

Торайғыров университетінің хабаршысы
ҒЫЛЫМИ ЖУРНАЛЫ

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
Вестник Торайғыров университета

Торайғыров университетінің ХАБАРШЫСЫ

Энергетикалық сериясы
1997 жылдан бастап шығады



ВЕСТНИК Торайғыров университета

Энергетическая серия
Издается с 1997 года

ISSN 2710-3420

№ 4 (2023)

ПАВЛОДАР

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
Вестник Торайгыров университета

Энергетическая серия
выходит 4 раза в год

СВИДЕТЕЛЬСТВО

о постановке на переучет периодического печатного издания,
информационного агентства и сетевого издания

№ 14310-Ж

выдано

Министерство информации и общественного развития
Республики Казахстан

Тематическая направленность

публикация материалов в области электроэнергетики,
электротехнологии, автоматизации, автоматизированных и
информационных систем, электромеханики и теплоэнергетики

Подписной индекс – 76136

<https://doi.org/10.48081/SMUR2431>

Бас редакторы – главный редактор

Кислов А. П.
к.т.н., доцент

Заместитель главного редактора

Талипов О. М., *доктор PhD*

Ответственный секретарь

Калтаев А.Г., *доктор PhD*

Редакция алқасы – Редакционная коллегия

Клецель М. Я., *д.т.н., профессор*
Новожилов А. Н., *д.т.н., профессор*
Никитин К. И., *д.т.н., профессор (Россия)*
Никифоров А. С., *д.т.н., профессор*
Новожилов Т. А., *д.т.н., профессор*
Алиферов А.И., *д.т.н., профессор (Россия)*
Кошеков К.Т., *д.т.н., профессор*
Приходько Е.В., *к.т.н., профессор*
Оспанова Н. Н., *к.п.н., доцент*
Нефтисов А. В., *доктор PhD*
Омарова А.Р., *технический редактор*

За достоверность материалов и рекламы ответственность несут авторы и рекламодатели
Редакция оставляет за собой право на отклонение материалов
При использовании материалов журнала ссылка на «Вестник Торайгыров университета» обязательна

<https://doi.org/10.48081/RNHH2479>

***Ж. К. Оржанова¹, А. А. Боканова², Ж. Н. Исабеков³**

¹Академия логистики и транспорта, Республика Казахстан, г. Алматы;

²Евразийский национальный университет имени Л. Н. Гумилева, Республика Казахстан, г. Астана;

³Международный казахско-турецкий университет имени Х. А. Ясави, Республика Казахстан, г. Туркестан

*e-mail: zhanar.orzhanova@mail.ru

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ФАЗОПОВОРОТНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКЕ

Статья посвящена актуальной проблеме – управлению режимами работы энергосистемы для обеспечения регулирования потоков электроэнергии.

Для воздушных линий электропередач (ВЛЭП) электроэнергетических систем (ЭЭС) Казахстана с большим количеством параллельных линий разного класса напряжения и значительной протяженности характерно неоптимальное распределение потоков мощности.

Развитие и внедрение устройств координации для управления фазами режимных параметров приводящих к перераспределению активных и реактивных мощностей по элементам электропередачи способствует повышению управляемости энергетической системы.

В статье рассмотрены инновационные технологии гибких (управляемых) систем электропередач на переменном токе FACTS на основе фазоповоротного трансформатора (ФПТ).

Для оптимального потокораспределения, снижения потерь и повышения пропускной способности, разработанных и эксплуатируемых зарубежными энергокомпаниями, было проведено сопоставление и анализ функциональных особенностей ФПТ.

Исследования проводились на универсальных стендах ЭВ-4 и ТОО-335.1 для определения углов поворота и фазовых сдвигов.

Ключевые слова: электроэнергетическая система, потокораспределение, управляемость, потери, FACTS, фазоповоротные трансформаторы, фазовый сдвиг, углы поворота.

Введение.

Одним из основных мероприятий в плане осуществления Концепции развития электроэнергетической отрасли Республики Казахстан на 2023–2029 годы является создание и ввод в эксплуатацию системы «Интеллектуальная энергосистема» [1].

Создание такой системы предполагает вовлечение в равной степени в функциональную деятельность всех субъектов электроэнергетики.

