

# ЭЛЕКТРОТЕХНИКА



УДК 621.313

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИЧИН И ПАРАМЕТРОВ СИНФАЗНЫХ КОЛЕБАНИЙ МОЩНОСТИ В АВТОНОМНЫХ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСАХ

А.Е. Савенко, С.Е. Савенко, П.С. Савенко

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

**Резюме:** Рассмотрена проблема существования синфазных и обменных колебаний мощности при параллельной работе синхронных генераторов в автономных электротехнических комплексах. Методами математического моделирования получены значения амплитуды и периода синфазных колебаний во всем возможном диапазоне настроек исследуемого объекта. Разработана методика построения карт зависимости амплитуды и периода синфазных колебаний мощности от значений коэффициентов передачи и уставок по частоте вращения регуляторов частоты вращения дизель-генераторов. Использование таких карт позволяет применить метод устранения обменных колебаний мощности с учетом возможного возникновения синфазных колебаний. Построение карт настроек амплитуды и периода синфазных колебаний мощности дает возможность понять тенденцию изменения амплитуды и периода синфазных колебаний мощности и проведения глубокого анализа работы автономного электротехнического комплекса.

**Ключевые слова:** обменные колебания мощности, синфазные колебания мощности, параллельная работа, автономный электротехнический комплекс, генераторный агрегат, экспериментальные исследования.

## STUDY OF THE REASONS AND PARAMETERS OF COMMON-MODE FLUCTUATIONS OF POWER IN AUTONOMOUS ELECTRICAL COMPLEXES

A.E. Savenko, S.E. Savenko, P.S. Savenko

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

**Abstract:** The problem of the existence of common-mode and exchange power fluctuations when parallel operation of synchronous generators in autonomous electrical systems is considered. The methods of mathematical modeling obtained the amplitude and period of common-mode oscillations in the whole possible range of settings of the object under study. A method has been

developed for constructing maps of the dependence of the amplitude and period of common-mode power oscillations on the values of the transfer coefficients and setpoints in terms of the rotation frequency of the speed governors of diesel generators. The use of such cards allows you to apply the method of eliminating exchange power fluctuations, taking into account the possible occurrence of common-mode oscillations. Mapping the settings of the amplitude and the period of the common-mode power oscillations makes it possible to understand the tendency of the amplitude and the period of the common-mode power oscillations to change and to carry out an in-depth analysis of the operation of the autonomous electrotechnical complex.

**Keywords:** exchange power fluctuations, common-mode power fluctuations, parallel operation, autonomous electric power equipment, generating set, experimental research.

**For citation:** Savenko A.E., Savenko S.E., Savenko P.S. Study of the reasons and parameters of common-mode fluctuations of power in autonomous electrical complexes. *Proceedings of the higher educational institutions. ENERGY SECTOR PROBLEMS*. 2019; 21(3-4):107-115. (In Russ). doi:10.30724/1998-9903-2019-21-3-4-107-115.

### Введение

Параллельная работа дизель-генераторных агрегатов на основе синхронных генераторов является наиболее часто применяемым режимом производства электрической энергии в автономных электротехнических комплексах [1, 2]. Преимущества такой компоновки хорошо известны, это – рациональное использование вырабатываемой электроэнергии, обеспечение надежности электростанции, работы агрегатов с наивысшими коэффициентами полезного действия и возможности ремонта отдельных агрегатов, экономия топлива и ресурса агрегатов [3, 4]. Для исследования обменных колебаний мощности при параллельной работе дизель-генераторных агрегатов проводились экспериментальные исследования на судне-пароме «Ейск» Керченской паромной переправы [5, 6]. При этом обнаружены синфазные колебания мощности.

На осциллограммах токов генераторов при работающих гребных двигателях, получающих питание через тиристорные преобразователи (рис. 1–4), наблюдаются автоколебательные процессы с разными амплитудами и периодами. Форма этих колебаний также имеет разный характер. Амплитуда колебаний достигает 100 %, а период 150–800 мс [6].

