

# Повышение энергоэффективности распределительных сетей 20 кВ с использованием средств компенсации реактивной мощности с управлением на базе искусственного интеллекта

<sup>1</sup>**БАЛТИН Алишер Талғатұлы**, магистр, старший преподаватель, [aliserbaltin9@gmail.com](mailto:aliserbaltin9@gmail.com),

<sup>2</sup>**\*БЕРДАЛИЕВ Али Даниярұлы**, инженер, [aberdaliev292@gmail.com](mailto:aberdaliev292@gmail.com),

<sup>1</sup>**ИСЕНОВ Султанбек Сансызбаевич**, к.т.н., декан, [isenov\\_sultan@mail.ru](mailto:isenov_sultan@mail.ru),

<sup>3</sup>**ШЕРЬЯЗОВ Сакен Койшыбаевич**, д.т.н., профессор, [sakenu@yandex.ru](mailto:sakenu@yandex.ru),

<sup>4</sup>**ОБУХОВ Сергей Геннадьевич**, д.т.н., профессор, [serob99@mail.ru](mailto:serob99@mail.ru),

<sup>1</sup>НАО «Казахский агротехнический исследовательский университет имени С. Сейфуллина», пр. Женис, 62, Астана, Казахстан,

<sup>2</sup>АО «Астана – Региональная Электросетевая Компания», ул. Домалак ана, 9, Астана, Казахстан,

<sup>3</sup>НАО «Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева», ул. Сатпаева, 2, Астана, Казахстан,

<sup>4</sup>Национальный исследовательский Томский политехнический университет, пр. Ленина, 30, Томск, Россия,

\*автор-корреспондент.

**Аннотация.** Повышение энергоэффективности линий электропередач является очень важной темой в современной энергетике. Однако стоит отметить, что линии классом напряжения 20 кВ являются нераспространенным классом в рамках Казахстана, более высокую популярность имеют линии напряжением 6 кВ, 10 кВ и 35 кВ. В статье рассмотрен вопрос о повышении энергоэффективности распределительных сетей города Астаны напряжением 20 кВ на примере подстанции «Олимп», с использованием средств компенсации реактивной мощности и управлением на базе искусственного интеллекта. Для обеспечения и выполнения данных критериев применение искусственного интеллекта используется мировой опыт в прогнозировании как нагрузок, генерации, так и цен на электроэнергию и положительный результат Дании, которые прибегают к инструментам и моделям машинного обучения как: TBATS, ANN и ARIMA. Такие познания в энергетике могут стать первыми шагами для оценки и прогноза по потреблению на ближайшие 10 лет, на основании полученных данных по потреблению города Астаны за период с 2014-2024 годы.

**Ключевые слова:** пропускная способность, распределительные сети 20 кВ, повышение энергоэффективности, средства компенсации реактивной мощности, тиристорно-управляемые элементы.

## Введение

Рассматривается повышение энергоэффективности линий электропередач на примере распределительных сетей 20кВ города Астаны от подстанции «Олимп». За последние 10 лет увеличение населения страны составило 17%, также стоит взглянуть на рост энергопотребления, в 2019 году это было 105,2 млрд кВт·ч, а в 2023 году это

число превысило 115,1 млрд кВт·ч [12]. Использование средств компенсации реактивной мощности, таких как TSR, TCR, TCSR и TSC (тиристорно-регулируемые конденсаторы, реакторы, а также скомбинированные устройства), тоже довольно передовой и гибкий способ повышения пропускной способности линий. В большинстве научных статей описываются новые технологии уче-

та и контроля управления, исполнительных устройств и устройств защиты с быстрым откликом [1-4]. Использование искусственного интеллекта в электроэнергетических системах довольно новое и передовое решение, часто служащее для прогнозирования нагрузок, адаптивного подстраивания под изменения в системе и ведения отчетности, мониторинга для диспетчерских и других служб. Комбинирование средств компенсации реактивной мощности и искусственного интеллекта может стать большим подспорьем для развития адаптивных и умных электроэнергетических систем и позволит автоматизировать многие процессы, проходящие в линии, также комбинированная работа может помочь внедрению ВИЭ в линии [10].

