

ISSN 1811-1858

# ҒЫЛЫМИ ЖУРНАЛ



С. ТОРАЙҒЫРОВ АТЫНДАҒЫ  
ПАВЛОДАР МЕМЛЕКЕТТІК  
УНИВЕРСИТЕТІ

## ЭНЕРГЕТИКАЛЫҚ СЕРИЯ



1'2013

ПМУ ХАБАРШЫСЫ  
ВЕСТНИК ПГУ

**Е. Ж. Сарсикеев\***, **Д. Ю. Ляпунов\***, **Р. М. Мустафина\*\***,  
**А. Д. Тастенов\*\***

## **СИСТЕМА РЕГУЛИРОВАНИЯ ВЕТРО-ДИЗЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА**

*Представлена структура ветро-дизельного комплекса, обеспечивающая его устойчивый режим работы. Произведены настройки контуров регулирования тока и напряжения на линейный оптимум. Выполнен анализ полученных динамических характеристик и установлена необходимость настройки обоих каналов регулирования.*

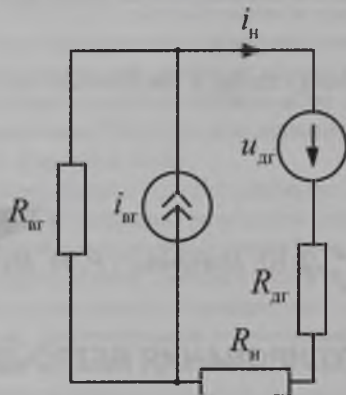
В настоящее время идея использования возобновляемых источников энергии (ВИЭ) для обслуживания автономных потребителей испытывает стремительное и устойчивое развитие. Наибольшее количество таких потребителей расположено в удаленных районах Казахстана, Сибири, Дальнего Востока.

К распространенным ВИЭ относятся ветроэлектростанции (ВЭС). Но основным их недостатком является неравномерность выработки электроэнергии, что требует решения при электроснабжении автономных потребителей, требующих бесперебойного электроснабжения. Эту проблему отчасти можно решить при использовании дизельных электростанций (ДЭС), однако для наиболее удаленных потребителей транспортная составляющая стоимости привозного топлива достигает 70...80% [1]. С этой целью используются ветро-дизельные комплексы (ВДК), объединяющие в себе дизель-генераторы, ветрогенераторы, силовые преобразователи, а также накопители энергии.

Электрическая принципиальная схема, отражающая структуру ВДК, приведена на рисунке 1.

На рисунке 1 дизель-генератор выступает в качестве источника напряжения, а ветрогенератор – в качестве источника тока.

Имитационная модель незамкнутой структуры ВДК, разработанная в среде MatlabSimulink, приведена на рисунке 2.



$R_{вг}$ ,  $R_{дг}$  – соответственно сопротивления цепей ветрогенератора и дизель-генератора, учитывающие параметры обмоток и преобразователей;

$R_{н}$  – эквивалентное сопротивление нагрузки;  $i_{вг}$  – ток ветрогенератора;

$u_{дг}$  – напряжение дизель-генератора;  $i_{н}$  – ток нагрузки.

Рисунок 1 – Электрическая принципиальная схема ВДК

При моделировании приняты следующие допущения: 1) не учитываются инерционные свойства вращающихся масс дизель-генератора и ветрогенератора, то есть сигналы задания на ток  $i_{вг}$  и напряжение  $u_{дг}$  полагаются постоянными величинами ( $i_{вг}^{зад} = 10$  А,  $u_{дг}^{зад} = 600$  В), что объясняется невозможностью контролировать выработку электроэнергии генераторами при помощи внешних воздействий; 2) сопротивление нагрузки присоединено к шине постоянного тока; 3) силовые преобразователи дизель-генератора и ветрогенератора имеют идентичные параметры.

