

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

№ 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

<https://doi.org/10.48081/JNDQ5849>

***А. Е. Кулакаева¹, А. И. Самсоненко², Ж. Ж. Онгенбаева³,
С. С. Қойшыбай⁴, Р. Ж. Камал⁵**

^{1,2,3,4,5}Международный университет информационных технологий,
Республика Казахстан, г. Алматы;

²Институт космической техники и технологий,
Республика Казахстан, г. Алматы

ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕЛИТЕЛЯ МОЩНОСТИ АКТИВНОЙ ФАЗИРОВАННОЙ АНТЕННОЙ РЕШЕТКИ

В настоящее время для радиотехнических систем наибольший интерес представляют антенны типа активно-фазированных антенных решеток, в которой к каждому излучателю антенной решетки подключается активный элемент в виде усилителя мощности, генератора или преобразователя частоты.

Основной целью настоящей работы является исследование одного из основных блоков антенны типа активно-фазированных антенных решеток, в частности системы распределителя мощности, обеспечивающего распределение сигнала от общего возбуждителя по всем каналам активно-фазированных антенных решеток.

В данной статье были исследованы основные технические характеристики активно-фазированных антенных решеток. Также были рассмотрены основные виды делителей мощности активно-фазированных антенных решеток, их структурные схемы построения, а также проведены измерения амплитудно-частотных параметров делителей и характеристик согласования. Также исследован частный случай от большого многопортового делителя активно-фазированной антенной решетки. Проведены измерения амплитудно-частотных параметров делителей активной фазированной антенной решетки и характеристики согласования с помощью анализатора спектра Microwave Analyser N9915A на базе ДТОО «Институт космической техники и технологий». Данные исследования могут быть актуальны для последующего этапа проектирования активной фазированной антенной решетки.

Ключевые слова: делитель, антенна, сканирование, амплитудно-частотная характеристика, анализатор спектра, измерение, частота, спектр.

Введение

На сегодняшний день существует множество различных типов антенн, но особый интерес вызывают фазированные антенные решетки (ФАР) и его последующий переход на активные ФАР (АФАР). В таких антенных системах имеется множество излучающих элементов, которые позволяют повысить энергетический потенциал антенной системы, а также получить узкую диаграмму направленности, по сравнению с единичным излучателем. Преимуществом АФАР является то, что к каждому излучателю антенной решетки подключается активный элемент в виде генератора, усилителя мощности или преобразователя частоты. Антенные решетки подобного типа являются перспективными антенными системами, которые нашли широкое применение в системах спутниковой связи, в радиолокационных и радионавигационных системах, в системах мобильной связи, а также в системах радиоэлектронной борьбы. Известны случаи использования АФАР в бортовых радиолокационных станциях, обеспечивающих большую дальность обнаружения целей, широкий спектр сканирования и работу в широкой полосе частот [1–7].

На сегодняшний день использование антенных систем, таких как АФАР, является перспективными для современных радиотехнических систем. Основные требования, предъявляемые к таким системам, можно отнести: расширение рабочей полосы частот, обеспечение высокого энергетического потенциала, многофункциональный режим работы и др.

Основной целью настоящей работы является исследование одного из основных блоков АФАР – системы распределителя мощности, обеспечивающего распределение сигнала от общего возбудителя по всем каналам АФАР. Таким образом, исследован частный случай от большого многопортового делителя АФАР.

На рисунке 1 представлена обобщенная структурная схема АФАР.