### Материалы и методы

В настоящее время рассматриваемая схема распределительной сети от подстанции «Олимп» имеет ряд задач и проблем, которые дают стимул в решении, используя мировой опыт. Данная подстанция находится на балансе и исходные данные были получены в АО «Астана РЭК» [11].

На основании выполненных экспериментов по расчету режима рассматриваемой распределительной сети 20кВ в программе RastrWIN3 и полученных результатов по расчету установившихся режимов, напряжение на узлах в среднем на 10-15% выше номинального, а сумма потерь составляла 0,84 МВА в летний минимум, а в зимний максимум на узлах не превышала пределы 5%, а сумма потерь была на уровне 1,41 МВА. Данные в летнее время показывают, что перенапряжение в часы минимума составляет 15%, это чревато уменьшением срока эксплуатации оборудования.

Информация по нагрузкам и загрузкам трансформаторов взята с контрольных замеров АО «Астана РЭК» 2023 года [11], где на период с 01.01.2023 года до 28.12.2023 года было 67 отключений, из них 51 аварийных, основные из которых приходятся на летнее время.

### Принцип работы TSC и TCR

Устройства TSC и TCR имеют широкое применение в системах FACTS, которые помогают не только контролировать параметры сети, но также улучшают стабильность и гибкость сети. Основными элементами двух устройств являются тиристоры и реактивные элементы: конденсаторы и реакторы.

TSC – конденсатор, который подключается к сети с помощью тиристоры, так называемый тиристорный переключатель может подключать и отключать конденсатор в сети переменного тока. Так как конденсаторы не регулируются по фазе, а подключаются на

полную мощность, – отсутствуют гармоники искажений [12].

TCR – реактор, который управляется тиристорами, главное отличие от тиристорных переключателей которого в том, что поглощаемая реактивная мощность может быть отрегулирована и изменяться в зависимости от положения проводимости тиристоры [12].

Если реактивная нагрузка энергосистемы является индуктивной, то система будет использовать тиристорные регулируемые конденсаторы для поглощения реактивной мощности из системы, что приводит к повышению напряжения в системе [5]. В сочетании с шагом конденсаторной батареи получают непрерывно изменяемую реактивную мощность, которая может как подавать, так и поглощать реактивную мощность. Также в отличие от динамических схем компенсации, синхронные конденсаторы, дешевле, быстрее и надежнее [6]. Однако статические VAR-компенсаторы дороже механически переключаемых конденсаторов, поэтому многие операторы систем используют комбинацию обеих технологий (иногда в одном установочном месте), где статические VAR-компенсаторы обеспечивают поддержку для быстрых изменений механически переключаемых конденсаторов [7, 8].

Система TSR обеспечивает ступенчатую вариацию тока, а TCR обеспечивает плавную вариацию напряжения. Таким образом, диапазон управления реактивной мощностью может быть увеличен за счёт использования TSR [9]. Стоит отметить, что при расчете надо учитывать, что внедрение анализа искусственного интеллекта для данных устройств позволит улучшать прогнозирование и эффективность.

На рисунке 1 приведена блок-схема, показывающая взаимодействие сети, средств компенсации и искусственного интеллекта.

На основании вышеизложенного в сеть подключаются комбинированные TCR-TSC устройства, сбор данных производит система SCADA, полученную информацию SCADA сохраняет в хранилище данных (Big Data). Искусственный интеллект анализирует всю информацию и делает прогнозы, основываясь на предыдущем опыте, также он переключает режимы работы тиристоры, благодаря чему производится управление устройствами. Диспетчер же в этой ситуации производит контроль и мониторинг над искусственным интеллектом и его прогнозами, в случае сбоя или аварии берет ручное управление на себя.