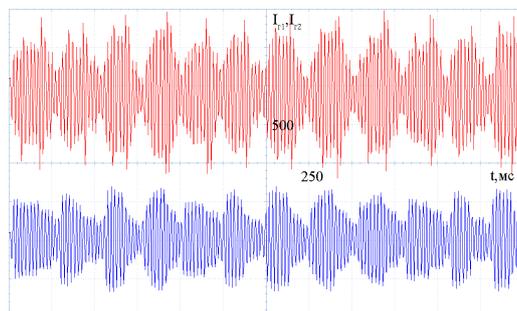


Рис. 1. Токи параллельно работающих генераторов при работающих гребных двигателях (режим 1)

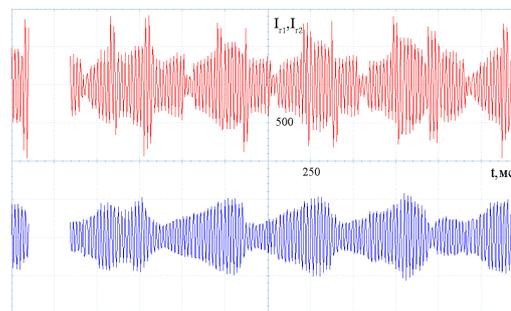


Рис. 2. Токи параллельно работающих генераторов при работающих гребных двигателях (режим 2)

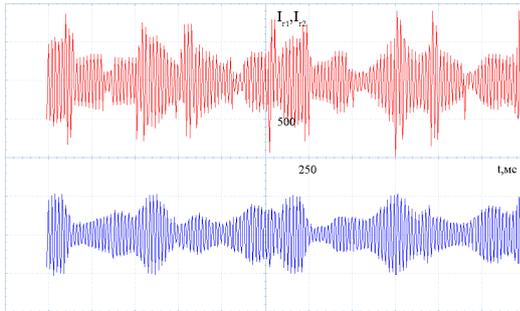


Рис. 3. Токи параллельно работающих генераторов при работающих гребных двигателях (режим 3)

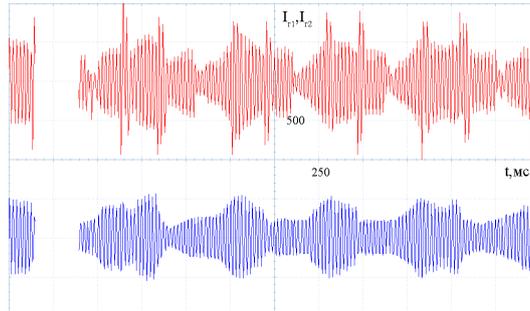


Рис. 4. Токи параллельно работающих генераторов при работающих гребных двигателях (режим 4)

Результаты проведенных исследований выявили, что амплитуда обменных колебаний мощности параллельно работающих дизель-генераторных агрегатов зависит от значений зазоров люфта в контурах регулирования частот вращения [6, 7]. Разработана методика построения карт зависимости амплитуды обменных колебаний мощности от значений зазоров люфтов [8]. Необходимо провести аналогичную работу по отношению к синфазным колебаниям.

#### Методы

Для исследования причин и природы синфазных колебаний мощности при работе электростанции автономного электротехнического комплекса используется математическая модель [9, 10], позволяющая построить графики мгновенных значений основных параметров параллельно работающих дизель-генераторных агрегатов.

В математической модели используется уравнение дизеля, который является приводным двигателем генераторного агрегата, в упрощенной форме:

$$J_m \frac{d\omega_r}{dt} = M_d - M_g;$$

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

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 аperiodическим звеном первого порядка:

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

где  $T_\omega$  – постоянная времени исполнительного механизма;  $K_\omega$  – коэффициент передачи (усиления) регулятора;  $U_\varepsilon$  – сигнал рассогласования между заданной  $\omega_{r0}$  и действительной  $\omega_r$  частотами вращения дизеля.

Для математического описания люфта с зазором  $D_n$  в контуре регулирования частоты вращения дизеля используем следующее выражение:

$$U_\varepsilon = \left\{ \begin{array}{l} U_\varepsilon = \text{const для } |U_\varepsilon - k\varepsilon| \leq D_n \\ k \left( \varepsilon - D_n \text{sign} \left( \frac{dU_\varepsilon}{dt} \right) \right) \text{ для } \frac{dU_\varepsilon}{dt} \neq 0 \end{array} \right\},$$

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

Таким образом, каждый дизель-генераторный агрегат, участвующий в параллельной работе, имеет автоматический регулятор частоты вращения с двумя основными изменяемыми параметрами: коэффициентом передачи  $K_\omega$  и уставкой по частоте вращения [11]  $\omega_{r0}$ , а также люфтом с зазором  $D_n$ .

