Торайғыров университетінің хабаршысы
ҒЫЛЫМИ ЖУРНАЛЫ

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
Вестник Торайгыров университета

Торайғыров университетінің ХАБАРШЫСЫ

Энергетикалық сериясы

1997 жылдан бастап шығады

ВЕСТНИК Торайгыров университета

Энергетическая серия

Издается с 1997 года

ISSN 2710-3420

№ 3 (2022)

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/AFHU6838

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

© Торайгыров университет

МРНТИ 621.313.3 (049.32)

https://doi.org/10.48081/LVWO2100

***А. О. Юсупова[1], А. О. Потапенко[2]**

[1,2]Торайгыров университет, Республика Казахстан, г. Павлодар

АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ СХЕМ ИЗМЕРЕНИЯ ЕМКОСТНЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

В настоящее время на производстве для диагностики, должного определения, регистрации и защиты широко используются измерительные преобразователи, среди которых значительное место занимают емкостные измерительные преобразователи. Использование любых видов преобразователей предусматривает подключение к схеме питания. В статье рассматриваются существующие измерительные цепи преобразования и измерения для детального анализа и дальнейшего выбора наиболее подходящей схемы измерения емкости измерительных преобразователей. Емкость измерительных преобразователей можно, как известно, определять с помощью множества существующих измерительных цепей и различными способами, которые преобразуют емкость датчика или ее изменение в напряжение или ток. В данный момент для диагностики повреждений широко используются измерительные преобразователи, среди которых значительное место занимают емкостные измерительные преобразователи. Преобразование перемещения воздушного зазора в измерительной схеме является наиболее простым и приемлемым преобразованием, где задача сводится лишь к дистанционному измерению величины хода измерительного орган, за счет анализа последнего можно и производить измерения. Включение емкостного датчика в различные измерительные схемы, питаемые от источника повышенной частоты, позволяет зафиксировать изменения емкости, на что и направлен данный анализ.

Ключевые слова: Емкостные измерительные преобразователи, воздушный зазор, эксцентриситет ротора, схема измерения, мостовые схемы, анализ схем измерения.

Введение

В современном производстве для диагностики повреждений широко используются измерительные преобразователи, среди которых значительное место занимают емкостные измерительные преобразователи.

Анализ современных способов диагностики показал [1], в настоящее время одним из наиболее перспективных направлений принято считать то, в котором для измерения смещения ротора используются емкостные измерительные преобразователи (ЕИП), принцип действия которых основан на изменении расстояния между электродами [2, 5]. Преобразование перемещения является наиболее простым и приемлемым преобразованием, где задача сводится лишь к дистанционному измерению величины хода измерительного органа. Именно это свойство целесообразно использовать в системах диагностики эксцентриситета ротора с ЕИП [3].

Материалы и методы

Емкость измерительных преобразователей можно измерять с помощью множества существующих измерительных цепей, которые преобразуют емкость датчика или ее изменение в напряжение или ток [4].

Как известно, можно выделить следующие основные методы измерения:

- измерение времени заряда или разряда конденсатора;
- электрометрические методы, основанные на делении заряда;
- метод амперметра и вольтметра;
- сравнение напряжений и токов;
- резонансные методы, включающие в себя контурные и генераторные способы резонансных измерений;
- мостовые методы.

Первые два метода не обеспечивают мгновенного и непрерывного преобразования и поэтому не нашли большого распространения.

Метод амперметра и вольтметра для измерения емкости конденсаторов является одним из наиболее ранних, но в настоящее время используется редко.

Сравнение токов или напряжений в измерительной цепи нашло широкое применение в основном для процентных раскалибраторов конденсаторов на допусковые группы по емкости.

Резонансные методы [4] обладают максимальной чувствительностью измерения изменения емкости датчика, но из-за сложности аппаратуры и трудности проведения дистанционных измерений находят довольно ограниченное применение.

