

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

№ 1 (2025)

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/PXLE1275>

Бас редакторы – главный редактор

Талипов О. М.

доктор PhD, ассоц. профессор (доцент)

Заместитель главного редактора

Калтаев А.Г., *доктор PhD*

Ответственный секретарь

Сағындық Ә.Б., *доктор PhD*

Редакция алкасы – Редакционная коллегия

Клецель М. Я.,	<i>д.т.н., профессор</i>
Никифоров А. С.,	<i>д.т.н., профессор</i>
Новожилов А. Н.,	<i>д.т.н., профессор</i>
Никитин К. И.,	<i>д.т.н., профессор (Российская Федерация)</i>
Алиферов А. И.,	<i>д.т.н., профессор (Российская Федерация)</i>
Кошеков К. Т.,	<i>д.т.н., профессор</i>
Приходько Е. В.,	<i>к.т.н., профессор</i>
Кислов А. П.,	<i>к.т.н., доцент</i>
Нефтисов А. В.,	<i>доктор PhD</i>
Омарова А. Р.	<i>технический редактор</i>

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/XFUX8389>**К. С.Шоланов¹, Н. Б. Жакипов², *Г. Ж. Асаинов³,**^{1,2,3}Казахский агротехнический исследовательский университет
имени С. Сейфуллина, Республика Казахстан, г. Астана¹ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2077-7883>²ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-7239-2095>³ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1330-5909>e-mail: asainovgibrat@gmail.com

ЭНЕРГИЯ ВЕТРОВОЙ НАГРУЗКИ ВОСПРИНИМАЕМАЯ АКТУАТОРАМИ ПАРУСНОЙ ВЕТРОВОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ

Статья посвящена энергетическому анализу актуаторов манипуляторного преобразователя парусной ветровой электростанции (ПВЭС). В ПВЭС механическая энергия от ветровой нагрузки на парус преобразуется в «организованные» движения в шести актуаторах параллельного манипулятора. Затем механическая энергия этих движений в каждом актуаторе преобразуется в электрическую энергию, вырабатываемую генераторами встроенными в актуаторы. В статье ставится задача с помощью программных средств определить энергию воспринимаемую актуаторами для того, чтобы на их основе оценить энергетическую эффективность ПВЭС. Для решения поставленной задачи используются полученные ранее результаты анализа ветровой нагрузки и определения предсказанной ветровой ситуации с помощью методов искусственного интеллекта. На основе этих данных по модифицированному алгоритму с применением ПП «Mathcad» вычисляется и исследуется входная мощность от ветровой нагрузки, действующая на каждый актуатор манипулятора. Данные, полученные в результате вычислений, предлагается использовать для выбора и обоснования параметров актуаторов. Известно, что актуаторы манипуляторного преобразователя в функциональном отношении являются важной компонентой ПВЭС. Совершенствование конструкции актуаторов позволит повысить энергетическую эффективность ПВЭС в целом. Проведенные ранее исследования показали, что ПВЭС

могут вырабатывать электрическую энергию мощности 5-10 кВт при скоростях ветра от 2.5 м/с и выше независимо от изменения направления ветра. По этим и другим особенностям ПВЭС превосходят турбинные ветровые электростанции и могут применяться без больших издержек в качестве автономных источников энергии

Ключевые слова: актуаторы, генератор, манипуляторный преобразователь, возобновляемые источники энергии, парусная ветровая электростанция