Основной задачей исследования является поиск ответа на вопрос: есть ли связь между настройками и параметрами контуров регулирования скорости вращения дизель-генераторных агрегатов и синфазными колебаниями мощности при параллельной работе. Также важно понять, от чего зависят амплитуда и период синфазных колебаний и систематизировать полученные результаты, так как результаты натуральных экспериментов доказывают их изменчивость.

Математическая модель дает возможность проведения анализа синфазных колебаний мощности, возникающих при параллельной работе двух синхронных генераторов автономного электротехнического комплекса в квазиустановившихся режимах.

При проведении исследований прием диапазон изменения коэффициентов передачи регуляторов  $K_\omega$  от 10 до 200, уставок по частоте вращения регуляторов  $\omega_{r0}$  от 0,9 до 1,1, что соответствует устойчивой параллельной работе генераторных агрегатов. Необходимо учитывать люфт, так как во время экспериментальных исследований на пароме «Ейск» стала понятна связь обменных и синфазных колебаний мощности, и это важно при реализации мер и средств по устранению обменных колебаний для обеспечения качественной устойчивой параллельной работы генераторов. Введем в математическую модель зазоры люфтов контуров регулирования скорости вращения дизель-генераторов соответственно  $D_{n1}=0,002$  и  $D_{n2}=0,01$ . Для исключения влияния переходных процессов на результаты выберем временной диапазон от 12 до 15 секунд, что заведомо соответствует квазиустановившемуся режиму работы.

Результаты моделирования подтверждают существование синфазных колебаний мощности и позволяют определить их амплитуду и период. Для этой цели будем использовать токи  $IA1$ ,  $IA2$  параллельно работающих генераторов.

### Результаты

Математическое моделирование параллельной работы дизель генераторных агрегатов, коэффициентов передачи регуляторов которых не равны, подтвердило предположение о возникновении синфазных колебаний в таком режиме работы (рис. 5).

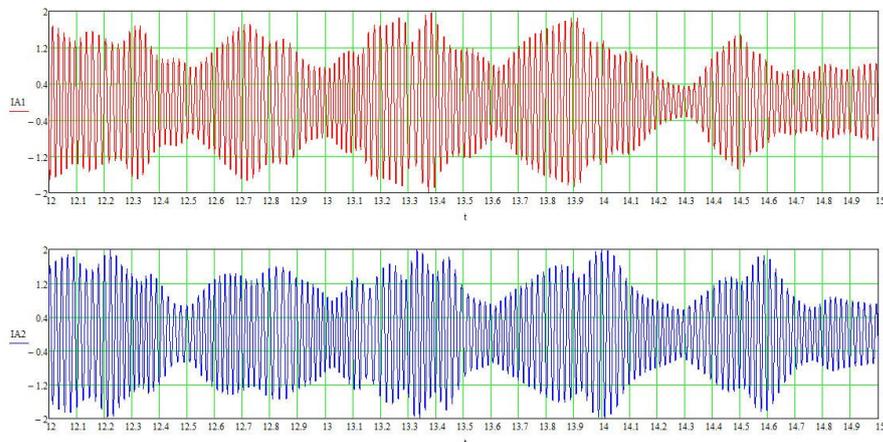


Рис. 5. Результаты моделирования:  $D_{n1}=0,002$ ;  $D_{n2}=0,01$ ;  $K_{\omega1}=40$ ;  $K_{\omega2}=80$ ;  $\omega_{r01}=1$ ;  $\omega_{r02}=1$ .

$IA1, IA2$  – токи параллельно работающих генераторов

Причем выборочное моделирование давало основание думать, что амплитуда колебаний увеличивается с увеличением разницы коэффициентов передачи регуляторов параллельно работающих дизель-генераторных агрегатов. Ясность характера зависимости параметров синфазных колебаний от соотношения коэффициентов передачи регуляторов частоты появилась после моделирования всего поля возможных соотношений настроек (табл. 1, 2) и построения графической визуализации полученных результатов в виде карты настроек (рис. 6, 7). Необходимо отметить, что при равных значениях коэффициентов усиления синфазные колебания отсутствуют, а полученные результаты в таблицах соответствуют амплитудам обменных колебаний мощности. Это главная диагональ таблиц слева направо сверху вниз.