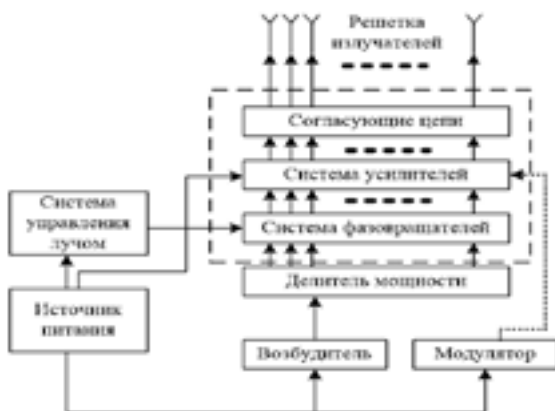


Рисунок 1 – Обобщённая структурная схема АФАР

При проектировании антенной системы АФАР особое внимание уделяется делителю мощности или же сумматору. Делители мощности распределяют мощность, поступающую на вход, между несколькими выходными каналами. Сумматоры обеспечивают сложение мощностей, поступающих на несколько входных каналов, в общей нагрузке. Делители и сумматоры мощности являются, как правило, взаимными устройствами, т.е. могут выполнять и деление, и суммирование мощности. В зависимости от назначения делители мощности осуществляют равное или неравное деление на два или большее число каналов.

К делителям и сумматорам мощности могут предъявляться самые разнообразные требования, которые определяются их применением. Делители мощности фазированных антенных решеток должны обеспечивать в выходных плечах заданное амплитудно-фазовое распределение, которое формирует требуемую диаграмму направленности решетки. При построении широкополосных транзисторных усилителей мощности применяются квадратурные делители и сумматоры, выполняющие наряду с функциями деления (суммирования) функции согласования отдельных каскадов усилителя с генератором и друг с другом [8-10]. При сложении мощностей нескольких генераторов должна быть обеспечена их синхронизация, чтобы получить синфазное сложение их мощностей в нагрузке. Делители и сумматоры мощности должны иметь приемлемое согласование в полосе частот и необходимую развязку между каналами.

Материалы и методы исследования

Исследован делитель на 2 и на 4 (рисунок 2), работающий в диапазоне 800-2700 МГц. Данные делители используются в экспериментах ДТОО «Институт космической техники и технологий» и предоставлено для анализа и измерений.

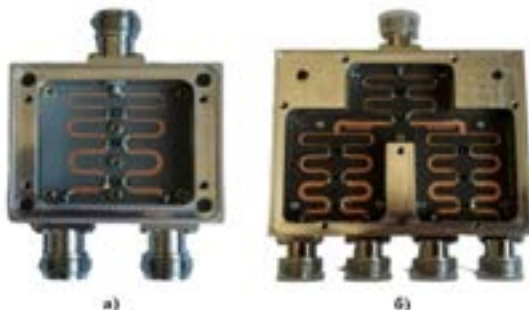


Рисунок 2 – Делители мощности на 2 (а) и на 4 (б)

В качестве материала для печатной платы в обоих делителях применен фольгированный (армированный) стекловолокном, фторопласт (ФАФ). Этот материал (рисунок 3) в радиодиапазоне обладает меньшими потерями, чем стеклотекстолит. Его диэлектрическая проницаемость (при частоте 10 ГГц) $\epsilon=2,5\pm 0,1$. В этом случае коэффициент укорочения необходимый при расчете топологических размеров: составляет $=1,58$.



Рисунок 3 – Фольгированный (армированный) фторопластовый диэлектрик

В измерениях использован анализатор FieldFox Microwave Analyser N9915A. Портативный комбинированный СВЧ анализатор FieldFox Analyser N9915A (рисунок 4) предназначен для выполнения широкого круга задач от планового технического обслуживания оборудования до всесторонней

диагностики и устранения неисправностей. СВЧ анализатор FieldFox обеспечивает высокое качество измерений, как в лаборатории, так и в полевых условиях.



Рисунок 4 – Microwave Analyser N9915A

Основное назначение комбинированного сверхвысокочастотного (СВЧ) анализатора – это тестирование кабелей и антенн. Еще он может быть сконфигурирован как векторный анализатор цепей и анализатор спектра. Дополнительные опции:

- включают измеритель мощности;
- независимый генератор сигналов;
- векторный вольтметр;
- анализатор помех;
- регулируемый источник постоянного тока и встроенный GPS приемник.