Введение

В последнее время исследования ученых показали, что широкое применение органического топлива ведет к негативным экологическим последствиям, а именно, к глобальному потеплению климата из-за парникового эффекта. В следствии этого было установлено, что одним из важнейших путей для устранения негативных климатических изменений является использование возобновляемых источников энергии (ВИЭ). Из различных видов ВИЭ преимущественное применение в современном мире находит ветроэнергетика [1, с. 5]. Так как энергия ветра, которая может быть преобразована в другие виды энергии приблизительно составляет $1,26 \times 10^9$ МВт [2, с. 6-7], что намного превышает потребность энергии в мире. Кроме того, ветроэнергетика имеет ряд преимуществ, главное из которых экологичность [3, с. 2-3]. Однако следует отметить, что в ветроэнергетике сейчас наибольшее применение нашли турбинные ветровые электростанции, которые имеют ряд недостатков заключающиеся в том, что для них проблемой является неожиданные изменения скорости и направления ветра, а также то, что нижняя граница скорости ветра выше 10 м/с, что делает невозможным их применения на обширных территориях со средней скоростью равной 2.5-3 м/с [4;5]. В этой связи представляется перспективным применение в ветроэнергетике автоматически управляемых малых парусных ветровых электростанций (ПВЭС), предложенных в работах [6;7]. Эти ПВЭС используют новую технологию преобразования энергии ветра в электрическую энергию благодаря применению манипуляторного преобразователя (МП) из параллельного манипулятора Sholkor [8 с. 9] с шестью актуаторами. Кроме того ПВЭС имеет качающийся в пространстве парус с аэродинамическим профилем воспринимающий аэродинамически силы сопротивления и подъема одновременно. Благодаря этому ПВЭС может функционировать с заданной мощностью (5-10) кВт при скоростях ветра от 2,5 м/с, независимо от изменения направления ветра. В данной статье ставится задача совершенствовать конструкцию ПВЭС. Так как главным узлом ПВЭС

в функциональном отношении является актуатор, то задача сводится к выбору параметров актуатора. По этой причине в статье предлагается для выбора приемлемых параметров актуатора использовать энергетические характеристики, а именно кпд, т.е. отношение выходной электрической мощности к входной мощности ветровой нагрузки воспринимаемой актуатором. Настоящая статья посвящена вычислению входной мощности на актуаторах в зависимости от изменения скорости ветра по величине и направлению. В дальнейшем предполагается экспериментальным путем определить кпд.

Материалы и методы

Ветровую нагрузку в ПВЭС воспринимает непосредственно рабочий орган (РО), состоящий из качающегося паруса с аэродинамическим профилем, мачты и верхней платформы МП. Затем движение верхней платформ шести подвижного манипулятора относительно неподвижного основания вызывает увеличение или уменьшение длин шести актуаторов. С помощью системы отбора мощности встроенного в каждый актуатор, перемещение штока актуатора преобразуется во вращательное движение вала электрической машины генерирующего электрический ток. Первичным источником энергии в любом ветроустановке является ветер. ПВЭС обладает преимуществами в преобразования энергии ветра в электрическую энергию по следующим причинам:

- парус с аэродинамическим профилем сечения формирует подъемные силы и силы сопротивления одновременно, независимо от направления ветра (особенности паруса);

- результирующая сил, действующих на парус, из-за длины мачты, увеличиваются во много раз при действии на актуаторы (особенность мачты).

В данной статье исходным для расчета актуаторов манипулятора являются такие характеристики ветра, как скорость и направление. Экспериментальные исследования проведенные в работе [9] показывают, что эти величины изменяются стохастически причем, направление ветра может в течении секунды изменяться на противоположное, а величина скорости – на значительную величину. По этой причине массив данных экспериментального исследования скорости и направления обработаны для выявления закономерности в изменении ветровой ситуации. При этом применяется программа, подготовленная на языке программирования Python, использующая библиотеки для работы с данными и создания самообучающейся нейронной сети [10]. Полученная программа используется для предсказания направления и скорости движения по 4-м диапазонам изменения скорости ветра в м/с [0-5], [до10], [до15], [свыше15]. На Рис.1,а

представлена диаграмма изменения предсказанной скорости, а на Рис.1,б – диаграмма изменения предсказанного угла вектора скорости от севера из базы данных в диапазоне [0-5] м/с в течении 65 с., полученные путем обучения нейросетей.