К 2035 году с учетом динамики потребления электроэнергии для их обеспечения в Единой энергетической системе (ЕЭС) Республики Казахстан запланирован ввод 17,5 ГВт установленных генерирующих мощностей, основой организации которых станут внедрение разнообразных инновационных технологии Генерирующие мощности возрастут на 73 %. В сообщениях АО KEGOC [2] перспектива изменении конфигурации Национальной электрической сети (НЭС) осуществится с использованием высокоинтегрированных, интеллектуальных и современных технологии Smart Grids.

Для повышения управляемости и эффективности работы ЕЭС, стабильности и функционального покрытия снабжения потребителей электрической энергией обширно вводятся прогрессивные технологии гибких (управляемых) систем электропередач переменного тока FACTS (Flexible Alternative Current Transmission Systems) [3, 4], являющейся частью подсистем технологии Smart Grids «умные сети». С использованием гибких систем возможно регулирование потокораспределения среди объединенных электроэнергетических систем, а также в распределительных сетях, что способствует эффективному использованию межсистемных связей с учетом их ресурсов, оптимизации эксплуатации энергетического оборудования и конъюнктуре рынка электроэнергии.

Установкой, настройкой и эксплуатацией устройств FACTS в электроэнергетической системе достигается стабилизация напряжения, повышение управляемости, оптимизация потокораспределения, снижение потерь, сглаживание низкочастотных колебаний, усиление статической и динамической устойчивости, повышение пропускной способности линий и качество электроэнергии [5].

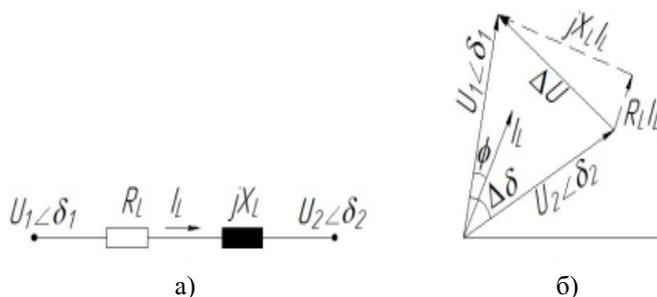
Для оптимального управления энергопотоками в 3-х фазных электрических сетях в Западной Европе, США, России и Казахстане используются относительно дешевые и технологически простые – фазопоротные трансформаторы (ФПТ), назначение которых в образовании дополнительного фазового сдвига меж напряжениями первичных и вторичных шин. В процессе эксплуатации для ФПТ специфичным является подбор его оптимального угла сдвига фазы, который в основном выбирается сезонно по требованиям надежной устойчивой загрузки элементов сети. Например,

во Франции при напряжении 225 кВ углы регулирования составляет -3540, во Франции, Нидерландах и Германии при 400 кВ. При том же напряжении в США углы регулирования

В Казахстане имеется собственный опыт эксплуатации ФПТ, установленного в 2009 году на ПС (подстанции) 500 кВ Ульке. Отметим тот факт, что это первая установка ФПТ на постсоветском пространстве [6].

Материалы и методы

При написании статьи использовались основные положения теории электрических цепей (ТЭЦ), системы линейных уравнений. На рисунке 1 показаны углы, которые мы использовали для анализа управляемости потоков мощности ФПТ.



а) эквивалентная схема; б) векторная диаграмма

Рисунок 1 – Углы поворота на выходе ФПТ

Напряжения U_1 и U_2 с углами сдвига δ_1 и δ_2 вводятся на концах рисунка 1а. Сопротивление участка показано как последовательное соединение реактивного сопротивления с активным [6-7]. Значение комплексного тока, протекающего на участке обусловлен разностью потенциалов на ее концах:

$$I_L = \frac{U_1 - U_2}{Z_L} = \frac{U_1 \angle \delta_1 - U_2 \angle \delta_2}{R_L + jX_L}. \quad (1)$$

где L_1 – комплексное значение сопряженного тока линии, U_1 – напряжение фазы.