Различные модификации мостов переменного тока (четырехплечие мосты, трансформаторные мосты с тесной индуктивной связью между плечевыми обмотками, многоплечие мосты, полууравновешенные, неуравновешенные и квазиуравновешенные мосты, различные автоматические

мосты, мостовые Т-схемы и самоуравновешиваемые мосты) позволяют наиболее точно измерять емкость датчика или ее изменение даже при значительном удалении датчика от измерительной аппаратуры. Все перечисленные выше разновидности мостовых цепей дают возможность проводить измерения для двухэлектродных датчиков. С трехэлектродными датчиками необходимо применять специальные измерительные цепи. Обычные четырех-плечие мосты переменного тока не годятся для измерения прямой емкости трехэлектродного конденсатора, так как не имеют дополнительных уравновешивающих реактивных элементов для исключения влияния частичных емкостей. Только четырехплечие мосты со специальной экранировкой и вспомогательной ветвью [4] позволяют непосредственно измерять прямую емкость. Они находят довольно ограниченное применение, так как процесс измерения отличается исключительно большой трудоемкостью. Этих недостатков лишены трансформаторные мосты с тесной индуктивной связью между плечевыми обмотками.

В этих мостах необходимость в дополнительных реактивных элементах при измерении прямых емкостей отпадает. Известно [4, 5], что мосты с индуктивно связанными плечевыми элементами обладают очень малой чувствительностью к паразитным проводимостям, включенным параллельно индуктивным плечам. С помощью моста с тесной индуктивной связью можно измерять емкость трехэлектродного конденсатора в диапазоне от 0,01 до 10000 пФ с погрешностью до 0,001 % [5] и даже меньшей. На основе моста с тесной индуктивной связью построены и автоматические мосты класса 0,1 [6, 7], однако быстродействие таких мостов невелико (в лучшем случае при слежении время измерения составляет несколько десятых долей секунды).

Существующие измерительные цепи, особенно самоуравновешиваемые, позволяют с высокой точностью и быстродействием проводить измерения при помощи емкостных датчиков различных неэлектрических величин, характеризующих физические и химические процессы.

Результаты и обсуждение

Включение емкостного датчика в мостовую схему, питаемую от источника повышенной частоты, позволяет зафиксировать изменения емкости на 0,1%. Более высокую чувствительность позволяет получить так называемая резонансная схема. В этом случае емкостный датчик включается в колебательный контур совместно с индуктивным сопротивлением. Резонансная схема показана на рисунке 1, а.

Высокочастотный генератор 1 имеет частоту напряжения f_r и питает индуктивно связанный с ним контур, состоящий из индуктивности $L_н$, подстроечного конденсатора C_0 и емкостного датчика $C_Ä$. Напряжение

U_k, снимаемое с контура, усиливается усилителем 2 и измеряется прибором 3, шкала которого может быть проградуирована в единицах измеряемой величины. При помощи подстроечного конденсатора C_0 контур настраивается на частоту f_0, близкую (но не равную) к частоте генератора.

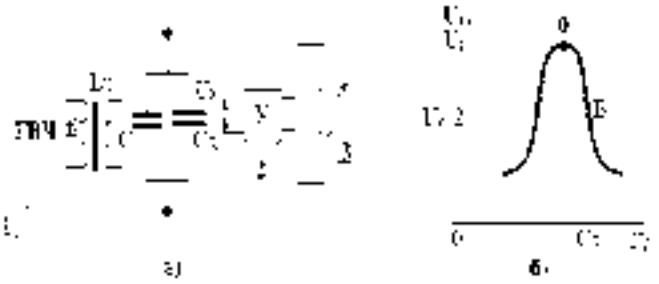


Рисунок 1 – Резонансная схема включения емкостного датчика

Настройка производится при средней емкости датчика в диапазоне возможных изменений измеряемой величины