а)

б)

Рисунок 1 – Предсказанные характеристики ветра

Полученные предсказанные характеристики ветровой ситуации для выбранного диапазона изменения скорости ветра в дальнейшем служат исходными данными при анализе динамики параллельного манипулятора и определения входной мощности на актуаторах.

Результаты и обсуждение

Согласно технологии преобразования энергии ветра в электрическую энергию реализуемой ПВЭС, энергия ветра воспринимается парусом 1, мачтой 2 и верхней платформой 9 манипулятора (Рис.2). Затем эта механическая энергия с помощью шести подвижного манипулятора преобразуется в возвратно поступательные движения каретки в шести актуаторах 3-8, связывающих основание 10 с верхней платформой 9. С помощью системы отбора мощности возвратно-поступательное движение каретки в каждом актуаторе преобразуется во вращательное движение вала электрической машины, генерирующей электрический ток. Отсюда следует, что актуатор является важной в функциональном отношении важной подсистемой ПВЭС. Конструктивные особенности и параметры актуатора определяются в результате динамического анализа манипуляторного преобразователя (МП). Ранее, в работах [6,7] была разработана динамическая модель МП и получен алгоритм силового анализа. Реализация этого алгоритма позволила с помощью ПП «Mathcad» определить усилия на каждом актуаторе при заданной скорости и направлении ветра действующего на парус. Особенность решения задач на данном этапе заключается, в том, что исходными данными для расчета являются конструктивные параметры

создаваемого опытного образца ПВЭС и ветровая ситуация и заданная в виде базы данных предсказанные значений скорости и направления ветра (п.2).

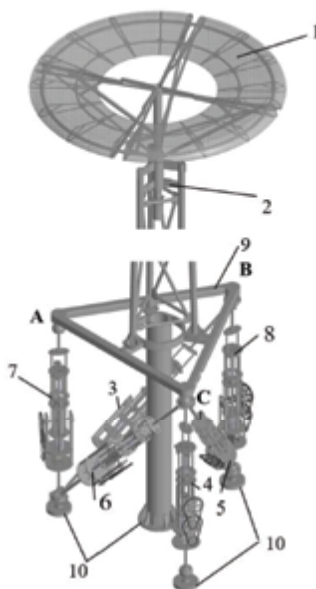


Рисунок 2 – 3D модель конструкции ПВЭС

В качестве исходных данных для расчета использовались следующие характеристики опытного образца ПВЭС:

- выходная мощность ПВЭС -5 кВт;
- длина стороны и высота МП – 2 м, 2 м;
- высота мачты – 12 м;

вес мачты, паруса, верхней платформы соответственно в (Н) – 2200, 950, 2600;

– парус с аэродинамическим профилем сечения А35 имеющий аэродинамический коэффициент сил сопротивления и подъёмной силы – 0.14, 0.28 соответственно;

– угол отклонения мачты от вертикального положения принимается равным 20 при изменения скорости ветра в 1-м диапазоне и увеличивается на 20 с увеличением номера диапазона.

В результате расчетов по ПП «Mathcad» вычислены скорости узловых точек А,В,С верхней платформы, а также усилия, действующие на каждый актуатор от ветровой нагрузки на РО. Эти расчеты позволили в динамике

определить прогнозируемую входную мощность N на каждом актуаторе 3-8 (Рис.3) по зависимости

$$N = R \cdot \Delta l / T , ,$$

где R , Δl , T –соответственно сила, действующая на актуатор в данном узле, перемещение узла и время перемещения узловой точки.



