© Савенко А.Е., Савенко П.С.

(cc) BY

**УДК 621.313** **DOI:10.30724/1998-9903-2022-24-4-105-115**

# ИСПОЛЬЗОВАНИЕ И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ АВТОМАТИЧЕСКИХ СИСТЕМ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ РАССРЕДОТОЧЕННЫМИ ИСТОЧНИКАМИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В ЛОКАЛЬНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

**Савенко А.Е., Савенко П.С.**

**Керченский государственный морской технологический университет,**
**г. Керчь, Республика Крым, Россия**
*Savenko-70@mail.ru*

***Резюме:*** *ЦЕЛЬ. Рассмотреть применение автоматических систем для управления рассредоточенными источниками электроэнергии в локальных электрических системах. Исследовать возможности расширения функций таких автоматических систем управления для повышения качества электроэнергии с точки зрения устранения обменных и синфазных колебаний мощности. МЕТОДЫ. Исследования дизель-генераторных агрегатов, параллельно работающих в локальных электрических системах, проведены методами математического моделирования. В математической модели учтено наличие явления «люфта» в контурах регулирования частоты вращения. РЕЗУЛЬТАТЫ. Отмечена целесообразность применения в локальных электрических системах аккумуляторных батарей, выпрямительных и инверторных преобразователей. Экспериментальные исследования в локальной электрической системе выявили существование обменных и синфазных колебаний мощности. Математическое моделирование также подтвердило возникновение в локальной электрической системе обменных колебаний мощности из-за «люфта» в контуре регулятора частоты, а также синфазных колебаний мощности из-за различия коэффициентов передачи регуляторов частоты у параллельно работающих дизель-генераторных агрегатов. Получена карта зависимости амплитуды обменных колебаний мощности от зазоров люфта и карта зависимости амплитуды синфазных колебаний мощности от значений коэффициента усиления регулятора частоты. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Установлена возможность устранения обменных и синфазных колебаний мощности уменьшением и обеспечением равенства коэффициентов передачи регуляторов частоты. Добавление функции устранения обменных и синфазных колебаний мощности в системы автоматического управления рассредоточенными источниками электроэнергии в локальных электрических системах обеспечивает поддержание необходимого качества электроэнергии в квазиустановившихся режимах работы.*

***Ключевые слова:*** *локальные электрические сети; энергосистема; обменные колебания мощности; синфазные колебания мощности; рассредоточенные источники электроэнергии.*

**Для цитирования:** Савенко А.Е., Савенко П.С. Использование и совершенствование автоматических систем для управления рассредоточенными источниками электроэнергии в локальных электрических системах // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2022. Т. 24. № 4. С. 105-115. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-4-105-115.

# USE AND IMPROVEMENT OF AUTOMATIC SYSTEMS FOR CONTROL OF REDUCED ELECTRIC POWER SOURCES IN LOCAL ELECTRIC NETWORKS

**AE. Savenko, PS. Savenko**

**Kerch State Maritime Technological University, Kerch, Republic of Crimea, Russia**
*savenko-70@mail.ru*

***Abstract:*** *THE PURPOSE. Consider the use of automatic systems for controlling reduced sources of electricity in local electrical networks. Explore the possibilities of expanding the functions of such automatic control systems to improve the quality of electricity in terms of eliminating power exchange and common-mode oscillations. METHODS. Studies of diesel*

*generator units operating in parallel in local electrical networks were carried out using mathematical modeling methods. The mathematical model takes into account the presence of the "backlash" phenomenon in the speed control loops. RESULTS. The expediency of using batteries, rectifier and inverter converters in local electrical networks is noted. Experimental studies in the local electrical network revealed the existence of power exchange and common-mode oscillations. Mathematical modeling also confirmed the occurrence of power exchange oscillations in the local electrical network due to the "backlash" in the frequency controller circuit, as well as power common-mode oscillations due to the difference in the frequency controller transmission coefficients for diesel generator units operating in parallel. A map of the dependence of the amplitude of power exchange oscillations on backlash gaps and a map of the dependence of the amplitude of power common-mode oscillations on the values of the gain of the frequency controller are obtained. CONCLUSION. The possibility of eliminating power exchange and common-mode oscillations by reducing and ensuring equality of the transmission coefficients of frequency controllers has been established. Adding the function of eliminating power exchange and common-mode oscillations to automatic control systems for reduced sources of electricity in local electrical networks ensures that the required quality of electricity is maintained in quasi-steady operating modes.*

***Keywords***: *local electric network; power system; power exchange oscillations; power common-mode oscillations; reduced electric power sources.*

**For citation:** Savenko AE, Savenko PS. Use and improvement of automatic systems for control of reduced electric power sources in local electric networks. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2022;24(4):105-115. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-4-105-115.

***Введение***

Как показывает опыт эксплуатации различных электроэнергетических объектов, в том числе электростанций, наилучшим образом это достигается применением автоматизированных систем управления (АСУ) [1, 2].

Для моделирования оптимальных режимов работы групп рассредоточенных источников электроэнергии (РИЭ), объединенных функциональными связями, можно найти целый ряд методов и подходов, нашедших широкое применение в традиционной электроэнергетике [3, 4].

Результаты моделирования оптимальных траекторий изменения состояний для объединенных групп РИЭ с применением принципа максимума Понтрягина и теории подобия позволили получить обобщения, которые, в свою очередь, дают возможность сформировать алгоритмы оптимального планирования совместной эксплуатации таких источников [5, 6]. Для совокупности разнотипных РИЭ, работающих в одной распределительной сети, например солнечной и гидроэлектростанции, получены условия оптимальности и разработаны алгоритмы согласования их функционирования. Важным преимуществом разработанных математических методов и алгоритмов является их ориентированность на постепенный переход к оперативному управлению функционированием РИЭ в электрических сетях (ЭС) с привлечением современных средств автоматизации [7-9].