Также в ходе математического моделирования обнаружено влияние различия уставок по частоте вращения регуляторов частоты параллельно работающих генераторных агрегатов на возникновение синфазных колебаний мощности (рис. 8).

Таблица 1

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
<b>10</b>	<b>0,01</b>	<b>1,1</b>	<b>1</b>	<b>0,9</b>	<b>0,75</b>	<b>1,1</b>	<b>0,3</b>	<b>0,25</b>	<b>0,25</b>	<b>0,25</b>	<b>0,25</b>
20	0,95	0,01	1,1	1	1,1	0,85	1,1	1,1	0,8	0,85	0,85
40	0,9	0,85	0,05	0,9	1,05	1,05	1,1	1,25	1,05	1,1	1,05
60	1,1	0,85	1,1	0,05	0,3	0,9	0,7	0,95	1	0,95	1,05
80	0,95	1	0,8	0,2	0,05	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	0,06	0,13	0,7	1,1
160	1,1	1,2	1,2	0,9	0,9	0,75	0,3	0,12	0,06	0,11	0,65
180	1,1	1,2	1,2	1,05	1,05	0,75	0,7	0,23	0,14	0,06	0,1
200	1,1	1	0,9	1,05	1,1	0,75	0,7	0,6	0,2	0,13	0,07

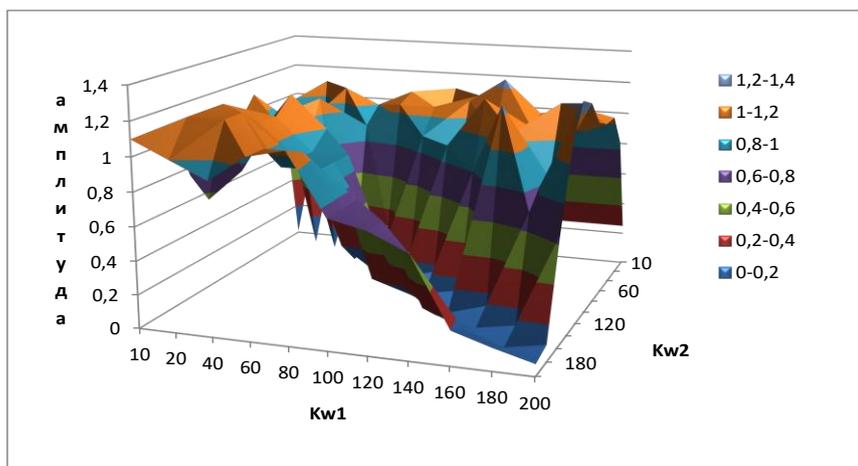


Рис. 6. Карта зависимости амплитуды синфазных колебаний мощности первого дизель-генератора от значений коэффициента усиления регулятора частоты.  $K_{\omega1}$  и  $K_{\omega2}$  – коэффициенты усиления регулятора первого и второго параллельно работающего дизель-генератора соответственно

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

$K_{\omega 1} / K_{\omega 2}$	10	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200
10	0,01	1,2	1	0,9	0,9	1,2	0,5	0,45	0,4	0,3	0,3
20	1	0,01	0,9	1	1	1	1,1	0,95	0,8	0,75	0,9
40	0,8	0,65	0,05	1	1,1	0,9	1,2	1,2	1,35	1	1,2
60	1,1	0,95	0,95	0,05	0,3	0,9	0,7	0,95	0,95	1,05	1,1
80	1	1	0,8	0,25	0,05	0,25	0,7	1,1	0,9	1	1,3
100	0,6	0,7	1,1	1,1	0,2	0,05	0,22	0,8	0,8	0,6	1,1
120	0,4	1	1,2	1	1,1	0,1	0,06	0,17	1,1	0,8	1,2
140	0,6	1,1	1,2	0,9	0,95	0,22	0,08	0,06	0,17	0,7	1,05
160	1,2	1	1,2	0,7	0,8	0,6	0,25	0,09	0,06	0,17	0,6
180	1,1	1,2	1,05	1,1	1,2	0,75	0,7	0,2	0,07	0,06	0,14
200	1	1,05	0,95	1,05	1,05	0,75	0,7	0,6	0,15	0,06	0,07

