

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 (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/UJEG4973>

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 алкасы – Редакционная коллегия

Клецель М. Я.,	<i>д.т.н., профессор</i>
Новожилов А. Н.,	<i>д.т.н., профессор</i>
Никитин К. И.,	<i>д.т.н., профессор (Россия)</i>
Никифоров А. С.,	<i>д.т.н., профессор</i>
Новожилов Т. А.,	<i>д.т.н., профессор</i>
Алиферов А.И.,	<i>д.т.н., профессор (Россия)</i>
Кошеков К.Т.,	<i>д.т.н., профессор</i>
Приходько Е.В.,	<i>к.т.н., профессор</i>
Оспанова Н. Н.,	<i>к.п.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

© Торайгыров университет

***С. Е. Тасанбаев¹, К. Е. Арыстанбаев², Б. Т. Макажанов³**

¹Евразийский Национальный Университет имени

Л. Н. Гумилева, Республика Казахстан, г. Астана

²Южно-Казахстанская медицинская академия,

Республика Казахстан, г. Шымкент

³Южно-Казахстанский университет имени М. Ауезова,

Республика Казахстан, г. Шымкент

ОСТОРОЖНЫЙ АЛГОРИТМ КОМПЕНСАЦИИ ВОЗМУЩЕНИЙ В СИСТЕМЕ СО СЛУЧАЙНЫМИ ПАРАМЕТРАМИ

Рассматривается задача оптимального стохастического управления объектом в условиях неполной информации. Предложен алгоритм, проявляющий осторожность в зависимости от вероятностных характеристик оценок параметров модели объекта и учитывающий возникновение порога неопределенности. Возникновение порога неопределенности исследуется для практически важной задачи компенсации возмущений. В работе приведена постановка задачи, где приведена задача стабилизации выходного сигнала от влияния наблюдаемых возмущающих воздействий. Предложен алгоритм учитывающий неопределенность описываемой матрицы, исходя из требуемого качества управления. В статье рассмотрен скалярный пример компенсации возмущения, который подробно расписан. Используя принцип достоверности эквивалентности в работе сравнивались характеристики алгоритма с работой алгоритма. Нахождение управляющего воздействия в «противофазе» действующему возмущению обеспечивает модифицированный закон управления, в котором управляющее воздействие было направлено на компенсацию возмущений при возникающих соотношениях параметров модели. Приведены результаты имитационного моделирования разработанного алгоритма. Наглядно показано сравнение метода имитационного моделирования разработанного алгоритма с достоверно эквивалентным алгоритмом. В работе моделирование предложенного алгоритма производилось в условиях, при которых соотношения между априорными параметрами модели

приводили к превышению порога неопределенности, а для достоверно эквивалентного алгоритма эта информация не учитывалась.

Ключевые слова: Управление, алгоритм, моделирование, оптимизация, возмущающие воздействия.

Введение

Развитая применительно к задачам стохастического управления при неполной информации теория дуального управления [1], а также позже [2], указывает, что целесообразно за счет эффектов предосторожности и зондирования создавать условия для поступления информации для достижения требуемого качества функционирования. При управлении динамическими системами, описываемыми моделями со случайными коэффициентами уточнение оценок невозможно, однако при синтезе управлений следует учитывать степень априорной неопределенности в знании параметров модели. Кроме того, для линейной квадратической задачи стохастического управления при определенных соотношениях между ковариациями оценок параметров модели не существует решения на бесконечном интервале при превышении порога неопределенности [3].

В настоящей работе проблема возникновения порога неопределенности исследуется для практически важной задачи компенсации возмущений. Предложен алгоритм адаптивного управления, проявляющий осторожность в зависимости от имеющихся ковариаций оценок параметров модели, и способный адаптироваться к превышению порога неопределенности. Приводятся результаты имитационного моделирования, иллюстрирующие эту способность разработанного алгоритма.