Учитывая приведенные выше особенности, а также пространственную удаленность объекта управления (отдельные группы РИЭ объединены распределительными электрическими сетями) согласовать их функционирование для выполнения совместной задачи без применения средств автоматического управления является сложным и малоэффективным [10-12]. Для организации автоматизированной системы управления необходимо идентифицировать взаимосвязи между объектами и условия оптимальности процессов, происходящих в рамках управляемой системы [13].

На сегодняшний день в литературных источниках [1, 2, 4] содержится крайне мало информации о локальных электротехнических комплексах с точки зрения взаимного влияния рассредоточенных источников электроэнергии и колебаний мощности. А результатов экспериментальных исследований практически нет совсем, в том числе и о качестве электроэнергии на них [5, 6, 10]. Между тем, это очень важный вопрос для любого электротехнического комплекса, а тем более локальной электрической системы в условиях работы соизмеримых по мощности источников и потребителей электроэнергии [13]. Большую помощь в решении этой задачи может оказать опыт эксплуатации электротехнических комплексов морских судов [14, 15, 16]. Конечно, при этом необходимо учитывать доминирующее применение дизель-генераторных агрегатов на морских судах в

отличие от береговых локальных электрических систем, где применяются источники различные по своей природе. Вместе с тем, в обоих случаях автономные локальные системы имеют режимы работы с централизованной системой электроснабжения и без таковой. Изучение особенностей работы локальных электрических систем и улучшение характеристик ее работы является чрезвычайно важными задачами при освоении Арктических территорий в условиях Западных санкций против Российской Федерации.

Научная значимость работы заключается в выявлении новых факторов, влияющих на качество работы рассредоточенных источников в локальных электрических системах. Предложено ввести функцию устранения обменных и синфазных колебаний мощности в устройства управления рассредоточенными источниками электроэнергии в локальных электрических системах. А также ввести в структуру локальных электрических систем аккумуляторные батареи, выпрямительные и инверторные блоки.

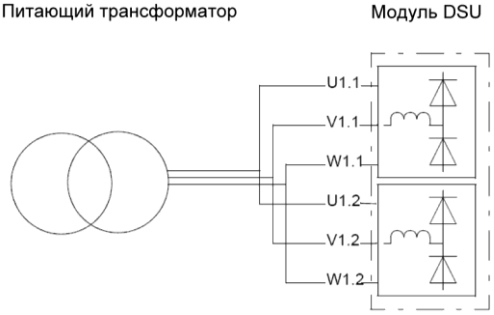
Практическая значимость исследования состоит в том, что в работе использованы результаты реальных экспериментов в локальной электрической системе.

Результаты исследования могут быть применены в разрабатываемых и существующих системах автоматического управления рассредоточенными источниками электроэнергии в локальных электрических системах путем их допрограммирования и введением дополнительных линий связи.

***Материалы и методы***

Потребители в локальных электрических системах с рассредоточенными источниками электроэнергии являются обычными устройствами, как и в централизованной электрической системе бесконечной мощности. Поэтому, в локальных электрических системах с рассредоточенными источниками электроэнергии необходимо обеспечить выполнение всех требований к качеству электрической энергии. Источниками электрической энергии в локальных электрических системах могут быть дизель-генераторные агрегаты, ветровые и солнечные электрогенерирующие мощности, малые гидроэлектростанции, аккумуляторные батареи, приливные электростанции, когенерационные установки, парогазовые и газотурбинные установки и другие. Учитывая такое разнообразие рассредоточенных источников электроэнергии, становится понятным важность и специфика обеспечения качества электрической энергии в локальных электрических системах, а также необходимость применения систем автоматического управления.

Для интегрирования рассредоточенных источников из состава локальной электрической системы, частота которых зависит от природных факторов и которые не имеют регуляторов частоты, возможно предусмотреть применение шестипульсных или двенадцатипульсных диодных выпрямителей (рис. 1) и дальнейшего инвертирования постоянного напряжения в переменное. Напряжения и токи после инверторов формируются с максимально идеальными параметрами близкими к системным и не подвержены возникновению в них каких-либо колебаний мощности в квазиустановившихся режимах работы. Коме того, целесообразно предусмотреть наличие в локальной электрической системе значительных по емкости аккумуляторных батарей, которые будут работать на сеть через инверторы. Аккумуляторные батареи позволят компенсировать недостаток электрической энергии во время уменьшения ее выработки рассредоточенными источниками локальной электрической сети, что может происходить в случае зависимости от природных факторов таких как, солнце, ветер, волнение водной поверхности и т.д. Кроме того, аккумуляторные батареи могут накапливать рекуперируемую энергию, поступающую в локальную сеть от ее потребителей в некоторых режимах работы. А в случае наличия периодической резкопеременной нагрузки аккумуляторные батареи смогут поставлять накопленную энергию, в том числе и рекуперируемую, в локальную электрическую сеть практически мгновенно, тем самым исключая провалы и дефицит мощности до запуска резервных источников или увеличения производительности работающих мощностей.




