 А

**Исходные данные для построения математической модели**

Масса алюминиевой части провода, кг/м	0,650
Масса стальной части провода, кг/м	0,302
Сопротивление провода при температуре 20 °С, Ом/мм	$0,12428 \cdot 10^{-3}$
Удельная теплоемкость алюминия, Дж/кг·К	881
Удельная теплоемкость стали, Дж/кг·К	460
Температура окружающей среды, °С	21
Длина пролета, м	328
Стрела провеса, м	7
Площадь поперечного сечения, мм <sup>2</sup>	279
Величина тока, А	700

Далее произведем механический расчет для построения зависимости провиса провода от времени.

Механическое напряжение в проводе для ненагруженного провода либо при начальных проектных условиях:

$$\sigma = \frac{g \cdot l^2}{8 \cdot f}, \quad (13)$$

где  $g$  – удельная нагрузка, кг/м·мм<sup>2</sup>;  $l$  – длина пролета, м;  $f$  – стрела провеса, м.

Определим длину провода в пролете следующим образом:

$$L = l + \frac{l^3 g^2}{24\sigma^2}. \quad (14)$$

При нагреве провода от 0 до температуры  $t_n$  длина провода изменится и составит

$$L_n = L \cdot (1 + \alpha \cdot t_n), \quad (15)$$

где  $\alpha$  – температурный коэффициент линейного удлинения провода, 1/°C.

Если теперь к проводу будет приложена нагрузка, то его длина изменится и станет равной

$$L_n = l \cdot (1 + \alpha \cdot t_n)(1 + \beta \cdot \sigma_n), \quad (16)$$

где  $\beta = \frac{1}{E}$  – коэффициент упругого удлинения материала провода;  $E$  – модуль упругости.

Приравняем уравнения (14) и (16):

$$l + \frac{l^3 g^2}{24\sigma^2} = l \cdot (1 + \alpha \cdot t_n)(1 + \beta \cdot \sigma_n). \quad (17)$$

Зная, что значения  $\alpha$  и  $\beta$  весьма малы, величиной их произведения можем пренебречь, считая, что  $\alpha\beta t_n \sigma_n \approx 0$ . Произведем математические преобразования для выражения (17): сократим обе части на  $l$ ; исключим 1 в обеих частях; разделим обе части на  $\beta$ .

В результате получим следующее уравнение:

$$\sigma_n - \frac{l^2 g^2}{24\beta\sigma_n^2} = -\frac{\alpha}{\beta} \cdot t_n. \quad (18)$$

Это же уравнение справедливо и для начальных условий, тогда получим

$$\sigma - \frac{l^2 g^2}{24\beta\sigma^2} = \sigma_n - \frac{l^2 g^2}{24\beta\sigma_n^2} - \frac{\alpha}{\beta} \cdot \theta. \quad (19)$$

Решение уравнения состояния провода в пролете также произведено в программном комплексе Mathcad, в результате чего построена зависимость изменения стрелы провеса провода АС-240/39 от времени при протекании по нему тока величиной 700 А, представленная на рис. 2.

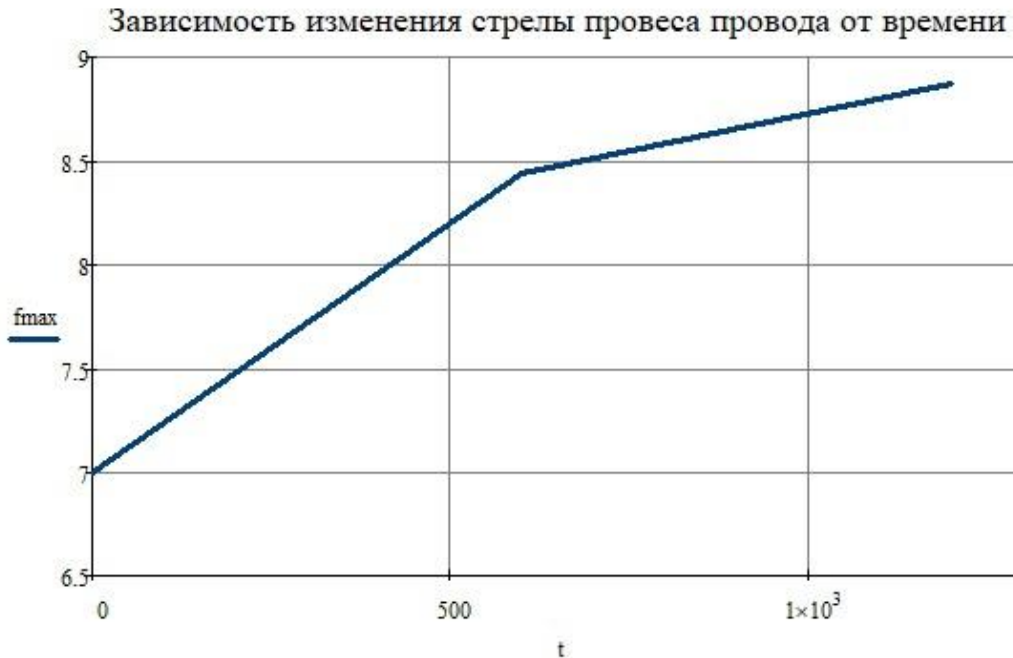


Рис. 2. Зависимость изменения стрелы провеса провода АС-240/39 от времени при протекании по нему тока величиной 700 А

### *Выводы*

В ходе работы произведены расчеты и построены математические модели, которые могут быть использованы для определения коэффициента коррекции, необходимого для снижения погрешности, возникающей при определении места повреждения на воздушных линиях электропередачи волновым методом из-за нагрева провода и последующего изменения его габаритных размеров.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Будзко, И.А. Электроснабжение сельского хозяйства / И.А. Будзко, Т.Б. Лещинская, В.И. Сукманов. – М.: Колос, 2000. – 536 с.
2. Герасименко, А.А. Статистическое моделирование электрических нагрузок в задаче определения интегральных характеристик систем распределения электрической энергии: монография / А.А. Герасименко, И.В. Шульгин. – Красноярск: Сибирский федер. ун-т, 2014. – 207 с.

## РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМОВ ОЦЕНКИ И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ УРОВНЯ БЕЗОПАСНОСТИ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

*Благочиннов А.В.*<sup>1</sup>, *Шевченко М.Е.*<sup>1</sup> – аспиранты

*Курьянова Е.В.*<sup>2</sup> – доцент кафедры Энергетики

<sup>1</sup>ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»

<sup>2</sup>Филиал ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» в г. Волжском

*АННОТАЦИЯ.* В статье рассматривается актуальная проблема оценки безопасности тепловых сетей и источников тепловой энергии, функционирующих в составе крупных энергоснабжающих систем. Выполнена оценка уровней безопасности, учитывающих дефициты тепла и энергии теплоэнергетических объектов, снижение надежности и экономических последствий, основанная на применении статистических данных о надежности объектов, инвестиционных проектах, мощностях источников, режимах работы оборудования. Разработан алгоритм прогнозирования уровня безопасности и надежности функционирования системы тепло- и электроснабжения.

*КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:* уровень безопасности, надежность объектов, экономическая эффективность.

*ABSTRACT:* The article discusses the current problem of assessing the safety of heating networks and heat energy sources operating as part of large power supply systems. The assessment of safety levels taking into account heat and energy shortages of heat and power facilities, reduction of reliability and economic consequences, based on the use of statistical data on the reliability of facilities, investment projects, power sources, equipment operation modes, was carried out. An algorithm for predicting the level of safety and reliability of the operation of the heat and power supply system has been developed.

*KEYWORDS:* level of safety, reliability of facilities, cost-effectiveness.

В рамках национального проекта «Цифровая экономика» предусмотрены мероприятия, направленные на улучшение конкурентоспособности российской энергетической отрасли. Это включает разработку и внедрение новых подходов к оценке безопасности и экономической эффективности работы оборудования в генерирующих системах с целью развития и ускорения роста отечественной энергетики. В настоящее время достижение такого эффекта возможно посредством создания современных цифровых систем, позволяющих в режиме реального времени осуществлять контроль, оценку текущего технического состояния энергетического оборудования и прогнозирование изменения его параметров во времени [1, 2].

В работе представлены алгоритмы, которые позволяют рассчитывать и прогнозировать уровень безопасности и экономическую эффективность генерирующих объектов в процессе производства электрической и тепловой энергии,



а также в процессе теплоснабжения. Разработанные алгоритмы учитывают важные технологические параметры энергетического оборудования и контролируют их изменения в режиме реального времени.

Предложенные показатели безопасности учитывают вес технологических параметров, таких как тепловая и электрическая мощность, расход топлива, количество технологических сбоев и другие, и их влияние на комплексный показатель энергетической безопасности. В качестве показателей экономической эффективности используются удельный расход условного топлива, удельное количество теплоты на производство электрической энергии и себестоимость электрической и тепловой энергии, срок эксплуатации, освоение инвестиций и т. д. Работа исследует примеры энергетических и теплоснабжающих объектов, таких как энергоблоки тепловых электрических станций, тепловые и электрические сети. Результаты исследования могут быть применены энергетическими предприятиями для разработки и реализации концепции цифровой трансформации технологического процесса [3, 4].

В разработанном алгоритме оценки уровня безопасности и экономической эффективности энергоблока станции предусмотрены следующие этапы.

1. Ввод перечня индикаторов энергетической безопасности и показателей экономической эффективности, необходимых для оценки уровня безопасности и экономической эффективности энергоблока и системы теплоснабжения. Этот перечень отражает возможные угрозы энергетической безопасности и экономической эффективности.

2. Ввод исходных данных для расчета основных индикаторов энергетической безопасности и показателей экономической эффективности энергоблоков и системы теплоснабжения.

3. Установление пороговых значений индикаторов и показателей.

4. Расчет и сравнение индикаторов и показателей с пороговыми значениями для определения уровня безопасности энергоблока и системы теплоснабжения.

5. Анализ протоколов технического состояния функциональных узлов и элементов энергоблока и системы теплоснабжения.

6. Принятие решения о мере физического воздействия на узлы и элементы энергоблока для определения прогнозных значений индикаторов энергетической безопасности и показателей экономической эффективности.

7. Передача информации в единую информационно-измерительную систему для корректировки уровня безопасности и экономической эффективности функциональных узлов и элементов.

8. Оценка ситуации по каждому энергоблоку и по всей станции на основе полученных результатов по каждому индикатору и показателю.

9. Анализ полученной информации для определения пределов изменения уровня энергетической безопасности и экономической эффективности. При необходимости проводится корректировка мероприятий по повышению надежности и экономической безопасности энергосистемы.

На рис. 1 изображена блок-схема алгоритма оценки и прогнозирования безопасности и экономической эффективности энергоблоков отдельно от тепловых сетей.

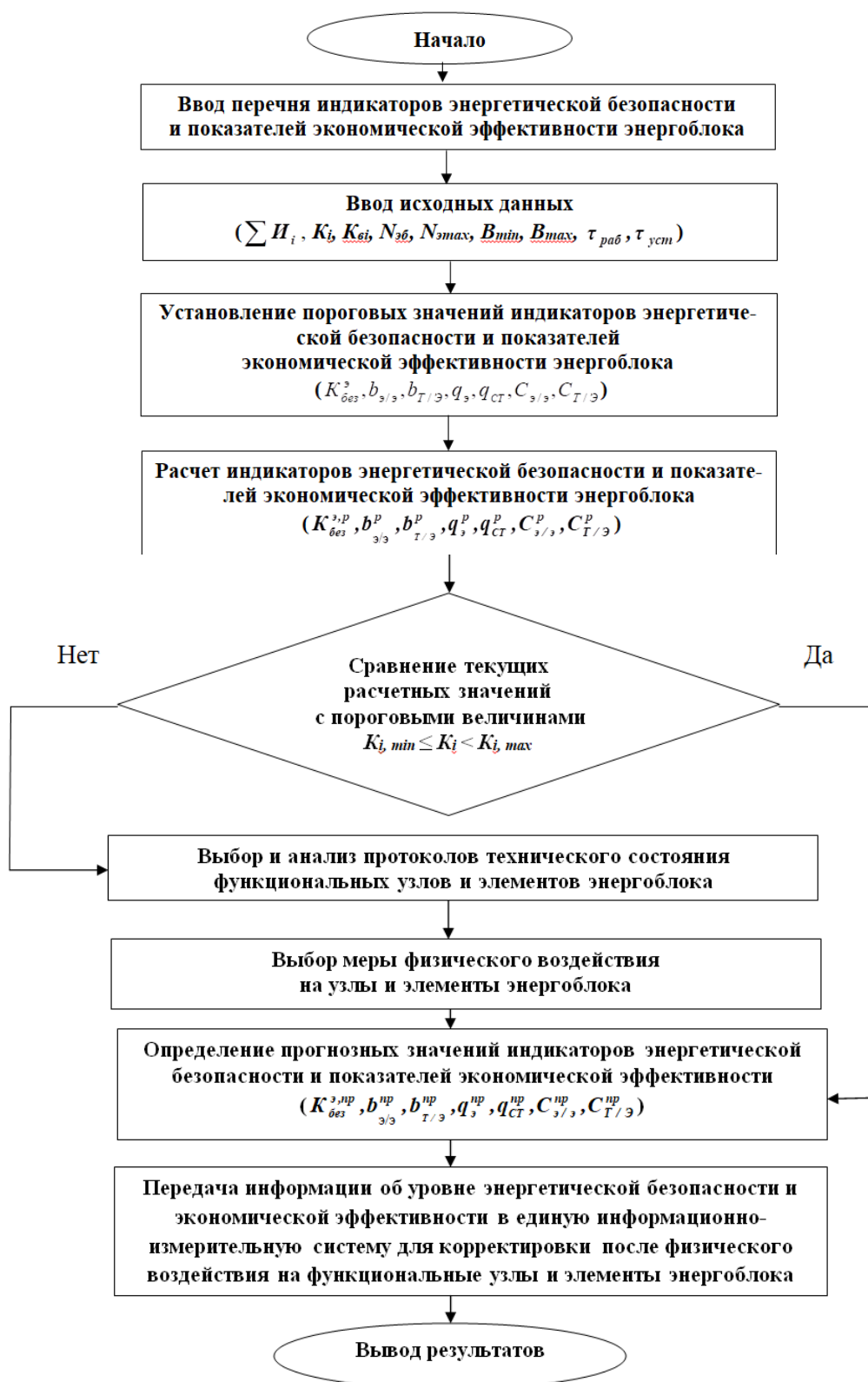


Рис. 1. Блок-схема алгоритма оценки и прогнозирования безопасности и экономической эффективности энергоблоков

Таким образом, алгоритм позволяет систематически оценить и контролировать уровень безопасности и экономической эффективности в энергосистемах, а также принимать соответствующие меры для повышения их надежности и безопасности [5].

Концептуальная схема управления безопасностью сетей теплоснабжения (рис. 2) предполагает построение схемы управления безопасностью тепловых сетей города, основываясь на комплексном рассмотрении статистических показателей и на справочно-нормативной документации по вопросам энергетической безопасности и надежности [6, 7].

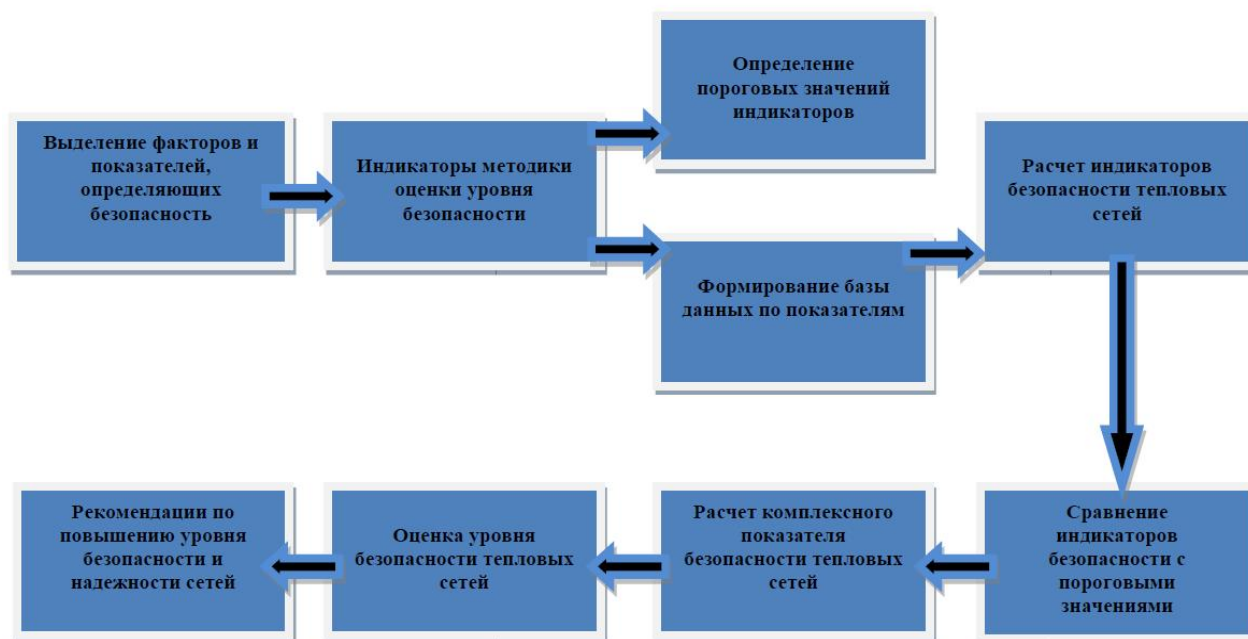


Рис. 2. Схема управления безопасностью и надежностью сети теплоснабжения

### Выводы

На основе выполненного исследования предложены алгоритмы расчета и прогнозирования уровня безопасности и экономической эффективности для генерирующих объектов в процессе производства электрической и тепловой энергии и систем теплоснабжения. Алгоритмы учитывают технологические параметры оборудования и контролируют их изменения в реальном времени. Индикаторы безопасности учитывают вес параметров и их влияние на комплексный показатель энергетической безопасности.