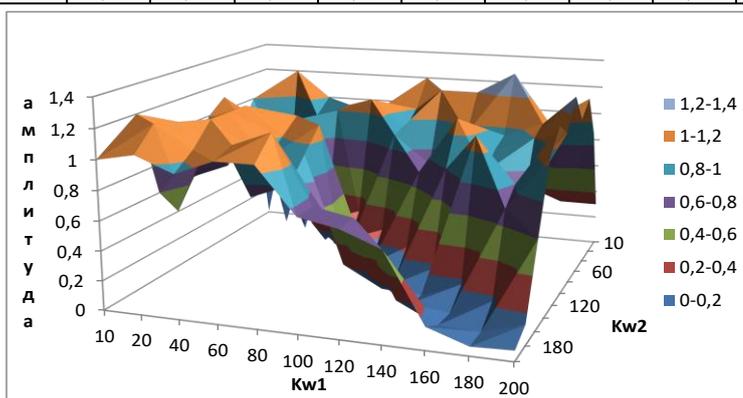


Рис. 7. Карта зависимости амплитуды синфазных колебаний мощности второго дизель-генератора от значений коэффициента усиления регулятора частоты.  $K_{\omega 1}$  и  $K_{\omega 2}$  – коэффициенты усиления регулятора первого и второго параллельно работающего дизель-генератора соответственно

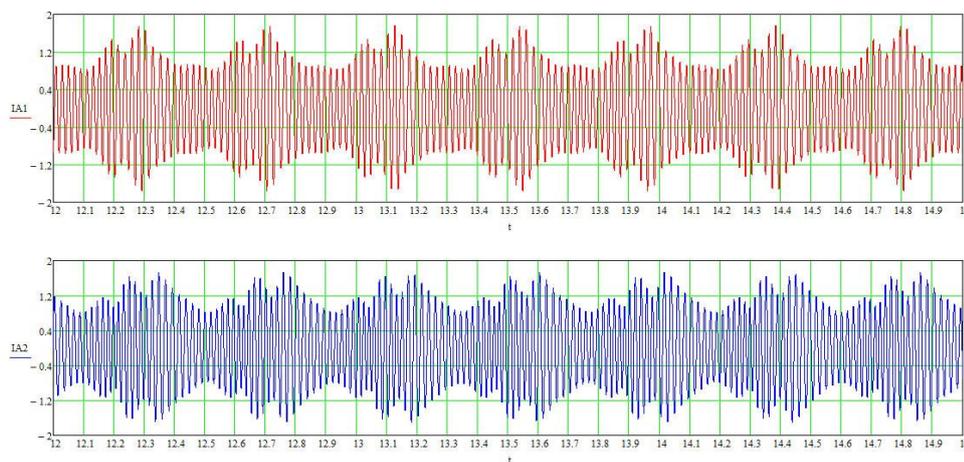


Рис. 8. Результаты моделирования:  $D_{n1}=0,002$ ;  $D_{n2}=0,01$ ;  $K_{\omega 1}=50$ ;  $K_{\omega 2}=50$ ;  $\omega_{r01}=1,04$ ;  $\omega_{r02}=0,94$ . IA1, IA2 – токи параллельно работающих генераторов

Причем выборочное моделирование давало основание думать, что период синфазных колебаний уменьшается с ростом разницы уставок по скорости. Ясность характера зависимости параметров синфазных колебаний от соотношения уставок по частоте вращения регуляторов частоты появилась после моделирования всего поля возможных соотношений настроек (таблица 3) и построения графической визуализации полученных результатов в виде карты настроек (рис. 9). Необходимо отметить, что при равных значениях уставок по частоте вращения синфазные колебания отсутствуют, а полученные результаты в таблице соответствуют периоду обменных колебаний мощности. Это также главная диагональ таблицы слева направо сверху вниз. По результатам моделирования периоды синфазных колебаний мощности у обоих генераторных агрегатов можно считать одинаковыми.