*а)*

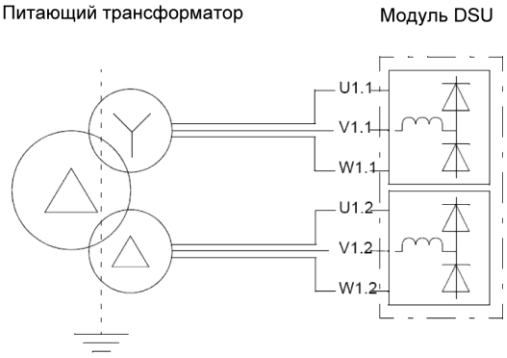



Рис. 1. Схемы *а)* шести и *б)* двенадцатипульсного соединения.

*Fig. 1. Diagrams of the a) 6- and b) 12-piece connection.*

Наибольший интерес с точки зрения влияния на параметры электрической энергии в локальной электрической сети представляют дизель-генераторные агрегаты. Для исследования проведем математическое моделирование и натурный эксперимент.

Синхронные генераторы моделируются уравнениями Парка-Горева в $d$ и $q$ координатах неподвижных относительно ротора:

$$\frac{\mathrm{d}\psi_{sd}}{\mathrm{d}\tau} = \psi_{sq}\omega_r - r_s i_{sd} - u_{sd},$$

$$\frac{\mathrm{d}\psi_{sq}}{\mathrm{d}\tau} = -\psi_{sd}\omega_r - r_s i_{sq} - u_{sq},$$

$$\frac{\mathrm{d}\psi_f}{\mathrm{d}\tau} = u_f - r_f i_f,$$

где $\psi_{sd}, \psi_{sq}$ - проекции векторов потокосцеплений статора на оси $d$, $q$; $u_{sd}, u_{sq}$ - проекции вектора напряжения; $r_s$ - сопротивление статорной обмотки; $i_{sd}, i_{sq}$ - проекции вектора тока; $\psi_f, i_f, u_f, r_f$ - потокосцепление, ток, напряжение и сопротивление обмотки возбуждения; $\tau$ - относительное время:

$$\psi_{sd} = (L_d + L_{sd}) i_{sd} + L_d i_f,$$

$$\psi_{sq} = (L_q + L_{sq}) i_{sq},$$

$$\psi_f = L_d i_{sd} + L_f i_f,$$

где $L_{sd}, L_{sq}$ - индуктивности рассеяния статорной обмотки; $L_d, L_q$ - индуктивности главного контура намагничивания по осям $d$, $q$; $L_f$ - индуктивность обмотки возбуждения.

Бесщеточный синхронный генератор имеет в своем составе возбудитель и пропорциональный регулятор напряжения, которые описаны следующим дифференциальным уравнением

$$\frac{du_f}{dt} = [-u_f + K_f (U_0 - u_m)] / T_B,$$

где $K_f$ - коэффициент передачи регулятора, $u_m = \sqrt{u^2_{sd} + u^2_{sq}}$, $U_0$ - задание по напряжению.

В математической модели используется уравнение дизеля, который является приводным двигателем агрегата:

$$J_m \frac{d\omega_r}{d\tau} = M_d - M_g,$$

$$M_d = K_m h,\ M_g = \psi_{sq} i_{sd} - \psi_{sd} i_{sq},$$

где $J_m$ - приведенный момент инерции вала дизеля и ротора генератора, $M_d$ - механический момент дизеля, $M_g$ - электромагнитный момент сопротивления, развиваемый генератором, $h$ – положение топливной рейки, $K_m$ - коэффициент усиления дизеля по частоте вращения.

Отдельным уравнением описан регулятор частоты вращения дизеля, который представлен апериодическим звеном первого порядка:

$$T_\omega \frac{dh}{dt} = K_\omega U_\varepsilon - h\,,$$

где $T_\omega$ - постоянная времени исполнительного механизма, $K_\omega$ - коэффициент усиления регулятора, $U_\varepsilon$ - сигнал рассогласования между заданной $\omega_{r0}$ и действительной $\omega_r$ частотами вращения дизеля:

$$U_\varepsilon = \begin{Bmatrix} U_\varepsilon = const \text{ для } \left|\mathrm{U}_\varepsilon - \mathrm{k}\varepsilon\right| \le D_n \\ k\left(\varepsilon - D_n sign\left(\frac{dU_\varepsilon}{dt}\right)\right) \text{ для } \frac{\mathrm{dU}_\varepsilon}{\mathrm{dt}} \ne 0 \end{Bmatrix},$$

где $k$ – коэффициент передачи, $D_n$ - зазор люфта регулятора, $\varepsilon$ - рассогласование между заданной $\omega_{r0}$ и действительной $\omega_r$ частотами вращения дизеля.

***Результаты и обсуждение***

Рассмотрим локальную автономную электроэнергетическую систему морского судна на примере парома «Ейск» (рис. 2). В качестве основных источников электроэнергии используются три дизель-генератора 6*VD*26/20-*AL*-2 с генераторами S450M6 800кВА, 390В, 50Гц, cos φ =0.8, 1184А. Гребные двигатели постоянного тока (Д1, Д2) типа МП2-М-630-152-8М3, получают электрическую энергию через сглаживающие дроссели ДР3 и ДР4 от тиристорных преобразователей ПТР1, ПТР2, перед которыми установлены сдвоенные реакторы ДР1 И ДР2. Для обеспечения электроэнергией судовых потребителей возможна параллельная работа двух или трех генераторов переменного тока (Г1-Г3). Экспериментальные исследования, проведенные в локальных электрической системе с рассредоточенными источниками электроэнергии на пароме «Ейск», выявили существование низкочастотных колебаний мощности. Причем, на зафиксированных осциллограммах (рис. 3 и рис. 4), видно, что колебания мощности имеют различный характер. В одних случаях (рис. 3) это обменные колебания, а в других случаях (рис. 4), это синфазные колебания мощности. Наличие таких явлений отрицательно влияет на коэффициенты полезного действия источников и потребителей электроэнергии, сроки их эксплуатации, снижают надежность работы локальных электрических систем и могут приводить к аварийным ситуациям.

