

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ УГЛА НАГРУЗКИ СИНХРОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ ДЛЯ УСТРАНЕНИЯ ОБМЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ МОЩНОСТИ В АВТОНОМНЫХ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСАХ

А.Е. Савенко, П.С. Савенко

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

Резюме: ЦЕЛЬ. Рассмотреть наиболее актуальные и важные проблемы параллельной работы генераторных агрегатов в составе автономных электротехнических комплексов современных морских судов, таких как переход дизель-генераторных агрегатов в режим обратной мощности и существование обменных колебаний мощности при параллельной работе. Рассмотреть возможность совершенствования метода устранения обменных колебаний мощности с использованием карт зависимостей амплитуды колебаний от параметров дизель-генераторных агрегатов. МЕТОДЫ. При решении поставленной задачи применялась математическая модель автономного электротехнического комплекса, позволяющая учесть зазоры люфтов в контурах регулирования частоты вращения параллельно работающих дизель-генераторных агрегатов. РЕЗУЛЬТАТЫ. Построена карта зависимости угла нагрузки от зазоров люфта. Доказана полная идентичность карт зависимости угла нагрузки от зазоров люфта и карт зависимости амплитуды обменных колебаний мощности от зазоров люфта. В критерии определения значения амплитуды обменных колебаний мощности предложено использовать угол нагрузки генераторов вместо огибающих токов генераторов. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Использование угла нагрузки параллельно работающих генераторов позволяет повысить быстродействие и точность блока устранения обменных колебаний мощности. Разработанный подход позволяет контролировать переход генераторных агрегатов в режим обратной мощности и появление обменных колебаний мощности на основе измерения углов нагрузки генераторов.

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

Для цитирования: Савенко А.Е., Савенко П.С. Использование угла нагрузки синхронных генераторов для устранения обменных колебаний мощности в автономных электротехнических комплексах. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2021. Т. 23. № 1. С. 197-207. doi:10.30724/1998-9903-2021-23-1-197-207.

USE OF LOAD ANGLE OF SYNCHRONOUS GENERATORS TO ELIMINATE POWER EXCHANGE OSCILLATIONS IN AUTONOMOUS ELECTRICAL COMPLEXES

AE. Savenko, PS. Savenko

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

Abstract: THE PURPOSE. Consider the most pressing and important problems of parallel operation of generator sets as part of autonomous electrical complexes of modern sea vessels, such as the transition of diesel generator sets to reverse power mode and the existence of power exchange oscillations during parallel operation. Consider the possibility of improving the method for eliminating power exchange oscillations using maps of dependences of the amplitude of oscillations on the parameters of diesel generator sets. METHODS. When solving the problem, a mathematical model of an autonomous electrical complex was used, which allows to take into account the backlash clearances in the control loops of the rotation frequency of

parallel diesel generator sets. **RESULTS.** A map of the dependence of the load angle on the backlash clearances was constructed. The complete identity of the maps of the dependence of the load angle on the backlash clearances and the maps of the dependence of the amplitude of the power exchange oscillations on the backlash gaps has been proved. In the criterion for determining the value of the amplitude of the power exchange oscillations, it is proposed to use the load angle of the generators instead of the envelope currents of the generators. **CONCLUSION.** The use of the load angle of parallel operating generators allows to increase the speed and accuracy of the unit for eliminating power exchange oscillations. The developed approach makes it possible to control the transition of generating sets to the reverse power mode and the appearance of power exchange oscillations based on measuring the load angles of the generators.

Keywords: power exchange oscillations, parallel operation, autonomous electric power complex, load angle, generating set, experimental research.

For citation: Savenko AE., Savenko PS. Use of load angle of synchronous generators to eliminate power exchange oscillations in autonomous electrical complexes *Power engineering: research, equipment, technology*. 2021;23(1): 197-207. doi:10.30724/1998-9903-2021-23-1-197-207.