$$C_{Ä0} = \frac{(C_{max} + C_{min})}{2} \quad (1)$$

В результате настройки напряжение U_P, снимаемое с контура, должно быть примерно вдвое меньше (точка Б на рисунке1, б), чем напряжение при резонансе U_P (точка о на рисунке 1, б). Таким образом, рабочая точка Б будет находиться примерно посередине одного из склонов резонансной характеристики. Этим обеспечиваются высокая чувствительность измерения (до 0,001%) и примерно линейная шкала измерительного прибора 3. Малейшее перемещение подвижной пластины датчика $C_Ä$ приводит к резкому изменению напряжения контура. Уменьшение емкости ($C_{Ä0} - \Delta\tilde{N}$) приводит к резкому увеличению напряжения, увеличение емкости ($C_{Ä0} + \Delta\tilde{N}$) – к резкому уменьшению напряжения. При выборе рабочей точки на левом склоне резонансной характеристики (с помощью подстроенного конденсатора) уменьшение емкости приводит к уменьшению напряжения, и наоборот.

Резонансная частота контура определяется из условия резонанса (равенства емкостного и индуктивного сопротивлений):

$$2\pi fL = \frac{1}{2\pi fC},$$
$$f_p = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_к(C_0 + C_д)}} \quad (2)$$

Конструкция одного из ЕИП, используемого для защиты ЭМ переменного тока от эксцентриситета ротора приведена на рисунке 2, где 1 Емкостной измерительный преобразователь и 2 реагирующий орган; 3– пазовый клин и металлическая фольга на нем. В данном случае смещение ротора определяется по емкости между сердечником ротора 2 и металлической фольгой на пазовом клине 3. Датчики в таких случаях не подвергаются дополнительной электрической нагрузке и не подключаются к высокому напряжению. Реагирующий орган выполнен из порогового элемента 9 и измерительного прибора 10.

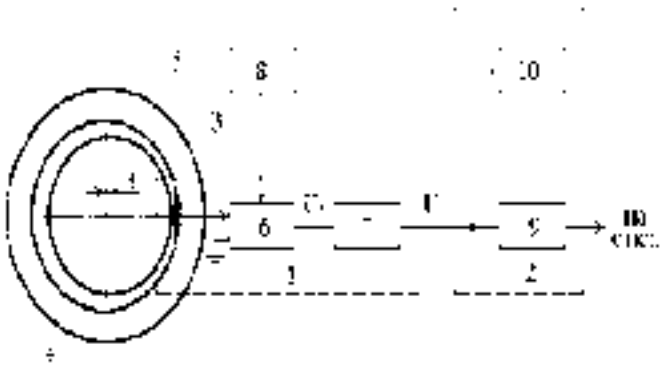


Рисунок 2 – Устройство для диагностики эксцентриситета ротора ЭМ с приведенной схемой питания

Емкостной датчик из фольги 3 и поверхности сердечника ротора 5 включается в одно из плеч измерительного моста 6 как показано на рисунке 2. Величина емкости такого емкостного датчика определена от расстояния от металлической фольги 3 до поверхности сердечника ротора. Схема измерительного моста 6 приведена на рисунке 3.

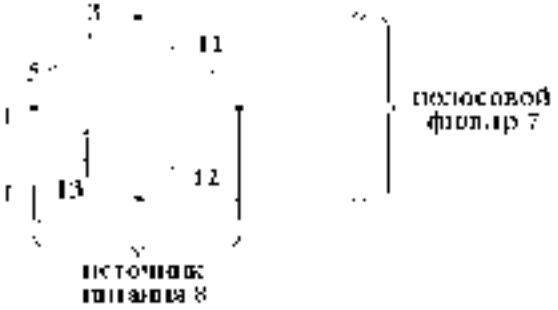


Рисунок 3 – Измерительный мост для схемы питания

В соответствии с рисунком 3 к одной диагонали измерительного моста 6 присоединен источник 8 питания переменного тока, а ко второй полосовой фильтр 7 с частотой пропускания равной частоте источника питания. В другие плечи измерительного моста 6 включены активные сопротивления 11 и 12, а также подстрочный конденсатор 13, который является емкостью, с помощью которой осуществляется балансировка измерительного моста 6 после монтажа устройства диагностики в электрическую машину с точно установленным ротором. Использование полосового фильтра 7 позволяет избавиться от влияния на работу устройства диагностики эксцентриситета ротора различного рода наводок. Конструктивно он может выполняться как в аналоговом, так и в цифровом исполнении. Если измерительный мост 6 сбалансирован, то напряжение U_6 на его выходе, а также U_7 на выходе полосового фильтра 7 будут равны нулю.