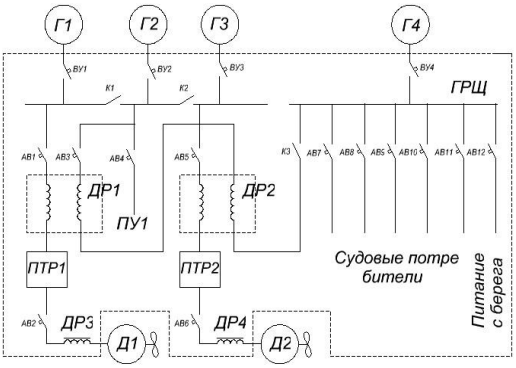



Рис. 2. Структурная схема судовой электростанции парома «Ейск».

*Fig. 2. Schematic diagram of the "Eisk" ship's power plant.*

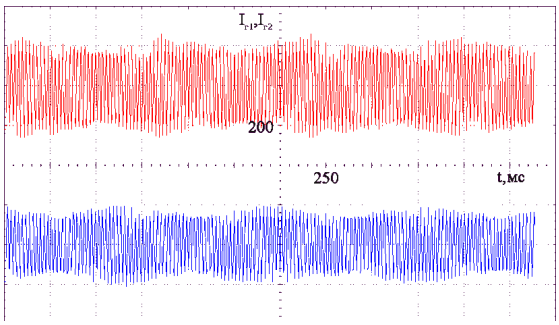



Рис. 3. Токи двух параллельно работающих генераторов в квазиустановившемся режиме.

*Fig. 3. Currents of two parallel operating generators in quasi-fixed mode.*

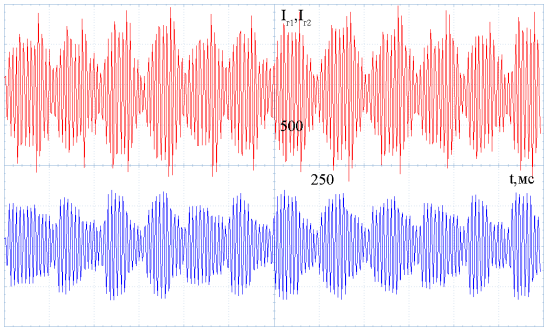



Рис. 4 .Токи двух параллельно работающих генераторов при работающих гребных двигателях.

*Fig. 4.Currents of two parallel operating generators with operating propulsion engines.*

В современных системах автоматического управления генераторами в локальных системах, например, *DECS*-100, *Selco* C 6200 отсутствует функция, которая бы отвечала за устранение колебаний мощности генератора в квазиустановившемся режиме работы.

Проведенные исследования с использованием методов математического моделирования также выявили существование (рис. 5 и рис. 6) и причины существования таких колебаний мощности. Так для обменных колебаний это наличие люфта в регуляторах частоты вращения, а для синфазных колебаний разница в настройках тех же регуляторов.

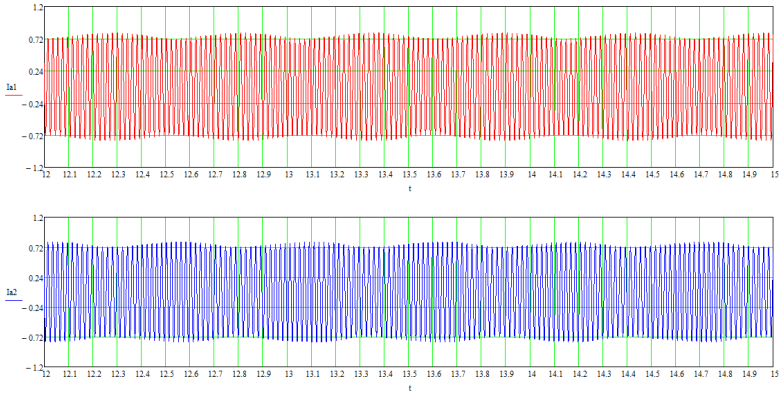



Рис. 5. Результаты моделирования, $Dn_1$=0,002, $Dn_2$=0,01, $K\omega_1$=50, $K\omega_2$=50, $\omega r_{01}$=1, $\omega r_{02}$=1.
$IA_1$, $IA_2$ – токи параллельно работающих генераторов

*Fig. 5. Modeling results, $Dn_1$=0.002, $Dn_2$=0.01, $K\omega_1$=50, $K\omega_2$=50, $\omega r_{01}$=1, $\omega r_{02}$=1.*
*$IA_1$, $IA_2$ - parallel operating generator currents*

Результаты математического моделирования показали, что устойчивая работа судового электротехнического комплекса возможна при значениях зазоров люфта от 0 до 0,02. Поэтому, именно в этих диапозонах изменения зазоров люфта, с шагом 0,002 проведены вычисления и определены соответствующие амплитуды обменных колебаний мощности. Результаты представлены в таблице 1, по данным которой представлена графическая визуализация на рисунке 7.