Введение

Автономные электротехнические комплексы, имеющие в своем составе дизель-генераторные агрегаты, продолжают оставаться широко востребованными в различных областях деятельности человечества [1,2]. Не смотря на развитие и интеграцию в энергетические системы возобновляемых источников электроэнергии, дизель-генераторные установки являются наиболее надежными, универсальными и независимыми от внешних условий устройствами. Суда и плавучие объекты морского флота относятся к электротехническим комплексам, которые во время нахождения в море и океане могут получать электрическую энергию исключительно за счет собственных источников [3-6]. Конечно, в настоящее время существуют экспериментальные суда с солнечными батареями, дополнительным парусным вооружением, волновые электростанции. Однако, основными источниками электрической энергии на плавучих объектах морского флота, где не применяются атомные энергетические установки, продолжают оставаться дизель-генераторные устройства на основе синхронных генераторов в режиме их параллельной работы [7-10].

Весь мир знает и следил за строительством подводного газопровода «Турецкий поток» с Черноморского побережья Российской Федерации в Турцию, а теперь газопровода «Северный поток-2» с Балтийского побережья Российской Федерации в Западную Европу. Основную и наиболее значительную часть работ по прокладке трубопровода выполнило самое большое в практике мирового судостроения судно «*Pioneering Spirit*» («Дух первопроходца») водоизмещением порядка одного миллиона тонн (рис. 1). Судно находится в собственности швейцарской компании *Allseas*. «*Pioneering Spirit*» производит монтаж, транспортировку буровых платформ и прокладку подводных трубопроводов. Строительство судна осуществляла компания *Daewoo Shipbuilding & Marine Engineering* (Южная Корея) на верфях Южной Кореи и в Роттердаме в 2011-2016 годах.

Примечателен тот факт, что президент Российской Федерации Владимир Владимирович Путин лично посетил судно «*Pioneering Spirit*» 23 июня 2017 года и присутствовал при соединении подводных частей трубопровода «Турецкий поток».

На судне установлены 12 винторулевых колонок типа Азипод мощностью по 4000 кВт. Электростанция судна состоит из 8 дизель-генераторов мощностью по 14700 кВт каждый, также установлен стояночный дизель-генератор мощностью 6100 кВт и аварийный дизель-генератор мощностью 3000 кВт. Генераторы вырабатывают напряжение 11кВ, что относится к классу High voltage. При такой колоссальной мощности автономной электростанции, на судне ощущается ее недостаток! Хотя, первоначально были установлены дизель-генераторы по 11200 кВт, но из-за недостатка электрической мощности при модернизации генераторы заменили, а дизелям увеличили обороты с 600 до 720 об/мин. На судне практически отсутствуют электрогидравлические приводы. Сейчас устанавливается полностью электрический, как и все остальные краны на судне, кормовой кран-спарка, грузоподъемностью 20 тысяч тонн. Суммарная мощность электродвигателей такого кормового крана составляет примерно 60 тысяч

кВт. Грузовые краны построены производителем тяжелого морского оборудования компанией *Huisman*.



Рис. 1. Судно «*Pioneering Spirit*»

Fig.1. Ship «*Pioneering Spirit*»