Параметры ВДК: 1) дизель-генератор:  $k_{дг} = 0,8$  – коэффициент передачи;  $T_e^{дг} = 0,1$  с – электромагнитная постоянная времени;  $k_{дг}^{conv} = 1$  – коэффициент передачи силового преобразователя;  $T_e^{conv} = 0,00167$  с – малая некомпенсируемая постоянная времени; 2) ветрогенератора:  $k_{вг} = 0,71$  – коэффициент передачи;  $T_e^{вг} = 0,05$  с – электромагнитная постоянная

времени;  $k_{\text{пр}}^{\text{conv}} = 1$  – коэффициент передачи силового преобразователя;  
 $T_{\text{пр}}^{\text{conv}} = 0,00167 \text{ с}$  – малая некомпенсируемая постоянная времени.

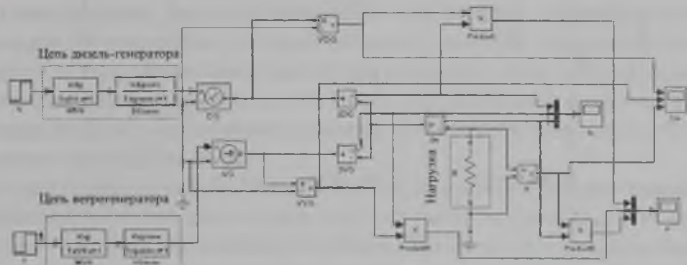


Рисунок 2 – Имитационная модель замкнутой структуры ВДК в среде Matlab

Переходные характеристики по токам и напряжению на нагрузке представлены соответственно на рисунках 3 и 4.

Из анализа зависимостей переходных токов рисунка 3 следует, что ток нагрузки в любой момент времени определяется по первому закону Кирхгофа  $i_{\text{н}} = i_{\text{дг}} + i_{\text{вг}}$ . Быстродействие системы невелико. Время переходного процесса для каждого из графиков определялось исходя из принятой 5%-ной зоны допустимых отклонений. Время переходного процесса по току нагрузки составляет  $t_{\text{н}}^{\text{пр}} = 0,3 \text{ с}$ , что в два раза больше времени переходного процесса по току ветрогенератора  $t_{\text{вг}}^{\text{пр}} = 0,15 \text{ с}$ , но меньше времени переходного процесса по току дизель-генератора  $t_{\text{дг}}^{\text{пр}} = 0,36 \text{ с}$ . Длительность переходного процесса по току нагрузки закономерно совпадает с длительностью переходного процесса по напряжению на нагрузке (рисунок 4).

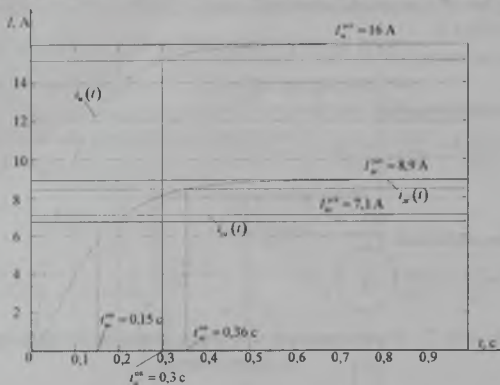


Рисунок 3 – Переходные характеристики по току ветрогенератора  $i_{вр}(t)$ , току дизель-генератора  $i_{дз}(t)$  и току нагрузки  $i_n(t)$  в незамкнутой структуре ВДК

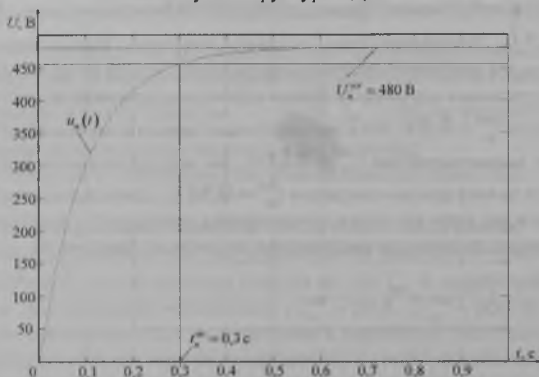


Рисунок 4 – Переходные характеристики по напряжению на нагрузке  $u_n(t)$  в незамкнутой структуре ВДК