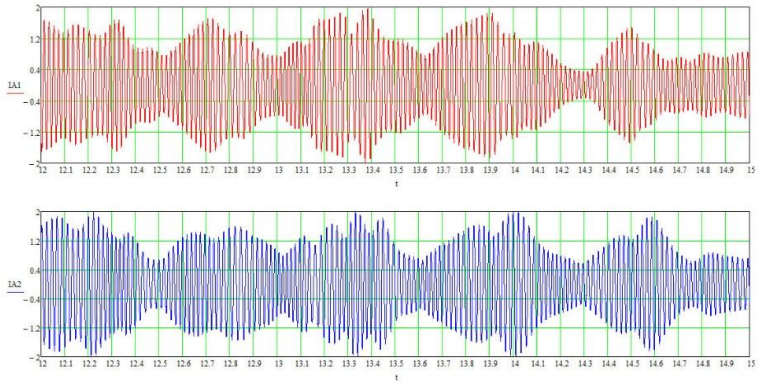



Рис. 6. Результаты моделирования, Dn1=0,002, Dn2=0,01, Kω1=40, Kω2=80, ωr01=1, ωr02=1.
IA1, IA2 – токи параллельно работающих генераторов

*Fig. 6 Modeling results, Dn1=0.002, Dn2=0.01, Kω1=40, Kω2=80, ωr01=1, ωr02=1.*
*IA1, IA2 - parallel operating generator currents*

Таблица 1

Зависимость амплитуды обменных колебаний мощности от зазоров люфта

| *Dn1/Dn2* | 0 | 0,002 | 0,004 | 0,006 | 0,008 | 0,01 | 0,012 | 0,014 | 0,016 | 0,018 | 0,02 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 | 0 | 0,011 | 0,021 | 0,031 | 0,04 | 0,052 | 0,065 | 0,071 | 0,083 | 0,095 | 0,1 |
| 0,002 | 0,01 | 0,0015 | 0,011 | 0,021 | 0,033 | 0,045 | 0,056 | 0,068 | 0,076 | 0,09 | 0,1 |
| 0,004 | 0,02 | 0,01 | 0,002 | 0,012 | 0,021 | 0,035 | 0,045 | 0,056 | 0,068 | 0,076 | 0,09 |
| 0,006 | 0,028 | 0,018 | 0,007 | 0,003 | 0,013 | 0,024 | 0,034 | 0,048 | 0,057 | 0,07 | 0,081 |
| 0,008 | 0,04 | 0,03 | 0,02 | 0,0065 | 0,0025 | 0,0135 | 0,024 | 0,036 | 0,048 | 0,058 | 0,068 |
| 0,01 | 0,05 | 0,04 | 0,03 | 0,018 | 0,0075 | 0,0062 | 0,0145 | 0,024 | 0,039 | 0,048 | 0,058 |
| 0,012 | 0,065 | 0,051 | 0,038 | 0,028 | 0,0165 | 0,007 | 0,004 | 0,015 | 0,025 | 0,038 | 0,048 |
| 0,014 | 0,075 | 0,063 | 0,052 | 0,04 | 0,028 | 0,015 | 0,006 | 0,004 | 0,015 | 0,027 | 0,039 |
| 0,016 | 0,09 | 0,08 | 0,063 | 0,051 | 0,04 | 0,0255 | 0,015 | 0,0045 | 0,006 | 0,015 | 0,027 |
| 0,018 | 0,1 | 0,09 | 0,075 | 0,06 | 0,051 | 0,036 | 0,027 | 0,015 | 0,045 | 0,0075 | 0,015 |
| 0,02 | 0,117 | 0,1 | 0,086 | 0,075 | 0,062 | 0,05 | 0,04 | 0,027 | 0,015 | 0,006 | 0,0065 |

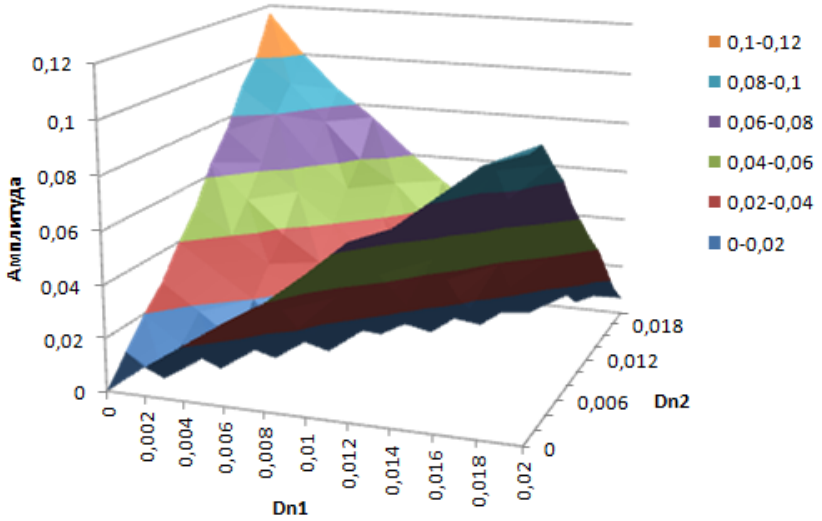



Рис. 7. Карта зависимости амплитуды обменных колебаний мощности от зазоров люфта. $Dn_1$ и $Dn_2$ — зазоры люфта первого и второго параллельно работающего дизель-генератора соответственно

*Fig. 7. Map of the dependence of the amplitude of the power exchange fluctuations on the gap of the backlash. $Dn_1$ and $Dn_2$ - Backlogs of the first and second parallel diesel generator, respectively*

На карте зависимости амплитуды обменных колебаний мощности от зазоров люфта видно, что при отсутствии люфта обменные колебания мощности отсутствуют. Однако, известно, что полное отсутствие люфта делает систему регулирования частотой неработоспособной. Обменные колебания мощности минимальны при равных зазорах люфта регуляторов частоты параллельно работающих генераторов. По понятным причинам, такая ситуация является редким частным случаем. А вот наличие различных по величине зазоров люфта в регуляторах частоты приводит к возникновению значительных по амплитуде обменных колебаний мощности.