Постановка задачи

Рассмотрим объект управления, описываемый разностным уравнением:

$$\begin{aligned}v(j+1) &= a^T(j)w(j) + b(j)u(j) + \varphi(j), \\ y(j+1) &= v(j+1), j = 1, 2, \dots\end{aligned}\tag{1}$$

Где $y(j+1)$ наблюдаемая переменная; $v(j+1)$ скалярная выходная переменная, наблюдаемая без помех; $w(j)$ – вектор возмущений; $u(j)$ – скалярное управляющее воздействие; $\varphi(j)$ – ненаблюдаемая помеха; $a(j)$ – вектор размера n и скалярная величина $b(j)$ – параметры модели, которые предполагаются гауссовскими и белыми (некоррелированными во времени) с средними \bar{a} и \bar{b} , соответственно, и априорными ковариациями:

$$M\{[a(j) - \bar{a}]^T [a(j) - \bar{a}]\} = \Sigma^{aa} \delta_{ij}$$

$$M\{[b(j) - \bar{b}]^T\} = \Sigma^{ab}$$

Возможна ненулевая взаимная ковариация:

$$M\{[a(j) - \bar{a}]^T [b(j) - \bar{b}]\} = \Sigma^{ab}$$

Где $\delta_{i,l}$ – символ Кронекера.

Случайные последовательности и статистически независимые друг от друга, имеют известные характеристики.

Задачей управления является стабилизация выходного сигнала от влияния наблюдаемых возмущающих воздействий .

Определим критерий качества в виде:

$$J = \frac{1}{2} M\left\{\sum_{k=1}^{N-1} v^2(k+1)\right\}, \quad (2)$$

Где M – символ операции математического ожидания, а N -интервал управления, положительное целое число.

Очевидно, что, если вектор параметров и известны для всех j , то, задача минимизации (2) может быть решена стандартными средствами. Однако, обычно они не известны, в связи с чем для синтеза алгоритма управления (4) используются их текущие оценки. Вместе с тем, имеющаяся неполнота информации в соответствии с теорией дуального управления [1] должна учитываться при синтезе управлений. Ниже будет представлен алгоритм, способный, учитывая неопределенность, описываемую матрицей , проявлять осторожность исходя из требуемого качества управления.

Материалы и методы

Алгоритм управления.

Критерий (2) на k -ом шаге может быть записан в виде:

$$J(k) = \frac{1}{2} M\{v^2(k+1) | Y^{k+1}\} = \int v^2(k+1) p\{v(k+1) | a(k), b(k), w(k), u(k), \varphi(k)\} \times p\{a(k), b(k), w(k), u(k), \varphi(k) | Y^{k+1}\} d\{a(k), b(k), w(k), u(k), \varphi(k)\}.$$

Где $y^{k-1} = [y^k(1), \dots, y^k(N-1)]^T$. Предполагается, что плотности распределения существуют.

Принимая во внимание (2), получим:

$$J(k) = \frac{1}{2} \int [a^T(z)w(k) + b(z)u(k) + \varphi(k)]^2 p(a(k), b(k), w(k), u(k), \varphi(k))^{y^{k-1}} d(a(k), b(k), w(k), u(k), \varphi(k))$$

Поскольку случайные переменные независимы

Получим:

$$p(a(j), b(j), w(j), u(j), \varphi(j))^{y^{j-1}} = p(a(j))p(b(j))p(w(j))p(u(j))p(\varphi(j))^{y^{j-1}}, 0 \leq j \leq N-1 \tag{4}$$

Условие минимума (3) запишутся в виде:

$$\frac{\partial J(k)}{\partial u(k)} = [\bar{a}w(k) + \bar{b}u(k)]\bar{b} + \sum^{kb} u(k) + \sum^{ab} w(k) = 0.$$

Решая это уравнение относительно $u(k)$, получим:

$$u^*(k) = -\frac{1}{\bar{b}^2 + \sum^{ab}} (\bar{a}\bar{b} + \sum^{ab})^T w(k). \tag{4}$$

Из закона (4) видим, что текущее управление зависит от наблюдаемой переменной, а также априорных ковариаций и. В случае отсутствия априорной неопределенности, т.е. и известных, закон управления приобретает вид

$$u^*(k) = -\frac{1}{\bar{b}} \bar{a}^T w(k) \tag{5}$$

И критерий достигает своего минимума ().