Результаты исследования могут быть использованы энергетическими предприятиями для внедрения цифровых платформ сбора, хранения и передачи данных о состоянии энергетического оборудования. Это позволит рассчитывать и прогнозировать уровень безопасности и экономической эффективности в процессах производства и передачи электрической и тепловой энергии. Получение прогнозных данных на основе алгоритмов позволит планировать ремонт

оборудования, управлять энергетическими режимами и распределением нагрузки, снизить потери энергии при ее передаче [8–10].

Работа выполнена при финансовой поддержке государственного задания Российской Федерации FSWF-2020-0025 «Разработка методов и анализ способов достижения высокого уровня безопасности и конкурентоспособности объектов энергетических систем на базе цифровых технологий» на оборудовании Центра коллективного пользования «Испытательный полигон технологий транспортировки электроэнергии и распределенных интеллектуальных энергосистем» НТИ МЭИ.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Федеральный закон от 21.07.97 № 116-ФЗ «О промышленной безопасности опасных производственных объектов».
2. Энергетическая стратегия России на период до 2035 года (утв. распоряжением Правительства РФ от 01 февраля 2017 г. № 1715-р).
3. Приказ Министерства энергетики РФ от 19 февраля 2019 г. № 123 «Об утверждении методических указаний по расчету вероятности отказа функционального узла и единицы основного технологического оборудования и оценки последствий такого отказа».
4. Гайфуллина, М.М. Оценка энергетической безопасности и энергоэффективности нефтяной компании / М.М. Гайфуллина, Д.Р. Халиуллина, Л.К. Хафизова // Интернет-журнал «Науковедение». – 2017. – Том 9. – № 3.
5. Барановский, В.В. Использование логико-вероятностных методов для оценки безопасности и надежности ТЭС как структурно-сложных технических систем / В.В. Барановский, Т.Ю. Короткова, М.Ю. Коновалов // Энергобезопасность и охрана труда. – 2015. – № 2 (62). – С. 5–9.
6. Гайфуллин, А.Ю. Методический подход к оценке социальной безопасности региона / А.Ю. Гайфуллин, М.М. Гайфуллина // Фундаментальные исследования. – 2015. – № 12 (5). – С. 1001–1006.
7. Башмаков И.А. Анализ основных тенденций развития систем теплоснабжения России / И.А. Башмаков // Энергетическая политика. – 2009. – № 2. – С. 10–25.
8. Программа сбора, хранения и обработки данных о режимах работы энергетических систем для обеспечения высокого уровня надежности / М.М. Султанов, И.А. Болдырев, Ю.А. Горбань, А.А. Смирнов, В.А. Юров. – Свидетельство № 2022685054.
9. Султанов, М.М. Принцип и алгоритм распределения данных о надежности и режимах работы энергетического оборудования при совместном использовании сети блокчейн и централизованной системы хранения данных / М.М. Султанов // Новое в российской электроэнергетике. – 2022. – № 12. – С. 30–40.
10. Султанов, М.М. Применение моделей расчета и прогнозирования надежности и безопасности энергетического оборудования с использованием комплексов сбора, обработки и управления данными / М.М. Султанов, И.А. Болдырев, П.В. Шамигулов // Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики: сборник материалов 94-го заседания Международного научного семинара; отв. редактор В.А. Стенников. – Иркутск, 2022. – С. 573–582.

## РАСЧЕТНАЯ ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ СНИЖЕНИЯ ВЫБРОСОВ ПАРНИКОВЫХ ГАЗОВ НА ТЕПЛОВЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЯХ

*Васильев А.Р.* – студент

*Гусева Ю.В.* – канд. физ.-мат. наук, доцент  
Филиал ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» в г. Волжском

*АННОТАЦИЯ.* В статье выполнена оценка эффективности снижения выбросов парниковых газов на тепловых электрических станциях при использовании на стадии охлаждения продуктов сгорания методов кальцево-карбонатного цикла, мембранных технологий и ферментации парниковых газов.

*КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:* тепловая электрическая станция, кальцево-карбонатный цикл, ферментация, мембранные технологии, парниковые газы.

*ABSTRACT.* The article evaluates the effectiveness of reducing greenhouse gas emissions at thermal power plants when using methods of the calcium-carbonate cycle, membrane technologies and fermentation of greenhouse gases at the stage of cooling combustion products.

*KEYWORDS:* thermal power plant, calcium carbonate cycle, fermentation, membrane technologies, greenhouse gases.

Использование органического топлива на тепловых электрических станциях приводит к образованию в продуктах сгорания котельных установок парниковых газов, в основном представленных углекислым газом. В рамках действующего природоохранного законодательства проводится эксперимент по квотированию вредных (загрязняющих) выбросов, одной из задач которого является определение массы выбросов парниковых газов, рассчитанных для каждого источника загрязняющих выбросов [1]. В данной работе выполнена расчетная оценка эффективности снижения выбросов парниковых газов при использовании различных методов технологического подавления на стадии охлаждения продуктов сгорания и анализ выбора методов подавления парниковых газов на отечественных теплоэлектроцентралях (ТЭЦ).

Анализ показывает, что наиболее реальными в части внедрения на действующих энергетических объектах являются технологии ограничения выбросов углекислого газа на стадии охлаждения продуктов сгорания. С учетом некоторых технологических особенностей выполнено сравнение различных технологий (варианты) снижения выбросов парниковых газов в атмосферу [2].

На рис. 1 представлены оценочные значения эффективности технологий очистки продуктов сгорания от выбросов  $\text{CO}_2$  на тепловых электростанциях.

На рис. 2 представлены результаты оценки капиталовложений для различных технологий (варианты) очистки дымовых газов теплоэлектроцентралей по состоянию на декабрь 2023 года.

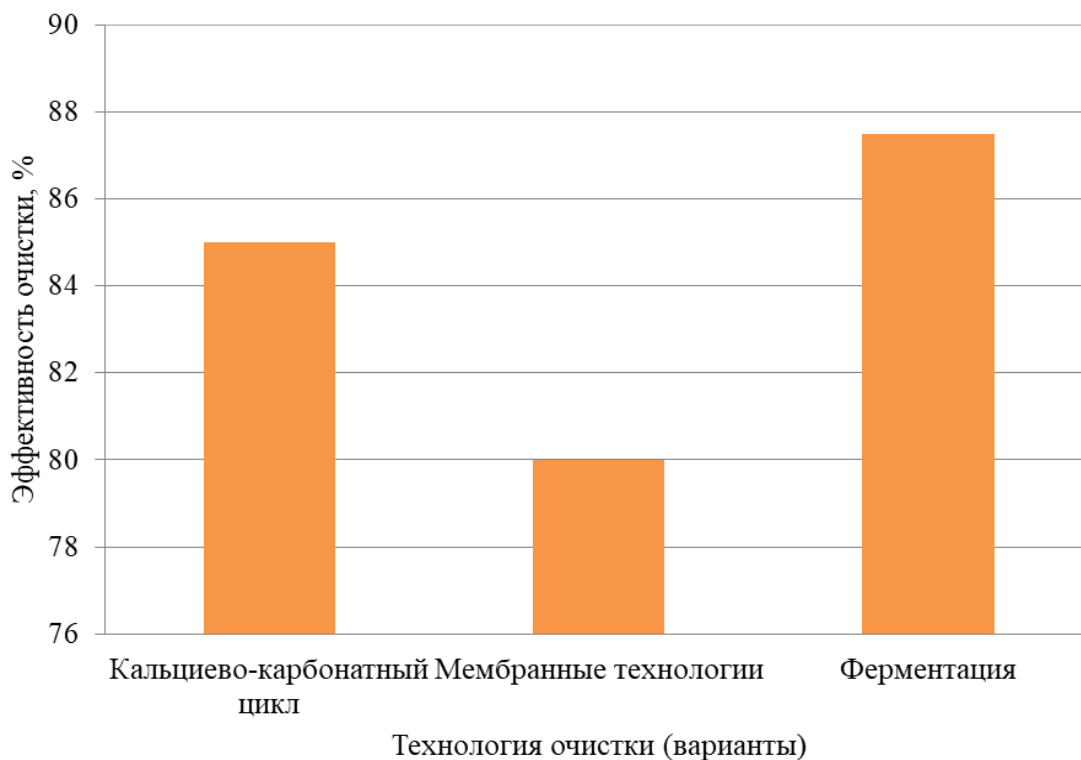


Рис. 1. Эффективность технологий очистки продуктов сгорания от выбросов CO<sub>2</sub>

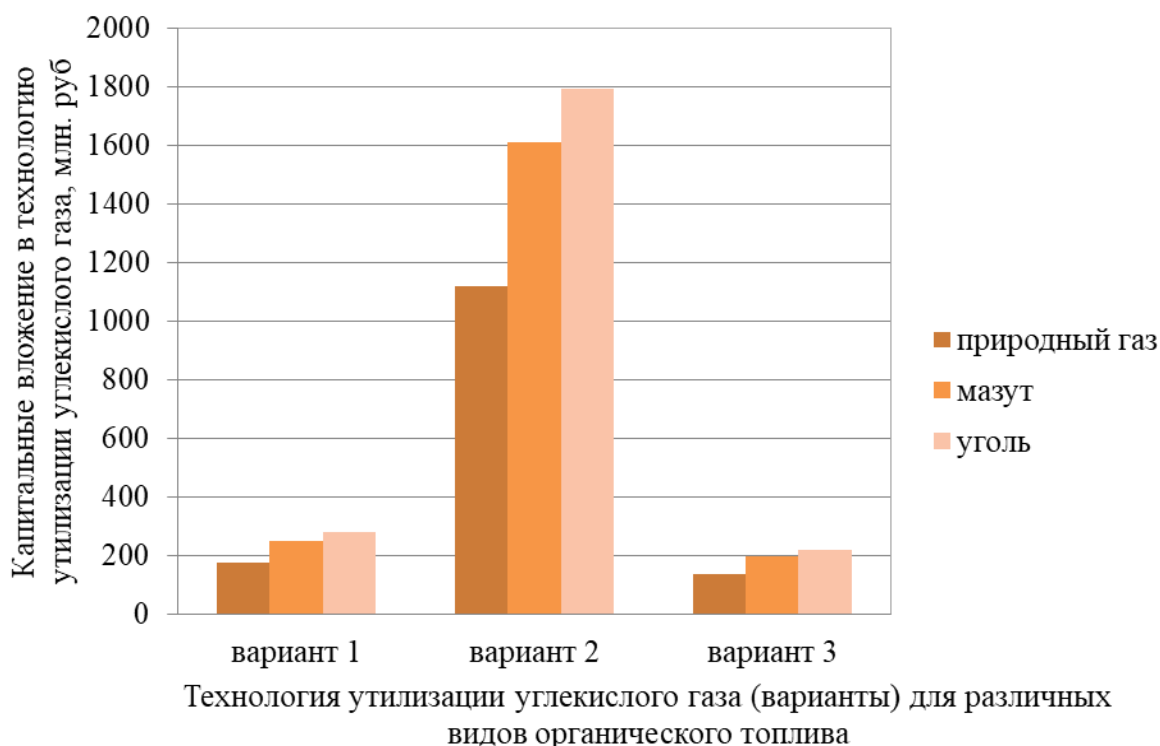


Рис. 2. Капитальные вложения в технологии (варианты) очистки выбросов от CO<sub>2</sub>:  
 вариант 1 – выделение CO<sub>2</sub> из дымовых газов в кальциево-карбонатном цикле;  
 вариант 2 – мембранные технологии захвата CO<sub>2</sub> до сжигания органического топлива;  
 вариант 3 – экологически чистое выделение CO<sub>2</sub> с помощью ферментов [2]

Массовые выбросы  $\text{CO}_2$  на примере рассматриваемой ТЭЦ (при работе на высокосернистом мазуте) с учетом установленной мощности 500 МВт и годового режима загрузки 6000 часов составляют 3844,43 тыс. тонн, а при режиме фактической среднегодовой нагрузки равны 1307,11 тыс. тонн, при использовании угля фактическая масса выбросов  $\text{CO}_2$  равна 1560,72 тыс. тонн, при горении природного газа масса выбросов составила 975,45 тыс. тонн. Степень очистки выбросов  $\text{CO}_2$  принята на уровне  $\eta_{oi} = 80\%$ .

При повышении степени очистки продуктов сгорания от  $\text{CO}_2$  до 90 % за счет применения способа ферментации и фактической среднегодовой нагрузке в условиях сжигания мазута масса выбросов равна 635,56 тыс. тонн, при использовании угля фактическая масса выбросов  $\text{CO}_2$  равна 780,36 тыс. тонн, при горении природного газа масса выбросов составила 487,73 тыс. тонн. Таким образом, природный газ является наиболее перспективным топливом для обеспечения экологических показателей выбросов парниковых газов в условиях действующего эксперимента на энергетических предприятиях по квотированию выбросов [1–4].

#### *Выводы*

В ходе расчетных исследований установлено, что применение современных технологий очистки продуктов сгорания от парниковых газов на тепловых электрических станциях сопровождается высокими удельными капиталовложениями. Следует отметить, что в условиях государственного регулирования природоохранной деятельности для энергетических предприятий существует возможность снижения приведенных затрат посредством реализации на действующем производстве наилучших доступных технологий [5–8]. При внедрении наилучших доступных технологий на тепловых электрических станциях, согласно современному природоохранному законодательству, энергетические предприятия будут освобождены от уплаты экологических платежей.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Федеральный закон РФ от 26.07.2019 № 195-ФЗ «О проведении эксперимента по квотированию выбросов загрязняющих веществ и внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации в части снижения загрязнения атмосферного воздуха» [Электронный ресурс]. – URL: [http:// www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_329955/](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_329955/) (дата обращения: 20.12.2023).
2. ИТС 38-2017. Сжигание топлива на крупных установках в целях производства энергии // Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям. – Введ. 2018-07-01. – М.: Росстандарт, 2017.
3. Иваницкий, М.С. Токсичность уходящих газов твердотопливного котла КЕ-25-14С / М.С. Иваницкий // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2020. – Т. 22. – № 1. – С. 77–84.
4. Иваницкий, М.С. Исследование токсичности уходящих газов твердотопливных котлов малой мощности / М.С. Иваницкий // Энергосбережение и водоподготовка. – 2016. – № 1 (99). – С. 56–61.

5. Пат. RU 2499192 С1. Способ автоматического регулирования процесса горения в тепловом агрегате / А.Д. Грига, М.С. Иваницкий, В.М. Фокин. № 2012129072/06; заявл. 10.07.2012; опубл. 20.11.2013.

6. Иваницкий, М.С. Содержание токсичных продуктов в уходящих газах перспективных угольных энергоблоков 660 и 1060 МВт / М.С. Иваницкий // Энергобезопасность и энергосбережение. – 2016. – № 4. – С. 5–9.

7. Иваницкий, М.С. Выбросы диоксида углерода в атмосферу при эксплуатации пылеугольных котлов ТЭС / М.С. Иваницкий // Энергосбережение и водоподготовка. – 2015. – № 3 (95). – С. 63–67.

8. Грига, А.Д. Построение модели расчета концентрации бенз(а)пирена в дымовых газах энергетических котлов / А.Д. Грига, М.С. Иваницкий, Ю.В. Васильева // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2014. – № 5–6. – С. 43–47.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СПОСОБА РЕАГЕНТНОГО УМЯГЧЕНИЯ КОНЦЕНТРАТА ОБРАТНОГО ОСМОСА

*Аввакумов Т.А.* – студент

*Одоевцева М.В.* – канд. техн. наук, доцент

Филиал ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» в г. Волжском

*АННОТАЦИЯ.* В статье представлены результаты реагентного умягчения концентрата двухстадийной обратноосмотической установки. Приведен ионный состав итогового умягченного концентрата, а также описаны происходящие химические реакции.

*КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:* обратный осмос, концентрат, реагентное умягчение.

*ABSTRACT.* The paper presents the results of softening the concentrate taken at the outlet of a two-stage reverse osmosis plant. The ionic composition of the final softened concentrate is given, and the chemical reactions occurring are described.

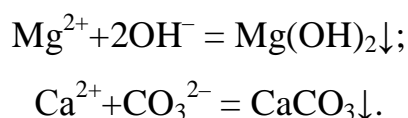
*KEYWORDS:* reverse osmosis, concentrate, reagent softening.

В зависимости от требуемого качества и исходного состава воды применяются различные схемы подготовки воды. Высокоэкологичные и энергоэффективные системы подготовки воды формируются с использованием мембранных методов, в частности установок обратного осмоса. Такие установки позволяют сократить объемы применяемых реагентов и снизить концентрации образующихся минерализованных сточных вод. Однако для таких установок существуют сложности в сокращении потребления воды на собственные нужды. В связи с этим оценивалась эффективность применения реагентного метода умягчения концентрата для последующего применения на мембранных установках обессоливания воды. В качестве объекта исследования использовался



концентрат после двухстадийной обратноосмотической установки. Ионный состав концентрата представлен в табл. 1.