Ошибка по напряжению дизель-генератора составила

$$\varepsilon_U^{дз} = U_{дз}^{зад} - U_n^{зад} = 600 - 480 = 120 \text{ В.}$$

Ошибка по току ветрогенератора равна:

$$\varepsilon_I^{\text{нр}} = I_{\text{нр}}^{\text{зад}} - I_{\text{нр}}^{\text{уст}} = 10 - 7,1 = 2,9 \text{ А.}$$

Таким образом, быстродействие ВДК определяется параметрами того из каналов регулирования, который обладает меньшим быстродействием. В данном случае наименьшее быстродействие имеет канал регулирования напряжения дизель-генератора. Оба канала регулирования имеют ошибку по управляющему воздействию, которая значительно превышает 5% от требуемого сигнала задания.

С целью увеличения быстродействия системы с обеспечением основных показателей качества рассмотрим одну из распространенных настроек контуров – настройку на линейный оптимум. Данная настройка обеспечивает нулевую ошибку по управляющему воздействию и перерегулирование [2]. Время переходного процесса по управлению при этом составит  $t^{\text{нм}} = 9,5 \cdot T_{\mu}$ , где  $T_{\mu} = T_{\text{нр}}^{\text{эсм}} = T_{\text{нр}}^{\text{сст}} = 0,00167 \text{ с}$  – малая некомпенсированная постоянная времени.

Произведем настройку контуров на линейный оптимум. Для этого используем желаемую передаточную функцию разомкнутой системы

$$W_{\text{разло}}^{\text{нр}}(p) = \frac{1}{4 \cdot T_{\mu} \cdot p \cdot (T_{\mu} \cdot p + 1)};$$

для канала регулирования напряжения:

$$\begin{aligned} W_{\text{нр}}^U(p) &= \frac{W_{\text{разло}}^{\text{нр}}(p)}{W_{\text{нр}}^U(p)} = \frac{1}{4 \cdot T_{\mu} \cdot p \cdot (T_{\mu} \cdot p + 1)} \cdot \frac{(T_s^{\text{нр}} \cdot p + 1) \cdot (T_{\mu} \cdot p + 1)}{K_{\text{нр}} \cdot K_{\text{нр}}^{\text{эсм}} \cdot K_{\text{нр}}^U} = \\ &= \frac{(T_s^{\text{нр}} \cdot p + 1)}{4 \cdot T_{\mu} \cdot K_{\text{нр}} \cdot K_{\text{нр}}^{\text{эсм}} \cdot K_{\text{нр}}^U \cdot p} = K_{\text{нр}}^U \cdot \frac{T_s^{\text{нр}} \cdot p + 1}{T_s^{\text{нр}} \cdot p} \end{aligned}$$

где  $W_{\text{нр}}^U(p)$  – передаточная функция разомкнутого контура регулирования напряжения,  $T_s^{\text{нр}}$  – электромагнитная постоянная времени дизель-генератора,  $K_{\text{нр}}$  – коэффициент передачи дизель-генератора,  $K_{\text{нр}}^{\text{эсм}}$  – коэффициент передачи преобразователя напряжения,  $K_{\text{нр}}^U = 1$  – коэффициент обратной связи по напряжению,  $K_{\text{нр}}^U = \frac{T_s^{\text{нр}}}{4 \cdot T_{\mu} \cdot K_{\text{нр}} \cdot K_{\text{нр}}^{\text{эсм}} \cdot K_{\text{нр}}^U} = \frac{0,1}{4 \cdot 0,00167 \cdot 0,8 \cdot 1 \cdot 1} = 18,71$  – коэффициент передачи регулятора напряжения.