На судне «*Pioneering Spirit*» существует очень большая проблема, связанная с обратной мощностью. Так, даже кран на 5000 тонн вызывает переход всех генераторов в режим обратной мощности при спуске груза, вследствие чего автоматическая защита по превышению оборотов останавливает все дизеля. Процесс происходит чрезвычайно быстро, так как кран используется в режиме компенсации волнения моря и обеспечивает неподвижность вывешенной части трубопровода. При этом период качки составлял 11 сек, а ограничения по амплитуде волнения моря 3 м, таким образом кран чередует режимы травления и выбирания, каждый из которых длится 4-5 сек, а защита по обратной мощности настроена на срабатывание через 10 сек. Для выхода из такой аварийной ситуации, судоводительский персонал судна запускает пару аzipодов на полную мощность в противоположные стороны для обеспечения нагрузки на судовую электрическую сеть. При этом на 5000 тонном кране на основной гак работает 12 электромоторов по 600 кВт. Если судно стоит в порту или, например, на рейде при хороших погодных условиях и общая нагрузка маленькая, то, как только судоводители забудут запустить винторулевые колонки или крановщик не предупредит об опасном режиме работы крана, то судно сразу обесточивается, то есть происходит блэкаут со всеми вытекающими последствиями. Очевидно, что установка и использование электрического кормового крана на 20 тысяч тонн может вызвать непредсказуемые последствия для устойчивости в работе автономного судового электротехнического комплекса. В дополнение ко всем существующим проблемам, необходимо рассеять 60 МВт при спуске груза. Когда груз опускается краном, то все электромоторы переходят в режим генерации и эта энергия начинает заряжать конденсаторы на шине постоянного тока инверторов, при этом за 4-5 секунд происходит их заряд с 1100 В до 1200 В. При превышении напряжением предела в 1200 В, AFE (*active frond end*) выпрямитель переходит в режим инвертора ведомого сетью и выдает всю энергию в общую судовую сеть. Реально эта мощность настолько велика, что переводит все параллельно работающие дизель-генераторы в режим обратной мощности. Конечно, такая проблема существует у всех судовых кранов с электрическим приводом и всегда имеет место проблема, куда деть энергию при опускании груза, либо кабины лифта. Для решения такой задачи часто используют резисторы – ТЭНы, но в случае, когда это лифт с электромотором на 20 кВт или кран на 100 тонн с двумя электромоторами по 350 кВт, такие ТЭНы имеют реализуемые размеры и греют воду. В ситуации с электрическим краном грузоподъемностью 20 тысяч тонн на судне «*Pioneering Spirit*» экипаж имеет дело с мощностью в 100 раз большей и возникает проблема с рассеиванием этой энергии. Для выхода из сложившейся ситуации, планируется установка системы аккумуляторов на каждую общую шину постоянного тока параллельно конденсаторам инверторов в помещении каждой лебедки. По предварительным расчетам потребуется 4000 кВт*ч литий-титанатных аккумуляторных батарей. Это позволит опускать груз массой в 20 тысяч тонн со скоростью 10 см/сек на 50 метровую высоту.

При переходе синхронного генератора в режим обратной мощности происходит изменение его угла нагрузки, то есть угла между осью полюсов ротора самого генератора и осью его вращающегося магнитного поля. Устанавливаемые на судах системы автоматики позволяют отслеживать изменения угла нагрузки синхронных генераторов.

Как было установлено в ходе проведения исследований на судах морского флота, в автономных электротехнических комплексах возникают обменные колебания мощности при параллельной работе синхронных генераторов [11]. Такие колебания мощности крайне негативно сказываются на работе судового электрооборудования и средств автоматики и способны создавать аварийные ситуации вплоть до обесточивания судна. Остановка генерирующих электрическую энергию агрегатов является аварийной ситуацией и создает угрозу самому суду, жизни его экипажа и пассажиров. Конечно, квалификация судовых специалистов позволяет в большинстве случаев восстановить электроснабжение и продолжить плавание.

Материалы и методы

Используя разработанную математическую модель (рис. 2) автономного электротехнического комплекса судна, установлено, что причиной обменных колебаний мощности является люфт в контурах управления скоростью дизель-генераторов [12]. Кроме того, разработан метод устранения обменных колебаний мощности [11, 13], для реализации которого предложены изменения в структуре судового электротехнического комплекса, алгоритм работы вводимого нового блока, а также критерий распознавания системой уровня колебаний [11, 14].