Оптимальное стохастическое управление (4) не является дуальным [1], поскольку вектор параметров $a(k)$ и коэффициент $b(k)$ предполагаются белыми (некоррелированными во времени), поэтому апостериорное обучение невозможно [4-8]. Однако оптимальная стратегия управления не должна игнорировать факт ненулевых априорных ковариаций, чему отвечает закон

(4), проявляя «осторожность» при формировании управлений, понижая их амплитуду в зависимости от ковариации .

Вместе с тем закон управления (4) имеет ограничения, связанные с определенными соотношениями между вектором параметров , коэффициентом и ковариацией . Анализ закона (4) показывает, что при определенных соотношениях, управляющее воздействие вместо компенсации внешнего возмущения по соответствующему каналу, усиливает его.

В работе [3] показано, что для линейной квадратической задачи такие соотношения, нарушение которых могут привести к неограниченному росту решения уравнения Риккати, были названы «порогом неопределенности».

Для того, чтобы управляющее воздействие было направлено на компенсацию возмущений при возникающих соотношениях параметров модели, модифицируем закон следующим образом:

$$u^*(k) = \gamma \cdot \frac{1}{\bar{a}^2 + \Sigma^{ab}} (\bar{a}\bar{b} + \Sigma^{ab})^T w(k), \quad (6)$$

Где определено по формуле:

$$\gamma = \begin{cases} 1, & \text{при } \bar{a}^T \cdot (\bar{a}\bar{b} + \Sigma^{ab}) < 0 \\ -1, & \text{при } \bar{a}^T \cdot (\bar{a}\bar{b} + \Sigma^{ab}) > 0 \end{cases}$$

Такой закон управления обеспечивает нахождение управляющего воздействия в «противофазе» действующему возмущению.

Результаты и обсуждение

Для иллюстрации разработанного алгоритма будет рассмотрен скалярный пример компенсации возмущения. Характеристики алгоритма будут сравниваться с работой алгоритма с использованием принципа достоверной эквивалентности.

Коэффициенты модели приняты: $\bar{a} = -0,5$, $\bar{b} = 0,3$, с $\Sigma^{ab} = \begin{bmatrix} 0,25 & 0,25 \\ 0,25 & 0,25 \end{bmatrix}$ ковариационной матрицей:

Истинными значениями параметров являлись , . Внешнее возмущение и случайная последовательность в объекте предполагаются белыми с нулевыми математическими ожиданиями и дисперсиями и . Длина интервала управления принята Для сравнения методом имитационного моделирования разработанного алгоритма (4) с достоверно эквивалентным алгоритмом (5) было сделано 10 реализаций, результаты которых сведены в таблицу 1.

Таблица 1. Сравнение метода имитационного моделирования разработанного алгоритма с достоверно эквивалентным алгоритмом

Алгоритм	Средние значения критерия	Среднеквадратическое отклонение	Диапазон изменения критерия качества
Достоверно эквивалентный алгоритм	2.2903	3.0984	0.0074-10.1833
Осторожный алгоритм	0.3856	0.4732	0.0007-1.9535

Как видно из таблицы 1 эффективность алгоритма (4) значительно выше, чем у алгоритма (5), разброс значений критерия качества (2) существенно ниже, что говорит о большей его предсказуемости. Причем моделирование алгоритма (4) производилось в условиях, при которых соотношения между априорными параметрами модели приводили к превышению порога неопределенности, а для достоверно эквивалентного алгоритма эта информация не учитывалась.

На рисунке 1 приведена зависимость критерия качества для алгоритмов (4) от номера шага.