Реагентное умягчение концентрата реализовывалось при обработке концентрата растворами извести  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  и соды  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ . При введении  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  достигается повышение рН обрабатываемой воды до значений 11,2–11,8. При такой величине рН все формы угольной кислоты преобразуются в карбонат-ионы. С учетом присутствия в обрабатываемой воде ионов  $\text{Ca}^{2+}$  и  $\text{Mg}^{2+}$  и образовавшихся ионов  $\text{CO}_3^{2-}$  из воды выделяется труднорастворимый карбонат кальция  $\text{CaCO}_3$ . Избыток ионов  $\text{OH}^-$  обеспечивает перевод ионов  $\text{Mg}^{2+}$  в твердую фазу:



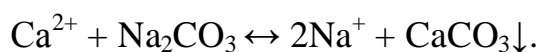
Технология известкования дополняется обработкой воды кальцинированной содой  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  для повышения эффекта осаждения ионов  $\text{Ca}^{2+}$  и  $\text{Mg}^{2+}$ .

Таблица 1

**Ионный состав концентрата**

Показатели	Размерность	Значение
$\text{Ж}_o$	мг-экв/дм <sup>3</sup>	15,2
$\text{Ж}_{\text{Ca}}$	мг-экв/дм <sup>3</sup>	10,0
$\text{Ж}_{\text{Mg}}$	мг-экв/дм <sup>3</sup>	5,2
$\text{Щ}_o$	мг-экв/дм <sup>3</sup>	8,8
Окисляемость	мг/дм <sup>3</sup> $\text{KMnO}_4$	105,0
$\text{Na}^+$	мг/дм <sup>3</sup>	111,0
$\text{Cl}^-$	мг/дм <sup>3</sup>	133,0
Электропроводность	мкСм/см	1840,0
рН	–	8,2

При содоизвестковании ионы магния при замене на ионы кальция удаляются практически полностью, а кальциевые соли некарбонатной жесткости осаждаются содой:



Доза соды, мг-экв/кг, и доза извести, мг-экв/кг, рассчитывали по следующим формулам:

$$D_c = \text{Ж}_{\text{исх}} - \text{Щ}_{\text{исх}} + \text{Ж}_{\text{ост}} + D_k + I_{\text{и}} + I_c = \text{Ж}_{\text{исх}} - \text{Щ}_{\text{исх}} + 0,4; \quad (1)$$

$$D_{\text{и}} = C_{\text{CO}_2}^{\text{исх}} + \text{Щ}^{\text{исх}} + \text{Ж}_{\text{Mg}} + D_k + I_{\text{и}} = \text{Щ}^{\text{исх}} + \text{Ж}_{\text{Mg}} + 0,1. \quad (2)$$

При проведении расчета принимаем:

- $\text{Ж}_{\text{ост}} = 0,2$  мг-экв/л – остаточная жесткость;
- $D_k$ , мг-экв/л – коагулянт не вводился;

- $I_{и} = 0,1$  мг-экв/л – избыток извести;
- $I_{с} = 0,1$  мг-экв/л – избыток соды.

По формулам (1) и (2) и ионному составу концентрата (табл. 1) были рассчитаны дозы реагентов. Обработка концентрата производилась в колбах 500 мл, по 250 мл раствора. Одним из основных факторов, способствующих эффективности процесса осаждения, является подогрев воды.

Предварительно концентрат подогревался до  $40\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ , и данная температура поддерживалась в течение всего эксперимента. В подогретый концентрат добавлялась известь, перемешивалась в течение 5 минут, в течение 30 минут проходила реакция. После извести добавлялась сода, проводились те же мероприятия, что и изложенные выше. Полученные результаты приведены в табл. 2.

Таблица 2

**Качество концентрата после содоизвесткования**

Показатели	$D_{и} = 19$ мг-экв/кг $D_{с} = 6$ мг-экв/кг	$D_{и} = 25$ мг-экв/кг $D_{с} = 6$ мг-экв/кг	$D_{и} = 19$ мг-экв/кг $D_{с} = 25$ мг-экв/кг
pH	11,05/10,7	11,20/11,20	11,15/10,75
$J_{о},$ мг-экв/дм <sup>3</sup>	2,00	4,00	0,30
$J_{Ca},$ мг-экв/дм <sup>3</sup>	2,00	4,00	0,14
$J_{Mg},$ мг-экв/дм <sup>3</sup>	0	0	0,16
$J_{с},$ мг-экв/дм <sup>3</sup>	3,20	5,20	7,00

Дозы рассчитанных реагентов оказалось недостаточно, поэтому было принято решение повысить дозировку соды до 25 мг-экв/кг. Избыток реагентов необходим в связи с наличием в концентрате антискаланта, который является ингибитором солевых отложений. При дозе реагентов  $D_{и} = 19$  мг-экв/кг,  $D_{с} = 25$  мг-экв/кг жесткость снизилась в 50 раз.

*Выводы*

Предлагаемая технология позволит превратить концентрат в раствор солей натрия для последующей обработки на установках мембранного обессоливания воды с целью сокращения потребляемой воды и количества стоков.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Копылов, А.С. Водоподготовка в энергетике: учеб. пособие для вузов / А.С. Копылов, В.М. Лавыгин, В.Ф. Очков. – М.: Издательский дом МЭИ, 2016. – С. 167–181.
2. ГОСТ Р 59418-2021. Биологическая безопасность. Очистка сточных, технических, поверхностных вод и фильтратов полигонов твердых коммунальных отходов на основе обратного осмоса.
3. Хмельницкий, Р.А. Физическая и коллоидная химия / Р.А. Хмельницкий. – М.: Высшая школа, 1988. – 400 с.

## ПОВЫШЕНИЕ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ТЕПЛОВЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

*Васильев А.Р., Кострюков С.А.* – студенты  
*Гусева Ю.В.* – канд. физ.-мат. наук, доцент  
Филиал ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» в г. Волжском

*АННОТАЦИЯ.* В статье выполнен анализ организационных и технологических мер, направленных на повышение экологической безопасности тепловых электрических станций, оказывающих негативное влияние на окружающую среду.

*КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:* экологическая безопасность, тепловые электростанции, газообразные выбросы, парниковые газы.

*ABSTRACT.* The article analyzes organizational and technological measures aimed at improving the environmental safety of thermal power plants that have a negative impact on the environment.

*KEYWORDS:* environmental safety, thermal power plants, gaseous emissions, greenhouse gases.

Тепловые электрические станции и энергетические предприятия, оказывающие значительное негативное воздействие на окружающую среду, участвуют в эксперименте по квотированию выбросов загрязняющих веществ с соблюдением принципа технологического нормирования в условиях государственного регулирования природоохранной деятельности. Таким образом, для повышения конкурентоспособности отечественной электроэнергетики рассматриваются технологические решения и методы ограничения поступления в атмосферу парниковых газов, образующихся при сжигании любого натурального топлива. Известные и широко распространенные за рубежом технологии утилизации выбросов парниковых газов характеризуются высокими капитальными вложениями при их внедрении на действующем производстве в России. В этой связи реализация такой природоохранной политики по внедрению соответствующих технологий и решений на реальных объектах отечественной теплоэнергетики требует предварительного технологического и финансового обоснования вложения инвестиций [1, 2].

С целью оценки возможности реализации данного подхода в настоящей работе выполнены расчетная оценка содержания в продуктах сгорания натурального топлива (природного газа, мазута, канско-ачинского угля) углекислого газа, являющегося наиболее распространенным парниковым газом, помимо метана, гексафторида серы и хлордифторметана (рис. 1). Рассмотрены наиболее распространенные технологии снижения выбросов парниковых газов, такие как выделение  $\text{CO}_2$  из дымовых газов в кальциево-карбонатном цикле (вариант 1), мембранные технологии захвата  $\text{CO}_2$  до сжигания органического топлива (вариант 2) и технология экологически чистого выделения  $\text{CO}_2$  из

продуктов сгорания органического топлива с помощью ферментов (вариант 3), как это показано на рис. 2.

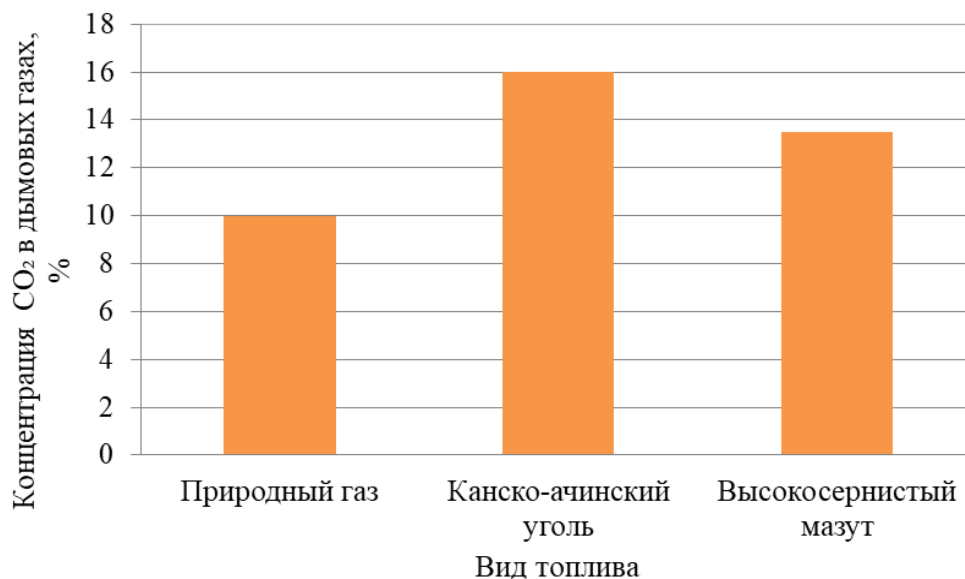


Рис. 1. Содержание CO<sub>2</sub> в продуктах сгорания различных видов органического топлива

В ходе исследования установлено, что при сгорании природного газа объемная концентрация CO<sub>2</sub> оценочно составляет 10 %, для варианта сжигания малосернистого мазута соответствует значениям 13,5 %, при использовании угля канско-ачинского месторождения не превышает 16 %.

Оценочные данные по удельным затратам на внедрение технологий снижения выбросов парниковых газов на тепловых электрических станциях (варианты) на рис. 2 представлены по состоянию на декабрь 2023 года.



Рис. 2. Удельные затраты на внедрение технологий снижения выбросов парниковых газов на тепловых электрических станциях (варианты)

### *Выводы*

Согласно анализу результатов расчетов, технологии ограничения углекислого газа характеризуются высокими удельными капиталовложениями. Оценка простого и дисконтированного сроков окупаемости технологий подавления выбросов углекислого газа показала, что рассматриваемые методы утилизации (кальциево-карбонатный цикл – вариант 1; ферментация – вариант 3) могут быть практически реализованы на действующих теплоэнергетических предприятиях на этапах внедрения наилучших доступных технологий и при разработке программы повышения экологической эффективности для повышения экологической безопасности тепловых электрических станций [3–5].

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Федеральный закон РФ от 26.07.2019 № 195-ФЗ «О проведении эксперимента по квотированию выбросов загрязняющих веществ и внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации в части снижения загрязнения атмосферного воздуха» [Электронный ресурс]. – URL: [http:// www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_329955/](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_329955/) (дата обращения: 20.12.2023).
2. ИТС 38-2017. Сжигание топлива на крупных установках в целях производства энергии // Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям.– Введ. 2018-07-01. – М.: Росстандарт, 2017.
3. Иваницкий, М.С. Токсичность уходящих газов твердотопливного котла KE-25-14С / М.С. Иваницкий // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2020. – Т. 22. – № 1. – С. 77–84.
4. Иваницкий, М.С. Исследование токсичности уходящих газов твердотопливных котлов малой мощности / М.С. Иваницкий // Энергосбережение и водоподготовка. – 2016. – № 1 (99). – С. 56–61.
5. Пат. RU 2499192 С1. Способ автоматического регулирования процесса горения в тепловом агрегате / А.Д. Грига, М.С. Иваницкий, В.М. Фокин. № 2012129072/06; заявл. 10.07.2012; опубл. 20.11.2013.
6. Иваницкий, М.С. Содержание токсичных продуктов в уходящих газах перспективных угольных энергоблоков 660 и 1060 МВт / М.С. Иваницкий // Энергобезопасность и энергосбережение. – 2016. – № 4. – С. 5–9.
7. Иваницкий, М.С. Выбросы диоксида углерода в атмосферу при эксплуатации пылеугольных котлов ТЭС / М.С. Иваницкий // Энергосбережение и водоподготовка. – 2015. – № 3 (95). – С. 63–67.
8. Грига, А.Д. Построение модели расчета концентрации бенз(а)пирена в дымовых газах энергетических котлов / А.Д. Грига, М.С. Иваницкий, Ю.В. Васильева // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2014. – № 5–6. – С. 43–47.

## ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ЭКОНОМИЧНОСТИ И НАДЕЖНОСТИ РАБОТЫ ОБОРУДОВАНИЯ ТЭЦ

*Скороходов В.Д.* – студент

*Иваницкий М.С.* – д-р техн. наук, доцент

Филиал ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» в г. Волжском

*АННОТАЦИЯ.* В статье проведен теоретический анализ методов прогнозирования экономичности и надежности оборудования ТЭЦ.

*КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:* надежность оборудования ТЭЦ, экономичность оборудования ТЭЦ, показатели надежности ТЭЦ, показатели экономичности ТЭЦ.

*ABSTRACT.* The article provides a theoretical analysis of methods for forecasting the efficiency and reliability of thermal power plant equipment.

*KEYWORDS:* reliability of TPP equipment, efficiency of TPP equipment, TPP reliability indicators, TPP efficiency indicators.

Актуальность исследования методов прогнозирования экономичности и надежности работы ТЭЦ связано с современными тенденциями повышения энергетической безопасности отечественной энергетической системы, необходимостью снижения расхода топлива на производство электрической энергии и повышения надежности энергоснабжения потребителей [1, 2].

В существующих методах анализа определения прогнозирования надежности и экономичности оборудования теплоэлектростанций можно выделить показатели ТЭЦ, которые характеризуют режимы, фактические объемы производства энергии станцией и условия, при которых эксплуатируется оборудование теплоэлектростанций, внешние факторы, которые могут повлиять на производительность ТЭЦ, а также резервы тепловой экономичности и степень их использования.

Целью работы является теоретический анализ методов и методических подходов к прогнозированию экономичности и надежности работы оборудования ТЭЦ. Задачей исследования данной работы является изучение основных показателей экономичности и надежности энергетического оборудования для разработки алгоритма прогнозирования экономичности и надежности и построения математической модели с целью повышения эффективности ТЭЦ.

Для оценки надежности оборудования ТЭЦ применяются следующие методы [1].

*Расчет с использованием марковских моделей*

В марковской модели расчета надежности функционирования энергоблока описывается марковским процессом с дискретным множеством состояний. В данной модели для текущего момента времени вероятность состояния

элемента в будущем зависит от его состояния в настоящий момент и не зависит от того, как он пришел в это состояние. Для расчета надежности энергоблока функциональную тепловую схему преобразуют в структурную, в которую включаются элементы и связи, влияющие на надежность функционирования блока. Пример функциональной тепловой и структурной схем приведен на рис. 1.

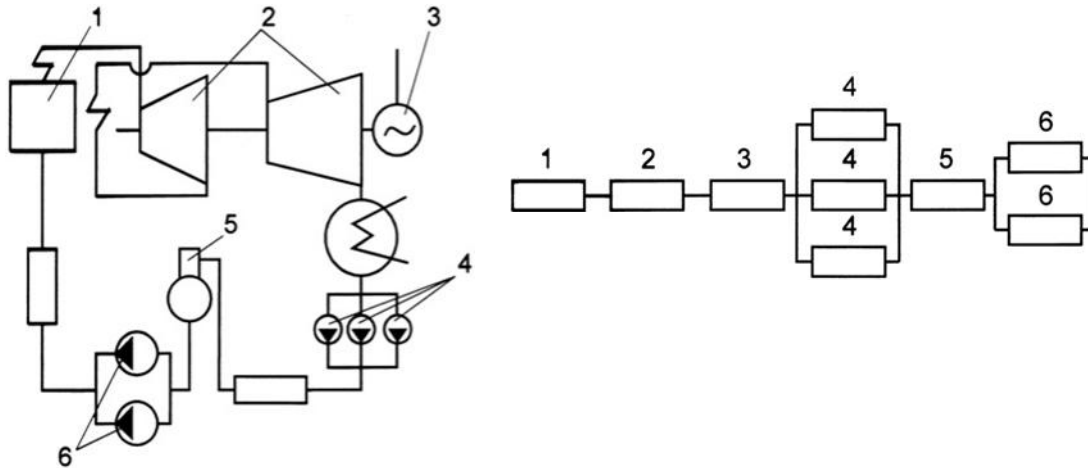


Рис. 1. Функциональная тепловая и структурная схемы:  
1 – котел; 2 – турбина; 3 – электрогенератор; 4 – конденсатные насосы;  
5 – деаэратор; 6 – питательные насосы

На основании структурной схемы составляется граф состояний, в который входят только достижимые состояния.

#### *Расчет методом «дерева отказов»*

Модель дерева отказов записывается относительно расчетного элемента тепловой схемы. Эта модель может показать отдельные состояния энергоблока:

- аварийная остановка;
- частичная нагрузка;
- плановый ремонт.