Технические характеристики FieldFox Microwave Analyser указаны в таблице 1.

Таблица 1 – Характеристики Microwave Analyser N9915A

Диапазон частот	от 30 кГц до 9 ГГц
Динамический диапазон	100 дБ
Погрешность измерения амплитуды	±0,5 дБ
Время работы от аккумулятора	3,5 часа
Масса прибора	3,0 кг
Рабочий диапазон температур	от -10°C до +55°C

Результаты и обсуждение

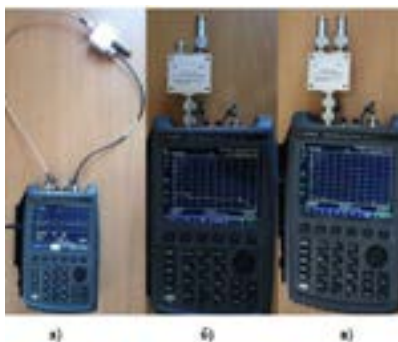
В данной работе проведены измерения амплитудно-частотных параметров делителей и характеристик согласования. Параметр АЧХ (S21) показал ослабление (затухание, дБ) сигнала в делителе между входом и выходом (то есть из порта 1 в порт 2 анализатора цепей). Между выходами 2 и 3 было замерено переходное ослабление (изоляция, дБ), которое показало,

что существует развязка между выходами 2 и 3 делителя. Параметр КСВ (S11) показал коэффициент согласования делителя с волновым сопротивлением кабельной линии (фидерной) 50 Ом. КСВ близки к единице во всем диапазоне частот делителя, что означает хорошее согласование, в случае если все выходы делителя нагружены равномерно на сопротивление 50 Ом.

В режиме анализа цепей измерены характеристики ослабления (S21–параметр), а также в режиме (S11-параметр) измерены параметры отражение и согласование (рисунок 5 - 7).



Рисунок 5 – АЧХ (S21) делителя мощности на 2 с нагруженным портом



а – схема измерения АЧХ (S21) делителя на 2; б – схема измерения КСВ (S11) делителя на 2 с одним не нагруженным портом; в – схема измерения КСВ (S11) делителя на 2 с двумя нагруженными портами

Рисунок 6 – Схемы для измерения АЧХ и КСВ

Для равномерной нагрузки в измерениях были использованы коаксиальные аттенюаторы. При отключении аттенюатора от одного выхода делителя наблюдалось ухудшение КСВ (S11), а значит ухудшение согласования. Аналогичные результаты получены при измерениях делителя на 4.

На рисунке 7 приведен коэффициент отражения. В начале, и в конце диапазона маркер 1 и 2. В данном случае КСВ=2,908, потому что один из портов оказался не нагруженным. Из этого нарушилась симметрия делителя.

На рисунке 8 приведен идеальный КСВ=1,192, потому что два порта нагружены симметрично, симметрия делителя не нарушена.

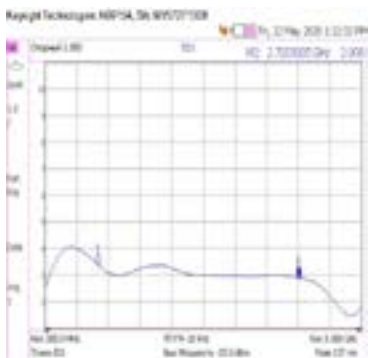


Рисунок 7 – АЧХ (S11) делителя на 2 с одним не нагруженным портом

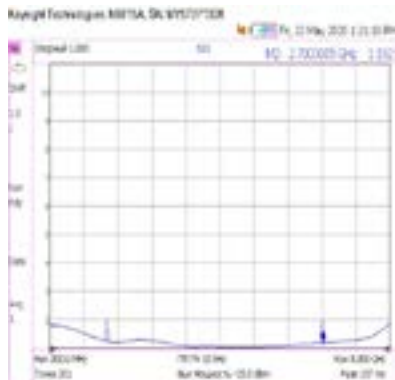


Рисунок 8 – АЧХ (S11) делителя на 2 с двумя нагруженными портами

На рисунке 9 представлен КСВ обратного порта, при нагруженных остальных портах. Мы наблюдаем равнозначность обратного и прямого портов, потому что КСВ близок к идеалу.