Таблица 3

Зависимость периода синфазных колебаний мощности от значений уставки скорости регулятора частоты

$\omega_{r01}/\omega_{r02}$	0,9	0,92	0,94	0,96	0,98	1	1,02	1,04	1,06	1,08	1,1
0,9	0,55	0,4	0,5	0,4	0,5	0,4	0,15	0,1	0,1	0,1	0,1
0,92	0,4	0,55	0,4	0,5	0,4	0,5	0,4	0,15	0,15	0,15	0,1
0,94	0,45	0,4	0,55	0,4	0,5	0,4	0,5	0,4	0,15	0,15	0,15
0,96	0,4	0,5	0,4	0,55	0,4	0,5	0,4	0,5	0,4	0,15	0,15
0,98	0,5	0,4	0,5	0,45	0,55	0,4	0,5	0,4	0,5	0,4	0,15
1	0,45	0,5	0,4	0,5	0,4	0,55	0,4	0,5	0,4	0,5	0,4
1,02	0,15	0,4	0,5	0,4	0,5	0,4	0,55	0,4	0,5	0,4	0,5
1,04	0,1	0,15	0,4	0,5	0,4	0,5	0,4	0,55	0,45	0,5	0,4
1,06	0,1	0,15	0,15	0,4	0,5	0,4	0,5	0,45	0,55	0,4	0,5
1,08	0,1	0,15	0,15	0,15	0,4	0,5	0,4	0,5	0,4	0,55	0,4
1,1	0,1	0,1	0,15	0,15	0,15	0,4	0,5	0,4	0,5	0,4	0,55

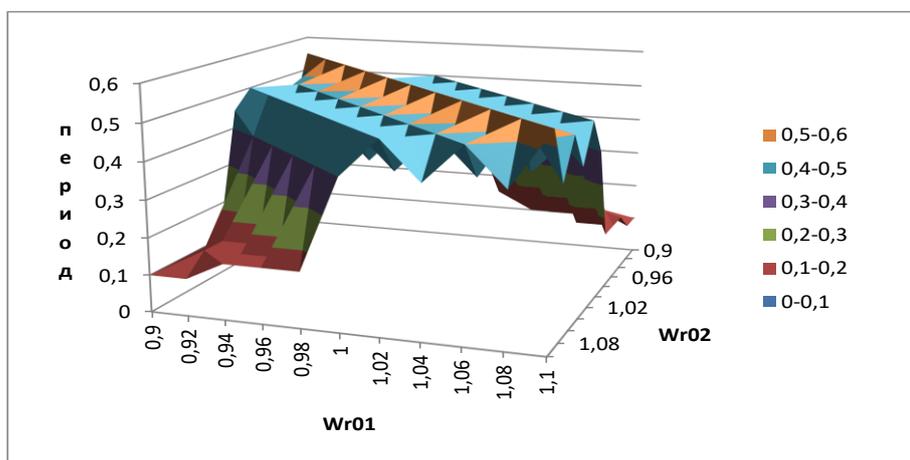


Рис. 9. Карта зависимости периода синфазных колебаний мощности дизель-генераторов от значений уставок по скорости регулятора частоты.  $\omega_{r01}$  и  $\omega_{r02}$  – уставки по скорости регулятора первого и второго параллельно работающего дизель-генератора соответственно

### Обсуждение

В результате проведенных исследований выяснилось, что синфазные колебания мощности при параллельной работе дизель-генераторных агрегатов могут появляться в

результате неодинаковых значений настроек коэффициентов передачи и уставок по частоте вращения регуляторов. В начале отклонения коэффициентов передачи от равных значений наблюдается рост амплитуды синфазных колебаний. При достижении некоторых предельных значений амплитуда начинает колебаться вокруг этих значений (см. рис. 6, 7). Амплитуда синфазных колебаний существенно превосходит амплитуду обменных колебаний мощности при одних и тех же значениях зазора люфта. Необходимо отметить, что амплитуда синфазных колебаний параллельно работающего генератора, коэффициент передачи регулятора которого больше, также больше. Это связано с тем, что этот генератор возьмет на себя больше нагрузки. Однако разница в нагрузке не может быть значительной по условиям параллельной работы генераторных агрегатов равной мощности, а следовательно, и амплитуды синфазных колебаний отличаются не намного, обычно разница составляет не более 10–15 %.

При отклонении уставок по частоте от равных значений наблюдаются синфазные колебания, амплитуда которых не меняется, а период уменьшается незначительно в некоторых пределах, а затем происходит стремительное его уменьшение и стабилизация на значениях в несколько раз меньших (см. рис. 9).