Обучение в контексте данных моделей заключается в итерационном подборе параметров для аппроксимации зависимостей,

описывающих какой-либо изменяющийся во времени процесс. Такой подход позволяет адаптивным моделям извлекать сложные нелинейные зависимости на длительных интервалах, за счет чего они, как правило, по сравнению с моделями на основе статистических подходов показывают более высокий результат [13].

Одним из самых широко распространенных моделей являются искусственные нейронные сети (ИНС). Такие сети обучаются на больших наборах данных с предсказуемыми закономерностями, а после благодаря полученным навыкам и пониманию закономерности выходят на самообучение, где успех машинного обучения в прогнозировании составил 95,2 % [13].

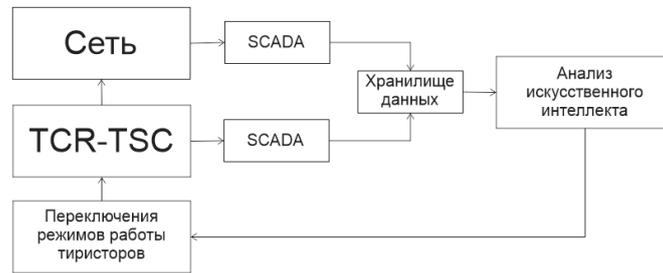
Положительный опыт Дании дал толчок для прогноза роста эффективности и применения искусственного интеллекта в анализе нагрузок и управлении тиристорами в системах TSC-TCR (рисунок 2), где эффективность искусственного интеллекта будет значительно увеличиваться в течение ближайших лет, когда система сможет работать практически автономно. Используя техноло-

гию искусственного интеллекта, на основании данных по потреблению электроэнергии города Астаны за предыдущие 10 лет в период с 2014-2024 годы, было спрогнозировано искусственным интеллектом, что ее потребление вырастет.

Прибегая к мировому опыту в прогнозировании как нагрузок, генерации, так и цен на электроэнергию, сложно не отметить положительный опыт Дании, которые используют такие инструменты и модели машинного обучения, как: TBATS, ANN и ARIMA. Так как основной энергоресурс Дании — это возобновляемые источники электроэнергии, прогнозирование именно этих данных имеет наибольшую важность. На рисунке 3 приведены результаты обучения нейронной сети после периода полугодового самообучения [13].

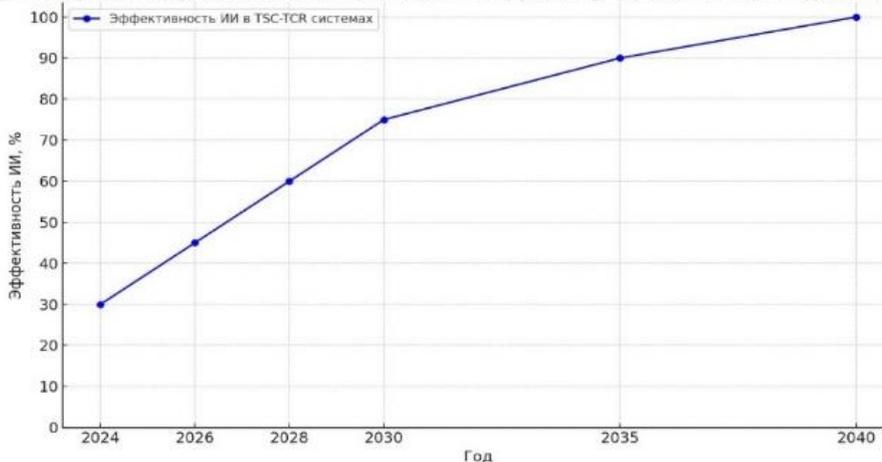
На рисунке 4 показан прогнозируемый рост потребления потерь в сети города Астаны до 2035 года. Линейное изменение обуславливается линейным прогнозом увеличения потребления.