Рисунок 3 – Прогнозируемая мощность на актуаторах

На Рисунке 3 представлена диаграмма изменения входной мощности на шести актуаторах (3-8) полученная в результате расчетов. Исходными данными для расчетов была предсказанная с помощью ИИ ветровая ситуация (Рис.1). Вычисления производились применительно к ветровой ситуации, изменяющейся в течении 65 с. с интервалом в 5 с. Из диаграммы следует, что при скачкообразном изменении скорости ветра при $T=45$ с.изменились усилия растяжения в актуаторах 3,7 и усилие сжатия в противоположном актуаторе 8. Эти результаты свидетельствуют об адекватности расчетов. Для согласования направления ветра с расчетной моделью направление ветра измеряется от Севера. В модели Север проходит от центра платформы через узел С. При монтаже ПВЭС это направление должно выдерживаться. Следует отметить, что по алгоритму представленному в работах [6,7] силы реакции актуаторов определялись по заданной скорости ветра в зависимости от приращения угла поворота ρ_0 и в зависимости от изменения направления ветра. В

представленном модифицированном алгоритме силы реакции актуаторов определяются при заданном предельном угле повороте РО, в зависимости от скорости и направления ветра, изменяющихся по закономерностям, полученным методом искусственного интеллекта. Полученные результаты могут быть использованы для проектирования актуаторов ПВЭС. Также в дальнейшем планируется использовать результаты данной работы для экспериментального определения КПД прототипа актуатора и ПВЭС в целом.

Информация о финансировании.

Данное исследование профинансировано Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (грант № AP14869386).

Выводы

В статье обосновано, что актуатор является основным функциональным элементом ПВЭС и подчеркивается важность определения энергетических характеристик актуатора для того, чтобы оценить энергетическую эффективность ПВЭС. В связи с этим в статье ставится задача определить энергию воспринимаемую актуаторами для того, чтобы на их основе оценить энергетическую эффективность актуатора и ПВЭС. Для решения поставленной задачи в качестве исходных данных использованы результаты анализа ветровой нагрузки и определения предсказанной ветровой ситуации с помощью методов искусственного интеллекта. На основе этих данных по модифицированному алгоритму с применением ПП «Mathcad» вычислена входная мощность от ветровой нагрузки, действующая на каждый актуатор манипулятора. Полученные в результате расчетов данные по входной мощности актуаторов позволяют оценить конструкции актуаторов и судить об энергоэффективности ПВЭС. В статье создается потенциал для широкого внедрения ПВЭС в ветроэнергетическую отрасль.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 **Sills, J., and Firestone, J.** Wind energy: A human challenge. [Text] // Science 366. – 2019. – P. 1206.

2 **Tong, W.** Fundamentals of wind energy : WIT Transactions on State of the Art in [Text]// Science and Engineering. – 2010. – Vol 44. – P. 3–48.

3 **Karad, S., and Thakur, R.** Efficient monitoring and control of wind energy conversion systems using Internet of things (IoT): a comprehensive review. [Text]// Environ. Dev.Sustain. – 2021. – Vol.23. – P. 14197–14214.

4 **Banna, H. U., Luna A., Ying S., Ghorbani H., Rodriguez P.** Impacts of wind energy in-feed on power system small signal stability: International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA) [Text]// Milwaukee : IEEE. – 2014. – P. 615–622.

5 Premalatha, M., Abbasi, T., and Abbasi, S. A., Wind energy: Increasing deployment, rising environmental concerns, Renewable and Sustainable [Text] // Energy Rev. – 2014. – Vol. 31. – P. 270–288.

6 Sholanov, K. S., Mirzabayev, B. I., Ceccarelli, M. Expansibility of Electric Power Production by Sail Wind Power Stations : [Text]// International Journal of Mechanics and Control. – 2021. – Vol. 22(02). – P. 117–126.

7 Sholanov, K., Omarov, A., Ceccarelli, M. Improving efficiency of converting wind energy in modified sail wind power station [Text] //International Journal of Mechanics and Control. – 2022. – Vol. 23(02). – P. 101–110.

8 Sholanov, K. S. Parallel Manipulators of Robots: Theory and Applications. // Springer. – 2020. – P.164.

9 Шоланов, К. С., Омаров, А. С. Описание конструкции и технологии преобразования энергии ветра электростанцией с зонтовым парусом[Текст] // Вестник Торайғыров университета. Энергетическая серия. – 2022. – № 3. – С. 211–223.