Полное значение емкости в мостовой схеме, получаемое от емкостного измерительного преобразователя, является не постоянным, а пульсирующим, если ротор является зубчатым. Оно состоит из постоянной и амплитуды переменной составляющих из выражения (3) [8,9].

При разложении таких кривых в ряд Фурье [9]

$$C(x) = C_0 + C_n = C_0 + \sum C_n \cdot \sin(\omega \cdot t) = C_0 + \sum C_n \cdot \sin(2\pi f_{x1} \cdot t) \qquad (3)$$

Выводы

1 Емкостные датчики из-за высокой чувствительности, простоты устройства, малых габаритов, веса и малой инерционности, что особенно важно для исследования быстропеременных процессов, должны найти еще более широкое применение, чем в настоящее время;

2 Для увеличения точности измерений и устранения влияния шунтирующих емкостей и утечек необходимо широкое внедрение емкостных измерительных преобразователей, величина которых может составлять несколько десятых и даже сотых пикофарады;

3 Существующие различные измерительные цепи, особенно самоуравновешиваемые, позволяют с высокой точностью и быстродействием проводить измерения при помощи емкостных датчиков различных неэлектрических величин, произведенный анализ.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 **Иванов-Смоленский, А. В.** Электрические машины. – М. : Энергия, 1980. – 909 с.

2 **Новожилов, А. Н., Юсупова, А. О., Потапенко, А. О.** Метод моделирование электрической емкости измерительного преобразователя. Журнал «Вестник Машиностроения», г. Москва, 2021, – № 9

Novozhilov, A., Potapenko A., Novozhilov, T. Simulation of voltage on the stator winding terminals of induction motor with impaired short-circuit winding of rotor, «Applied Mechanics and Materials» Vol. 792 – 2015 г. – 5 с.

4 **Novozhilov, A., Potapenko A., Novozhilov, T.** Process Simulation in Induction Motor where Short-Circuit Rotor Bar is Failed during Run-down Regime Przegląd elektrotechniczny, ISSN 0033-2097, R. 94 NR 6/2018

5 **Новожилов, А. Н., Юсупова, А. О., Новожилов, Т. А.** Выбор метода выявления эксцентриситета ротора электрической машины / Вестник ПГУ. № 4. Серия Энергетическая – г. Павлодар, 2016, с. 117 – 126.

6 **Новожилов, А. Н., Юсупова, А. О. Новожилов, Т. А.** Выбор типа емкостного измерительного преобразователя для диагностики эксцентриситета ротора электрической машины / Материалы международной конверенции «17 Сатпаевские чтения» Том 19 – С. 133–138.

7 **Novozhilov, A., Yussupova A., Assainov, G., Novozhilov, T., Manukovsky, A.** Sources of independent power supply for protection relay/ Przeglad Elektrotechniczny – № 5, 2018 – P. 23–26.

8 **Novozhilov, A., Yussupova A., Novozhilov, T, A. A** Device for Determining the Rotor Eccentricity of Rotating Electric Machines. Russian Electrical Engineering, № 2 – P. 32–35

9 **Novozhilov, A., Yussupova A., Novozhilov, T, A.** Determining the Displacement of the Rotor Shaft in an Electrical Machine. Russian Engineering Research, 2019, – No. 10, – P. 827–830. Allerton Press, Inc., 2019.

10. **H. L.HuT, M. XuS, E. Hui.** A high-accuracy, high-speed interface circuit for differential-capacitance transducer. / Sensors and Actuators A : Physical. Volume 125, Issue 2, 10 January 2006, Pages 329-334.

REFERENCES

1 **Ivanov-Smolensky, A. V.** Electricheskie mashini. [Electric machines.] [Text]/ Ivanov-Smolensky A.V. – M. : Energiya, 1980 – 909 p.