На рисунке 5 отмечено изменение потерь после внедрения тиристорно-управляемых

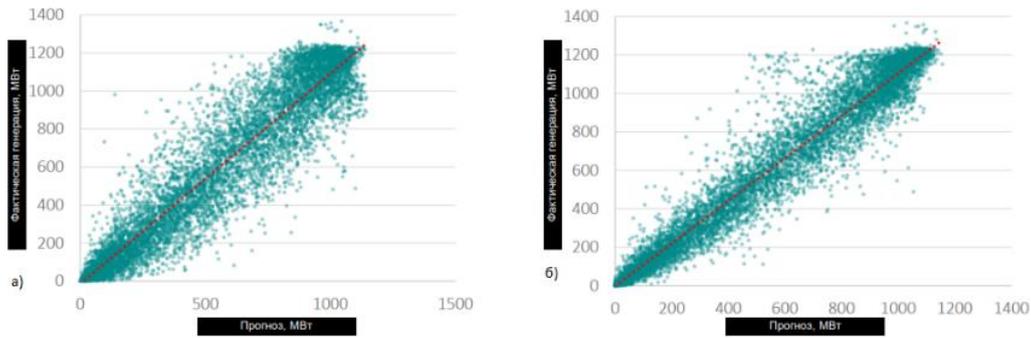


**Рисунок 1 – Блок-схема взаимодействия сети, средств компенсации и искусственного интеллекта**

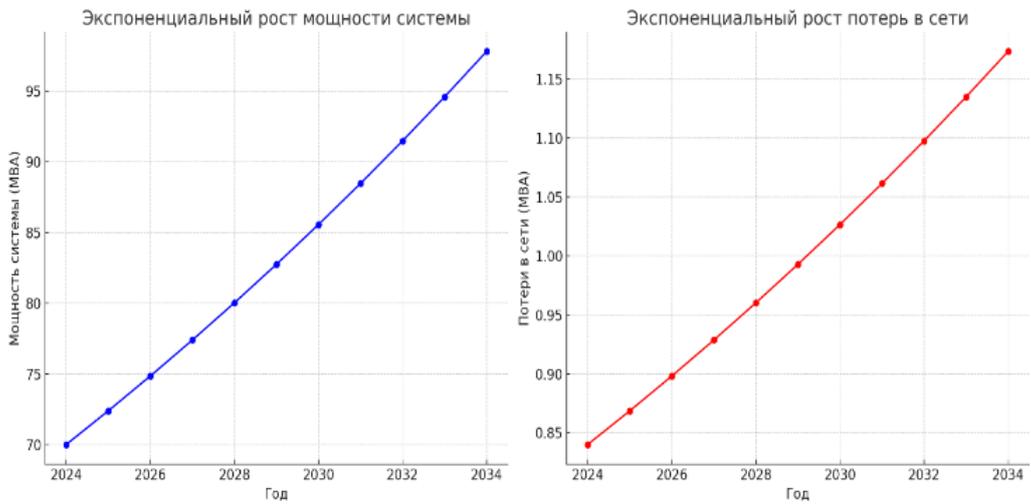
**Прогноз роста эффективности ИИ в анализе нагрузок и управлении тиристорами (TSC-TCR)**