На рисунке 10 видно прохождения тестового сигнала из порта 2 в порт 3 на краях диапазоне частот (800-2700 МГц) ослаблен на $-21,25$ дБ. Таким образом, наблюдается развязка (изоляция) между портами.



Рисунок 9 – КСВ (S11) делителя мощности на 2 обратного порта

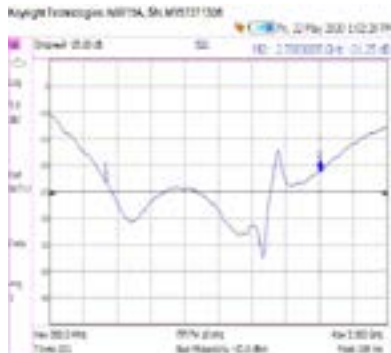


Рисунок 10 – АЧХ (S21) переходное ослабления между портами 2 и 3



Рисунок 11 – Схема измерения КСВ обратного порта делителя



Рисунок 12 – Схема измерения переходного ослабления (развязка, изоляция)

Приведены сравнительные АЧХ прямого и обратного прохождения сигнала через делитель (рисунок 13). Приведены АЧХ (S_{21}) делителя на 4, при нагруженных остальных портах (рисунок 14). Потери прохождения сигнала (марк.1 – 6,329 дБ, марк.2 – 6,625 дБ) соответствуют коэффициенту деления на 4.

Рисунок 13 – Сравнительная АЧХ (S_{21}) делителя мощности на 2Рисунок 14 – АЧХ (S_{21}) делителя мощности на 4

На рисунке 15 приведено КСВ делителя мощности на 4 с нагруженными портами. В конце диапазона, правее маркера 2 наблюдаем ухудшение согласование – график поднимается вверх более 2 единиц.

На рисунке 16 приведено ухудшение КСВ (марк.1, марк.2, и марк.3 – до 3,039 единиц) при отсутствии нагрузок на портах 3 и 4 (произошло рассогласование).



Рисунок 15 – КСВ (S11) делителя мощности на 4 остальные порты нагружены



Рисунок 16 – КСВ (S11)



Рисунок 17 – Схема измерения КСВ первого порта делителя мощности на 4

Выводы

Таким образом, в результате исследований параметр АЧХ (S21) показал ослабление сигнала в делителе между входом и выходом. Между выходами 2 и 3 было замерено переходное ослабление. Измерения показали, что существует развязка между выходами 2 и 3 делителя. Параметр КСВ (S11) показал коэффициент согласования делителя с волновым сопротивлением фидерной линии 50 Ом. КСВ близки к единице во всем диапазоне частот делителя, что означает хорошее согласование, в случае если все выходы делителя нагружены равномерно на сопротивление 50 Ом. Для равномерной

нагрузки в измерениях были использованы коаксиальные аттенюаторы. При отключении аттенюатора от одного выхода делителя наблюдалось ухудшение КСВ (S11), а значит ухудшение согласования.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 **Воскресенский, Д. И., Канащенкова А. П.** Активные фазированные антенные решетки // М. : Радиотехника, 2004. - 488 с.

2 **Воскресенский, Д.И.** Проектирование фазированных антенных решеток // М. : Радиотехника, 2012.

3 **Айтмагамбетов, А. З., Кулакаева, А. Е., Кожамметова, Б. А., Жаксылык, А. Ж.** Оценка энергетического бюджета для системы радиомониторинга на базе низкоорбитальных спутников // Вестник АУЭС. – 2019. – № 4 (47). – С. 88.