Для оценки экономичности оборудования ТЭС использовались показатели [2]:

- коэффициент полезного действия (абсолютный электрический КПД);
- удельный расход теплоты;
- удельный расход топлива.

К основным показателям для разработки алгоритма прогнозирования экономичности и надежности оборудования ТЭЦ относятся:

- выработка электроэнергии ТЭЦ;
- тепловая энергия, отпущенная с паром промышленным потребителям;
- тепловая энергия, отпущенная в теплосеть;
- давление отпущенной тепловой энергии;
- вид используемого топлива;
- наружная температура воздуха;
- температуры воды, как охлаждающей, так и исходной;
- турбоагрегаты и котлоагрегаты.

При помощи исходных данных для создания алгоритма определения прогнозирования надежности и экономичности оборудования теплоэлектроцентралей производится построение математической модели, которая представляет собой систему уравнений материального баланса, энергетического баланса для всех элементов теплоэлектроцентрали тепловой схемы и их связей.

При построении математической модели необходимы следующие данные:

- системы уравнений энергетического и материального баланса, которые строятся индивидуально для каждой ТЭЦ;
- системы ограничений при оптимальных нагрузках;
- уравнения характеристик турбин, которые получают на основе обработки диаграмм режимов с введением всех поправок на рабочие условия;
- модели расчета конкретных элементов ТЭЦ, котлов, турбин, редуционно-охлаждительных установок, сетевого подогревателя, параметров воды и пара;
- блоки оптимального распределения нагрузок по группе турбин;
- расчеты расходов на собственные нужды ТЭЦ.

#### *Выводы*

В результате построения математической модели разработан алгоритм определения прогнозирования надежности и экономичности оборудования теплоэлектроцентралей для повышения эффективности работы ТЭЦ.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ноздренко, Г.В. Надежность ТЭС: учеб. пособие / Г.В. Ноздренко, В.Г. Томлов, О.К. Григорьева. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2009. – 76 с.
2. Стерман, Л.С. Тепловые и атомные электрические станции: учебник для вузов / Л.С. Стерман, В.М. Лавыгин, С.Г. Тишин. – М.: Энергоатомиздат, 1995. – 416 с.

## ОПЫТ ЭКСПЛУАТАЦИИ АЭС НА БЫСТРЫХ НЕЙТРОНАХ

*Гофуржонов Ш.Х.У.* – студент

*Иваницкий М.С.* – д-р техн. наук, доцент

Филиал ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» в г. Волжском

*АННОТАЦИЯ. В статье рассмотрен опыт эксплуатации ядерного энергетического реактора БН-800 на четвертом энергоблоке Белоярской атомной электростанции и опыт формирования замкнутого топливного цикла на подобных типах реакторов.*

*КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: замкнутый топливный цикл, быстрые реакторы, рециклирование отработанного ядерного топлива.*

*ABSTRACT. The article discusses the experience of operating the BN-800 nuclear power reactor at the fourth power unit of the Beloyarsk Nuclear Power Plant and the experience of forming a closed fuel cycle on similar types of reactors.*

*KEYWORDS: closed fuel cycle, fast reactors, recycling of spent nuclear fuel.*



Соответствуя потребностям в увеличении объемов выработки электроэнергии, энергетические реакторы атомных электростанций на быстрых нейтронах (БН) решают фундаментальную проблему традиционной атомной энергетики – возможность повторного использования ядерного топлива [1–3].

Реакторы АЭС на быстрых нейтронах вторично используют переработанное ядерное топливо в сочетании с  $^{238}\text{U}$ , что невозможно для эффективного применения в традиционных типах реакторов. Таким образом, осуществляется замыкание топливного цикла воспроизводства, что существенно сокращает финансовые затраты и максимизирует энергетический потенциал атомной энергетики.

На текущий момент наиболее перспективным энергетическим реактором является реактор БН-800, который штатно установлен на четвертом энергоблоке Белоярской атомной электростанции.

Таким образом, целью исследования является анализ эффективности реакторов АЭС на быстрых нейтронах с учетом вторичного использования ядерного топлива. Задачи включают оценку технической и экономической эффективности, анализ технологических аспектов, изучение вклада в энергетику, анализ экологических аспектов и определение перспектив развития данной технологии. В этой связи исследование направлено на оценку вклада реакторов БН в современную теплоэнергетику и определение их роли в обеспечении устойчивого энергетического развития.

Инновации проекта БН-800 [2]:

- самозащищенность блока от внешних и внутренних воздействий;
- пассивные средства воздействия на реактивность, системы аварийного расхолаживания через теплообменники, поддон для сбора расплавленного топлива;
- нулевой натриевый пустотный эффект реактивности;
- минимальная вероятность аварии с расплавлением активной зоны.

Задачами БН-800 являются окончательная отработка технологий коммерческих быстрых реакторов БН-1200 и отработка элементов и технологий двухкомпонентной системы ядерной энергетики, таких как:

- технологии изготовления и регенерации уран-плутониевого топлива;
- технологии дожигания минорных актинидов, образующихся в топливе тепловых реакторов;
- технологии совместного с тепловыми реакторами замкнутого топливного цикла.

На текущий момент реактор БН-800 является единственным реактором в теплоэнергетике, в ходе эксплуатации которого был завершен проект замкнутого топливного цикла. Главной целью эксперимента были отработка и наладка всех промежуточных процессов передачи отработанного ядерного топлива от реакторов на тепловых нейтронах к реакторам типа БН.

Переходные процессы передачи включают в себя отстаивание тепловыделяющих сборок (ТВС) в бассейнах выдержки, переработку облученного топлива и его транспортировку на АЭС с энергоблоками на быстрых реакторах.

В сентябре 2022 года впервые за время эксплуатации реактора произошла его полная загрузка тепловыделяющими сборками на основе МОКС-топлива. Таким образом, Российская Федерация впервые в мире осуществила замыкание топливного цикла (ЗТЦ) в научно-техническом масштабе. Первое промышленное исполнение технологии ЗТЦ планируется в 2029 году в г. Томске силами АО «Концерн Росэнергоатом».

В настоящее время БН-800 является научно-испытательным реактором, на котором отрабатываются все переходные процессы, которые сопровождают замкнутый топливный цикл. В их числе выдержка отработавших топливных сборок, системное рециклирование сборок и загрузка ядерного топлива в активную зону реактора. На текущем этапе опыт работы будет перенесен на будущий проект реактора на быстрых нейтронах типа БРЕСТ, который полноценно будет использовать замкнутый топливный цикл в связке с реакторами на тепловых нейтронах.

#### *Выводы*

Перспективы развития реакторов АЭС на быстрых нейтронах обещают значительный вклад в энергетическую промышленность Российской Федерации. Технология воспроизводства ядерного топлива позволяет замкнуть топливный цикл, когда уже отработанное ядерное топливо может использоваться повторно, существенно снижая затраты на обогащение  $^{238}\text{U}$  и увеличивая экологическую эффективность работы атомных электростанций в принципе. Таким образом, реакторы АЭС на быстрых нейтронах являются важным шагом вперед, способствуя созданию устойчивого энергетического будущего и внедрению инновационных решений в ядерную энергетику России.

Опыт с рециклированием ОЯТ с помощью реактора БН-800 и в принципе реакторов на быстрых нейтронах подтверждает их значимость в контексте ядерной энергетики. Реакторы подобного типа используют эффективное вторичное использование ядерного топлива, что способствует повышению энергетической независимости и улучшению общей эффективности выработки электроэнергии. Таким образом, использование подобного типа реакторов определяет их важным инструментом в переходе к устойчивому энергетическому развитию атомной энергетики. Экологическая эффективность и перспективы развития подчеркивают необходимость дальнейших исследований и внедрения реакторов типа БН для создания устойчивой, эффективной и чистой энергетической инфраструктуры.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Атомные электростанции с реакторами на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем: учеб. пособие в 2 ч. – Екатеринбург: Уральский федеральный университет, 2013. – 119 с.

2. Селезнев, Е.Ф. Кинетика реакторов на быстрых нейтронах / Е.Ф. Селезнев; под ред. акад. РАН А.А. Саркисова; Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН. – М.: Наука, 2013. – 239 с.

3. Реакторы на быстрых нейтронах [Электронный ресурс] // ФЭИ Росатом. – URL: <https://www.ippe.ru/departments/reactors/fast-neutron-reactors/138-bn-800>.

4. Григорьев, В.А. Справочник по тепловым и атомным электростанциям / В.А. Григорьев, В.М. Зорин. – М.: Энергия, 1989. – 560 с.

5. Клименко, А.В. Тепловые и атомные электростанции: справочник / А.В. Клименко, В.М. Зорин. – М.: МЭИ, 2003. – 648 с.

## АЛГОРИТМ РАСЧЕТА НАДЕЖНОСТИ ЭНЕРГОБЛОКА ТЭЦ С ВОДОРОДНЫМ ГЕНЕРАТОРОМ

*Скороходов В.Д.* – студент

*Иваницкий М.С.* – д-р техн. наук, доцент

Филиал ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» в г. Волжском

*АННОТАЦИЯ.* В статье разработан алгоритм прогнозирования надежности и экономичности энергоблока ТЭЦ с водородным генератором.

*КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:* надежность оборудования ТЭЦ, экономичность оборудования ТЭЦ, водородный генератор, алгоритм прогнозирования.

*ABSTRACT.* The article considers an algorithm for predicting the reliability and efficiency of a thermal power plant unit with a hydrogen generator.

*KEYWORDS:* reliability of thermal power plant equipment, efficiency of thermal power plant equipment, hydrogen generator, forecasting algorithm.

Надежность работы оборудования ТЭЦ напрямую зависит от состояния технических элементов тепловой схемы, которое требуется контролировать. Существующие алгоритмы прогнозирования экономичности и надежности имеют недостатки и могут быть улучшены с целью увеличения условного экономического эффекта. Основными показателями тепловой экономичности ТЭЦ являются коэффициент полезного действия (абсолютный электрически КПД), удельный расход теплоты и удельный расход топлива. Анализ показал, что на практике отсутствуют технологические методы, обеспечивающие решение задачи по созданию алгоритма прогнозирования надежности работы оборудования ТЭЦ с водородным генератором [1].

Целью данной работы является разработка алгоритма прогнозирования экономичности и надежности работы оборудования ТЭЦ с водородным генератором.

Задачи следования:

- разработка алгоритма выбора процедуры анализа надежности;
- разработка алгоритма расчета показателей надежности энергоблока.

Для решения поставленной задачи использованы рекомендации ГОСТ-Р-27.302-2009 [2] для расчета сложных систем.

Для расчета показателей надежности необходимы следующие исходные данные:

- время наработки на отказ  $t_o$ , ч;
- время восстановления  $t_b$ , ч;
- длительность планового ремонта  $t_{п}$ , ч.

При общей процедуре анализа надежности для выбора метода расчета надежности энергоблока используется алгоритм, приведенный на рис. 1.

Для выполнения расчетов надежности должна быть заранее составлена структурная схема энергоблока.

На базе алгоритма выбора процедуры анализа надежности можно построить алгоритм расчета и прогнозирования показателей надежности энергоблока, который показан на рис. 2.

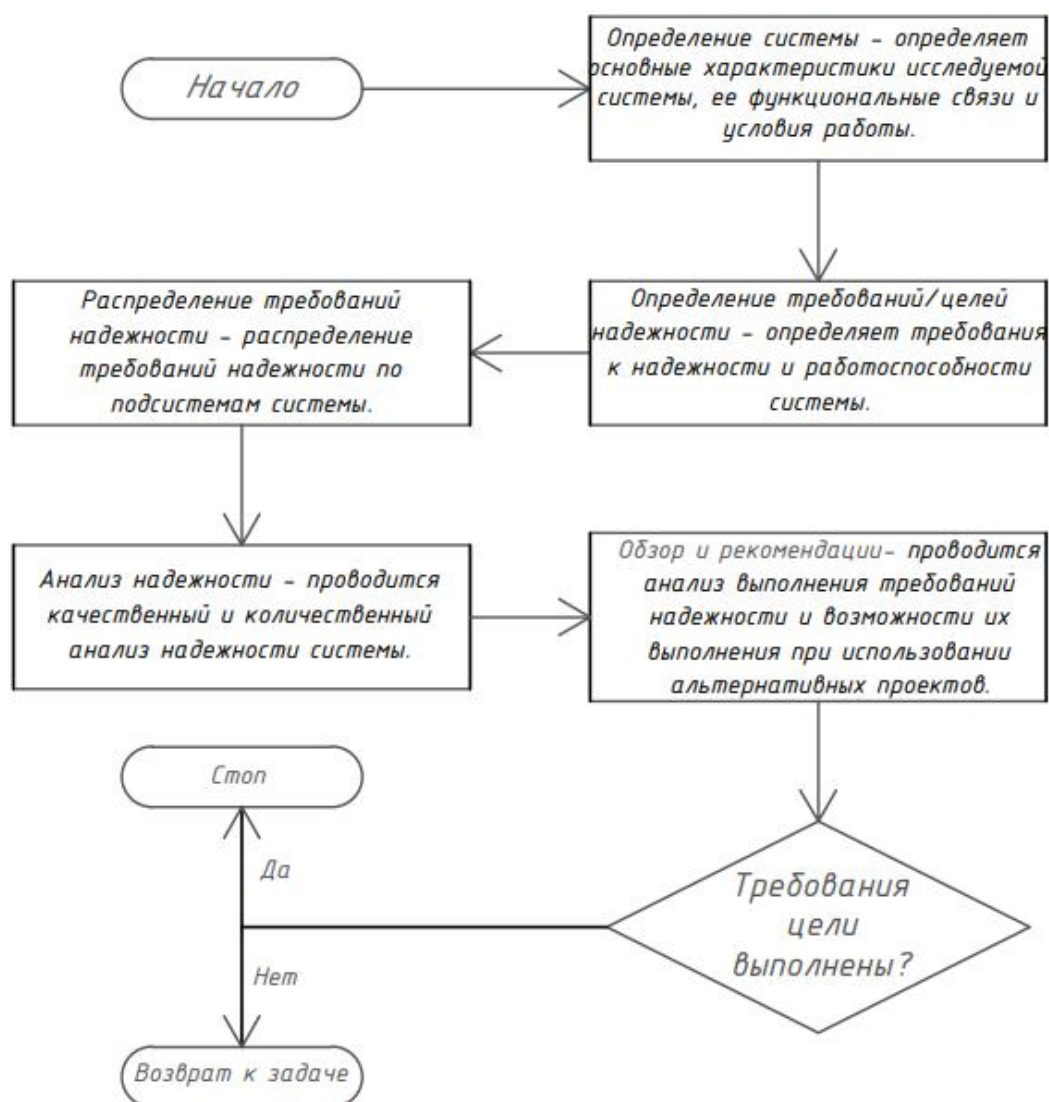


Рис. 1. Алгоритм выбора процедуры анализа надежности [3]

В результате работы разработан алгоритм расчета и прогнозирования показателей надежности энергоблока, который позволяет оперативно отслеживать работу энергоблока и определять непроизводственные потери, что приводит к увеличению КПД энергоблока и позволяет уменьшить потери энергии, а следовательно, ведет к сокращению расхода топлива.