Вводим данный регулятор в контур регулирования напряжения. Соответствующая схема приведена на рис. 5.

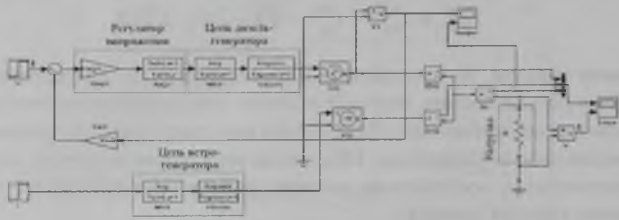


Рисунок 5 – Схема ВДК с настроенным на линейный оптимум каналом регулирования напряжения

Переходные процессы по токам и напряжению приведены соответственно на рисунках 6 и 7.

Время переходного процесса составило 0,016 с, что на один порядок меньше, чем в исходной системе без обратных связей.

Отметим одну важную особенность: настроенный канал регулирования напряжения ВДК ускоряет переходные процессы не только в канале регулирования напряжения (рисунок 7), но и в нагрузке (кривая  $i_{\text{н}}(t)$  на рисунке 6). Определяющую роль при этом играет именно дизель-генератор, канал же регулирования тока ВДК при этом работает на порядок медленнее, вследствие того, что он не настроен.

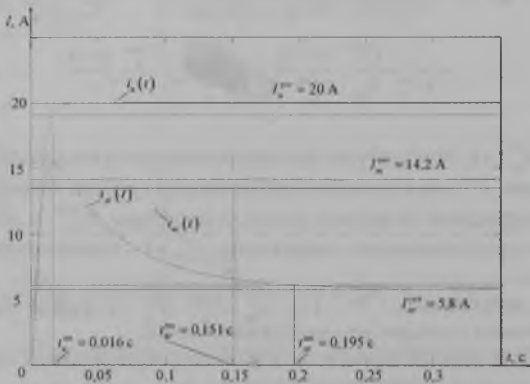


Рисунок 6 – Переходные характеристики по току ветрогенератора  $i_{\text{вг}}(t)$ , току дизель-генератора  $i_{\text{дг}}(t)$  и току нагрузки  $i_{\text{н}}(t)$  при настройке контура напряжения ВДК на линейный оптимум

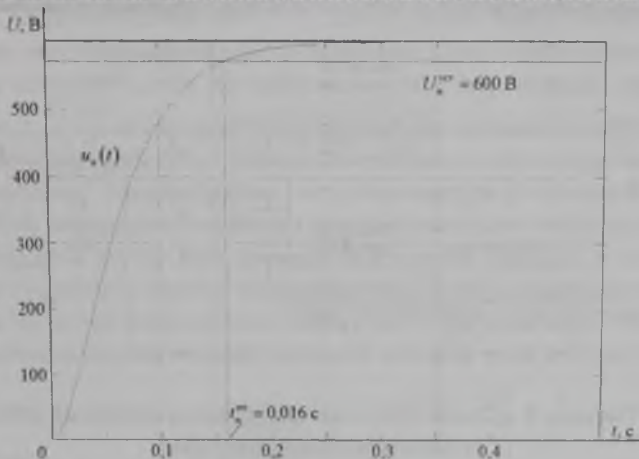


Рисунок 7 – Переходные характеристики по напряжению на нагрузке  $u_n(t)$  при настройке контура напряжения ВДК на линейный оптимум

На следующем этапе произведем настройку на линейный оптимум канала регулирования тока ВДК.