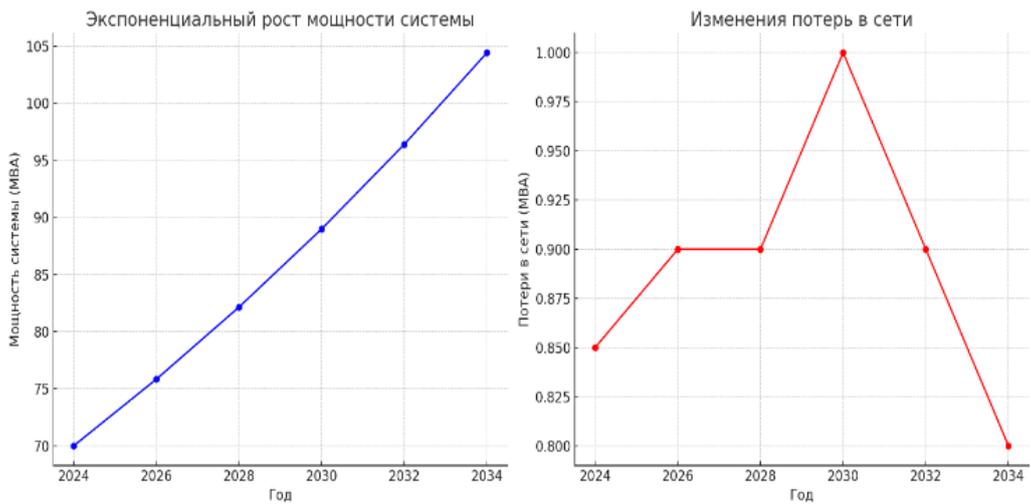
**Рисунок 2 – Прогноз роста эффективности ИИ в анализе нагрузок**



**Рисунок 3 – Успехи обучения прогнозированию нейронных сетей, используемых Данией**



**Рисунок 4 – Увеличение мощности и потерь в сети**



**Рисунок 5 – Изменения потерь после внедрения TSC-TCR систем**

реакторов и конденсаторов на фоне увеличения роста мощности и симуляции среде RastrWIN3. Сравнение данных показывает, что после внедрения гибких систем контро-

ля реактивной мощности потери в системе начинают уменьшаться, особенно это заметно в перспективе в 2030 году. Также по мере обучения искусственного интеллекта

по эффективности систем анализа и прогнозирования, качество прогнозов станет более точное и продвинутое. Экономическая интерпретация в начале внедрения (2024 год) высока, но по мере адаптации системы и накопления опыта они постепенно уменьшаются, и к 2029 году целесообразность полностью оправдывается, поскольку затраты минимальны, а доходы остаются стабильными.

### Заключение

В статье были рассмотрены методы повышения энергоэффективности линий электропередач напряжением 20 кВ на примере подстанции «Олимп», с использованием средств компенсации реактивной мощности с управлением на базе искусственного интеллекта. После внедрения комбинированных тиристорных устройств получены следующие результаты:

1. Напряжение рассматриваемой распределительной сети 20кВ стало более стабильнее как в зимний, так и в летний период, и показало уменьшение потерь за счёт компенсации реактивной мощности, которые приведены в сравнениях потерь до и после ввода средств компенсации реактивной мощности.

2. Распределительная сеть стала более гибкой, за счет быстрого изменения реак-

тивной мощности, а также появились возможности высокого диапазона регулирования, быстрее и эффективнее реагирует на малейшие изменения в сети.

3. Средства компенсации становятся более эффективнее со временем, так как после внедрения системы хранения (Big Data) и анализа его с помощью искусственного интеллекта прогнозируемые нагрузки станут более точными и переключение режимов тиристорных станет более эффективным.