Поставив выражение (1) и значение полной мощности S , устанавливаем:

$$S_1 = \frac{U_1 U_2}{\frac{R_L^2 + X_L^2}{X_L}} \sin \Delta \delta + \frac{U_1^2 - U_1 U_2 \cos \Delta \delta}{\frac{R_L^2 + X_L^2}{R_L}} +$$

$$+ j \left(\frac{U_1^2 - U_1 U_2 \cos \Delta \delta}{\frac{R_L^2 + X_L^2}{X_L}} - \frac{U_1 U_2}{\frac{R_L^2 + X_L^2}{R_L}} \sin \Delta \delta \right),$$

где $-\Delta \delta = \delta_1 - \delta_2$ сдвиг фаз относительно 1 и 2 узлами. С учетом идеализированной линии без потерь, т.е. при R_L получим:

$$P_1 = \frac{U_1 U_2}{X_L} \sin \Delta \delta, \quad (3)$$

$$Q_1 = \frac{U_1^2 U_1 U_2 \cos \Delta \delta}{X_L}. \quad (4)$$

Из выражений (3) и (4) P_1 и Q_2 являются функциями переменных сопротивлений и фазового угла сдвига меж напряжениями. По теории, изменяя эти параметры, можно оказывать воздействие на изменение распределения активной и реактивной мощностей в случае сложной замкнутой конфигурации электрической сети. По формуле (3) регулирование активной мощностью возможно изменением угла $\Delta \delta$, что возможно при применении фазоповоротных трансформаторов (ФПТ) с тиристорным управлением, которые относятся к устройствам FACTS.

Используя материалы зарубежных авторов [7] по использованию вольтодобавочных трансформаторов для напряжений входа-выхода пришли к выводу, что напряжения увеличиваются при больших фазовых сдвигах.

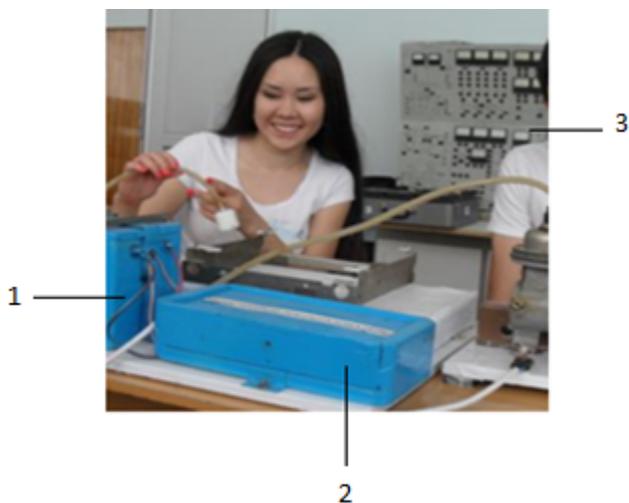
Результаты и обсуждение

В современном мире за рубежом эксплуатируются ФПТ – phase-shifting transformer (PST) где число витков переключается механически обмоток трансформатора с РПН (регулирование под нагрузкой) – on load tap changers (OLTS). Рынок ФТП представлен фирмами ABB, Siemens, Elin, Alstom (Westinghouse) и др.

В данном разделе представлены результаты исследования малогабаритного ФПТ для определения углов поворота. Разнообразие

представленных на рынке продукции отличается в способах образования добавочного (регулируемого) вектора напряжения, различия углов поворота и преобразованного сдвига углов поворота вектора регулируемого напряжения. Исследования проводились с помощью виртуальных приборов (ВП). В отличие от реальной панели управления стационарного измерительного прибора, такая виртуальная панель может быть многократно перестроена в процессе работы для адаптации к конкретным условиям эксперимента. В зависимости от используемой платы и программного обеспечения пользователь получает измерительный прибор под ту или иную задачу.

Сочетание платы сбора данных, измерительного устройства и персонального компьютера предоставляет человеку новые возможности, недостижимые при использовании автономных измерительных приборов. На рисунке 2 показан экспериментальный стенд [8–10].



1 – трансформатор; 2 – полупроводниковый коммутатор на высоковольтных тиристорах; 3 – универсальный стенд
Рисунок 2 – Экспериментальный стенд

В основе ФПТ заложен принцип вынужденной коррекции значения угла φ . Для определения угла поворота использовался учебный стенд «ВП ТОЭ-335.1», на панели коннекторов которого выбираем из меню «Приборы П» элементы для моделирования углов поворота $\Delta\delta$ (Рисунок 3).