Полученные карты, кроме общей информации, детально описывают синфазные колебания мощности для дизель-генераторов 6VD26/20-AL-2 с генераторами S450MG 800 кВА и могут быть полезны специалистам, которые эксплуатируют и настраивают такие агрегаты. Аналогичные исследования, направленные на построение карт зависимости параметров синфазных колебаний мощности от значений настроек коэффициентов передачи и уставок по частоте вращения регуляторов могут быть проведены для любых дизель-генераторных агрегатов.

#### **Заключение**

Полученные в исследовании результаты являются развитием работы [6], направленной на исследование колебаний мощности при параллельной работе дизель-генераторных агрегатов в составе автономных электротехнических комплексов. Разработанная методика построения карт зависимости амплитуды и периода синфазных колебаний мощности от значений коэффициентов передачи и уставок по частоте вращения регуляторов позволяет значительно улучшить качество параллельной работы дизель-генераторных агрегатов. Алгоритм устранения обменных колебаний мощности основан на изменении коэффициентов передачи и уставок по частоте вращения регуляторов. С учетом полученных результатов для сохранения устойчивой работы автономного электротехнического комплекса изменение настроек регуляторов частоты у параллельно работающих агрегатов необходимо производить синхронно. Время изменения настроек ведомых агрегатов должно быть на порядок меньше времени изменения настроек ведущего дизель-генератора [12]. Построение карт настроек амплитуды и периода синфазных колебаний мощности совместно с картами настройки амплитуды обменных колебаний мощности в зависимости от зазоров люфта дает возможность глубокого анализа работы автономного электротехнического комплекса.

#### **Литература**

1. Лежнюк П.Д. Оптимизация распределения нагрузки между рассредоточенными источниками энергии в локальной электрической системе / П.Д. Лежнюк, В.В. Нетребский, А.В. Никиторович // *Технічна електродинаміка*. 2012. № 2. С. 38–39.
2. Грачева Е.И. Исследование вероятностных характеристик систем электроснабжения / Е.И. Грачева, Р.Р. Садыков // *Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики*. 2017. Т.19, № 1-2. С. 95–101.
3. Грачева Е.И. Сравнительный анализ и исследование методов расчета потерь электроэнергии в системах электроснабжения промышленных предприятий / Е.И. Грачева, И.И. Ильясов, А.Н. Алимова // *Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики*. 2018. Т.20, № 3-4. С. 62–71.

4.Ившин И.В. Измерительно-диагностический комплекс для диагностики энергетических установок / М.Ф. Низамиев, И.В. Ившин, О.В. Владимиров, Ю.В. Ваньков // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2014. № 3-4. С. 109–114.

5.Хватов О.С. Электростанция на базе дизель-генератора переменной частоты вращения / О.С. Хватов, А.Б. Дарьенков // Электротехника. 2014. № 3. С. 28–32.

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

7.Pyrhonen J. Design of Rotating Electrical Machines / Juha Pyrhonen, Tapani Jokinen and Val'eria Hrabovcov'a. John Wiley & Sons, Ltd. 2008. 531 p.

8.Савенко А.Е. Влияние люфта на амплитуду обменных колебаний мощности в автономных электротехнических комплексах / А.Е. Савенко, П.С. Савенко // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2018. Т. 20, № 5-6. С. 46–54.

9.Савенко А.Е. Математическая модель судового электротехнического комплекса // Вестник ИГЭУ. 2015. № 5. С. 54–59.

10. Голубев А.Н. Математическая модель для расчета электромагнитных сил в синхронном электроприводе с постоянными магнитами / А.Н. Голубев, В.А. Мартынов, А.В. Алейников // Вестник ИГЭУ. 2015. № 1. С. 10–13.

11. Reimert D. Protective relaying for power generation systems / D. Reimert. Taylor and Francis Group, LLC. 2006. 545 p.

12. Тютиков В.В. Методика синтеза регуляторов для независимого формирования статических и динамических показателей нелинейных объектов / В.В. Тютиков, А.И. Воронин // Известия ЮФУ. Технические науки. 2015. № 3(164). С. 154–164.

#### **Авторы публикации**

**Савенко Александр Евгеньевич** – канд. техн. наук, доцент кафедры «Электрооборудование судов и автоматизация производства» Керченского государственного морского технологического университета. E-mail: Savenko-70@mail.ru.

**Савенко Станислав Евгеньевич** – магистрант направления подготовки «Электроэнергетика и электротехника» Керченского государственного морского технологического университета.