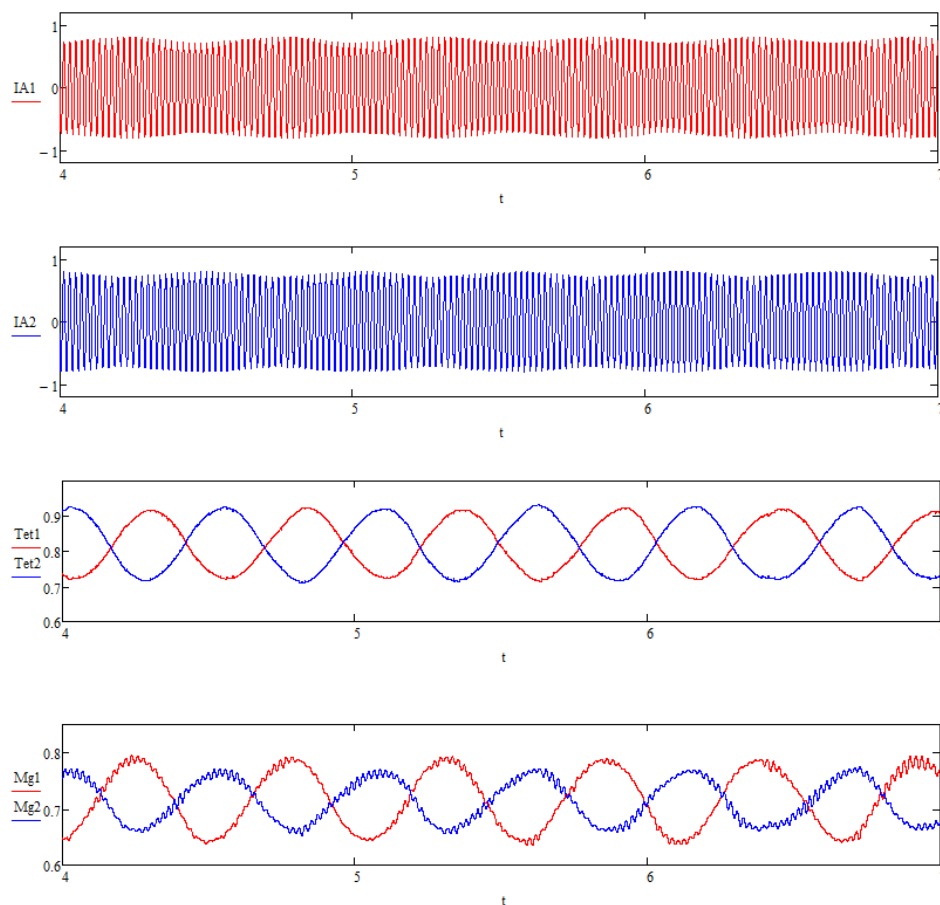


Рис.2. Результаты моделирования. Зазоры люфта $D_{n1}=0,002$ и $D_{n2}=0,01$, коэффициенты передачи $K_{\omega 1} = K_{\omega 2} = 50$, уставки по частоте вращения $\omega_{r01} = \omega_{r02} = 1$ и постоянные времени

$$T_{\omega 1} = T_{\omega 2} = 60$$

Fig.2. Simulation results. Backlash gaps $D_{n1}=0.002$ and $D_{n2}=0.01$, transmission coefficients, speed settings and time constants

Основными параметрами, по которым проводится анализ амплитуды обменных колебаний мощности в разработанном методе являются токи генераторов. Вместе с тем в используемой математической модели судового электротехнического комплекса [11, 15] присутствует информация о мгновенных углах нагрузки параллельно работающим

синхронных генераторов (рис. 1). Графики мгновенных значений токов, углов нагрузки и моментов двух генераторных агрегатов, работающих параллельно, представлены в квазиустановившемся режиме работы в диапазоне 4-7 сек., при этом заданы значения зазоров люфтов контуров регулирования частоты вращения соответственно $D_{n1}=0,002$ и $D_{n2}=0,01$, коэффициенты передачи $K_{\omega 1} = K_{\omega 2} = 50$, уставки по частоте вращения $\omega_{r01} = \omega_{r02} = 1$ и постоянные времени $T_{\omega 1} = T_{\omega 2} = 60$.

На графиках токов генераторов отчетливо видны признаки обменных колебаний мощности, когда максимуму огибающей тока одного генератора соответствует минимум огибающей тока второго параллельно работающего генератора и наоборот. При сопоставлении графиков изменения токов и углов нагрузок генераторов видна полная идентичность огибающих токов и графиков углов нагрузки, максимуму линии изменения угла нагрузки первого генератора соответствует минимум линии изменения угла нагрузки

второго параллельно работающего генератора. Таким образом, можно определять и контролировать амплитуду обменных колебаний мощности по углам нагрузки параллельно работающих генераторов.