4 **Кожамметова, Б. А., Камал, Р. Ж., Койшыбай, С. С.** Вопросы применения активных фазированных антенных решеток в радиотехнических системах // Современные технологии в науке и образовании-СТНО-2019. – 2019. – С. 46–50.

5 **Ступин, Д. Д., Перлов, А. Ю., Маврин, А. В.** Исследование и испытания передающих комплексов АФАР для обеспечения тактико-технических характеристик РЛС // Известия Южного федерального университета. Технические науки. – 2018. – №. 3 (197).

6 **Дзюба, А. П.** Перспективы развития фазированных антенных решеток // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. – 2013. – Т. 30. – № 3.

7 **Жумашев, Н. Г., Каражанов, Б. Б., Сулейменов, Е. А.** Самолетные радиолокационные станции с использованием фазированной антенной решетки // Труды Международного симпозиума «Надежность и качество». – 2017. – Т. 2.

8 **Тушнов, П. А., Бердыев, В. С.** Технология управления выходной мощностью приемопередающего модуля АФАР // Радиотехника. – 2015. – №. 10. – С. 62-74.

9 **Карасев, М. С.** и др. Многофункциональный приемо-передающий модуль АФАР нового поколения // Электроника и микроэлектроника СВЧ. – 2018. – Т. 1. – С. 239–242.

10 **Викулов, И.** Радиоэлектронные системы с АФАР: направления развития и применения // Электроника: наука, технология, бизнес. – 2017. – № 5. – С. 126–134.

REFERENCES

- 1 **Voskresensky, D. I., Kanaschenkov, A. P.** Active phased antenna arrays //– M.: Radiotekhnika, 2004.– p. 488.
- 2 **Voskresensky, D.I.** Design of phased antenna arrays. //M.: Radiotekhnika, 2012.
- 3 **Aitmagambetov, A. Z., Kulakaeva, A. E., Kozhakhmetova, B. A., Zhaksylyk, A. Zh.** Estimation of the energy budget for a radio monitoring system based on LEO satellites. //AUPET Bulletin. 2019. – № 4 (47). – p.88.
- 4 **Kozhakhmetova, B.A., Kamal, R. Zh., Koishybai, S.S.** Issues of using active phased antenna arrays in radio engineering systems // Modern technologies in science and education-STNO-2019. – 2019 .- pp. 46–50.
- 5 **Stupin, D. D., Perlov, A. Yu., Mavrin, A. V.** Research and testing of AFAR transmitting complexes to ensure the tactical and technical characteristics of the radar // Bulletin of the Southern Federal University. Technical science. – 2018. – 3 (197).
- 6 **Dzyuba, A.P.** Prospects for the development of phased antenna arrays // Bulletin of the Dagestan State Technical University. Technical science. – 2013. – Т. 30. – 3.
- 7 **Zhumashev, N. G., Karazhanov, B. B., Suleimenov, E. A.** Aircraft radar stations using a phased array antenna // Proceedings of the International Symposium «Reliability and Quality». – 2017.–Т. 2.
- 8 **Tushnov, P.A., Berdyev, V.S.** Technology for controlling the output power of the AFAR receiving and transmitting module // Radio engineering. – 2015. – No. 10. – p. 62–74.
- 9 **Karasev, M.S.** et al. Multifunctional AFAR receiving and transmitting module of the new generation // Electronics and microelectronics of microwave. – 2018. – Vol. 1. – p. 239–242.
- 10 **Vikulov, I.** Radioelectronic systems with AFAR: directions of development and application // Electronics : Science, technology, business. – 2017. – № 5. – p. 126–134.

Материал поступил в редакцию 15.09.22.