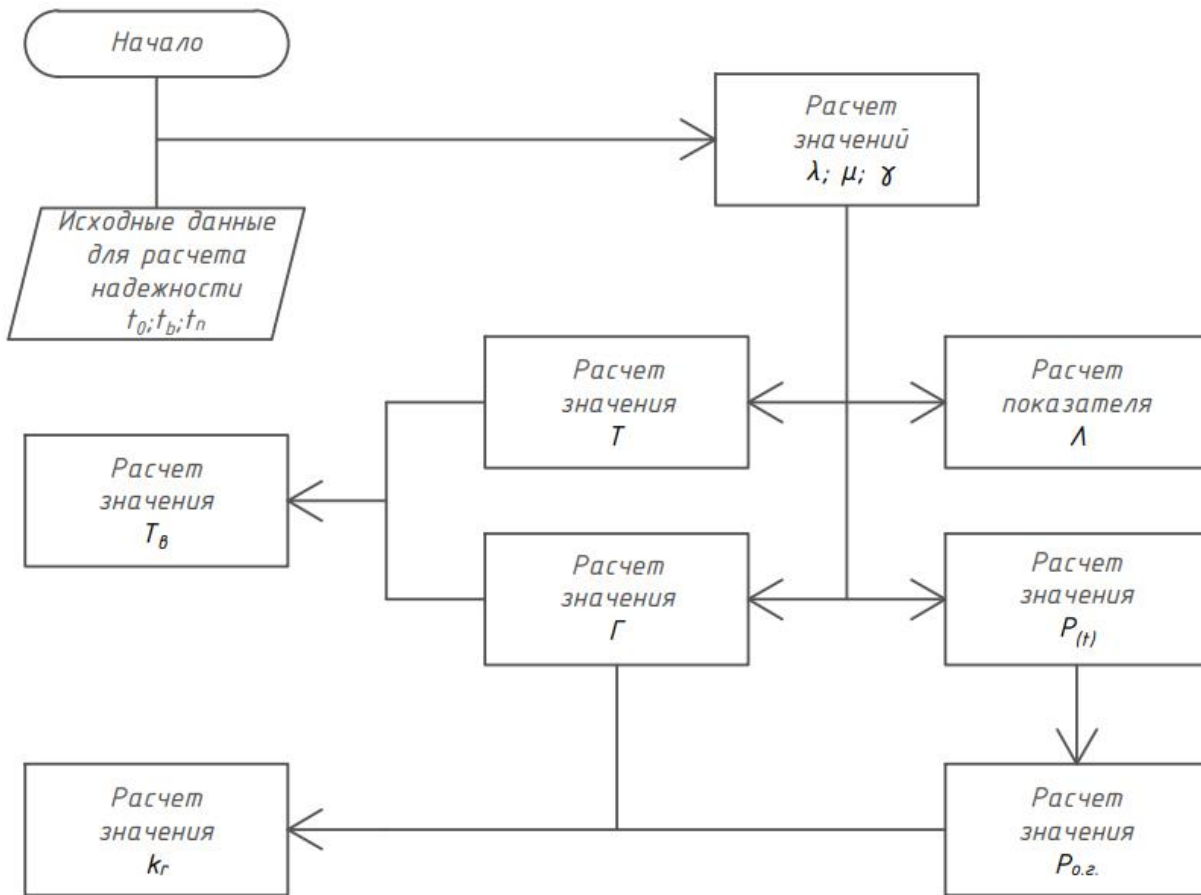


Рис. 2. Алгоритм расчета и прогнозирования показателей надежности энергоблока:  
 $\lambda$  – интенсивность отказов;  $\mu$  – интенсивность восстановления;  $\gamma$  – гамма-процентная наработка до отказа;  $\Lambda$  – интенсивность отказов энергоблока;  $\Gamma$  – интенсивность восстановления энергоблока;  $T$  – среднее время безотказной работы энергоблока;  $T_b$  – среднее время восстановления энергоблока;  $P(t)$  – вероятность безотказной работы энергоблока;  $k_r$  – расчет коэффициента готовности энергоблока;  $P_{o.g.}$  – расчет коэффициента оперативной готовности энергоблока

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Стерман, Л.С. Тепловые и атомные электрические станции: учебник для вузов / Л.С. Стерман, В.М. Лавыгин, С.Г. Тишин. – 2-е изд., перераб. – М.: Издательство МЭИ, 2000. – 408 с.
2. ГОСТ Р 27.302-2009. Надежность в технике. Анализ дерева неисправностей. – М.: Стандартинформ, 2011. – 27 с.
3. ГОСТ Р 51901.5-2005. Руководство по применению методов анализа надежности. – М.: Стандартинформ, 2006. – 51 с.

## ОПЫТ ВНЕДРЕНИЯ ЦИФРОВЫХ РЕШЕНИЙ НА ТЭЦ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ ПАРОВЫХ ТУРБИН

*Болдарев Ф.Е., Рыбалов А.А., Ширяйкин С.Г.* – студенты  
Филиал ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» в г. Волжском

*АННОТАЦИЯ.* В статье рассмотрен опыт внедрения цифровых технологий на ТЭЦ для повышения надежности паровых турбин.

*КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:* паротурбинная установка, ТЭЦ, модель, диагностика, цифровые технологии.

*ABSTRACT.* The article discusses the experience of introducing digital technologies at thermal power plants to improve the reliability of steam turbines.

*KEYWORDS:* steam turbine plant, thermal power plant, model, diagnostics, digital technologies.

Повышение надежности и безопасности работы основного энергетического оборудования теплоэлектростанций (ТЭЦ) является актуальной задачей развития и совершенствования электроэнергетической отрасли для обеспечения качественного и бесперебойного энергоснабжения потребителей тепловой и электрической энергией [1].

В этой связи целью данной работы является анализ опыта внедрения цифровых решений на ТЭЦ для повышения надежности паровых турбин.

Существует множество цифровых решений, которые могут быть использованы для повышения надежности паровых турбин. К наиболее эффективным из них относятся [1, 2]:

– системы мониторинга состояния оборудования, позволяющие в режиме реального времени отслеживать параметры работы оборудования и выявлять возможные неисправности на ранней стадии. Это позволяет своевременно принять меры по устранению неисправностей, что предотвращает их развитие и выход оборудования из строя;

– системы предиктивного обслуживания, использующие данные мониторинга состояния оборудования для прогнозирования вероятности возникновения неисправностей. Это позволяет заранее подготовиться к ремонту или замене оборудования, что предотвращает его внезапный выход из строя;

– системы цифрового моделирования, позволяющие создавать виртуальные модели оборудования. Предлагаемые модели могут использоваться для проведения испытаний оборудования, оптимизации его работы и выявления потенциальных проблем.

Ниже представлены примеры внедрения цифровых решений на современных ТЭЦ для повышения надежности паровых турбин [1–3]:

– ТЭЦ-22 в г. Москве внедрена система мониторинга состояния паровых турбин на базе программного комплекса АРМ-Turbo. Благодаря этому удалось снизить количество отказов паровых турбин на 20 %;

– ТЭЦ-1 в г. Санкт-Петербурге внедрена система предиктивного обслуживания паровых турбин на базе программного комплекса АРМ-Turbo, тем самым удалось сократить расходы на ремонт паровых турбин на 15 %;

– ТЭЦ-5 в г. Новосибирске внедрена система цифрового моделирования паровых турбин. Результаты внедрения позволили повысить эффективность работы турбин на 10 %.

В дальнейшем внедрение цифровых решений на ТЭЦ будет продолжаться, что позволит обеспечить повышение надежности работы паровых турбин, снизить эксплуатационные расходы и обеспечить бесперебойную работу электростанций.

Внедрение цифровых решений на ТЭЦ имеет ряд преимуществ для повышения надежности паровых турбин, которые заключаются в следующем [4].

1. Системы мониторинга состояния оборудования позволяют выявлять возможные неисправности на ранней стадии, когда они еще не привели к выходу оборудования из строя. Это позволяет своевременно принять меры по устранению неисправностей, что предотвращает их развитие и снижает затраты на ремонт оборудования.

2. Системы предиктивного обслуживания позволяют прогнозировать вероятность возникновения неисправностей. Это помогает заранее подготовиться к ремонту или замене оборудования, что предотвращает его внезапный выход из строя и снижает риски для безопасности.

3. Системы цифрового моделирования позволяют оптимизировать работу оборудования, что приводит к повышению его эффективности и снижению эксплуатационных расходов.

Применение искусственного интеллекта и машинного обучения в задачах энергетики в данное время не настолько распространено, как в других сферах и отраслях экономики. При этом современные промышленные объекты часто генерируют и собирают большое количество данных, а методы машинного обучения обеспечивают эффективное использование этих данных для решения различных устоявшихся типовых задач:

- выявления неисправностей и отказов;
- прогнозирования качества продукции;
- определения остаточного срока службы оборудования и многих других.

При технической диагностике паротурбинных установок на основании нормативно-технической документации и международных стандартов в процессе исследования можно выделить три основных этапа [3]:

- обнаружение ошибок в работе или неисправностей;
- локализация неисправности или выход на конкретные сигналы, вносящие наибольший вклад в обнаружение неисправности;
- выход на диагноз, представляющий собой определение коренных причин возникновения неисправности, а также прогноз остаточного ресурса оборудования.

### *Выводы*

Высокое качество решения вышеобозначенных задач благодаря эффективному внедрению технологий анализа данных позволяет ТЭЦ перейти на стратегию обслуживания энергетического оборудования по техническому состоянию.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чичерин, С.В. Минимизация температуры теплоносителя на районной котельной – динамическая оптимизация / С.В. Чичерин, Л.Р. Джунусова, Т.Ж. Джунусов // 4-я Международная конференция по исследованиям в области энергетики и окружающей среды (ICAEER 2019). – 2019. – Том 118. – 02004.
2. Новицкий, Н.Н. Технология разработки режимов работы крупных систем тепло-снабжения на основе методов многоуровневого термогидравлического моделирования / Н.Н. Новицкий, З.И. Шалагинова, В.В. Токарев, О.А. Гребнева // Известия РАН. Энергетика. – 2018. – № 1. – С. 12–24.
3. Суворов, Д.М. Эффективность расширенных графиков регулирования отопления на ТЭЦ с понижением нормативной расчетной температуры теплоносителя / Д.М. Суворов, Н.В. Татаринова, Е.А. Лыскова // Проблемы региональной энергетики. – 2021. – № 4 (52). – С. 99–114.

## **МЕТОДЫ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ ТОЧЕК ИЗМЕНЕНИЯ СОСТОЯНИЯ В ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ДАННЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ**

*Егоров М.С., Кереселидзе Д.К.* – студенты  
Волжский филиал Волгоградского государственного университета

*АННОТАЦИЯ.* В работе подробно рассмотрена задача обнаружения точек изменения состояния, методы машинного обучения для решения данной задачи, представлена реализация на языке Python.

*КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:* машинное обучение, технологические параметры, временные ряды, тепловые электрические станции.

*ABSTRACT.* The paper examines in detail the problem of changepoint detection, machine learning methods for solving this problem, and presents an implementation in Python.

*KEYWORDS:* machinelearning, technological parameters, time series, thermalpowerplants.

В контексте цифровизации энергетики поднимается вопрос об автоматизации и обеспечении контроля технологических процессов. Системы мониторинга и диагностики оборудования осуществляют сбор параметров работы энергетического оборудования. Таким образом, возникает массив данных, которые могут быть проанализированы с целью повышения надежности и безопасности эксплуатации энергетического оборудования [1].



Среди методов анализа данных можно выделить модели машинного обучения и нейросети [2]. Применение таких моделей возможно к тем данным, которые представляют собой временные ряды. К таким данным относятся параметры, представленные аналоговыми сигналами. Результаты применения алгоритмов машинного обучения могут быть использованы для предупреждения сбоев в работе технологического оборудования в режиме реального времени. Одной из приоритетных является задача обнаружения точек изменения состояния временного ряда (англ. Change point detection).

В работе рассмотрено применение AutoEncoder-модели для решения задачи обнаружения точек изменения состояния для параметра температуры баббита упорных и опорных подшипников турбины. Временной ряд содержал участок стационарного режима работы оборудования, переходного режима, а также в конце временного диапазона – предаварийный режим. Нахождение точек изменения состояния позволит заранее выявить аварийный режим работы, чтобы впоследствии принять меры для устранения неполадок в работе энергетического оборудования.

Модели последовательности в последовательность (AutoEncoder), изначально разработанные для задач, связанных с последовательностями, такими как обработка естественного языка, могут быть адаптированы для обнаружения точек изменения в данных, поступающих в режиме реального времени. Этот подход использует способность модели улавливать временные зависимости и отслеживать ошибки восстановления для выявления отклонений во входных данных.

Энкодер  $E$  модели AutoEncoder улавливает временные зависимости во входной последовательности  $X$  и создает фиксированное представление – вектор контекста  $C$ .

$$C = E(X).$$

Декодер  $D$  восстанавливает входную последовательность из вектора контекста.

$$\hat{X} = D(C).$$

Ошибка восстановления  $E_r$  вычисляется как разница между оригинальной входной последовательностью  $X$  и восстановленной последовательностью  $\hat{X}$ .

$$E_r = X - \hat{X}.$$

Порог  $T$  устанавливается на ошибке восстановления. Точка изменения обнаруживается, когда  $E_r$  превышает этот порог:

$$E_r > T.$$

Перед работой с AutoEncoder-моделью была произведена предварительная обработка данных. Были созданы классы DataSet, DataLoader, DataNormalization, с их помощью загружались данные, на которые затем было применено преобразование Бокса – Кокса для их нормализации [3].

В качестве инструмента для построения AutoEncoder-модели была выбрана библиотека PyTorch для языка Python [4]. С помощью модуля torch.nn описана архитектура модели в классе AutoEncoder\_model, создана forward-функция, которая описывает шаг применения модели. Был создан метод fit\_predict в классе CPD\_AutoEncoder, который получает на вход данные в потоковом режиме и также в режиме реального времени детектирует точки изменения состояния.

С помощью описанных выше классов и методов была построена CPD\_AutoEncoder-модель распознавания точек изменения состояния, работающая в режиме реального времени. Для ее работы будем поставлять данные в потоковом режиме на вход в модель, далее, после процесса кодирования и декодирования, считаем меру различия  $\Delta_i$  на каждом моменте времени  $t_i$  [5]. Выберем первую  $i$ , удовлетворяющую условию  $\Delta_i > T$  – это и будет точкой изменения.

На рисунке показан результат работы модели, где черные пунктирные линии обозначают границы участков изменения состояния.

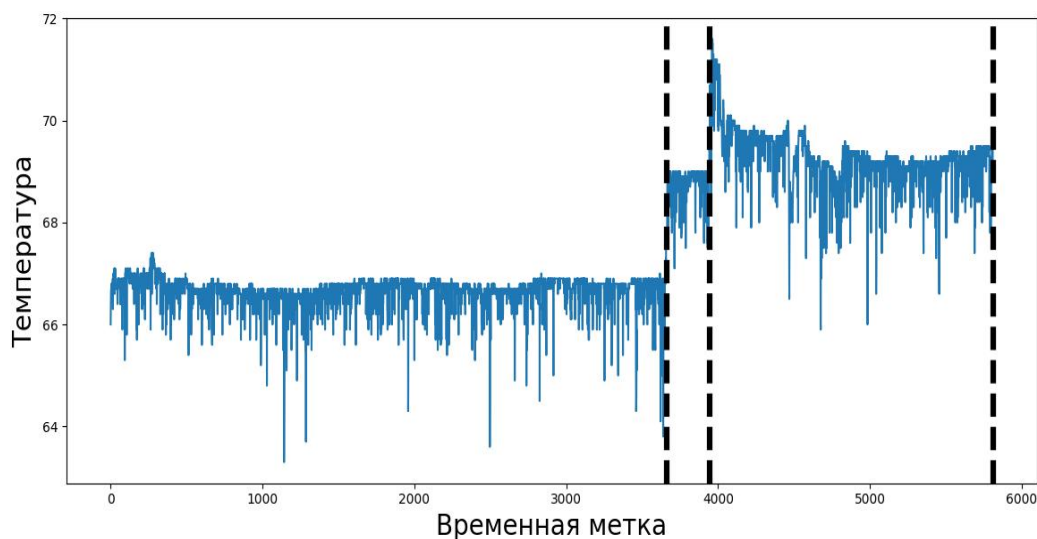


Рисунок. Пример работы CPD\_AutoEncoder-модели

#### *Выводы*

Модель CPD\_AutoEncoder с достаточной степенью точности показала участки изменения состояния. Данные результаты могут быть использованы для создания систем предиктивной аналитики, направленных на предупреждение аварийных режимов работы энергетического оборудования. Также данные результаты могут быть применены в совокупности с алгоритмами поиска аномалий во временных рядах для создания систем самодиагностики, предупреждения отказов оборудования, оптимизации процессов регулирования и управления технологическими параметрами на электростанциях.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шевченко, М.Е. Анализ сигналов технологического процесса / М.Е. Шевченко // XXVII Региональная конференция молодых ученых и исследователей Волгоградской области, г. Волжский, 1–15 ноября 2022 г.: тезисы докладов. – Волжский: Филиал ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» в г. Волжском, 2023. – С. 16–18.
2. Полковников, А.А. Применение ARIMA-моделей для прогнозирования отказов в энергетическом оборудовании / А.А. Полковников, О.Н. Масюкова, М.С. Егоров, М.Е. Шевченко // Проблемы устойчивого развития и эколого-экономической безопасности регионов: материалы XVII Международной науч.-практ. конф., г. Волжский, 27–28 апреля 2023 г. / Волж. филиал Федер. гос. авт. образоват. учреждения высш. обр. «Волгогр. гос. ун-т». – Волгоград: Сфера, 2023. – С. 127–131.
3. Voh-Cox Transformations: An Overview. PengfeiLi. Department of Statistics, University of Connecticut. – 2005. – Apr. 11.
4. PyTorch [Электронный ресурс]. – URL: <https://pytorch.org/docs/stable/index.html> (дата обращения: 19.12.2023).
5. De Ryck, T. Change Point Detection in Time Series Data using Autoencoders with a Time-Invariant Representation [Электронный ресурс] / T. De Ryck, M. De Vos, A. Bertrand. – URL: <https://arxiv.org/abs/2008.09524> (дата обращения: 19.12.2023).

## КРИТЕРИИ ВЫЯВЛЕНИЯ АНОМАЛИЙ ВО ВРЕМЕННЫХ РЯДАХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ

*Шевченко М.Е.*<sup>1</sup> – аспирант

*Болдырев И.А.*<sup>2</sup> – канд. техн. наук, доцент

<sup>1</sup>ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»

<sup>2</sup>Филиал ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» в г. Волжском

*АННОТАЦИЯ.* В статье проанализированы критерии и методы детектирования аномалий во временных рядах, рассмотрена возможность их применения для технологических параметров. Сформулированы существующие проблемы применения критериев, а также предложены методы повышения эффективности обнаружения аномалий.

*КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:* аномалии, временные ряды, данные, цифровизация.

*ABSTRACT.* The article analyzes the criteria and methods for detecting anomalies in time series and considers the possibility of their application for technological parameters. The existing problems of applying criteria are formulated, as well as methods for improving the efficiency of anomaly detection are proposed.

*KEYWORDS:* anomalies, time series, data, digitalization.

С развитием технологий обработки больших данных (Big Data) появились новые методы выявления закономерностей в данных, а также стало возможным применять существующие методики на временных рядах большой размерности. Благодаря росту цифровизации энергетической отрасли становится возможным

применение современных методов обработки технологических данных. Особенно актуальной является задача поиска аномалий во временных рядах технологических параметров. В настоящее время для определения аномалий во временных рядах разработано множество критериев. Целью данного исследования является определение аномалий для дальнейшего исследования, систематизация существующих критериев и подходов к выявлению аномалий, а также их анализ и выбор наиболее подходящих для применения к технологическим данным.