В заключение можно отметить, что совокупность преобладающих факторов по внедрению тиристорно-переключаемых и тиристорно-регулируемых систем в распределительные сети напряжения 20 кВ с высокой плотностью нагрузок, и в густонаселенных районах мегаполиса на примере подстанции «Олимп» (г. Астана) являются довольно перспективным направлением. На основании полученных результатов, эксплуатационные и амортизационные затраты, окупаемость по расчётам произойдут только к 2029 году. Но стоит учесть высокую стоимость оборудования, что данная технология является также одним из способов повышения энергоэффективности питающих и распределяющих сетей 20кВ, к чему стремится наша страна.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kazmi, S. A. Multi Criteria Decision Analysis for Optimum DG Placement in Smart Grids / S. A. Kazmi, S. F. Hasan, D. R. Shin // Smart Grid Technologies – Asia (ISGT ASIA), 2015 IEEE Innovative. 2019. November.
2. Safdarian, A. Merkebu Z. Degefa, Matti Lehtonen, Mahmud Fotuhi-Firuzabad “Distribution network reliability improvements in presence of demand respons / A. Safdarian [et al.] // IET Generation, Transmission & Distribution. 01 December 2014. Vol. 8. <https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2013.0815>
3. Granhaug, O. Compact secondary substation in a future medium voltage distribution network / O. Granhaug [et al.] // CIREN 2011, 21th International Conference on Electricity Distribution, Frankfurt. 2011. 6-9 June.
4. Федин, В.Т. Инновационные технические решения в системах передачи электроэнергии / В.Т. Федин. – Минск : БНТУ, 2022. – 222 с. – ISBN 978-985-550-132-0.
5. Mathur, R. Verma, K. “Thyristor Based Facts Controllers For Electrical Transmission System”, Ieee Press, 2022.
6. Narain G. Hingoranl, Laszlo, G. “Understanding Concepts and Technology of Flexible Ac Transmission Systems”, 2019.
7. Padiyar, K.R, Varma, R.K. “Damping Torque Analysis Of Static Var System Controllers”. IEEE Transaction on Power System; 6(2); Pp 458-465, 06 August 2002 <https://doi.org/10.1109/59.76687>
8. Irokwe, N. V., Okoro, C. K. Comparative analysis of single phase TCR, TSC and TSR static var compensators. IOSR Journal of Electrical and Electronics Engineering (IOSR-JEEE) e-ISSN: 2278-1676, p-ISSN: 2320-3331, Volume 16, Issue 4 Ser. I (Jul. – Aug. 2021).
9. T. Vijayakumar, A. Nirmalkumar Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology 2(1): 1-4, 2010 ISSN: 2040-7467 © Maxwell Scientific Organization, 2019
10. Исенов Султанбек Сансызбаевич (KZ), Умурзакова Анара Даукеновна (KZ), Балтин Алишер Талғатұлы

(KZ), Шерьязов Сакен Койшыбаевич (KZ), Шелубаев Максим Викторович (RU)- Ветроэлектрическая станция. Свидетельство о внесении сведений в государственный реестр прав на объекты, охраняемые авторским правом № 36963 от 09.06.2023 – Республика Казахстан.

11. <https://www.astrec.kz/ru-официальный сайт АО «Астана РЭК»>
12. <https://primeminister.kz/ru/news/kazakhstan-budet-polnostyu-obespechivat-sebya-elektroenergiyei-zaschet-vvoda-novykh-moshchnostey-26972-Официальный информационный ресурс-Премьер-министра Республики Казахстан>
13. Orhan Altug Karabiber, George Xydis, «Electricity Price Forecasting in the Danish Day-Ahead Market Using the TBATS, ANN and ARIMA Methods», Department of Business Development and Technology, Aarhus University, Birk Centerpark 15, 7400 Herning, Denmark, 10 March 2019. <https://doi.org/10.3390/en12050928>

### **Жасанды интеллект негізінде басқарумен реактивті қуатты өтеу құралдарын пайдалана отырып 20 кВ тарату желілерінің энергия тиімділігін арттыру**

<sup>1</sup>**БАЛТИН Алишер Талғатұлы**, магистр, аға оқытушы, [aliserbaltin9@gmail.com](mailto:aliserbaltin9@gmail.com),

<sup>2</sup>\***БЕРДАЛИЕВ Али Даниярұлы**, инженер, [aberdaliev292@gmail.com](mailto:aberdaliev292@gmail.com),

<sup>1</sup>**ИСЕНОВ Султанбек Сансызбаевич**, т.ғ.к., декан, [isenov\\_sultan@mail.ru](mailto:isenov_sultan@mail.ru),

<sup>3</sup>**ШЕРЬЯЗОВ Сакен Койшыбаевич**, т.ғ.д., профессор, [sakenu@yandex.ru](mailto:sakenu@yandex.ru),