**A. E. Кулакаева¹, А. И. Самсоенко², Ж. Ж. Онгенбаева³,
С. С. Қойшыбай⁴, Р. Ж. Камал⁵*

^{1,2,3,4,5}Халықаралық ақпараттық технологиялар университеті,

Қазақстан Республикасы, Алматы қ.;

²Ғарыштық техника және технологиялар институты,

Қазақстан Республикасы, Алматы қ.

Материал баспаға 15.09.22 түсті.

БЕЛСЕНДІ ФАЗАЛАНҒАН АНТЕННА ТОРЫНЫҢ ҚУАТ БӨЛГІШІН ЗЕРТТЕУ

Қазіргі уақытта радиотехникалық жүйелер үшін белсенді фазалық антенна торлары сияқты антенналар үлкен қызығушылық тудырады, онда белсенді элемент әр антенна торының сәулелендіргішіне қуат күшейткіші, генератор немесе жиілік түрлендіргіші түрінде қосылады.

Бұл жұмыстың негізгі мақсаты белсенді фазаланған антенна торлары түріндегі антеннаның негізгі блоктарының бірін, атап айтқанда белсенді фазаланған антенна торларының барлық арналары бойынша жалпы қоздырғыштан сигналдың таралуын қамтамасыз ететін қуат тарату жүйесін зерттеу болып табылады.

Бұл мақалада белсенді фазаланған антенна торларының негізгі техникалық сипаттамалары зерттелді. Сондай-ақ, белсенді фазаланған антенна торларының қуат бөлгіштерінің негізгі түрлері, олардың құрылымдық сұлбалары қарастырылды, сонымен қатар бөлгіштердің амплитудалық-жиілік параметрлері мен сәйкестік сипаттамалары өшенді. Сондай-ақ, белсенді фазаланған антенна торының үлкен көп портты бөлгішінің ерекше жағдайы зерттелді. «Ғарыштық техника және технологиялар институты» ЖШЕС негізінде Microwave Analyser N9915A спектр талдағышының көмегімен белсенді фазаланған антенналық тор бөлгіштерінің амплитудалық-жиіліктік параметрлерін өлшеу және келістіру сипаттамасы жүргізілді. Зерттеу деректері белсенді фазалық антенна торын жобалаудың келесі кезеңіне қатысты болуы мүмкін.

Кілтті сөздер: бөлгіш, антенна, сканерлеу, амплитудалық-жиіліктік сипаттама, өлшеу, жиілік, спектр.

**A. Ye. Kulakayeva¹, A. I. Samsonenko², Zh. Zh. Ongenbaeva³,
S. S. Koishybai⁴, R. Zh. Kamal⁵*

^{1,2,3,4,5}International Information Technology University,
Republic of Kazakhstan, Almaty.

²Institute of Space Engineering and Technology,
Republic of Kazakhstan, Almaty.

Material received on 15.09.22.

RESEARCH OF THE POWER DIVIDER OF THE ACTIVE PHASED ANTENNA ARRAY

Currently, for radio engineering systems, the most interesting are antennas of the type of active-phased antenna arrays, in which an active element in the form of a power amplifier, generator or frequency converter is connected to each radiator of the antenna array.

The main purpose of this work is to study one of the main antenna blocks of the type of active-phased antenna arrays, in particular, a power distributor system that ensures the distribution of a signal from a common exciter across all channels of active-phased antenna arrays.

In this article, the main technical characteristics of active-phased antenna arrays were investigated. The main types of power dividers of active-phased antenna arrays, their structural schemes of construction were also considered, as well as measurements of the amplitude-frequency parameters of the dividers and matching characteristics were carried out. A special case of a large multiport divider of an active-phased array antenna is also investigated. The amplitude-frequency parameters of the dividers of the active phased array antenna and the characteristics of the solgassing were measured using the Microwave Analyser N9915A spectrum analyzer based on the Institute of Space Engineering and Technology. These studies may be relevant for the next stage of designing an active phased array antenna.

Keywords: divider, antenna, scanning, frequency response, measurement, frequency, spectrum

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