10 Шоланов, К. С., Токишева, Г. С. и др. Формирование данных для проектирования парусных ветровых электростанций [Текст]// Вестник Торайғыров университета. Энергетическая серия. – 2024. – № 2. – С 421–432.

REFERENCES

1 Sills, J., and Firestone, J. Wind energy : A human challenge. [Text] // Science 366. – 2019. – P. 1206.

2 Tong, W. Fundamentals of wind energy: WIT Transactions on State of the Art in [Text]// Science and Engineering. – 2010. – Vol 44. – P. 3–48.

3 Karad, S., and Thakur, R. Efficient monitoring and control of wind energy conversion systems using Internet of things (IoT) : a comprehensive review. [Text]// Environ. Dev.Sustain. – 2021. – Vol. 23. – P. 14197–14214.

4 Banna, H. U., Luna A., Ying S., Ghorbani H., Rodriguez P. Impacts of wind energy in-feed on power system small signal stability: International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA) [Text]// Milwaukee: IEEE. – 2014. – P. 615–622.

5 Premalatha, M., Abbasi, T., and Abbasi, S. A., Wind energy: Increasing deployment, rising environmental concerns, Renewable and Sustainable [Text] // Energy Rev. – 2014. – Vol. 31. – P. 270–288.

6 Sholanov, K. S., Mirzabayev, B. I., Ceccarelli, M. Expansibility of Electric Power Production by Sail Wind Power Stations : [Text]// International Journal of Mechanics and Control. – 2021. – Vol. 22(02). – P. 117–126.

7 **Sholanov, K., Omarov, A., Ceccarelli, M.** Improving efficiency of converting wind energy in modified sail wind power station [Text] // International Journal of Mechanics and Control. – 2022. – Vol. 23(02). – P. 101–110.

8 **Sholanov, K. S.** Parallel Manipulators of Robots: Theory and Applications. // Springer. – 2020. – P.164.

9 **Sholanov, K. S., Omarov, A. S.** Opisanie konstrukcii i tekhnologii preobrazovaniya energii vetra elektrostanciej s zontovym parusom [Description of the design and technology of wind energy conversion by an umbrella sail power plant][Text] // Bulletin of the Toraighyrov University. Energy series. – 2022. – No. 3. – P. 211–223.

10 **Sholanov, K. S., Tokisheva, G. S., etc.** Formirovanie dannyh dlya proektirovaniya parusnyh vetrovyh elektrostancij: Vestnik Torajgyrov universiteta [Data generation for the design of sailing wind farms] [Text]// Bulletin of the Toraighyrov University. Energy series. – 2024. – No. 2. – P. 421–432.

Поступило в редакцию 07.08.24

Поступило с исправлениями 13.12.24

Принято в печать 10.03.25

*К. С.Шоланов¹, Н. Б. Жакипов², *Г. Ж. Асаинов³,*

^{1,2,3}С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті, Қазақстан Республикасы, Астана қ

07.08.24 ж. баспаға түсті.

13.12.24 ж. түзетулерімен түсті.

10.03.25 ж. басып шығаруға қабылданды.

ЖЕЛКЕНДІ ЖЕЛ ЭЛЕКТР СТАНЦИЯСЫНЫҢ АКТУАТОРЛАРЫ ҚАБЫЛДАЙТЫН ЖЕЛ ЖҮКТЕМЕСІНІҢ ЭНЕРГИЯСЫ

Мақала желкенді жел электр станциясының (ПВЭС) манипуляторлық түрлендіргішінің актуаторларын энергетикалық талдауға арналған.