$$W_{\text{пер}}^I(p) = \frac{W_{\text{разомк}}^{\text{от}}(p)}{W_{\text{раз}}^I(p)} = \frac{1}{4 \cdot T_{\mu} \cdot p \cdot (T_{\mu} \cdot p + 1)} \cdot \frac{(T_{\sigma}^{\text{вт}} \cdot p + 1) \cdot (T_{\mu} \cdot p + 1)}{K_{\text{вт}} \cdot K_{\text{вт}}^{\text{conv}} \cdot K_{\text{ос}}^I} =$$

$$= \frac{(T_{\sigma}^{\text{вт}} \cdot p + 1)}{4 \cdot T_{\mu} \cdot K_{\text{вт}} \cdot K_{\text{вт}}^{\text{conv}} \cdot K_{\text{ос}}^I \cdot p} = K_{\text{пер}^I} \cdot \frac{T_{\sigma}^{\text{вт}} \cdot p + 1}{T_{\sigma}^{\text{вт}} \cdot p}$$

где  $W_{\text{разомк}}^{\text{от}}(p)$  – передаточная функция разомкнутого контура регулирования напряжения,  $T_{\sigma}^{\text{вт}}$  – электромагнитная постоянная времени ветрогенератора,  $K_{\text{вт}}$  – коэффициент передачи дизель-генератора,  $K_{\text{вт}}^{\text{conv}}$  – коэффициент передачи преобразователя тока,  $K_{\text{ос}}^I$  – коэффициент обратной связи по току,  $K_{\text{пер}^I} = \frac{T_{\sigma}^{\text{вт}}}{4 \cdot T_{\mu} \cdot K_{\text{вт}} \cdot K_{\text{вт}}^{\text{conv}} \cdot K_{\text{ос}}^I} = \frac{0,05}{4 \cdot 0,00167 \cdot 0,71 \cdot 1 \cdot 1} = 10,54$  – коэффициент передачи регулятора тока.

Схема при настроенном на линейный оптимум канале регулирования тока и настроенном канале регулирования напряжения приведена на рисунке 8.



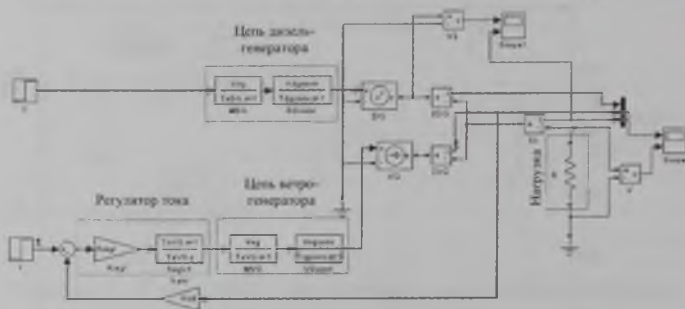


Рисунок 8 – Схема ВДК с настроенным на линейный оптимум каналом регулирования тока

Переходные характеристики по токам приведены на рисунке 9.

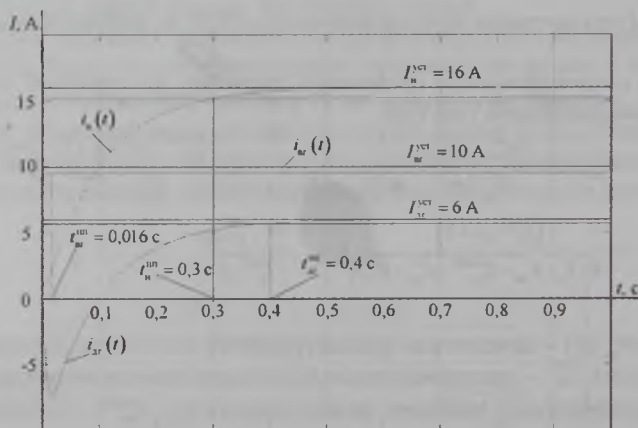


Рисунок 9 – Переходные процессы при настроенном на линейный оптимум канале регулирования тока ВДК