Результаты

Для выяснения характера зависимости угла нагрузки синхронных генераторов от значений зазоров люфта в контурах регулирования частотой вращения проведены исследования при помощи разработанной математической модели [11]. Изменения зазоров принимались в диапазоне от 0 до 0,02 с шагом 0,002, то есть во всем диапазоне устойчивой работы. Результаты вычислений приведены в таблице 1.

Таблица 1

Зависимость угла нагрузки от зазоров люфта в контурах регулирования частоты вращения генераторных агрегатов

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	0,05	0,09	0,15	0,2	0,25	0,3	0,35	0,4	0,41	0,46
0,002	0,05	0,01	0,05	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3	0,34	0,38	0,42
0,004	0,1	0,06	0,02	0,05	0,11	0,14	0,2	0,25	0,29	0,33	0,38
0,006	0,15	0,11	0,06	0,02	0,05	0,11	0,15	0,2	0,24	0,3	0,34
0,008	0,2	0,16	0,11	0,06	0,02	0,06	0,09	0,15	0,19	0,23	0,28
0,01	0,25	0,21	0,16	0,11	0,06	0,02	0,05	0,1	0,14	0,19	0,24
0,012	0,31	0,27	0,21	0,16	0,11	0,06	0,02	0,05	0,09	0,14	0,19
0,014	0,36	0,32	0,26	0,21	0,16	0,12	0,07	0,03	0,05	0,09	0,15
0,016	0,42	0,38	0,31	0,26	0,21	0,16	0,11	0,08	0,04	0,05	0,1
0,018	0,48	0,43	0,36	0,32	0,26	0,21	0,17	0,12	0,08	0,05	0,06
0,02	0,54	0,48	0,41	0,37	0,31	0,26	0,21	0,17	0,13	0,08	0,06

по которым построена карта зависимости угла нагрузки от зазоров люфта в контурах регулирования частоты вращения генераторных агрегатов (рис. 3).

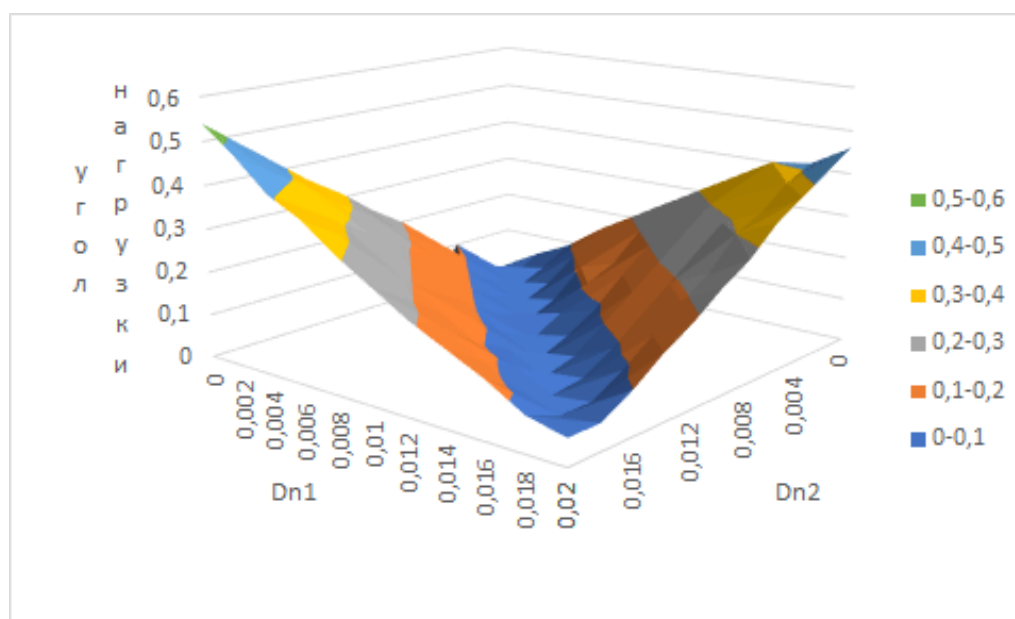


Рис. 3. Карта зависимости угла нагрузки от зазоров люфта. D_{n1} и D_{n2} — зазоры люфта первого и второго параллельно работающего дизель-генератора соответственно