2 **Novozhilov, A. N., Yusupova, A. O., Potapenko, A. O.** Metod modelirovaniya electricheskoi emkosti izmeritelnogo preobrazovatelya. [Method of modeling the electrical capacitance of a measuring converter] [Text]/ The journal «Bulletin of Mechanical Engineering», Novozhilov A. N., Yusupova A. O., Potapenko A.O. – No. 9, 2021, M.

3 **Novozhilov, A., Potapenko A., Novozhilov. T.** [Simulation of voltage on the stator winding terminals of induction motor with imposed short-circuit winding of rotor] [Text]/ «Applied Mechanics and Materials». Novozhilov, A., Potapenko A., Novozhilov. Vol. 792. – 2015. – 5 p.

4. **Novozhilov, A., Potapenko A., Novozhilov. T.** [Process Simulation in Induction Motor where Short-Circuit Rotor Bar is Failed during Run-down Regime] [Text]/ Przegląd elektrotechniczny. Novozhilov, A., Potapenko A., Novozhilov. ISSN 0033–2097, R. 94 NR 6/2018

5 **Novozhilov, A. N., Yusupova, A.O., Novozhilov, T. A.** Vibor metoda viyavleniya exentrisiteta rotora electricheskoi mashini. [The choice of a method for detecting the eccentricity of the rotor of an electric machine] [Text]/ Bulletin of PSU. No. 4. A. N. Novozhilov, A. O. Yusupova, T. A. Novozhilov. Energy Series – Pavlodar, 2016, P. 117–126.

6 **Novozhilov, A. N. Yusupova, A. O. Novozhilo, T. A.** Vibor tipa emkostnogo izmeritelnogo preobrazovateltya dlya diagnostiki exentrisiteta rotora electricheskoi mashini. [Selection of the type of capacitive measuring transducer for the diagnosis of the eccentricity of the rotor of an electric machine] [Text]/ Materials of the international conversion «A. N. Novozhilov, A. O. Yusupova, T. A. Novozhilov. 17 Satpayev readings». Vol. 19. P. 133–138.

7 **Novozhilov, A., Yussupova A., Assainov, G., Novozhilov, T., Manukovsky, A.** [Sources of independent power supply for protection relay] [Text]/ Przeglad Elektrotechniczny, Novozhilov, A., Yussupova A., Assainov, G., Novozhilov, T., Manukovsky, A. № 5, 2018 P. 23–26.

8 **Novozhilov, A., Yussupova A., Novozhilov, T. A.** [A Device for Determining the Rotor Eccentricity of Rotating Electric Machines]. [Text]/ Russian Electrical Engineering, Novozhilov, A., Yussupova A., Novozhilov, T, A. – № 2 P. 32–35.

9 **Novozhilov, A., Yussupova A., Novozhilov, T, A.** [Determining the Displacement of the Rotor Shaft in an Electrical Machine]. [Text]/ Russian Engineering Research, 2019, – No. 10, P. 827–830. Novozhilov, A., Yussupova A., Novozhilov, T, A. Allerton Press, Inc., 2019.

10 **H. L. HuT, M. XuS, E. Hui.** [A high-accuracy, high-speed interface circuit for differential-capacitance transducer]. [Text]/ Sensors and Actuators A: Physical. H. L. HuT, M. XuS, E. Hui.Volume 125, Issue 2, 10 January 2006, Pages 329-334.

Материал поступил в редакцию 15.09.22.

**Ә. О. Юсупова[1], А. О. Потапенко[2]*
[1.2]Торайғыров университеті, Қазақстан Республикасы, Павлодар қ.
Материал баспаға 15.09.22 түсті.