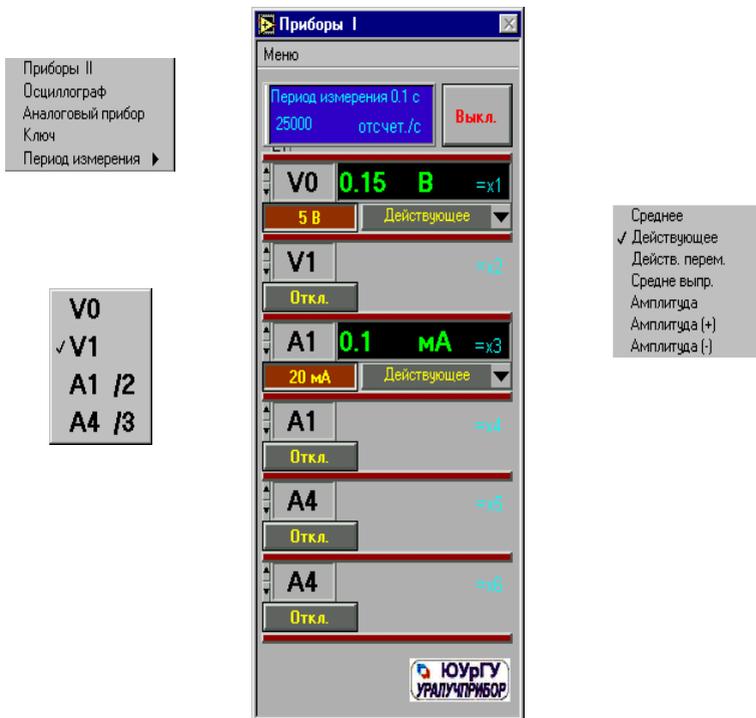


Рисунок 3 – Виртуальные приборы стенда ТООЭ-335.1

Выбор оптимальной настройки ФПТ зависит от полупроводникового коммутатора на высоковольтных тиристорах (TCPST – Thyristor-Controlled Phase-Shifting Transformer), которые позволяют плавно подстраиваться под текущий режим работы электроэнергетической системы, обеспечивая ее устойчивость в переходных процессах с оптимальными параметрами.

Выводы.

Работа на универсальных стендах позволила определить углы поворота $\Delta\delta$ и фазовый сдвиг φ , что предопределяет возможность широкого применения ФПТ в электроэнергетике Казахстана. В таблице представлены результаты эксперимента [8-10].

Таблица 1 – Углы регулирования ФПТ для разных классов напряжений

Номинальное напряжение линии, кВ	Углы регулирования, эл.градусы	Мощность передачи, МВА
110		100-120
220	-35/+35	200-260
500		1000-1200

Из таблицы видно, что чем выше напряжение, тем меньше угол регулирования ФПТ. Изменения углов поворота определялись с помощью виртуального осциллографа ЦЗО-01 из меню стенда ВП ТОЭ-335.1.

К преимуществам виртуальных приборов относится также их экономическая эффективность, так как практически любая плата сбора данных компьютерных программ обработки измерительной информации дешевле реального измерительного прибора.

Совершенно очевидно, что многие исследовательские задачи в XXI веке будут решаться с помощью виртуальных приборов.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 Концепция развития электроэнергетической отрасли Республики Казахстан на 2023–2029 годы от 28 марта 2023 года № 263 [Электронный ресурс]. – adilet.zan.kz.

2 **Велиев Ф.** КЕГОС должен обеспечить запуск умных сетей к 2035 году [Электронный ресурс]. – kz.kursiv.media.

3 **Мисриханов, М. Ш., Рябченко, В. К., Ситников, В. Ф.** Основы технологии FACTS // Электро-Info. – 2007. – декабрь. – С.61–69.

4 **Hug-Glanzmann G.** Coordinated power flow control to enhance steady-state security in power systems. Dissertation, Swiss Federal Institute of Technology. – Zurich 2008.

5 **Ушаков, В. А.** Современные проблемы электроэнергетики : учебное пособие. – Томский политехнический университет: – Изд-во ТПУ, 2013. – 448 с.

6 **Грибов, Д. С.** Повышение пропускной способности ВЛ-500 кВ Жетыкара-Ульке : дисс.маг. – Алматы : АУЭС, 2013. – 72 с.

7 **Mekonnen M. T., Belmans R.** The influence of phase shifting transformers on the results of flowbased market coupling // 9th International Conference on the European Energy Market (EEM12) – Florence, Italy, May 10–12. – 2012.

8 **Fei Z., Hongyang Y.** Steady state phasor modeling and analysis of hierarchically switched thyristor controlled phase shift transformer // Power System Technology – 2013. – 37 (11). P. 184–3189.