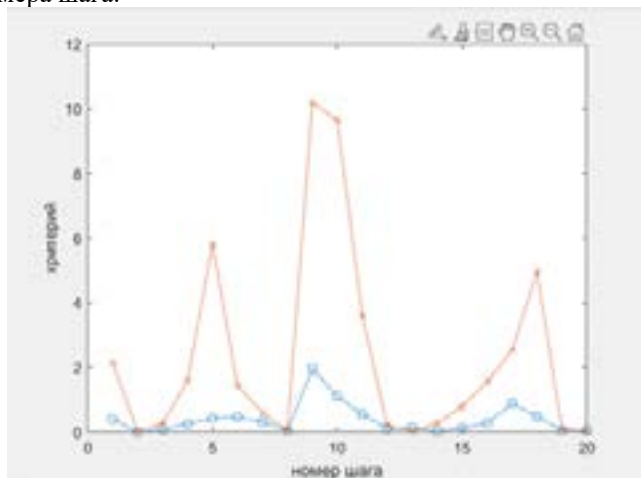


Рисунок 1 – Зависимость критерия качества от номера шага

На рисунке 1 приведены усредненные по 10 реализациям [9-11] кривые изменений критерия качества для алгоритмов (4) (маркер «x») и (6) (маркер «o»).

Выводы

В работе исследована проблема возникновения порога неопределенности для практической значимой проблемы компенсации нарушений. Предложен

адаптивный алгоритм управления, способный адаптироваться к превышению пределов неопределенности. Приведены результаты имитационного моделирования в виде зависимости критерия качества для алгоритмов от номера шага. Сравнение кривых показывает, что при возникновении явления порога неопределенности алгоритм (6) справляется лучше с его влиянием.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 **Фельдбаум, А. А.** Основы теории оптимальных автоматических систем [Текст]. – М.: Государственное издательство физико-математической литературы, 1963. – 120 с.

2 **Бар-Шалом, Я., Ци, Э.** Концепции и методы стохастического управления. В кн. Фильтрация и стохастическое управление в динамических системах [Текст]. – М.: Мир, 1980. – 230 с.

3 **Athans, M. R., Ku, S. B.** The Uncertainty Threshold Principle: Some Fundamental Limitations of Optimal Decision Making under Dynamic Uncertainty. – IEEE Trans. Automat. Contr, 1977. – vol.AC-22. – P. 491–495.

4 **Чубич, В. М.** Активная параметрическая идентификация стохастических динамических систем на основе планирования экспериментов [Текст]: дис. ... д-ра техн. наук: 20.02.2014 / В. И. Денисов. – Новосибирск, 2013. – 247 с.

5 **Льюнг, Л.** Идентификация систем. Теория для пользователя [Текст]. – М.: Наука, 1991. – 432 с.

6 **Цыпкин, Я. З.** Информационная теория идентификации [Текст]. – М.: Наука, 1995. – 336 с.

7 **Mehra, R. K.** Optimal Input Signals for Parameter Estimation in Dynamic Systems-Survey and New Results. – IEEE Transactions on Automatic Control, 1974 – Vol-19,6. – P. 753–768.

8 **Горский, В. Г., Адлер Ю. П., Талалай А. М.** Планирование промышленных экспериментов (модели динамики) [Текст]. – М.: Металлургия, 1978. – 112 с.

9 **Filatov, N. M., Unbehauen, H.** Survey of adaptive Dual Control Methods. – IEE Proc. Control Theory Appl, 2000. – Vol.147, – №1. – P.118–128.

10 **Lopes-Toledo, A. A.** Optimal Policies for Identification of Stochastic Linear Systems. – IEEE Trans, 2003. – AC-20 (6). – P.754-766.

11 **Padilla, C. S., Cruz, J. B.** Sensitivity Adaptive Feedback with Estimation Redistribution. – IEEE Transactions on Automatic Control, 1998. – Vol-AC–23,3 –P.445-451.