<sup>4</sup>**ОБУХОВ Сергей Геннадьевич**, т.ғ.д., профессор, [serob99@mail.ru](mailto:serob99@mail.ru),

<sup>1</sup>«С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті» КеАҚ, Жеңіс даңғылы, 62, Астана, Қазақстан,

<sup>2</sup>«Астана – өңірлік электржелілік Компания» АҚ, Домалақ ана көшесі, 9, Астана, Қазақстан,

<sup>3</sup>«Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті» КеАҚ, Сәтбаев көшесі, 2, Астана, Қазақстан,

<sup>4</sup>Ұлттық зерттеу Томск политехникалық университеті, Ленин даңғылы, 30, Томск, Ресей,

\*автор-корреспондент.

**Аңдатпа.** Электр желілерінің энергия тиімділігін арттыру қазіргі энергетикада өте маңызды тақырып болып табылады. Алайда, 20 кВ кернеу класындағы желілер Қазақстан шеңберінде кең таралмаған класс болып табылатынын, 6кВ, 10кВ және 35 кВ кернеулі желілердің танымалдығы анағұрлым жоғары екенін атап өткен жөн. Мақалада реактивті қуатты өтеу құралдарын пайдалана отырып және «Олимп» қосалқы станциясының мысалында 20 кВ кернеулі Астана қаласының тарату желілерінің энергия тиімділігін арттыру туралы, жасанды интеллект негізінде мәселе қаралды. Осы критерийлерді қамтамасыз ету және орындау үшін жасанды интеллектті қолдану TBATS, ANN және ARIMA сияқты машиналық оқыту құралдары мен модельдеріне жүгінетін жүктемелерді, генерацияны және электр энергиясының бағасын және Данияның оң нәтижесін болжауда әлемдік тәжірибе қолданылады. Энергетикадағы мұндай білім 2014-2024 жылдар кезеңінде Астана қаласын тұтыну бойынша алынған деректер негізінде алдағы 10 жылға арналған тұтыну бойынша бағалау мен болжаудың алғашқы қадамдары болуы мүмкін.

**Кілт сөздер:** өткізу қабілеті, 20 кВ тарату желілері, энергия тиімділігін арттыру, реактивті қуатты өтеу құралдары, тиристормен басқарылатын элементтер.

### **Improving the Energy Efficiency of 20 kV Distribution Networks Using Reactive Power Compensation Devices with Artificial Intelligence Control**

<sup>1</sup>**BALTIN Alisher**, Master's Degree, Senior Lecturer, [aliserbaltin9@gmail.com](mailto:aliserbaltin9@gmail.com),

<sup>2</sup>\***BERDALIEV Ali**, Engineer, [aberdaliev292@gmail.com](mailto:aberdaliev292@gmail.com),

<sup>1</sup>**ISENOV Sultanbek**, Cand. of Tech. Sc., Dean, [isenov\\_sultan@mail.ru](mailto:isenov_sultan@mail.ru),

<sup>3</sup>**SHERYAZOV Saken**, Dr. of Tech. Sc., Professor, [sakenu@yandex.ru](mailto:sakenu@yandex.ru),

<sup>4</sup>**OBUKHOV Sergey**, Dr. of Tech. Sc., Professor, [serob99@mail.ru](mailto:serob99@mail.ru),

<sup>1</sup>NCJSC «S. Seifullin Kazakh Agrotechnical Research University», Zhenis Avenue, 62, Astana, Kazakhstan,

<sup>2</sup>Astana-Regional Electric Grid Company JSC, Domalak ana Street, 9, Astana, Kazakhstan,

<sup>3</sup>NPJSC «L.N. Gumilyov Eurasian National University», Satpayev Street, 2, Astana, Kazakhstan,

<sup>4</sup>National Research Tomsk Polytechnic University, Lenin Avenue, 30, Tomsk, Russia,

\*corresponding author.