9 **Ванин, В. К., Евдокунин, Г. А., Николаев, Р. Н., Попов, М. Г., Искаков, А. К., Оспанов, Б. К., Утегулов Н. И.** Система РЗА фазорегулирующего устройства сверхвысокого напряжения // Современные направления развития систем релейной защиты и автоматики энергосистем : сб. докл. междунар. науч.-техн. конф. – М. : Научноинженерное информационное агенство, 2009. – С. 182–192.

10 **Боканова, А. А.** Методы и средства измерений электрических величин. Учебное пособие. – Астана : ЕНУ имени Л. Н. Гумилева, 2013. –232 с. ISBN 978-601-7429-48-5.

REFERENCES

1 Kontseptsiya razvitiya elektroenergeticheskoy otrasli Respubliki Kazakhstan na 2023-2029 gody ot 28 marta 2023 goda № 263. [The concept of development of the electric power industry of the Republic of Kazakhstan for 2023-2029 dated March 28, – 2023 No. 263]. [Electronic resource]. – adilet.zan.kz.

2 **Veliyev, F.** KEGOC dolzhen obespechit' zapusk umnykh setey k 2035 godu [KEGOC must ensure the launch of smart grids by 2035]. – [Electronic resource]. kz.kursiv.media.

3 **Misrikhanov, M. Sh., Ryabchenko, V. K., Sitnikov, V. F.** Osnovy tekhnologii FACTS. [Fundamentals of FACTS technology] // Elektro-Info. – 2007. december. – P.61–69.

4 **Hug-Glanzmann, G.** Coordinated power flow control to enhance steady-state security in power systems. Dissertation, Swiss Federal Institute of Technology. – Zurich, 2008.

5 **Ushakov, V. A.** Sovremennyye problemy elektroenergetiki i : uchebnoye posobiye [Modern problems of the electric power industry]. – Tomskiy politekhnicheskiiy universitet : – Publishing House, 2013. – 448 p.

6 **Gribov, D. S.** Povysheniye propusknoy sposobnosti VL-500 kV Zhetykara-Ul'ke: diss.mag. [Increasing the capacity of 500 kV overhead line Zhetykara-Ulke] – Almaty : AUPET, 2013. – 72 p.

7 **Mekonnen, M. T., Belmans, R.** The influence of phase shifting transformers on the results of flowbased market coupling // 9th International Conference on the European Energy Market (EEM12). – Florence, Italy, May 10–12. – 2012.

8 **Fei, Z., Hongyang, Y.** Steady state phasor modeling and analysis of hierarchically switched thyristor controlled phase shift transformer // Power System Technology. – 2013 – 37(11). P. 184–3189.

9 **Vanin, V. C., Evdokunin, G. A., Nikolaev, R. N., Popov, M. G., Iskaikov, A. K., Ospanov, B. K., Utegulov, N. I.** Sistema RZA fazoreguliruyushchego ustroystva sverkhvysokogo napryazheniya [Relay protection system of ultra-high

voltage phase control device] // *Sovremenny'e napravleniya razvitiya relejnoj zashhity i avtomatiki energosistem: sb. dokl. mezhdunar. nauch.-texnich. konf. [Text]. – Moscow : Nauchno-inzhenernoe informacionnoe agentstvo, 2009. – P. 182–192.*

10 **Bokanova, A. A.** *Metody i sredstva izmereniy elektricheskikh velichin. Uchebnoye posobiye [Methods and means of measuring electrical quantities] –Astana : ENU im.L.N.Gumileva, 2013. – 232 p. – ISBN 978-601-7429-48-5.*

Принято к изданию 28.11.23.

Ж. К. Оржанова¹, А. А. Боканова², Ж. Н. Исабеков³

¹Логистика және көлік академиясы, Қазақстан Республикасы, Алматы қ;

²Л. Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті,

Қазақстан Республикасы, Астана қ;

³Қожа Ахмет Ясауи атындағы Халықаралық қазақ-түрік университеті, Қазақстан Республикасы, Түркістан қ.

Басып шығаруға 28.11.23 қабылданды.

ЭЛЕКТР ЭНЕРГЕТИКАСЫНДА ФАЗАЛЫҚ АЙНАЛМАЛЫ ТРАНСФОРМАТОРЛАРДЫ ҚОЛДАНУ ПЕРСПЕКТИВАЛАРЫ

Мақала өзекті мәселеге – электр энергиясының ағындарын реттеуді қамтамасыз ету үшін электр жүйесінің жұмыс режимдерін басқаруға арналған.