Анализ характеристик показывает, несмотря на то, что быстродействие канала регулирования тока увеличилось (верхняя кривая на рисунке 9), общее быстродействие системы не изменилось по отношению к исходной (см. рисунок 3). Переходный процесс по напряжению и его показатели качества полностью соответствуют аналогичному процессу в исходной системе (рисунок 4). Кроме того, имеется статическая ошибка по напряжению, то есть установившееся значение напряжения на нагрузке не соответствует

заданному значению из-за того, что контур напряжения разомкнут. В дополнение, преобразователь дизель-генератора в рассматриваемом случае вынужден потреблять ток на начальном этапе переходного процесса (см. кривую  $i_{\text{ин}}(t)$  на рисунке 9). В реальной же системе это невозможно, так как он не может работать в режиме инвертора и отдавать энергию в цепь дизель-генератора. Таким образом, настройка контура регулирования тока без настройки контура регулирования напряжения нецелесообразна, так как это не приведет к улучшению качества переходного процесса в системе и не позволит устранить ошибку по напряжению в установившемся режиме.

Рассмотрим еще один случай: замкнем канал регулирования тока не по току ветрогенератора, как на схеме рисунка 8, а по току нагрузки (рисунок 10).

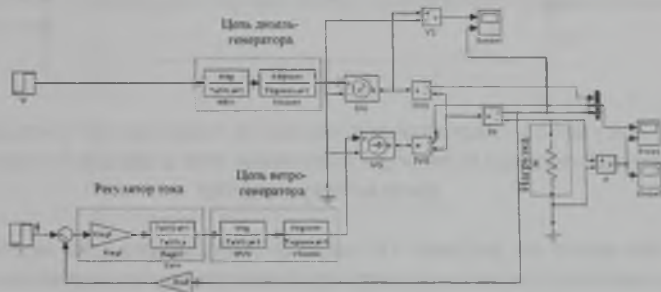


Рисунок 10 – ВДК с настроенным на линейный оптимум каналом регулирования тока с обратной связью по току нагрузки

В рассматриваемом случае переходные процессы по токам дизель-генератора и ветрогенератора носят расходящийся характер (рисунок 11), несмотря на то, что ток нагрузки имеет установившееся значение.

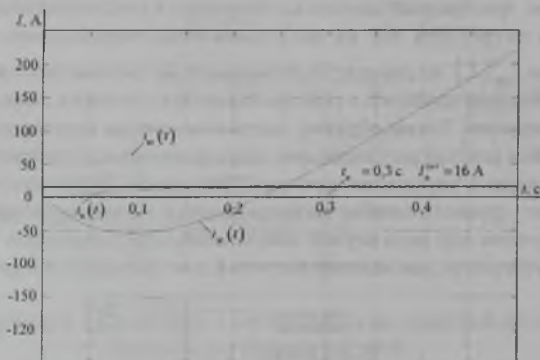


Рисунок 11 – Переходные процессы по токам при настроенном на линейный оптимум контуре регулирования тока и заведении обратной связи по току нагрузки

Как видно из рисунка 11, канал регулирования тока неустойчив вследствие того, что ток ветрогенератора неконтролируемо возрастает, однако суммарный ток нагрузки постоянен и соответствует заданию. Следовательно, необходимо вводить узел токоограничения. Канал регулирования напряжения устойчив, но имеет статическую ошибку по напряжению. Переходный процесс по напряжению абсолютно аналогичен переходному процессу в исходной системе (рисунок 4).

Теперь выясним показатели работы ВДК при настройке обоих контуров на линейный оптимум (рисунок 12).

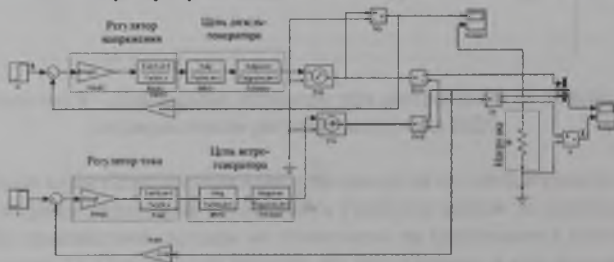


Рисунок 12 – ВДК с обоими контурами, настроенными на линейный оптимум

Графики зависимостей переходных процессов приведены на рисунке 13.