Математическое моделирование параллельной работы дизель генераторных агрегатов, коэффициентов передачи регуляторов которых не равны, подтвердило предположение о возникновении синфазных колебаний в таком режиме работы (рис. 6). В таблице 2 и на рисунке 8 представлены результаты математического регулирования по амплитуде синфазных колебаний мощности при различающихся по значениям коэффициентам передачи регуляторов частоты. Здесь видно, что при равных значениях коэффициентов передачи амплитуды колебаний минимальны и обусловлены существованием обменных колебаний мощности из-за люфта, причем уменьшение коэффициента передачи регуляторов частоты практически сводит их к нулю. А при увеличении разницы между коэффициентами передачи регуляторов частоты на существующие обменные колебания мощности накладываются значительные по амплитуде синфазные колебания мощности.

Таблица 2.

Зависимость амплитуды синфазных колебаний мощности первого дизель-генератора от значений коэффициента усиления регулятора частоты

| $K_{\omega1}$/ $K_{\omega2}$ | 10 | 20 | 40 | 60 | 80 | 100 | 120 | 140 | 160 | 180 | 200 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 10 | 0,01 | 1,1 | 1 | 0,9 | 0,75 | 1,1 | 0,3 | 0,25 | 0,25 | 0,25 | 0,25 |
| 20 | 0,95 | 0,015 | 1,1 | 1 | 1,1 | 0,85 | 1,1 | 1,1 | 0,8 | 0,85 | 0,85 |
| 40 | 0,9 | 0,85 | 0,02 | 0,9 | 1,05 | 1,05 | 1,1 | 1,25 | 1,05 | 1,1 | 1,05 |
| 60 | 1,1 | 0,85 | 1,1 | 0,03 | 0,3 | 0,9 | 0,7 | 0,95 | 1 | 0,95 | 1,05 |
| 80 | 0,95 | 1 | 0,8 | 0,2 | 0,04 | 0,2 | 0,9 | 1,2 | 0,9 | 1,2 | 1,1 |
| 100 | 0,7 | 0,9 | 1,2 | 1 | 0,25 | 0,05 | 0,16 | 0,8 | 1,05 | 0,8 | 1,25 |
| 120 | 0,55 | 0,75 | 1,1 | 0,9 | 0,9 | 0,15 | 0,06 | 0,13 | 1,25 | 0,8 | 1,3 |
| 140 | 0,75 | 1,2 | 1,1 | 0,9 | 0,9 | 0,22 | 0,15 | 0,062 | 0,13 | 0,7 | 1,1 |
| 160 | 1,1 | 1,2 | 1,2 | 0,9 | 0,9 | 0,75 | 0,3 | 0,12 | 0,065 | 0,11 | 0,65 |
| 180 | 1,1 | 1,2 | 1,2 | 1,05 | 1,05 | 0,75 | 0,7 | 0,23 | 0,14 | 0,067 | 0,1 |
| 200 | 1,1 | 1 | 0,9 | 1,05 | 1,1 | 0,75 | 0,7 | 0,6 | 0,2 | 0,13 | 0,07 |

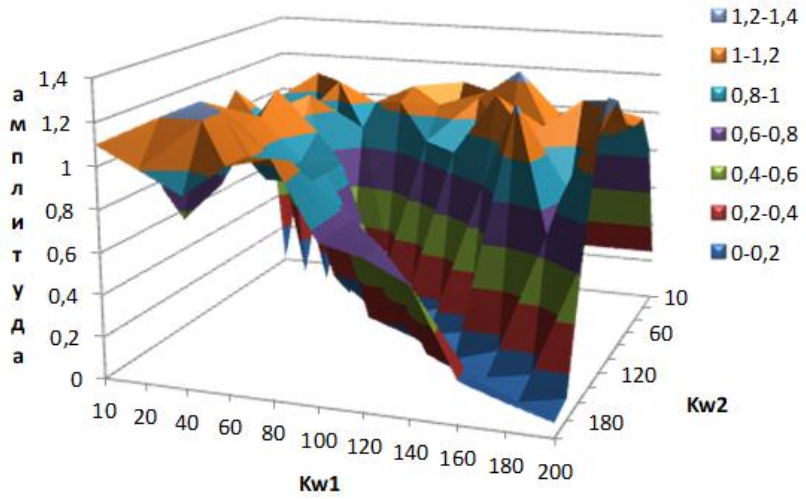



Рис. 8. Карта зависимости амплитуды синфазных колебаний мощности первого дизель-генератора от значений коэффициента усиления регулятора частоты. $K_{\omega1}$ и $K_{\omega2}$ - коэффициенты усиления регулятора первого и второго параллельно работающего дизель-генератора соответственно

*Fig. 8. Map of the dependence of amplitude of the phase power fluctuations of the first diesel generator from the values of the gain factor of the frequency regulator. and - the gain factors of the regulator of the first and second parallel diesel generator respectively*