Для дальнейшей работы необходимо определить понятие «аномальность данных». В контексте анализа временных рядов термины «аномалии» и «выбросы» часто используются взаимозаменяемо [1–4]. Однако существуют различия, которые позволяют отделить аномалии от выбросов.

Подход, при котором происходит разделение понятий «аномалии» и «выброса», встречается в работах [5–7], где аномалии относятся к точкам (участкам) данных, которые отклоняются от ожидаемого паттерна или тренда во временном ряду и могут быть вызваны различными причинами, такими как сезонность, внешние события или основные изменения в процессе генерации данных.

Более детально отличие терминов рассмотрено в работе [5]. Если рассмотреть два направления анализа данных, то их можно разделить на детектирование выбросов и поиск новизны. Схожим качеством для выброса и «новизны» является отличие свойств (статистических характеристик, закона распределения) от объектов обучающей выборки (при нормальной стационарности). Однако разница в том, что временной ряд может содержать выброс, в то время как наличие аномального участка во временном ряду характеризуется развитием аномалии, которую необходимо выявить, чтобы обнаружить аномалию при ее появлении.

В технических системах аномалии могут определяться причинами их появления. Таким образом, в работе [6] аномалии определяются как поломки, отказы, аварии и нарушения этапов технологического процесса.

В обзоре по обнаружению аномалий [7] автор приводит классификацию для более точного определения термина «аномалия». Можно выделить следующие категории аномалий:

- точечные – в случае когда аномалия является выпадающей точкой из нормального множества точек временного ряда;
- условные – являются аномалиями только для определенного временного ряда в рамках поставленных условий (например, превышение допустимых границ технологического параметра);
- коллективные – проявляются в виде участка временного ряда, который является аномальным по отношению к остальному временному ряду.

С другой стороны, выбросы представляют собой точки данных, которые статистически отличаются от большинства данных [8]. Они могут или не могут быть частью ожидаемого паттерна или тренда. Выбросы могут быть вызваны ошибками измерения, экстремальными событиями или другими факторами, приводящими к существенному отклонению от нормы.

Выбросы являются следствием [5]:

- ошибок в данных (неточности измерения, округления, неверной записи и т. п.);
- наличия шумовых объектов (неверно классифицированных объектов);
- присутствия объектов «других» выборок (например, показаниями сломавшегося датчика).

Следовательно, можно принять, что, согласно классификации, рассмотренной выше, выброс наиболее близок к «точечной аномалии». Таким образом, выброс является частным случаем аномалии.

Применительно к АСУ ТП задача определения выбросов обеспечивается, как правило, алгоритмами ПАЗ. Аномалии не всегда выходят за уставки, поэтому традиционными алгоритмами АСУ ТП обычно не определяются, однако могут свидетельствовать о развивающемся дефекте.

Итак, наибольший интерес представляет собой задача поиска аномалий, нежели выбросов, так как появлению аномалий предшествует ее развитие. В случае обработки технологических данных, которые могут быть косвенными признаками технического состояния оборудования, задача сводится к определению дефектов на ранних этапах их развития.

Можно выделить следующие аномалии во временных рядах технологических параметров [9]:

- смена тренда – самый простой и легко заметный тип аномалии, который проявляется в изменении амплитуды технологического сигнала;
- резкий скачок характеризуется внезапным изменением технологических параметров и, как правило, оказывает негативное влияние;
- шум возникает в механических узлах, где дефекты проявляются в виде повышенной вибрации и биений;
- увеличение дисперсии означает увеличение разброса значений сигнала и, как правило, свидетельствует о наличии переходных процессов или нестабильной работе оборудования;
- уменьшение дисперсии можно объяснить как превращение колебательного процесса в плавную прямую линию. Подобная аномалия наблюдается при сбоях в работе измерительных приборов, например при «затухании прибора».

Важно отметить, что работа энергетического оборудования сопровождается переходными режимами, связанными с переходом на новый стационарный режим работы (например, увеличение мощности). В связи с этим необходимо отличать режимную нестационарность от аномальной.

Анализ существующих подходов к выявлению аномалий во временных рядах позволил классифицировать критерии по следующим группам:

- без учителя:
  - критерии, основанные на статистических метриках,
  - критерии, основанные на доверительных интервалах;
- с учителем:
  - применение методов на основе прогнозирования.

В статье [10] проведено исследование статистических критериев (метрик), в результате авторами были выделены наиболее эффективные критерии, анализ которых производился далее с целью выявления наиболее эффективных для применения к технологическим данным.

Критерий межквартильного расстояния, а также критерий трех сигм можно объединить как методы, основанные на применении доверительных интервалов. Они могут быть применены для выявления аномалий в технологических данных, однако технологические параметры могут отличаться по своей природе, характеру изменения, границам допустимых значений.

В зависимости от метода уточняются границы доверительного интервала, однако окончательная граница определяется для каждого временного ряда отдельно. Меньший доверительный интервал позволит увеличить чувствительность к обнаружению аномалий, но негативным последствием может быть большее количество ложных срабатываний. В противоположность этому больший доверительный интервал уменьшит чувствительность, что может привести к позднему обнаружению или пропуску аномалий. Следовательно, применение критериев доверительных интервалов требует дополнительной методики уточнения границ для каждого технологического параметра.

К критериям, основанным на статистических метриках, которые были выделены как целесообразные к применению в статье [10], можно отнести критерий наибольшего абсолютного отклонения, критерий Романовского, критерий Шовене, критерий Хоглина – Иглевича, критерий Роснера. Общим недостатком для всех метрик является сравнение расчетного значения критерия с критическим, как правило табличным, что затруднено фактором множества технологических параметров, для каждого из которых необходимо уточнять величину критического значения. В свою очередь, критерий Роснера применяется для случаев, когда число аномалий не превышает пяти, что является существенным недостатком при поиске коллективных аномалий во временных рядах.

Отдельно стоит выделить  $T^2$ -критерий Хотеллинга, так как он позволяет выявлять аномалии при многомерном контроле технологического процесса, то есть учитывает сразу несколько временных рядов. Следует отметить, что  $T^2$ -критерий получил достаточно широкое распространение для поиска аномалий в технологических данных, что подтверждают работы [11, 12], а также применение данного критерия в работе системы предиктивного анализа ПРАНА [13].

К методам обнаружения аномалий с учителем можно отнести алгоритмы на основе моделей прогнозирования. Принцип работы таких алгоритмов заключается в следующем.

1. Обучение на тестовой выборке данных.
2. Прогнозирование значений временного ряда.
3. Сравнение с реальными данными.
4. Оценка отклонения фактических значений от прогнозируемых.

При таком подходе могут использоваться статистические модели, такие как AR, MA, ARMA и т. д. Возможность применения модели ARIMA для построения прогнозных значений технологического параметра подтверждена в [14]. К недостаткам такого метода обнаружения аномальных участков следует отнести сильное влияние размерности обучающей выборки, снижение качества прогноза при увеличении соотношения обучающей и тестовой выборки. Также при настройке параметров модели необходима методика настройки для технологических данных различного типа. Полученные метрики отклонения фактических данных от прогнозных также необходимо количественно оценить для принятия граничных значений, превышение которых будет свидетельствовать о появлении аномального участка.

Помимо статистических моделей прогнозирования, широкое распространение получили нейросетевые модели. В [11] рассмотрен метод детектирования аномалий по сумме невязок при использовании Encoder-decoder-моделей. При таком подходе критерием наличия аномалий во временном ряду является интегральный показатель разности между исходными и восстановленными данными. В свою очередь, данный показатель может быть уточнен для более точного определения аномалий. Для выявления аномалий в данных возможно применение генетических алгоритмов [15–17]. Генетический алгоритм может эффективно адаптироваться к динамике данных, помогая выявлять необычные закономерности и изменения во времени. Этот метод позволяет системе автоматически адаптироваться к различным условиям и эффективно выявлять аномалии в динамически изменяющихся временных рядах.

### *Выводы*

Таким образом, были проанализированы критерии и методы детектирования аномалий во временных рядах и рассмотрена возможность их применения для технологических данных. Сформулированы существующие проблемы при применении критериев, а также выделены задачи, которые необходимо решить для повышения эффективности применения критериев. Проведение сравнения эффективности представленных критериев на технологических данных является предметом дальнейших изысканий.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чесноков, М.Ю. Поиск аномалий во временных рядах на основе ансамблей алгоритмов DBSCAN / М.Ю. Чесноков // Искусственный интеллект и принятие решений. – 2018. – № 1. – С. 99–107.
2. Антипов, С.Г. Проблема обнаружения аномалий в наборах временных рядов / С.Г. Антипов, М.В. Фомина // Программные продукты и системы. – 2012. – № 2. – С. 78–82.
3. Обзор методов обнаружения аномалий в потоках данных / Шкодырев В. П. и др. // Proc. of the Second Conference on Software Engineering and Information Management. – СПб., 2017. – С. 50–56.
4. Aggarwal, C.C. An introduction to outlier analysis / C.C. Aggarwal // Springer International Publishing. – 2017. – С. 1–34.

5. Дьяконов, А.Г. Выявление аномалий в работе механизмов методами машинного обучения / А.Г. Дьяконов, А.М. Головина // Аналитика и управление данными в областях с интенсивным использованием данных. – 2017. – С. 469–476.
6. Подход к оценке качества обнаружения аномалий в технологических сигналах [Электронный ресурс] / С.В. Карев, А.А. Кошечкин, Д.А. Мурзагулов и др. // Автоматизация процессов управления. – 2022. – № 2. – С. 80–89. – URL: <http://vital.lib.tsu.ru/vital/access/manager/Repository/koha:001002608>.
7. Chandola, V. Anomaly detection: A survey / V. Chandola, A. Banerjee, V. Kumar // ACM computing surveys (CSUR). – 2009. – Т. 41. – № 3. – С. 1–58.
8. Зайдель, А.Н. Элементарные оценки ошибок измерений [Электронный ресурс] / А.Н. Зайдель. – М.: Наука, 1968. – URL: <https://lib-bkm.ru/13039>.
9. Мурзагулов, Д.А. Обнаружение аномалий технологических сигналов с использованием ансамбля классификаторов и вейвлет-преобразований / Д.А. Мурзагулов, А.В. Замятин // Автоматизация процессов управления. – 2021. – № 1. – С. 20–26.
10. Голубчикова, И.С. Исследование применимости методов обнаружения аномалий во временных рядах / И.С. Голубчикова // Электронные средства и системы управления: материалы докладов XIII Международной научно-практической конференции, посвященной 55-летию ТУСУРа, 29 ноября – 1 декабря 2017 г. – Томск: ФГБОУ ВО «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники», 2017. – № 1–2. – С. 160–163.
11. Трыков, Е.Л. Обнаружение аномалий в работе реакторного оборудования с помощью нейросетевых алгоритмов / Е.Л. Трыков, И.В. Трыкова, К.И. Коцоев // Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика. – 2020. – № 3. – С. 136–147.
12. Кацер, Ю.Д. Методы обнаружения неисправностей оборудования АЭС / Ю.Д. Кацер, В.О. Козицин, И.В. Максимов // Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика. – 2019. – № 4. – С. 5–27.
13. Бочаров, О.Ю. Анализ существующих систем предиктивной аналитики / О.Ю. Бочаров // Актуальные вопросы современной науки: теория, технология, методология и практика. – 2023. – С. 114–123.
14. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023686473 Российская Федерация. Программа прогнозирования значений технологических параметров на основе ARIMA-модели: № 2023685794: заявл. 28.11.2023: опубли. 06.12.2023 / М.М. Султанов, И.А. Болдырев, М.Е. Шевченко, А.С. Кузнецов; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ» (ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»).
15. Kaur, N. A review of machine learning based anomaly detection techniques / N. Kaur, G. Singh, J. Minhas // International Journal of Computer Applications Technology and Research. – 2013. – № 2. – V. 2. – Pp. 185–187.
16. Song, W. Group anomaly detection based on Bayesian framework with genetic algorithm / W. Song, W. Dong, L. Kang // Information Sciences. – 2020. – V. 533. – P. 138–149.
17. Genetic Algorithm based feature selection and Naïve Bayes for anomaly detection in fog computing environment [Электронный ресурс] / J.O. Onah et al. // Machine Learning with Applications. – 9 September 2021. – Vol. 6 – № 100156. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.mlwa.2021.100156>.



## АНАЛИЗ ПРОГРАММНЫХ РЕШЕНИЙ ПОВЫШЕНИЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ОПЕРАТИВНОГО ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО ПЕРСОНАЛА

*Иванов А.А.* – студент

*Куц Л.Р.* – канд. техн. наук, доцент

Филиал ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» в г. Волжском

*АННОТАЦИЯ.* В статье рассмотрены программные продукты для улучшения качества обучения обслуживающего персонала с целью обнаружения и предотвращения электротехнических рисков. Выполнен анализ программных продуктов, показаны их положительные и отрицательные стороны.

*КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:* алгоритм Т. Саати, матрица парных сравнений, тренажеры, электротехнический персонал, безопасность.

*ABSTRACT.* The article examines software products aimed at improving the training quality of service personnel for the detection and prevention of electrical engineering risks. An analysis of software products has been conducted, highlighting their positive and negative aspects.

*KEYWORDS:* T. Saaty algorithm, pairwise comparison matrix, simulators, electrical personnel, safety.

Современная электротехническая индустрия сталкивается с непрерывным ростом технологической сложности и увеличением оперативных задач, что выдвигает повышенные требования к безопасности оперативного персонала. В данном контексте применение программных решений становится ключевым фактором в обеспечении эффективности и безопасности рабочих процессов. Несмотря на значительные усилия, направленные на разработку безопасных рабочих условий, существует постоянная потребность в совершенствовании программных решений для обеспечения высокого уровня безопасности рабочего персонала.

Для сравнительного анализа программных продуктов в области повышения безопасности оперативного электротехнического персонала были выбраны следующие критерии:

- А1: функционал – оценка спектра функций, предоставляемых программным обеспечением для обучения;
- А2: интерфейс – удобство использования интерфейса программного решения;
- А3: адаптивность – способность программного обеспечения адаптироваться к различным рабочим средам и особенностям предприятий;
- А4: стоимость – экономическая эффективность внедрения программного решения.

Для вычисления весов критериев применялась аналитическая иерархическая процедура Саати. Подробные указания по заполнению матрицы парных сравнений представлены в табл. 1.

Таблица 1

**Правила заполнения матрицы парных сравнений**

$X_{ij}$	Значение
1	$i$ -й и $j$ -й критерии примерно равноценны
2, 3	$i$ -й критерий немного предпочтительнее $j$ -го
4, 5	$i$ -й критерий предпочтительнее $j$ -го
7	$i$ -й критерий значительно предпочтительнее $j$ -го
9	$i$ -й критерий явно предпочтительнее $j$ -го

Матрица парных сравнений, средние геометрические и веса критериев представлены в табл. 2.

Таблица 2

**Матрица парных сравнений, средние геометрические и веса критериев**

Критерии	A1	A2	A3	A4	Оценки компонент собственного вектора	Веса критериев
A1	1	0,33333	0,33333	0,25	0,488359342	0,111519654
A2	3	1,00000	0,50000	0,50	0,944087511	0,215587793
A3	3	2,00000	1,00000	1,00	1,430969081	0,326769989
A4	4	2,00000	1,00000	1,00	1,515716567	0,346122563
Сумма	11	5,33333	2,83333	2,75	4,379132501	1

На основе расстановки приоритетов критериев, а также полученных значений оценка согласованности составила 8 %, что менее 10 %, а значит, все составлено верно.

Диаграмма весовых коэффициентов для критериев представлена на рис. 1.

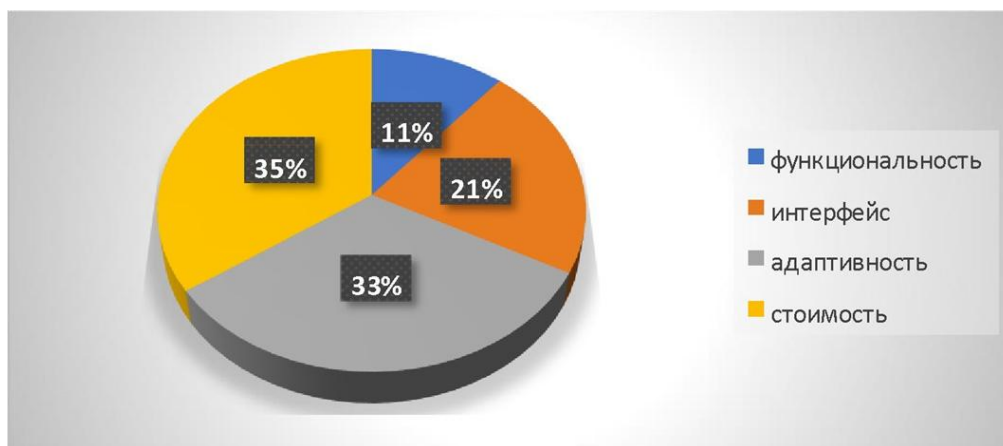


Рис. 1. Весовые коэффициенты критериев приоритета выбора программных решений

Для определения количественных значений функциональных возможностей были выбраны следующие программные решения (ПР).