REFERENCES

- 1 **Fel'dbaum, A. A.** Osnovy teorii optimal'nyh avtomaticheskikh sistem. [Fundamentals of the theory of optimal automatic systems.][Text] –М. : Gosudarstvennoe izdatel'stvo fiziko-matematicheskoy literatury, 1963. – 120 p.
- 2 **Bar-Shalom, A., Ci, E.** Konceptcii i metody stohasticheskogo upravleniya. V kn. Fil'traciya i stohasticheskoe upravlenie v dinamicheskikh sistemah. [Concepts and methods of stochastic control.][Text] – М. : Mir, 1980. – 230 p.
- 3 **Athans, M. R., Ku, S. B.** The Uncertainty Threshold Principle: Some Fundamental Limitations of Optimal Decision Making under Dynamic Uncertainty. – IEEE Trans. Contr, 1977. – vol.AC-22.– P. 491–495.
- 4 **Chubich, V. M.** Aktivnaya parametricheskaya identifikaciya stoxasticheskix dinamicheskix sistem na osnove planirovaniya e`ksperimentov. [Active parametric identification of stochastic dynamical systems based on experimental planning] [Text]: dis. ... d-ra tekhn. nauk: 20.02.2014/V. I. Denisov. –Novosibirsk, 2013. –247 p.
- 5 **L'jung, L.** Identifikaciya sistem. Teoriya dlya pol'zovatelya. [Identification of systems. Theory for the user] [Text] – М. : Nauka, 1991. – 432 p.
- 6 **Супкин, Ya. Z.** Informacionnaya teoriya identifikacii. [Information theory of identification] [Text] –М. : Nauka, 1995. – 336 p.
- 7 **Mehra, R. K.** Optimal Input Signals for Parameter Estimation in Dynamic Systems-Survey and New Results. – IEEE Transactions on Automatic Control, 1974 – Vol-19,6. – P.753–768.
- 8 **Gorskij, V. G., Adler Yu. P., Talalaj A. M.** Planirovanie promy`shlenny`x e`ksperimentov (modeli dinamiki). [Planning of industrial experiments (dynamics models)] [Text] – М. :Metallurgiya, 1978. – 112 p.
- 9 **Filatov, N. M., Unbehauen, H.** Survey of adaptive Dual Control Methods. – IEE Proc. Control Theory Appl, 2000. – Vol.147, – №1. – P. 118–128.
- 10 **Lopes-Toledo, A. A.** Optimal Policies for Identification of Stochastic Linear Systems. – IEEE Trans, 2003. – AC-20 (6). – P. 754–766.
- 11 **Padilla, C. S., Cruz J. B.** Sensitivity Adaptive Feedback with Estimation Redistribution. – IEEE Transactions on Automatic Control, 1998. – Vol-AC-23,3. – P.445–451.

Материал поступил в редакцию 15.12.22.

*С. Е. Тасанбаев¹, К. Е. Арыстанбаев², Б. Т. Макажанов³

¹Л. Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті,
Қазақстан Республикасы, Астана қ.

²Оңтүстік – Қазақстан медицина академиясы,
Қазақстан Республикасы, Шымкент қ.

³М. Ауэзов атындағы Оңтүстік – Қазақстан университеті,

Қазақстан Республикасы, Шымкент қ
Материал баспаға 15.12.22 түсті.