СЫЙЫМДЫЛЫҚТЫ ӨЛШЕУ ТҮРЛЕНДІРГІШТЕРІН ӨЛШЕУДІҢ ҚОЛДАНЫСТАҒЫ СХЕМАЛАРЫН ТАЛДАУ

Қазіргі уақытта өндірісте өлшеу түрлендіргіштері диагностика, дұрыс анықтау, тіркеу және қорғау үшін кеңінен қолданылады, олардың арасында сыйымдылықты өлшеу түрлендіргіштері маңызды орын алады. Түрлендіргіштердің кез-келген түрін пайдалану қуат схемасына қосылуды қамтиды. Мақалада егжей-тегжейлі талдау және өлшеу түрлендіргіштерінің сыйымдылығын өлшеудің ең қолайлы схемасын одан әрі таңдау үшін түрлендірудің және өлшеудің қолданыстағы өлшеу тізбектері қарастырылады. Өлшеу түрлендіргіштерінің сыйымдылығын көптеген өлшеу тізбектерінің көмегімен және сенсордың сыйымдылығын немесе оның өзгеруін кернеуге немесе токқа түрлендіретін әртүрлі тәсілдермен анықтауға болады. Қазіргі уақытта өлшеу түрлендіргіштері зақымдануды диагностикалау үшін кеңінен қолданылады, олардың арасында сыйымдылықты өлшеу түрлендіргіштері маңызды орын алады. Өлшеу схемасындағы ауа саңылауының қозғалысын түрлендіру қарапайым және қолайлы түрлендіру болып табылады, мұнда тапсырма тек өлшеу органының инсульт шамасын қашықтықтан өлшеуге дейін азаяды, соңғысын талдау арқылы өлшеулер жүргізуге болады. Сыйымдылық сенсорын жоғары жиілік көзінен қоректенетін әртүрлі өлшеу тізбектеріне қосу осы талдау бағытталған сыйымдылық өзгерістерін түзетуге мүмкіндік береді.

Кілтті сөздер: сыйымдылықты өлшеу түрлендіргіштері, ауа саңылауы, ротордың эксцентриктілігі, өлшеу схемасы, көпір тізбектері, өлшеу тізбектерін талдау.

**A. O. Yussupova[1], A. O. Potapenko[2]*
[1,2]Toraighyrov University, Republic of Kazakhstan, Pavlodar
Material received on 15.09.22.

ANALYSIS OF EXISTING MEASUREMENT SCHEMES OF CAPACITIVE MEASURING TRANSDUCERS

Currently, measuring transducers are widely used in production for diagnostics, proper detection, registration and protection, among which capacitive measuring transducers occupy a significant place. The use of any type of converters provides for connection to the power supply circuit. The article discusses the existing measuring circuits of conversion and measurement for detailed analysis and further selection of the most suitable circuit for measuring the capacitance of measuring transducers. The capacitance of the measuring transducers can, as is known, be determined using a variety of existing measuring circuits and in various ways that convert the capacitance of the sensor or its change into voltage or current. At the moment, measuring transducers are widely used to diagnose damage, among which capacitive measuring transducers occupy a significant place. The transformation of the movement of the air gap in the measuring circuit is the simplest and most acceptable transformation, where the task is reduced only to the remote measurement of the stroke of the measuring device, due to the analysis of the latter, measurements can be made. The inclusion of a capacitive sensor in various measuring circuits powered by an increased frequency source allows you to record changes in capacitance, which is what this analysis is aimed at.

Keywords: Capacitive measuring transducers, air gap, rotor eccentricity, measurement circuit, bridge circuits, analysis of measurement circuits.

Теруге 15.09.2022 ж. жіберілді. Басуға 30.09.2022 ж. қол қойылды.
Электронды баспа
3 Mb RAM
Шартты баспа табағы 19,8. Таралымы 300 дана. Бағасы келісім бойынша.
Компьютерде беттеген: А. К. Мыржикова
Корректор: А. Р. Омарова
Тапсырыс № 3989

Сдано в набор 15.09.2022 г. Подписано в печать 30.09.2022 г.
Электронное издание
3 Mb RAM
Усл. печ. л. 19,8. Тираж 300 экз. Цена договорная.
Компьютерная верстка: А. К. Мыржикова
Корректор: А. Р. Омарова
Заказ № 3989

«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