1. Тренажер оперативного и эксплуатационного персонала на основе моделей виртуальной реальности трансформаторной подстанции.

2. Стенд для обучения и повышения квалификации электротехнического и электротехнологического персонала.

3. Интерактивная автоматизированная система для проведения научных исследований, проектирования и обучения персонала эксплуатации электротехнических комплексов в нефтяной отрасли.

4. Комплексный рекурсивно-идентификационный тренажер (КРИТ-1) для подготовки эксплуатационного персонала энергообъекта.

5. Устройство подготовки эксплуатационного персонала энергетического оборудования.

Определенные количественные значения функциональных возможностей программных решений  $X_{ij}$  представлены в табл. 3.

Таблица 3

**Интегральные показатели качества**

Критерии	Весовые коэффициенты	Программные решения					Базовые значения
		1 ПР	2 ПР	3 ПР	4 ПР	5 ПР	
Функциональность	0,488359342	7,00	4,00	5,00	4,00	3,0	4,6
Интерфейс	0,944087511	6,00	3,00	5,00	3,00	4,0	4,2
Адаптивность	1,430969081	2,00	2,00	1,00	2,00	2,0	1,8
Стоимость	1,515716567	2,00	4,00	4,00	4,00	3,0	3,4
Интегральный показатель качества $Q$		4,25	3,25	3,75	3,25	3,0	3,5

Лепестковая диаграмма значений характеристик качества функциональных возможностей (критериев) программных решений представлена на рис. 2.

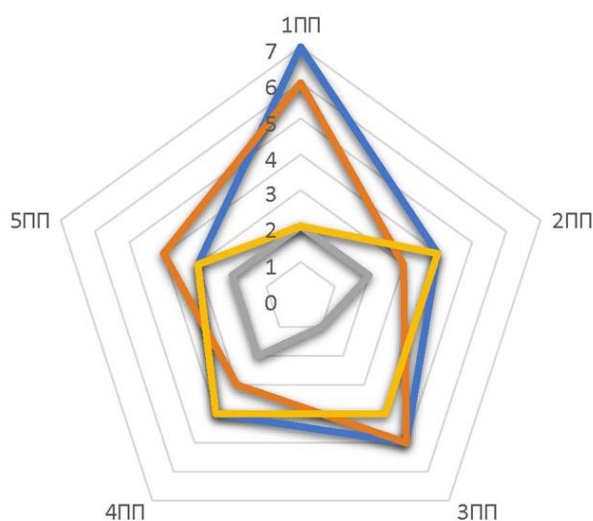


Рис. 2. Лепестковая диаграмма значений функциональных характеристик

При проведении анализа существующих программных решений выявлено, что многие программные решения обладают значительными преимуществами в области функционала и интерфейса, что делает их эффективными инструментами для обучения оперативного персонала. Однако в то же время многие из них сталкиваются с ограничениями в адаптивности к разнообразным рабочим средам предприятий, а также экономической обоснованности (стоимости), что требует доработок и оптимизации.

#### *Выводы*

Наиболее эффективным программным решением для повышения обеспечения безопасности оперативного электротехнического персонала является тренажер оперативного и эксплуатационного персонала на основе моделей виртуальной реальности трансформаторной подстанции (ТР1), его положительные и отрицательные стороны будут взяты за основу при разработке программного обеспечения для обучения электротехнического оперативного персонала ООО «ЛУКОЙЛ-Волгоградэнерго» Волжской ТЭЦ-2.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пат. RU № 2684886. МПК G09B 9/00 (2006.01). Комплексный рекурсивно-идентификационный тренажер (КРИТ-1) для подготовки эксплуатационного персонала энергообъекта / Е.Н. Архипова, С.И. Магид; опубл. 15.04.2019.
2. Пат. RU № 2611669. МПК G09B 9/00 (2006.01). Устройство подготовки эксплуатационного персонала энергетического оборудования / Е.Н. Архипова, С.И. Магид; опубл. 28.02.2017.
3. Пат. RU № 2672163. МПК G09B 19/00 (2006.01). Интерактивная автоматизированная система для проведения научных исследований, проектирования и обучения персонала эксплуатации электротехнических комплексов в нефтяной отрасли / С.В. Бочкарев, В.К. Гладков, А.Б. Петроченков, А.В. Ромодин, В.В. Селезнев, Д.Н. Черемных, В.А. Шамаев; опубл. 12.11.2018.
4. Пат. RU № 2670143 МПК G09B/18 (2006.01). Стенд для обучения и повышения квалификации электротехнического и электротехнологического персонала / В.А. Королев, А.О. Мурашов, Н.И. Рузанова, С.И. Рузанов, А.Ф. Шевхужев, В.С. Шкрабак, Р.В. Шкрабак; опубл. 18.08.2018.
5. Пат. RU № 2617972 МПК G09B 19/00 (2006.01) Тренажер оперативного и эксплуатационного персонала на основе моделей виртуальной реальности трансформаторной подстанции / Р.Р. Насыров, И.Р. Сулейманов, А.И. Чуркин; опубл. 28.04.2017.
6. Саати, Т. Принятие решений. Метод анализа иерархий / Т. Саати, пер. с англ. Р.Г. Вачнадзе. – М., Радио и связь, 1993. – 278 с.

## ЛИНГВОКУЛЬТУРНАЯ СПЕЦИФИКА ПЕДАГОГИЧЕСКОГО ОБЩЕНИЯ В ВУЗЕ

**Опара А.А.** – канд. филол. наук, доцент  
Филиал ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» в г. Волжском

*АННОТАЦИЯ.* В данной статье исследованы лингвокультурные особенности педагогического общения в высшей школе. Педагогическое общение рассматривают как один из видов профессиональной коммуникации. Нормативное поведение участников общения базируется на ценностях культуры и определяет специфику межкультурного взаимодействия. Ролевые ожидания, связанные с поведением участников образовательного процесса, могут кардинально различаться в культурах и вести к непониманию преподавателя и студента.

*КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:* педагогическое общение, профессиональная коммуникация, педагогический дискурс.

*ABSTRACT.* This article examines the linguocultural features of pedagogical communication in higher education. Pedagogical communication is considered as one of the types of professional communication. The normative behavior of communication participants is based on the values of culture and determines the specifics of intercultural interaction. Role expectations associated with the behavior of participants in the educational process can radically differ in cultures and lead to a misunderstanding of the teacher and student.

*KEYWORDS:* pedagogical communication, professional communication, pedagogical discourse.

Педагогическое общение рассматривают как один из видов профессиональной коммуникации. Его отличительным свойством выступает способность к фиксации большого количества культурных доминант. Каждый человек на продолжительное время становится непосредственным его участником, принимая на себя роль обучаемого или обучающегося. Педагогический дискурс фиксирует важные ценности и нормы поведения, усвоенные большинством представителей социума, целенаправленно передаются и санкционируются обществом.

Нормативное поведение участников общения базируется на ценностях культуры и определяет специфику межкультурного взаимодействия. Например, англичане никогда не станут исправлять ошибки в речи иностранцев, даже если те просят их об этом. Известный лингвист С.Г. Тер-Минасова описывает случаи непонимания, возникающие из-за различных ожиданий у русских преподавателей и иностранных студентов.

Во время чтения лекций в японском университете русские преподаватели наблюдают отсутствие всякой реакции студентов на услышанное. Они сидят с бесстрастными лицами, часто с закрытыми глазами, ни вопросов, ни комментариев. Японские коллеги объясняют, что их культура не позволяет студентам

показывать свое согласие, несогласие, спорить с преподавателем, перебивать, выражать чувства ни словами, ни мимикой. Следовательно, задания, связанные с дискуссией, не работают.

Списывание считается главным преступлением у американцев (особенно виновны те, кто дает списывать), что не находит понимания в русской культуре, где использование шпаргалок и списывание поставлено на поток и является выгодным бизнесом.

В Корее использование чернил красного цвета для написания имени ученика и исправления ошибок вызывает негативные эмоции, так как корейские буддисты пишут имя человека красными цветом только в объявлениях о его смерти. Азиатские студенты бывают шокированы, когда преподаватель ведет себя непринужденно, свободно одевается и обращается к учащимся в дружеском тоне. По их мнению, учитель должен быть респектабельным и вызывать страх.

Таким образом, ролевые ожидания, связанные с поведением участников образовательного процесса, могут кардинально различаться в культурах и вести к непониманию преподавателя и студента.

Особый интерес для лингвокультурологии представляют тексты, регламентирующие взаимодействие участников общения в рамках социального института, то есть организационные нормы. В педагогической коммуникации таким жанром выступают правила поведения учащихся, представляющие собой нормативные тексты. Одним из таких документов, является учебный журнал, форма и правила его ведения утверждается вузом. В нем прописаны обязанности лектора потока и преподавателя, ведущего занятия в группе по контролю посещаемости занятий, выполнения календарного плана учебных занятий, а также выдачи заданий.

Данный документ включает положение о старостах учебных групп. Выполнение обязанностей старосты является одним из основных общественных поручений студента. Согласно положению, у старосты есть обязанности и права. Например, проводить в группе распоряжения и указания декана, вести персональный учет посещения студентами занятий, вместе с преподавателем поддерживать дисциплину.

В японской системе образования играет важную роль посещаемость занятий. После окончания школы (начальной, средней, старшей, языковой...) студенту представляют документ с процентом посещаемости. Когда студенты приезжают на обучение в Японию, обязательно проводят классный час (только для новеньких и не всегда сразу в первую неделю), где выдают актуальную и важную информацию о документах, правилах школы, сортировке мусора, негласных правилах поведения в Японии и прочем. И в уставе каждой школы сказано, что студент обязан ходить на занятия, ведь ради этого он и приехал в Японию. Соответственно, и официально подрабатывать в японских компаниях можно ограниченное количество часов в неделю.

В китайских вузах контроль за посещение осуществляет искусственный интеллект. Он распознает лица по уникальным чертам, идентифицируя каждого из учеников.

В Польше, несмотря на то что преподаватели не требуют систематического присутствия на лекционных занятиях, посещаемость студента отмечается. За частые пропуски без основательной причины могут выдвинуть вопрос об отчислении из учреждения высшего образования. Помимо пропусков пар, существует еще несколько обстоятельств, которые могут привести к тому, что студента отчислят из университета.

#### *Выводы*

Итак, правила поведения учащихся представляют собой учебно-организованный жанр педагогического дискурса, в котором сочетаются признаки делового и педагогического дискурса. Сопоставление текстов правил позволяет сделать вывод о том, что в большинстве стран данный жанр недостаточно адаптирован к целям и задачам педагогического процесса, отличается авторитарностью, он ближе деловому дискурсу.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тер-Минасова, С.Г. Война и мир языков и культур: учеб. пособие / С.Г. Тер-Минасова. – М.: Слово/Slovo, 2008. – 344 с.
2. Якимович, Е.В. Лингвокультурная специфика педагогического общения / Е.В. Якимович // Внутривузовская научно-техническая конференция профессорско-преподавательского состава: сборник статей. – Волгоград: ВолгГАСУ, 2008. – С. 123–126.

### **ВЛИЯНИЕ МАССОВОЙ КУЛЬТУРЫ НА ДИАЛОГ КУЛЬТУР И ЭНЕРГЕТИКУ**

*Приймак Е.В.* – студент

*Опара А.А.* – канд. филол. наук, доцент

Филиал ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» в г. Волжском

*АННОТАЦИЯ.* В статье рассматривается, как массовая культура влияет на диалог культур и энергетику в контексте глобализации и создания единой мировой культуры, а также представлены аргументы, что массовая культура может стать причиной потери культурной идентичности и гомогенизации культурных традиций, подчеркивая важность сохранения культурной идентичности и уважения к культурным традициям.

*КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:* культура, массовая культура, энергетика, диалог культур.

*ABSTRACT.* The article examines how mass culture affects the dialogue of cultures and energy in the context of globalization and the creation of a unified world culture, and also presents arguments that mass culture can cause the loss of cultural

*identity and the homogenization of cultural traditions, emphasizing the importance of preserving cultural identity and respect for cultural traditions.*

*KEYWORDS: culture, mass culture, energy, dialogue of cultures.*

Культура – это своеобразное явление, которое существует в рамках определенного сообщества и характеризуется специфическими чертами. В современном мире культура является одним из ключевых элементов, определяющих идентичность народов и государств. Однако в последние десятилетия мы наблюдаем все большую взаимозависимость и взаимопроникновение культурных традиций различных народов. В этом контексте массовая культура играет важную роль в диалоге культур.

Массовая культура – это явление, которое возникло в результате индустриализации и распространения средств массовой информации. Она характеризуется доступностью и широким распространением, а также часто имеет коммерческий характер.

В современном мире, где глобализация и информационные технологии проникают в каждый уголок нашей планеты, массовая культура становится неотъемлемой частью нашей жизни. Понятие «массовая культура» охватывает аспекты развлечений, коммуникации и потребления, которые в значительной мере определяют наше ежедневное существование. Однако вопрос о влиянии массовой культуры на диалог культур и энергетику остается предметом активных дискуссий и исследований.

Массовая культура представляет собой комплекс культурных явлений, созданных для широкого круга аудитории. Это может включать фильмы, музыку, телевизионные передачи, литературу, моду, искусство и другие формы массового производства и потребления.

Кроме того, массовая культура может быть источником полезной информации и знаний. С помощью фильмов, телевизионных передач, книг и других средств массовой коммуникации мы можем расширить свои горизонты и быть в курсе происходящих в мире событий. Массовая культура становится мощным инструментом образования и информирования, что особенно ценно в наше время, когда доступ к информации является основным условием для успеха и прогресса.

Однако влияние массовой культуры на диалог культур не всегда является положительным. Некоторые критики утверждают, что массовая культура приводит к потере культурной идентичности и гомогенизации культурных традиций. Кроме того, массовая культура может стать причиной конфликтов и противоречий между различными культурами.

Таким образом, массовая культура играет важную роль в диалоге культур. Она становится связующим звеном между различными культурными традициями и способствует созданию единой мировой культуры. Однако необходимо учитывать и потенциальные риски и проблемы, связанные с влиянием массовой культуры на диалог культур.



Один из главных рисков, связанных с массовой культурой, заключается в том, что она может привести к потере культурной идентичности. Например, многие народы и государства сталкиваются с проблемой сохранения своих традиций и культурного наследия в условиях распространения массовой культуры.

И нельзя не отметить, что массовая культура также может иметь отрицательные последствия в виде бездумного потребления медиаконтента, которое может привести к апатии и асоциальному поведению. СМИ могут воздействовать на наше восприятие реальности, формировать стереотипы и искажать наши представления о мире. Это вызывает вопросы о пропаганде, манипуляции и контроле над массами, что может привести к политическим и социальным напряжениям.

Еще одним важным аспектом, который нужно учитывать, является влияние массовой культуры на энергетику общества. Расходы электроэнергии на организацию культурных событий, производство и потребление медиаконтента значительно возросли в последние десятилетия. Это создает проблемы в сфере окружающей среды и энергетической эффективности. Возникает необходимость в развитии новых, экологически чистых и культурно ответственных технологий, которые позволят нам наслаждаться массовой культурой, минимизируя негативное воздействие на окружающую среду.

### *Выводы*

В целом массовая культура играет важную роль в нашей современной жизни. Она отражает и направляет наши индивидуальные, социальные и культурные предпочтения. Однако ее влияние на диалог культур и энергетику неоднозначно. Необходимо учитывать как позитивные, так и негативные аспекты массовой культуры, и стараться использовать ее потенциал для достижения гармонии и устойчивого развития нашего общества.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Массовая культура как глобализационный феномен // Российский гуманитарный журнал. – 2018. – Т. 7. – № 4. – С. 260–272.
2. Гаспаров, М.Л. Историзм, массовая культура и наш завтрашний день / М.Л. Гаспаров. – М.: Собрание; Наука. – 2005. – Т. 1. – С. 26–29.
3. Аблеев, С.Р. Специфика и тенденции массовой культуры: анализ основных аспектов [Электронный ресурс] / С.Р. Аблеев. – URL: <https://lomonosov.org/friend-esses/fourfriend-esses15054.html>.

## ФОРМИРОВАНИЕ СОДЕРЖАНИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКИ СТУДЕНТОВ-ЭНЕРГЕТИКОВ С ПОЗИЦИИ КОНЦЕПЦИИ ФУНДИРОВАНИЯ

*Ходырева Н.Г.* – канд. пед. наук, доцент

*Устинова Л.Г.* – канд. пед. наук, доцент

Филиал ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» в г. Волжском

*АННОТАЦИЯ.* Статья посвящена вопросам моделирования содержания математической подготовки студентов-энергетиков посредством концепции фундирования. Рассматривается сущность концепции фундирования, ее отличия от традиционного подхода к построению содержания образования, средства реализации концепции в учебном процессе.

*КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:* содержание образования, моделирование, фундирование, спираль фундирования, математика.

*BSTRACT.* The article is devoted to the issues of modeling the content of mathematical training of energy students through the concept of foundation. The essence of the concept of foundation is considered, its differences from the traditional approach to building the content of education, the means of implementing the concept in the educational process.

*KEYWORDS:* the content of education, modeling, funding, fundingspiral, mathematics.

Одной из важнейших задач реализации федеральных государственных образовательных стандартов высшего образования является проектирование содержания обучения с учетом современного состояния науки и техники и требований, которые предъявляют к будущим специалистам ведущие организации и компании-партнеры в соответствующей профессиональной сфере.