**Abstract.** Improving the energy efficiency of power transmission lines is a very important topic in the modern energy industry. However, it is worth noting that lines with a voltage class of 20 kV are a non-widespread class within Kazakhstan, lines with a voltage of 6 kV, 10 kV and 35 kV are more popular. This article discusses the issue of improving the energy efficiency of Astana city's 20 kV distribution networks using the example of the Olymp substation, using reactive power compensation and artificial intelligence-based control. To ensure and fulfill these criteria, the use of artificial intelligence uses global experience in predicting both loads, generation, and electricity prices, and the positive result of Denmark, which uses machine learning tools and models such as TBATS, ANN, and ARIMA. Such knowledge in the field of energy can be the first steps for assessing and forecasting consumption for the next 10 years, based on the data on consumption of Astana city for the period from 2014-2024.

**Keywords:** throughput capacity, 20 kV distribution networks, energy efficiency improvement, reactive power compensation, thyristor-controlled elements.

## REFERENCES

1. Kazmi, S. A. Multicriteria analysis makes decisions for optimal promotion of DG in intelligent networks / S. A. Kazmi, S. F. Hassan, D. R. Shin // Technologies of intelligent Networks-Asia (ISGT ASIA), 2015 IEEE Innovative. 2019. November.
2. Safdarian, A. Merkebu Z. Degefa, Matti Lehtonen, Mahmud Fotuhi-Firuzabad "Distribution network reliability improvements in presence of demand respons / A. Safdarian [et al.] // IET Generation, Transmission & Distribution. 01 December 2014. Vol. 8. <https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2013.0815>
3. Granhaug, Yes. A compact second substation in the future medium voltage distribution network / O. Granhaug [et al.] // CIRED 2011, 21st International Conference on Electricity Distribution, Frankfurt, June 6-9.
4. Fedin, V.T. Innovative technical solutions in electric power transmission systems. Fedin. Minsk : BNTU, 2022. 222 p. ISBN: 978-985-550-132-0.
5. Mathur, R. Verma, K. "Facts about thyristor-based controllers for power transmission systems", Ieee Press, 2022.
6. Narain G. Khingoranl, Laszlo G. "Understanding the concept and technology of flexible AC transmission systems", 2019
7. Padiyar, K.R, Varma, R.K. "Damping Torque Analysis Of Static Var System Controllers". IEEE Transaction on Power System; 6(2); Pp 458-465, 06 August 2002 <https://doi.org/10.1109/59.76687>
8. Irokve N. V., Okoro K. K. Comparative analysis of single-phase static compensators var TCR, TSC and TSR. Journal of Electrical Engineering and Electronics IOSR (IOSR-JEEE) e-ISSN: 2278-1676, p-ISSN: 2320-3331, Volume 16, Issue 4 Series I (July-August 2021).
9. T. Vijayakumar, A. Nirmalkumar Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology 2 (1):1-4, 2010 ISSN: 2040-7467 © Maxwell Scientific Organization, 2019
10. Sultanbek Sansyzbaevich Isenov (KZ), Anara Daukenovna Umurzakova (KZ), Alisher Talgatuly Baltin (KZ), Saken Koishybaevich Sheryazov (KZ), Maxim Viktorovich Shelubaev (RU) – Wind Power plant Information on entering information into the state register of Rights to objects protected by copyright No. 36963 dated 06/09/2023-Republic of Kazakhstan
11. <https://www.astrec.kz/ru-официальный website of Astana RK JSC>
12. <https://primeminister.kz/ru/news/kazakhstan-budet-polnostyu-obespechivat-sebya-elektroenergiyey-zaschet-vvoda-novykh-moshchnostey-26972>.
13. Orhan Altug Karabiber, George Xidis, "Forecasting electricity prices in the Danish market for the day ahead using TBATS, ANN and ARIMA methods", Faculty of Business Development and Technology, Aarhus University, Birk Centerpark 15, 7400 Herning, Denmark, March 10, 2019 <https://doi.org/10.3390/en12050928>