Исследования показывают возможность обеспечения качества электрической энергии в локальных системах с точки зрения возникновения в них перетоков мощности вызванных обменными и синфазными колебаниями. Для этого необходимо обеспечить взаимосвязь между системами управления генераторов и при обнаружении превышения амплитудами колебаний допустимых величин производить автоматическую адаптивную подстройку и коррекцию параметров настройки регуляторов частоты рассредоточенных источников в локальной электрической системе. Математическое моделирование показало, что уменьшение коэффициентов передачи регуляторов частоты приводит к уменьшению амплитуды обменных колебаний, а поддержание равенства уставок частоты и коэффициентов передачи регуляторов частоты избавляет локальную систему от синфазных колебаний. Автоматические устройства управления работой источников электрической энергии в локальных системах имеют возможность контролировать параметры, необходимые для выявления и удаления колебаний мощности всех типов. Основными величинами, которые необходимо контролировать, являются токи источников электроэнергии с точки зрения поддержания постоянства идеальности синусоидальности их формы в смысле отсутствия обменных и синфазных колебаний мощности. Таким образом, обеспечив обмен такими параметрами между системами управления источниками в локальной электрической системе, возможно ввести дополнительную функцию по обеспечению стабильности работы рассредоточенных источников в квазиустановившехся режимах в смысле их чистоты от обменных и синфазных колебаний мощности.

***Заключение***

Формирование оптимальных режимов работы РИЭ в составе локальной электрической системы является сложной задачей и требует учета не только параметров генерирования отдельных РИЭ, но также показателей энергопотребления распределительных сетей и взаимосвязей между ними. Исходя из этого система управления совокупностью РИЭ должна строиться по иерархическому принципу, что позволяет повысить уровень интеграции управления вводом элементов более высокого уровня, предотвратить дублирование, разделить сложные задачи на подзадачи, которые решаются при ограниченных технических возможностях каждого иерархического уровня.

Известные из литературы исследования электроснабжения в локальных электрических системах посвящены в основном их взаимосвязям с системой централизованного электроснабжения, улучшению экологических характеристик, построению стоимостных моделей и критериев оптимальности. В отличие от рассмотренных в литературном обзоре результатов данное исследование заключается в экспериментальном выявлении новых факторов, влияющих на обеспечение качества электроэнергии в локальных электрических системах, выявлении вызывающих их причин и совершенствованию систем автоматического управления для устранения таких явлений. Добавление функции устранения обменных и синфазных колебаний мощности в системы автоматического управления рассредоточенными источниками электроэнергии обеспечивает адаптивное изменение настроек регуляторов частоты, направленное на обеспечение постоянства синусоидальности напряжения в квазиустановившихся режимах работы.

**Литература**

1. Jiang, J., Peyghami, S., Coates, C., Blaabjerg, F. A Decentralized Reliability-Enhanced Power Sharing Strategy for PV-Based Microgrids. IEEE Transactions on Power Electronics. 2021;36(6):7281–7293, 9272881.

2. Gracheva E. I., Alimova A.N. Calculating Methods and Comparative Analysis of Losses of Active and Electric Energy in Low Voltage Devices . International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon), 2019. 361-367.

3. Савенко А.Е., Рыбин А.Г. Оптимизация схемы присоединения рассредоточенных источников электроэнергии к распределительным электрическим сетям Темрюкского района. Вестник КГЭУ.2022;1(53): 76–85.

4. Лежнюк П.Д., Нетребский В.В., Никиторович А.В. Оптимизация распределения нагрузки между рассредоточенными источниками энергии в локальной электрической системе / Технічна електродинаміка. 2012;2:38-39.

5. Lezhniuk, P., Komar, V., Rubanenko, O. Information Support for the Task of Estimation the Quality of Functioning of the Electricity Distribution Power Grids with Renewable Energy Source. 2020 IEEE 7th International Conference on Energy Smart Systems, ESS 2020 – Proceedings. 2020:168–171, 9159965.

6. Lezhniuk, P., Komar, V., Kravchuk, S. Regimes Balancing in the Local Electric System with Renewable Sources of Electricity. 2019 IEEE 20th International Conference on Computational Problems of Electrical Engineering. CPEE 2019, 8949118.

7. Грачева Е.И., Алимова А.Н., Абдуллазянов Р.Э. Анализ и способы расчета потерь активной мощности и электроэнергии в низковольтных цеховых сетях. Вестник КГЭУ.2018;4(40):53-65.

8. Грачева Е.И., Садыков Р.Р. Исследование вероятностных характеристик систем электроснабжения / Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики.2017;1-2:95–101.

9. Martinez, M.S., Nozik, A.J., Beard, M.C. Theoretical limits of multiple exciton generation and singlet fission tandem devices for solar water splitting. Journal of Chemical Physics. 2019;151(11),114111.

10. Грачева Е.И., Шакурова З.М., Абдуллазянов Р.Э. Сравнительный анализ наиболее распространенных детерминированных методов определения потерь электроэнергии в цеховых сетях. Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2019;21(5):87-96.

11. Sangwongwanich, A., Blaabjerg, F. Monte Carlo Simulation with Incremental Damage for Reliability. Assessment of Power Electronics IEEE Transactions on Power Electronics. 2021,36(7):7366–7371, 9293165.

12. Banin U., Waiskopf N., Hammarström L., Batista V.S., Brudvig G.W. Nanotechnology for catalysis and solar energy conversion. Nanotechnology. 2020;32(4),042003.

13. Мещеряков В.Н., Черкасова В.С., Мещерякова О.В. Коррекция системы векторного управления асинхронным электроприводом / Системы управления и информационные технологии, 2015. №3(61). С. 36-38.