Анализ государственных образовательных стандартов высшего образования (табл.) начиная с 1993 года и по настоящее время показал, что за прошедшие годы менялись как требования к результатам подготовки специалистов, так и требования к содержанию вузовского образования.

После вступления России в 2003 году в Болонский процесс и перехода в 2009 году на новые Федеральные государственные образовательные стандарты (ФГОС) результаты обучения стали формулироваться в терминах компетенций. В процессе актуализации ФГОС название, состав и содержательное наполнение компетенций изменялось. В то же время обязательный минимум содержания образования постепенно сокращался, и в итоге был совсем исключен из государственных стандартов. В настоящее время высшие учебные заведения имеют право самостоятельно определять содержание образования по направлению подготовки и закреплять его в основной профессиональной образовательной программе.

Последний тезис подчеркивает актуальность проблемы проектирования содержания образования, усвоение которого в полной мере бы способствовало развитию универсальных, общепрофессиональных и профессиональных компетенций будущих специалистов и отвечало бы требованиям современного рынка труда.

#### Анализ государственных образовательных стандартов высшего образования

Стандарт	Год	Результаты обучения	Содержание обучения
ГОС ВПО	1993–1999 гг.	Требования к уровню подготовки: знать, уметь, иметь представления, владеть, иметь опыт и т. д.	Обязательный минимум содержания образования (по дисциплинам)
ГОС ВПО	2000–2009 гг.	Знать и уметь применять	Обязательный минимум содержания образования (по дисциплинам)
ФГОС ВПО	2009–2011 гг.	Общекультурные и профессиональные компетенции	Содержание образования по циклам: гуманитарному, естественно-научному, профессиональному
ФГОС ВО (3+)	2014–2016 гг.	Общекультурные, общепрофессиональные и профессиональные компетенции	Требований к содержанию нет
ФГОС ВО (3++)	2017 г. – ...	Универсальные, общепрофессиональные и профессиональные компетенции	Требований к содержанию нет

Одним из возможных подходов к совершенствованию процесса моделирования содержания вузовского образования является использование концепции фундирования знаний и опыта личности обучающегося в построении содержания математической подготовки студентов энергетического вуза.

Впервые термин «фундирование» возник как философская категория в феноменологии – философском направлении, основоположником которой является Эдмунд Гуссерль, немецкий философ конца XIX – начала XX века. Слово «фундирование» произошло от немецкого «обоснование», «основание». По определению Гуссерля, «А фундировано посредством В, если для существования А сущностно необходимо В, только в единстве с которым А может существовать» [1, с. 137]. Согласно феноменологическому учению, все комплексные высокоуровневые акты и предметности фундированы в изначальных простых актах и предметах.

В педагогику термин «фундирование» был внедрен в 2002 году в Ярославском государственном педагогическом университете. Авторы концепции – ряд ученых-педагогов (Е.И. Смирнов, Р.М. Зайниев, В.В. Афанасьев и др.) под руководством профессора В.Д. Шадрикова [2]. В авторской интерпретации

фундирование – это процесс создания условий для становления личности учителя математики, формирований целостной системы профессионально-педагогической деятельности будущего педагога [1, с. 136].

Одной из ключевых составляющих концепций фундирования является построение содержания образования по направлению подготовки, которое включает в себя следующие компоненты:

- школьные учебные элементы и виды деятельности, актуализируемые в учебном процессе вуза (знания, умения, навыки, идеи, алгоритмы, личностный опыт);

- вузовские учебные элементы, обобщающие школьные знания на более высоком теоретическом уровне (формирование понятийного аппарата, более обобщенные умения, методы, процедуры, технологии);

- практико-ориентированные профессиональные задачи, решаемые посредством сформированных знаний и умений и способствующие развитию поисковой и творческой активности студентов [1, с. 137].

Традиционная модель отбора содержания образования также включает все перечисленные выше компоненты. Однако, как правило, основное внимание уделяется проектированию вузовских учебных элементов, часто в отрыве от школьного материала и с недостаточной ориентацией на профессиональные дисциплины.

Отличие концепции фундирования от традиционного подхода состоит в том, что, в первую очередь, определяется профессионально-теоретическая основа для отбора содержания образования по вузовским дисциплинам, далее моделируются и разворачиваются вузовские элементы, а затем устанавливается преемственность со школьными предметными знаниями, подлежащими актуализации, поэтапному расширению и углублению [3, с. 83].

Средством реализации концепции фундирования в учебном процессе вуза является спираль фундирования. Это способ планирования и организации учебного процесса, который предполагает циклическое повторение материала на разных уровнях с постоянным обобщением или применением в специальных дисциплинах [4, с. 125]. Основу для фундирования в вузовском курсе высшей математики составляют следующие содержательные линии: числовая, функциональная, геометрическая, линия тождественных преобразований, линия уравнений и неравенств, стохастическая линия.

В рамках каждой содержательной линии моделирование спирали фундирования включает в себя:

- отбор тематического содержания;
- выбор алгоритмов, методов, процедур решения задач;
- включение профессионально-ориентированных заданий;
- проектирование исторического оснащения;
- определение единого подхода к обозначениям, чертежам;
- проектирование этапов изучения материала.

Наличие проекта Предуниверситария МЭИ позволяет расширить содержание математической подготовки школьников 10 и 11 классов, представляя материал каждой содержательной линии в единой логической связи и устанавливая преемственность между школьными и вузовскими учебными элементами. В рамках такого направления деятельности создаются возможности для углубления знаний, применения единого подхода к введению определений, усвоения методов и алгоритмов решения, применяемых в высшей математике, включения профессионально-ориентированных задач в содержание обучения школьников.

### *Выводы*

На данный момент авторами построена спираль фундирования содержательной линии дифференциальных уравнений с историко-методическим оснащением. В проекте разработана спираль фундирования по теме «Векторы. Метод координат» и установлено соответствие этой содержательной линии со школьным материалом.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фундирование в определении содержания математического образования будущего учителя / Е.И. Смирнов, В.Н. Белкина, А.С. Тихомиров, Т.Л. Трошина // Ярославский педагогический вестник. – 2013. – № 3. – Том II. – С. 134–140.
2. Подготовка учителя математики: Инновационные подходы: учеб. пособие для студентов, обучающихся по специальности 032100 «Математика» / В.В. Афанасьев и др.; под ред. В.Д. Шадрикова. – М.: Гардарики, 2002. – 383 с.
3. Яновская, Н.Б. Концепция фундирования при обучении математике студентов технического университета / Н.Б. Яновская, Ю.В. Ларченков-Казанович // Казанский педагогический журнал. – 2010. – № 3. – С. 82–88.
4. Шабалина, А.И. Основные характеристики оснащенных спиралей фундирования математико-методических умений будущего учителя математики / А.И. Шабалина // Ярославский педагогический вестник. – 2010. – № 4. – Том II. – С.123–129.

### СПЕЦИФИКА ПЕРЕВОДА ТЕКСТОВ В ИТ-СФЕРЕ

*Мамина А.В.* – студент

*Калюжная И.А.* – канд. филол. наук

Волжский филиал Волгоградского государственного университета

*АННОТАЦИЯ.* В статье рассмотрены ключевые аспекты процесса технического перевода в области информационных технологий. Статья подчеркивает необходимость глубокого понимания специфики ИТ-терминологии, а также культурных особенностей для достижения высокого качества перевода. Приведены примеры, иллюстрирующие правильный подход к переводу технических текстов в сфере ИТ.

*КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: технический перевод, информационные технологии, специализированная лексика, архитектурные шаблоны, культурная адаптация, пользовательский интерфейс, международный обмен знаниями, программирование, терминология IT.*

*ABSTRACT. The paper explores crucial aspects of the technical translation process within the realm of information technology. Emphasizing the necessity for a profound understanding of IT terminology and cultural nuances, the article highlights the importance of achieving high-quality translations. Concrete examples are provided to illustrate the proper approach to translating technical texts in the field of IT.*

*KEYWORDS: technical translation, information technology, specialized lexicon, architectural patterns, cultural adaptation, user interface, international knowledge exchange, programming, IT terminology.*

### *Введение*

Технический перевод в сфере информационных технологий (IT) является фундаментальным элементом в передаче знаний, инструкций и сведений о программном обеспечении, аппаратных средствах и различных технологиях. Эффективный перевод IT-текстов с английского языка на русский требует глубокого понимания не только лексики и грамматики, но и специфики отрасли. В статье рассмотрены ключевые аспекты технического перевода в IT и представлены примеры, иллюстрирующие особенности этого процесса.

Актуальность настоящего исследования состоит в рассмотрении различных подходов к переводу технических текстов в сфере IT, изучении специфики перевода компьютерных терминов, а также применении локализации и адаптации при переводе текстов из IT-сферы.

Новизна исследования состоит в рассмотрении и изучении различных переводческих решений при переводе текстов из изучаемой области знаний.

### *Ключевые аспекты технического перевода в IT*

1. *Специализированная лексика.* IT-сфера изобилует терминологией, специфической для конкретных технологий, языков программирования, аппаратных средств и процессов разработки. Переводчик должен обладать глубоким пониманием этих терминов на обоих языках, чтобы точно передать смысл без потери информации.

2. *Техническая документация и спецификация.* Перевод технических документов, таких как спецификации, инструкции по эксплуатации или руководства пользователя, требует точности и ясности. Переводчик должен не только понимать содержание, но и уметь передать его наиболее точным и понятным образом для конечного пользователя.

3. *Адаптация культурно-специфичных аспектов.* Важно учитывать не только технические аспекты, но и культурные нюансы. Некоторые термины или понятия могут иметь разное восприятие в разных культурах.

В статье приведены некоторые примеры перевода текстов из области информационных технологий с использованием различных переводческих трансформаций.

#### *Примеры технического перевода в IT*

*Перевод технической документации.* Перевод технической документации зависит от специфики документа и способа передачи информации. Рассмотрим некоторые примеры перевода данных текстов.

*Исходный текст на английском:* The user interface of the software allows for drag-and-drop functionality, enabling users to seamlessly arrange elements on the screen [1].

*Перевод на русский:* Пользовательский интерфейс программного обеспечения поддерживает функцию перетаскивания, позволяя пользователям легко перемещать элементы на экране [1].

В данном переводе конструкция *drag-and-drop functionality* может быть переведена как *функция перетаскивания*, в других переводах можно встретить вариант *функция перемещения выделенного объекта*. Иногда встречается упрощенный вариант: *The toolbars supporting drag and drop functionality*. Перевод: *Панели инструментов можно перетаскивать мышью* [1].

#### *Перевод терминологии программирования*

С появлением новых программных продуктов в IT-сфере появляются и новые устройства, функции и программы, которые получают терминологическое наименование. Очень эффективным способом образования компьютерных терминов в русском языке является заимствование. Именно таким образом в наш родной язык пришли такие слова, как *драйвер*, *интерфейс*, *файл*, *скрипт* и многие другие. Данные слова прочно осели в русском языке [1].

Для перевода компьютерных терминов с английского языка на русский часто используется *транслитерация* (например: *monitor* – «монитор») и *калькирование* (например: *main memory* – «оперативная память») [1]. Иногда при отсутствии аналогов в русском языке переводчик оставляет название объекта на языке оригинала, полностью или частично [2].

*Исходный текст на английском:* The application is built using a Model-View-Controller (MVC) architectural pattern [1].

*Перевод на русский:* Приложение разработано с использованием архитектурного шаблона Model-View-Controller (MVC) [1].

#### *Адаптация культурных нюансов*

Для более точного понимания переводчики часто используют *локализацию* (сюда могут относиться правила обращения, обычаи и традиции), а также *адаптацию формата и единиц измерения*, что является важным для технических текстов. Иногда могут использоваться сравнения и сравнительные обороты.

*Исходный текст на английском:* Our software is user – friendly as a walk in the park [1].

*Перевод на русский:* Наше программное обеспечение простое и удобное в использовании, как прогулка в парке [1].

Здесь переводчик оставил сравнение, так как оно было понятно для целевой аудитории [3].

#### *Выводы*

Технический перевод в сфере IT является важным инструментом для международного обмена знаниями и инноваций. Он требует от переводчика не только знания обоих языков, но и глубокого понимания специфики IT-отрасли. Это обеспечивает точный и понятный перевод, способствующий эффективной работе и взаимопониманию между специалистами по всему миру.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Multitran (словарь) [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.multitran.ru> (дата обращения: 05.11.2023).
2. Бабалова, Г.Г. Системно-аспектуальное функционирование компьютерной терминологии: дисс. ... д-ра филол. наук / Г.Г. Бабалова. – М., 2009. – С. 380.
3. Zannetin, F. The Routledge Handbook of Translation and Methodology / F. Zannetin, C. Rundle. – London: Routledge, 2022. – P. 381.



## СОДЕРЖАНИЕ

<i>Ахметбаев Д.С., Иран Е., Нурлан Ш.</i> Стабилизация режимов напряжений для повышения надежности электрической системы.....	3
<i>Ахметбаев Д.С., Досжанов Н., Иран Е.</i> О повышении пропускной способности линии электропередачи 1150 кВ Экибастуз – Кокшетау.....	9
<i>Ахметбаев Д.С., Досайбекова Н., Абдикарим Н.</i> Повышение надежности и пропускной способности распределительных сетей.....	12
<i>Бармина М.А., Плотников А.С.</i> Исследование эффективности внедрения комбинированных датчиков тока и напряжения для борьбы с перенасыщением измерительных трансформаторов.....	18
<i>Бондаренко Н.В., Галицкий Д.С.</i> Диагностика релейной защиты на основе методов машинного обучения.....	23
<i>Ботов Д.А., Зенина Е.Г.</i> Моделирование систем автоматического регулирования возбуждения синхронных генераторов электростанций.....	26
<i>Николаевский С.А., Зенина Е.Г.</i> Анализ работы адаптивной релейной защиты и алгоритм ее функционирования.....	33
<i>Ребров Е.Н., Шибитов В.С.</i> Разработка и применение устройств определения места повреждения на ЛЭП с использованием волновых методов.....	36
<i>Сорокин Н.А.</i> Применение катушек Роговского в микропроцессорных устройствах релейной защиты.....	39
<i>Ефимов В.В., Зенина Е.Г.</i> Разработка модели различных систем заземления нейтрали в сетях 6-35 кВ.....	41
<i>Баженова А.А.</i> Обзор устройств АОПО и их возможное применение на ПС.....	46
<i>Жалнина В.Ю., Зенина Е.Г.</i> Разработка математической модели нагрева провода и изменения стрелы провеса воздушной линии электропередачи в процессе протекания тока.....	50
<i>Благочиннов А.В., Шевченко М.Е., Курьянова Е.В.</i> Разработка алгоритмов оценки и прогнозирования уровня безопасности теплоэнергетических объектов.....	56
<i>Васильев А.Р., Гусева Ю.В.</i> Расчетная оценка эффективности снижения выбросов парниковых газов на тепловых электростанциях.....	61
<i>Аввакумов Т.А., Одоевцева М.В.</i> Исследование эффективности способа реагентного умягчения концентрата обратного осмоса.....	64
<i>Васильев А.Р., Кострюков С.А., Гусева Ю.В.</i> Повышение экологической безопасности тепловых электростанций.....	67
<i>Скороходов В.Д., Иваницкий М.С.</i> Теоретический анализ методов прогнозирования экономичности и надежности работы оборудования ТЭЦ.....	70
<i>Гофуржонов Ш.Х.У., Иваницкий М.С.</i> Опыт эксплуатации АЭС на быстрых нейтронах.....	72

---

---

<b>Скороходов В.Д., Иваницкий М.С.</b> Алгоритм расчета надежности энергоблока ТЭЦ с водородным генератором.....	75
<b>Болдарев Ф.Е., Рыбалов А.А., Ширяйкин С.Г.</b> Опыт внедрения цифровых решений на ТЭЦ для повышения надежности паровых турбин.....	78
<b>Егоров М.С., Кереселидзе Д.К.</b> Методы машинного обучения для обнаружения точек изменения состояния в технологических данных энергетического оборудования.....	80
<b>Шевченко М.Е., Болдырев И.А.</b> Критерии выявления аномалий во временных рядах технологических параметров.....	83
<b>Иванов А.А., Куц Л.Р.</b> Анализ программных решений повышения обеспечения безопасности оперативного электротехнического персонала.....	89
<b>Опара А.А.</b> Лингвокультурная специфика педагогического общения в вузе.....	93
<b>Приймак Е.В., Опара А.А.</b> Влияние массовой культуры на диалог культур и энергетику.....	95
<b>Ходырева Н.Г., Устинова Л.Г.</b> Формирование содержания математической подготовки студентов-энергетиков с позиции концепции фундирования.....	98
<b>Мамина А.В., Калюжная И.А.</b> Специфика перевода текстов в IT-сфере.....	101

**ЭНЕРГЕТИКА В УСЛОВИЯХ ЦИФРОВОЙ ТРАНСФОРМАЦИИ.  
НАУКА. ТЕХНОЛОГИИ. ИННОВАЦИИ**

**III МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ**

г. Волжский  
25–28 декабря 2023 г.

Сборник материалов конференции

Редактор *Болдырева А.П.*  
Компьютерная верстка *Константиненко Н.Н.*  
Корректор *Константиненко Н.Н.*

Подписано в печать 29.03.2024. Формат 60×84/16.  
Печать ризографическая. Усл. печ. л. 6,2.  
Тираж 25 экз. Заказ № 630.

Издательство филиала ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» в г. Волжском  
Отпечатано в филиале ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» в г. Волжском  
404110, г. Волжский, пр. Ленина, 69