Fig.3. Map of the dependence of the load angle on the backlash gaps. D_{n1} and D_{n2} are the backlash gaps of the first and second parallel-running diesel generator, respectively

Ранее, проведены аналогичные исследования на предмет выяснения зависимости амплитуд обменных колебаний мощности от зазоров люфта по значениям токов генераторов [12]. Результаты таких вычислений приведены в таблице 2, по которым построена карта зависимости амплитуды обменных колебаний мощности от зазоров люфта (рис. 4).

Таблица 2

Зависимость амплитуды обменных колебаний мощности от зазоров люфта

D_{n1}/D_{n2}	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

Сравнение результатов исследования, приведенных в таблицах 1 и 2, а также карт зависимости угла нагрузки от зазоров люфта на рисунке 2 и карты зависимости амплитуды обменных колебаний мощности от зазоров люфта на рисунке 3 показывает их полное сходство и идентичность. Таким образом, обе карты доказывают то, что при равенстве зазоров или нулевых значениях зазоров люфта в контурах регулирования оборотов дизель-генераторов обменные колебания отсутствуют, а увеличение значений зазоров D_{n1} и D_{n2} приводит к росту амплитуды обменных колебаний мощности.

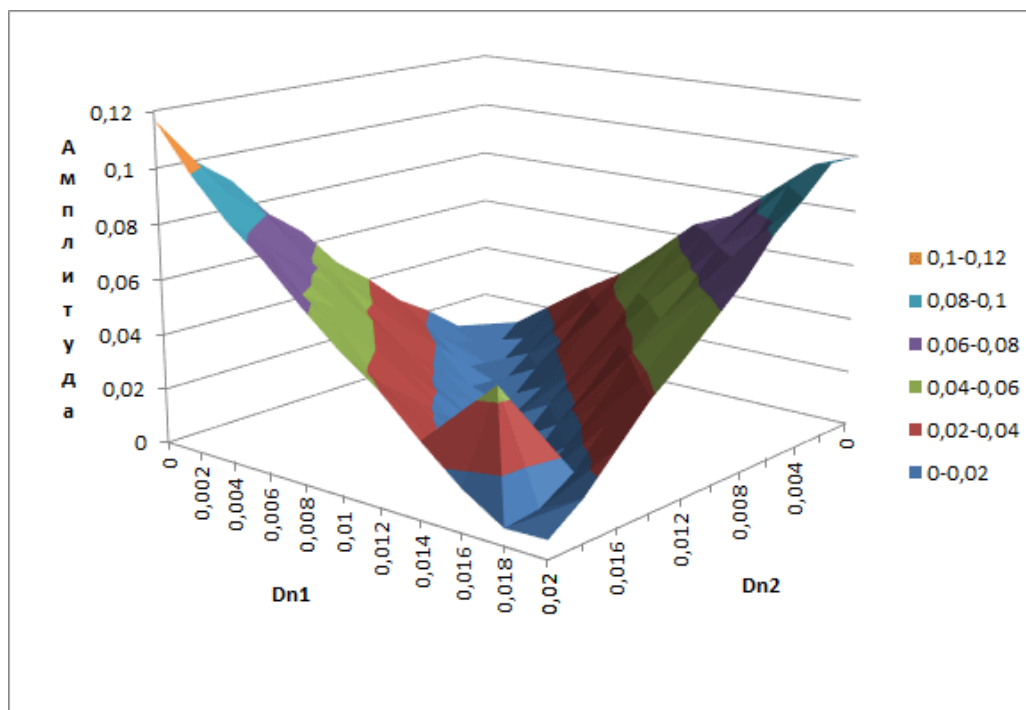


Рис.4. Карта зависимости амплитуды обменных колебаний мощности от зазоров люфта. D_{n1} и D_{n2} - зазоры люфта первого и второго параллельно работающего дизель-генератора соответственно