14. Губанов Ю.А., Калинин И. М., Корнев А.С., Кузнецов В.И., Сеньков А.П. Направления совершенствования судовых единых электроэнергетических систем. Морские интеллектуальные технологии, 2019, №1-1(43), стр. 103–109.

15. Савенко А.Е., Голубев А.Н. Обменные колебания мощности в судовых электротехнических комплексах /Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина. Иваново, 2016. – 172 с.

16. Savenko A.E., Savenko P.S. Analysis of Power Oscillations Parameters in Autonomous Electrical Complexes Using the Method of Customization Charts Designing. Proceedings – 2020 International Ural Conference on Electrical Power Engineering, UralCon 2020, Proc. 2020 Int. Ural Conf. on Electrical Power Engineering. С. 400–405.

**Авторы публикации**

***Савенко Александр Евгеньевич*** – канд. техн. наук, доцент кафедры Электрооборудования судов и автоматизации производства Керченского государственного морского технологического университета. Savenko-70@mail.ru

***Савенко Павел Станиславович*** – курсант морского факультета Керченского государственного морского технологического университета.

**References**

1. Jiang J., Peyghami S., Coates, C., Blaabjerg F. A *Decentralized Reliability-Enhanced Power Sharing Strategy for PV-Based Microgrids.* IEEE Transactions on Power Electronics. 2021,36(6):7281–7293, 9272881.

2. Gracheva E. I., Alimova A.N. *Calculating Methods and Comparative Analysis of Losses of Active and Electric Energy in Low Voltage Devices*. International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon), 2019. 361-367.

3. Savenko A.E., Rybin A.G. Optimization of the scheme of connection of reduced electric power sources to the distribution electric networks in Temryuk region. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo jenergeticheskogo universiteta*. 2022;1(53):76–85.

4. Lezhnyuk P.D., Netrebskiy V.V., Nikitorovich A.V. Optimizatsiya raspredeleniya nagruzki mezhdu rassredotochennymi istochnikami energii v lokal'noy elektricheskoy sisteme. *Tekhnichna elektrodinamika*. 2012,2:38-39.

5. Lezhniuk, P., Komar, V., Rubanenko, O. *Information Support for the Task of Estimation the Quality of Functioning of the Electricity Distribution Power Grids with Renewable Energy Source.* 2020 IEEE 7th International Conference on Energy Smart Systems, ESS 2020. Proceedings. 2020:168–171, 9159965.

6. Lezhniuk P., Komar V., Kravchuk S. *Regimes Balancing in the Local Electric System with Renewable Sources of Electricity.* 2019 IEEE 20th International Conference on Computational Problems of Electrical Engineering. CPEE 2019, 8949118.

7. Gracheva E.I., Alimova A.N., Abdullazjanov R.Je. Analiz i sposoby rascheta poter' aktivnoj moshhnosti i jelektrojenergii v nizkovol'tnyh cehovyh setjah. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo jenergeticheskogo universiteta.* 2018;4(40):53–65.

8. Gracheva E.I., Sadykov R.R. Issledovanie veroyatnostnykh kharakteristik sistem elektrosnabzheniya. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Problemy energetiki*. 2017;1-2;95-101.

9. Martinez M.S., Nozik A.J., Beard M.C. Theoretical limits of multiple exciton generation and singlet fission tandem devices for solar water splitting. *Journal of Chemical Physics.* 2019;151(11),114111.

10. Sangwongwanich A., Blaabjerg F. *Monte Carlo Simulation with Incremental Damage for Reliability.* Assessment of Power Electronics IEEE Transactions on Power Electronics. 2021:36(7):7366–7371, 9293165.

11. Gracheva E.I., Shakurova Z.M., Abdullazyanov R.E. A comparative analysis of the most common deterministic methods for the calculation of electricity losses in industrial networks. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2019;21(5):87-96.

12. Banin U., Waiskopf N., Hammarström L., Batista V.S., Brudvig G.W. Nanotechnology for catalysis and solar energy conversion. *Nanotechnology*. 2020;32(4),042003.

13. Meshherjakov VN, Cherkasova VS, Meshherjakova OV. Korrekcija sistemy vektornogo upravlenija asinhronnym jelektroprivodom. *Sistemy upravlenija iinformacionny etehnologii.* 2015;3(61):36-38

14. Gubanov Y.A., Kalinin I.M., Kornev A.S., Kuznetsov V.I., Sen'kov A.P. Directions of improvement for ship unified power systems. *Marine Intelligent Technology*, 2019, №1-1(43), pp. 103–109.

15. Savenko A.E., Golubev A.N. Obmennye kolebaniya moshchnosti v sudovykh elektrotekhnicheskikh kompleksakh. *Ivanovskiy gosudarstvennyy energeticheskiy universitet imeni V.I. Lenina.* Ivanovo, 2016. 172 p.

16. Savenko A.E., Savenko P.S. *Analysis of Power Oscillations Parameters in Autonomous Electrical Complexes Using the Method of Customization Charts Designing.* Proceedings-2020 International Ural Conference on Electrical Power Engineering, UralCon 2020, Proc. 2020 Int. Ural Conf. on Electrical Power Engineering, pp. 400–405.

**Authors of the publication**

***Alexandr E. Savenko*** - Kerch State Maritime Technological University. Savenko-70@mail.ru.

***Pavel S. Savenko*** - marine faculty cadet, Kerch State Maritime Technological University.

***Получено*** ***11.06.2022 г.***

***Отредактировано*** ***11.07.2022 г.***

***Принято*** ***28.07.2022 г.***