ПВЭС-те желдің жел жүктемесінен механикалық энергия параллель манипулятордың алты актуаторында «ұйымдастырылған» қозғалыстарға айналады. Содан кейін әр актуатордағы осы қозғалыстардың механикалық энергиясы актуаторларға енгізілген генераторлар шығаратын электр энергиясына айналады. Мақалада бағдарламалық жасақтаманың көмегімен пвэс-тің энергетикалық тиімділігін бағалау үшін актуаторлар қабылдаған энергияны анықтау міндеті қойылады. Тапсырманы шешу үшін жел

жүктемесін талдаудың және жасанды интеллект әдістерін қолдана отырып болжасқан жел жағдайын анықтаудың бұрын алынған нәтижелері қолданылады. Осы мәліметтер негізінде «Mathcad» ПП көмегімен өзгертілген алгоритм бойынша манипулятордың әрбір актуаторына әсер ететін жел жүктемесінен кіріс қуаты есептеледі және зерттеледі. Есептеу нәтижесінде алынған деректерді актуаторлардың параметрлерін таңдау және негіздеу үшін пайдалану ұсынылады. Манипуляторлық түрлендіргіштің актуаторлары функционалды түрде ПВЭС-тің маңызды құрамдас бөлігі болып табылатыны белгілі. Актуаторлардың конструкциясын жетілдіру жалпы ПВЭС-тің энергетикалық тиімділігін арттыруға мүмкіндік береді. Бұрын жүргізілген зерттеулер ПВЭС жел бағытының өзгеруіне қарамастан Желдің жылдамдығы 2,5 м/с және одан жоғары болған кезде 5-10 кВт электр энергиясын өндіре алатынын көрсетті. Осы және басқа да ерекшеліктері бойынша ПВЭС турбиналық жел электр станцияларынан асып түседі және оларды автономды энергия көздері ретінде үлкен шығындарсыз қолдануға болады.

Кілтті сөздер: актуаторлар, генератор, манипулятор түрлендіргіші, жаңартылатын энергия көздері, желкенді жел электрстанциясы

K. S.Sholanov¹, N. B. Zhakipov², *G. Zh. Assainov³

^{1,2,3}Kazakh agrotechnical research university named after S. Seifullin, Republic Of Kazakhstan, Astana.

Received 07.08.24

Received in revised form 13.12.24

Accepted for publication 10.03.25

WIND LOAD ENERGY PERCEIVED BY ACTUATORS OF A SAILING WIND FARM

The article is devoted to the energy analysis of actuators of the manipulator converter of a sailing wind power plant (PVES).

In the PVP, mechanical energy from the wind load of the wind is converted into “organized” movements in six actuators of the parallel manipulator. The mechanical energy of these movements in each actuator is then converted into electrical energy produced by the generators embedded in the actuators. The article sets the task of determining the energy received by actuators to assess the energy efficiency of pves using

software. To solve the task, the previously obtained results of wind load analysis and determination of the predicted wind conditions using artificial intelligence methods are used. Based on this data, the input power from the wind load acting on each actuator of the manipulator is calculated and studied according to a modified algorithm using PP "Mathcad". It is recommended to use the data obtained as a result of the calculation to select and justify the parameters of the acutators. It is known that actuators of manipulator transducers are functionally an important component of PVES. Improving the design of actuators will increase the energy efficiency of PVPS as a whole. Previous studies have shown that PVES can generate 5-10 kW of electricity at wind speeds of 2.5 M/S and higher, regardless of the change in wind direction. In terms of these and other features, PVES surpasses turbine wind farms and can be used as autonomous energy sources without large losses

Keywords: actuators, actuators, generator, manipulator converter, renewable energy sources, sailing wind farm

Теруге 10.03.2025 ж. жіберілді. Басуға 28.03.2025 ж. қол қойылды.

Электронды баспа

29.9 Mb 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 №4358

Сдано в набор 10.03.2025 г. Подписано в печать 28.03.2025 г.

Электронное издание

29.9 Mb RAM

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

Компьютерная верстка: А. К. Мыржикова

Корректор: А. Р. Омарова, Д. А. Кожас

Заказ № 4358

«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