КЕЗДЕЙСОҚ ПАРАМЕТРЛЕРІМЕН ЖҮЙЕДЕ ҚОЗДЫРУЛАРДЫ ӨТЕУДІҢ САҚТЫҚТЫҚ АЛГОРИТМІ

Толық емес ақпарат жағдайында объектіні оңтайлы стохастикалық басқару міндеті қарастырылады. Объект моделінің параметрлерін бағалаудың ықтималдық сипаттамаларына байланысты сақтық танытатын және белгісіздік шегінің пайда болуын ескеретін алгоритм ұсынылады. Белгісіздік шегінің пайда болуы қоздырулардың өтеудің маңызды міндеті үшін зерттеледі. Жұмыста, есеп қойылымында, $v(j+1)$ шығыс сигналын $w(j)$ бақыланатын қоздыру әсерінен тұрақтандыру міндеті берілген. Сипатталған матрицаның белгісіздігін ескеретін алгоритм ұсынылады, қажетті басқару сапасына сүйене отырып. Мақалада толығымен сипатталған қоздыру өтеудің скалярлық мысалы қарастырылады. Эквиваленттік сенімділік принципі қолдана отырып, жұмыс алгоритмінің сипаттамаларын алгоритмнің жұмысымен салыстырды. Басқару әсерді «қарсы фазада» қолданыстағы қоздыруды табу модификацияланған басқару заңын қамтамасыз етеді, онда басқарушылық әсер модель параметрлерінің туындайтын арақатынастарындағы бұзылулардың орнын толтыруға бағытталған. Әзірленген алгоритмді модельдеу нәтижелері келтірілген. Әзірленген алгоритмді имитациялық модельдеу әдісін сенімді эквивалентті алгоритммен салыстыру көрнекі түрде көрсетілген. Жұмыста ұсынылған алгоритмді модельдеу модельдің априорлық параметрлері арасындағы қатынастар белгісіздік шегінен асып кеткен жағдайда жүргізілді, ал сенімді эквивалентті алгоритм үшін бұл ақпарат ескерілмеді.

Кілтті сөздер: Басқару, алгоритм, модельдеу, оңтайландыру, қоздыру әсерлер.

*S. E. Tasanbayev¹, K. E. Arystanbayev², B. T. Makazhanov³

¹L. N. Gumilev Eurasian National University,

Republic of Kazakhstan, Astana

²South Kazakhstan Medical Academy,

Republic of Kazakhstan, Shymkent

³M. Auezov South Kazakhstan University,

Republic of Kazakhstan, Shymkent

Material received on 15.12.22

EXACT ALGORITHM FOR COMPENSATION OF DISTURBANCES A SYSTEM WITH RANDOM PARAMETERS

The problem of optimal stochastic control of an object in conditions of incomplete information is considered. An algorithm is proposed that being cautious depending on the probabilistic characteristics of the estimates of the parameters of the object model and takes into account the occurrence of the uncertainty threshold. The manifestation of the uncertainty threshold is investigated for the practically important problem of compensation of disturbances. The work shows a statement of the problem, where the problem of stabilizing the output signal from the influence of the observed disturbing influences $w(j)$ is given. An algorithm is proposed that takes into account the uncertainty of the described matrix, based on the required quality of control. The article considers a scalar example of perturbation compensation, which is described in detail. Using the principle of equivalence reliability, the characteristics of the algorithm were compared with the operation of the algorithm. Finding the control action in «antiphrosis» to the current disturbance provides a modified control law, in which the control action was aimed at compensating for disturbances in the resulting model parameter ratios. The results of simulation modeling of the developed algorithm are presented. The comparison of the simulation method of the developed algorithm with a reliably equivalent algorithm is clearly shown. The work shows, the simulation of the proposed algorithm was carried out under conditions in which the relations between the a priori parameters of the model led to an excess of the uncertainty threshold, and for a reliably equivalent algorithm, this information wasn't taken into account.

Keywords: algorithm, modeling, control, optimization, disturbing effects

Теруге 15.12.2022 ж. жіберілді. Басуға 30.12.2022 ж. қол қойылды.

Электронды баспа

3,44 Мб RAM

Шартты баспа табағы 23.59. Таралымы 300 дана. Бағасы келісім бойынша.

Компьютерде беттеген: А. К. Мыржикова

Корректор: А. Р. Омарова

Тапсырыс № 4019

Сдано в набор 15.12.2022 г. Подписано в печать 30.12.2022 г.

Электронное издание

3,44 Мб RAM

Усл. печ. л. 23.59. Тираж 300 экз. Цена договорная.

Компьютерная верстка: А. К. Мыржикова

Корректор: А. Р. Омарова, Д. А. Кожас

Заказ № 4019

«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