Из рисунка 13 видно, что ветрогенератор полностью обеспечивает ток 10 А. Рассматриваемый дизель-генератор создается для поддержания напряжения 600 В на шине постоянного тока. Как показывает анализ ошибки регулирования практически равны нулю.

Длительность переходных процессов в рассматриваемом случае одинакова как по току, так и по напряжению. Таким образом, из проведенного исследования следует, что требуется настраивать оба канала и ток нагрузки зависит непосредственно от ее параметров. Если тока ветрогенератора не достаточно, то этот недостаток тока восполняется от дизель-генератора, тем самым обеспечивается постоянство тока на потребителе, что является необходимым условием для бесперебойного электроснабжения автономных потребителей.

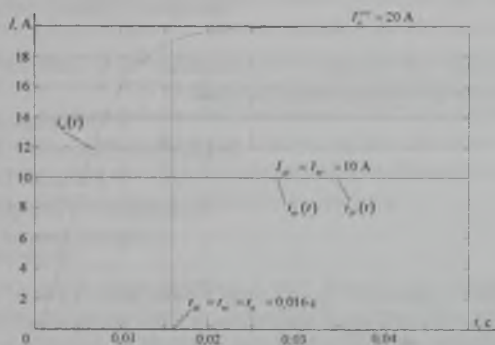


Рисунок 13 – Переходные процессы при настройке обоих каналов регулирования на линейный оптимум

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства образования и науки РФ по приоритетным направлениям науки и техники (регистрационный номер НИР 7.5245.2011; номер государственной регистрации 01201254010 от 15.03.2012).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Суржикова, О. А., Никулина, И. Е. Техничко-экономические аспекты энергообеспечения изолированных потребителей // Известия Томского политехнического университета. – 2005. – Т. 308. – №7. – С. 223–226.
- 2 Кояин, Н. В., Мальцева, О. П., Удут, Л. С. Оптимизация контуров регулирования систем электропривода по типовым методикам // Известия Томского политехнического университета. – 2005. – Т. 308. – №7. – С. 120–125.

\*Национальный исследовательский  
Томский политехнический университет, г. Томск;  
\*\*Павлодарский государственный университет  
имени С. Торайгырова, г. Павлодар.  
Материал поступил в редакцию 20.04.13.

*Е. Сарсикеев\*, Д. Ляпунов\*, Р. Мұстафина\*\*, А. Тастенов\*\**

**Желдік-дизельдік кешеннің реттеу жүйесі**

\*Томбы саяси техникалық  
Ұлттық зерттеу университеті, Томбы қ.;  
\*\*С. Торайгыров атындағы  
Павлодар мемлекеттік университеті, Павлодар қ.  
Материал 20.04.13 редакцияға түсті.

*E. Sarsikeev\*, D. Lyapunov\*, R. Mustafina\*\*, A. Tastenov\*\**

**Control system of wind-diesel complex**

\*National research Tomsk  
Polytechnic University, Tomsk, Russia;  
\*\*Pavlodar State University  
named after S. Toraigyrov, Pavlodar.  
Material received on 20.04.13.

*Желдік-дизельдік кешеннің орнықты жұмыс режимін қамтамасыз ететін құрылымы келтірілген. Сызықтық оптимумда ток пен кернеуді реттеу контурларын баптау жүргізілген. Алынған үдемелі сипаттамаларға талдау жасалынып, реттеудің екі арнасын да баптау қажеттілігі анықталған.*

*Wind-diesel complex's structures, providing its stable operation are presented. Control loops of current and voltage's setting on the line optimum have been made. The analyses have been done of the obtained dynamic characteristics and the need to configure the two control channels has been established.*