Қазақстанның электр энергетикалық жүйелерінің (ЭЭЖ) әртүрлі кернеу класындағы және едәуір ұзындықтағы параллель желілерінің көп саны бар әуе электр беру желілері (ӘЭЖ) үшін қуат ағындарының оңтайлы бөлінбеуі тән.

Электр беру элементтері бойынша белсенді және реактивті қуаттарды қайта бөлуге әкелетін режимдік параметрлердің фазаларын басқару үшін үйлестіру құрылғыларын дамыту және енгізу энергетикалық жүйенің басқарылуын арттыруға ықпал етеді.

Мақалада фазалық айналмалы трансформаторға (ФАТ) негізделген facts айнымалы токтағы икемді (басқарылатын) электр беру жүйелерінің инновациялық технологиялары қарастырылған.

Шетелдік энергетикалық компаниялар әзірлеген және пайдаланатын оңтайлы ағынды бөлу, шығындарды азайту және өткізу қабілетін арттыру үшін ФАТ функционалдық ерекшеліктерін салыстыру және талдау жүргізілді.

Зерттеулер айналу бұрыштары мен фазалық сдсыларды анықтау үшін ЭВ-4 және ТОЭ-335.1 әмбебап стендтерінде жүргізілді.

Кілтті сөздер: электр энергиясы жүйесі, ағынның таралуы, оңдеу, жоғалту, фактілер, фазалық айналмалы трансформаторлар, фазалық сдсы, кернеу.

Zh. K. Orzhanova¹, A. A. Bokanova², Zh. N. Issabekov³

¹Academy of Logistics and Transport, Republic of Kazakhstan, Almaty;

²L. N. Gumilyov Eurasian National University,
Republic of Kazakhstan, Astana;

³Khoja Ahmet Yasawi International Kazakh-Turkish University,
Republic of Kazakhstan, Turkestan.

Accepted for publication on 28.11.23.

PROSPECTS FOR THE USE OF PHASE-REVERSAL TRANSFORMERS IN THE ELECTRIC POWER INDUSTRY

The article is devoted to an urgent problem – the management of the operating modes of the power system to ensure the regulation of electricity flows.

Non-optimal distribution of power flows is characteristic for overhead power transmission lines (PTL) of electric power systems (EPS) in Kazakhstan with a large number of parallel lines of different voltage classes and considerable length.

The development and implementation of coordination devices for controlling the phases of regime parameters leading to the redistribution of active and reactive capacities across power transmission elements contributes to improving the controllability of the energy system.

The article discusses innovative technologies of flexible (controlled) AC power transmission systems FACTS based on a phase-reversal transformer (FRT).

For optimal flow distribution, reducing losses and increasing throughput, developed and operated by foreign power companies, a comparison and analysis of the functional features of the FRT was carried out.

The studies were carried out on universal stands EV-4 and TOE-335.1 to determine the angles of rotation and phase shifts.

Keywords: electric power system, flow distribution, controllability, losses, FACTS, phase-reversal transformers, phase shift, voltage.

Теруге 28.11.2023 ж. жіберілді. Басуға 29.12.2023 ж. қол қойылды.

Электронды баспа

29.9 Мб RAM

Шартты баспа табағы 22,2. Таралымы 300 дана. Бағасы келісім бойынша.

Компьютерде беттеген: А. К. Мыржикова

Корректор: А. Р. Омарова, Д. А. Кожас

Тапсырыс №4175

Сдано в набор 28.11.2023 г. Подписано в печать 29.12.2023 г.

Электронное издание

29.9 Мб RAM

Усл. печ. л. 22,2. Тираж 300 экз. Цена договорная.

Компьютерная верстка: А. К. Мыржикова

Корректор: А. Р. Омарова, Д. А. Кожас

Заказ № 4175

«Toraighyrov University» баспасынан басылып шығарылған

Торайғыров университеті

140008, Павлодар қ., Ломов к., 64, 137 каб.

«Toraighyrov University» баспасы

Торайғыров университеті

140008, Павлодар қ., Ломов к., 64, 137 каб.

67-36-69

E-mail: kereku@tou.edu.kz

www.vestnik-energy.tou.edu.kz