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

#### **References**

1. Lezhnyuk P.D., Netrebskiy V.V., Nikitorovich A.V. Optimizatsiya raspredeleniya nagruzki mezhdu rassredotochennymi istochnikami energii v lokal'noy elektricheskoy sisteme [Optimization of partition of load between the dispersed energy sources in the in-plant electric system] // Tekhnichna elektrodinamika. 2012. Issue 2. P. 38–39.

2. Gracheva E.I., Sadykov R.R. Issledovanie veroyatnostnykh kharakteristik sistem elektrosnabzheniya [The study of probabilistic characteristics of power supply systems] // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Problemy energetiki. 2014. Issue 3-4. P. 109–114.

3. Gracheva E.I. Sravnitel'nyj analiz i issledovanie metodov rascheta poter' jelektroenergii v sistemah jelektrosnabzheniya promyshlennykh predpriyatij / E.I. Gracheva, I.I. P'jasov, A.N. Alimova [The comparative analysis and research of methods of calculation of losses of the electric power in the systems of electrical power supply of the industrial enterprises]. // Izvestija vysshih uchebnykh zavedenij. Problemy jenergetiki. 2018. B. 20, issue 3-4. P. 62–71.

4. Ivshin I.V., Nizamiev M.F., Vladimirov O.V., Van'kov Yu.V. Izmeritel'no-diagnosticheskiy kompleks dlya diagnostiki energeticheskikh ustanovok [Measuring-diagnostic complex for the diagnosis of

- power plants] // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Problemy energetiki. 2014. Issue 3-4. P. 109–114.
5. Khvatov O.S., Dar'entov A.B. Elektrostantsiya na baze dizel'-generatora peremennoy chastoty vrashcheniya [Power on the basis of diesel generator variable speed] // Elektrotehnika. 2014. Issue. 3. P. 28–32.
6. Savenko A.E., Golubev A.N. Obmennye kolebaniya moshchnosti v sudovykh elektrotekhnicheskikh kompleksakh [Exchange power fluctuations in ship electrotechnical complexes]. Ivanovo: Ivanovskiy gosudarstvennyy energeticheskiy universitet imeni V.I. Lenina, 2016. 172 p.
7. Pyrhonen J. Design of Rotating Electrical Machines / Juha Pyrhonen, Tapani Jokinen and Val'eria Hrabovcov'a. John Wiley & Sons, Ltd. 2008. 531 p.
8. Savenko A.E. Vlijanie ljufta na amplitudu obmennykh kolebaniy moshchnosti v avtonomnykh jelektrotekhnicheskikh kompleksakh [Influence of backlash on amplitude of exchange power fluctuations in autonomous electric power equipment]. / A.E. Savenko, P.S. Savenko // Izvestija vysshikh uchebnykh zavedenij. Problemy jenergetiki. 2018. B. 20, issue 5-6. P. 46–54.
9. Savenko A.E. Matematicheskaya model' sudovogo elektrotekhnicheskogo kompleksa [A mathematical model of the ship's electrical complex]. // Vestnik IGEU. 2015. Issue 5. P. 54–59.
10. Golubev A.N. Matematicheskaya model' dlya rascheta elektromagnitnykh sil v sinkhronnom elektroprivode s postoyannymi magnitami [Mathematical model for simulation of electromagnetic forces in permanent magnet synchronous motors] // Vestnik IGEU/ 2015/ Issue 1. P. 10–13.
11. Reimert D. Protective relaying for power generation systems / D. Reimert. Taylor and Francis Group, LLC, 2006. 545 p.
12. Tyutikov V.V., Voronin A.I. Metodika sinteza regulyatorov dlya nezavisimogo formirovaniya staticheskikh i dinamicheskikh pokazateley nelineynykh ob"ektov [Procedure for the synthesis of controllers for independent formation of static and dynamic parameters of nonlinear objects] // Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki. 2015 Issue 3(164) P. 154–164.

#### **Authors of the publication**

**Alexandr E. Savenko** – Kerch State Maritime Technological University, Kerch, Republic of Crimea Russia  
E-mail: Savenko-70@mail.ru.

**Stanislav E. Savenko** – Kerch State Maritime Technological University, Kerch, Republic of Crimea Russia

**Pavel S. Savenko** – Kerch State Maritime Technological University, Kerch, Republic of Crimea Russia

**Поступила в редакцию**

**19 февраля 2019 г.**