Fig.4. Map of the dependence of the amplitude of the power exchange fluctuations on the backlash gaps. D_{n1} and D_{n2} -backlash gaps of the first and second parallel-running diesel generator, respectively

Обсуждение

Рассмотренные проблемы перехода генераторов в режим обратной мощности и существование обменных колебаний мощности в автономных судовых электротехнических комплексах настолько серьезны, что без преувеличения, требуют поиска новых путей решения. Полученные результаты исследований дают возможность единого подхода при решении поставленных задач. Такой подход возможен с точки зрения контроля угла нагрузки синхронных генераторов и использования системами автоматического управления параллельной работой генераторных агрегатов информации об изменении угла нагрузки. В разработанном методе устранения обменных колебаний мощности [11] при определении критерия о значении таких колебаний используются огибающие токов синхронных генераторов I_1 и I_2 , из разности которых $I_1 - I_2$ формируется значение $S = S_1 + S_2 + \dots + S_n$ за период времени T (рис.5). Значение суммарной площади S является индикатором значения амплитуды обменных колебаний мощности.

При формировании формы огибающей используется синусоида мгновенного значения тока генератора (рис. 6). Это требует временных затрат, что сказывается на быстродействии системы. Кроме того, возможно возникновение некоторых сложностей при построении огибающих токов, связанных с не идеальностью форм токовых синусоид. Как уже отмечалось, переход генераторов в режим обратной мощности на судне «*Pioneering Spirit*» происходит очень быстро, менее, чем за 4-5 сек., поэтому повышение быстродействия имеет чрезвычайно важное значение и может значительно улучшить характеристики устойчивой работы электротехнического комплекса судна.

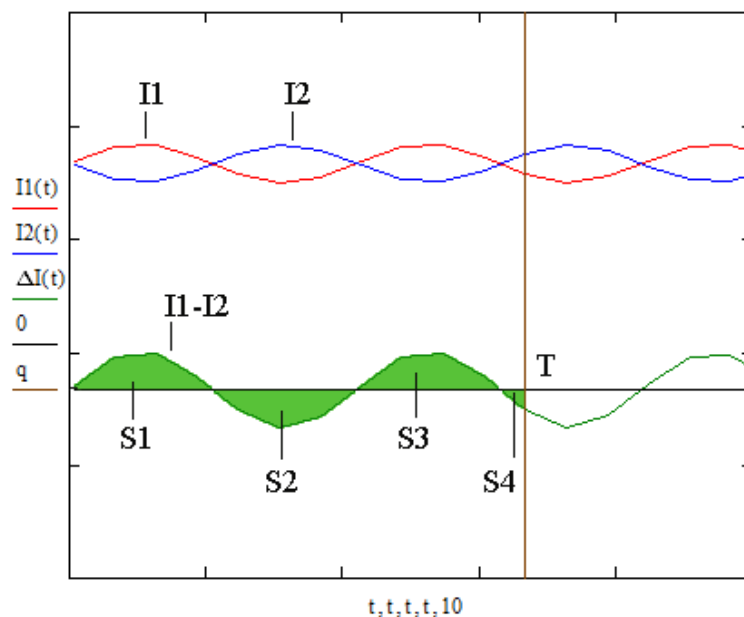


Рис.5. Критерий определения амплитуды обменных колебаний мощности на основе токов двух генераторов

Fig.5. Criterion for determining the amplitude of the power exchange fluctuations based on the currents of two generators

Во время проведения исследований на морских судах фиксировались случайные отклонения амплитуд токовых синусоид в отдельных периодах, что было связано, например, с появлением значительных пульсаций при работе мощных тиристорных преобразователей напряжения гребных электрических двигателей, а также с возможным появлением синфазных колебаний мощности из-за разницы в настройках регуляторов частоты [11]. Такие явления требуют специальных мер и сказываются на точности формирования массива данных для построения огибающей тока генератора и работе блока устранения обменных колебаний мощности в целом в реальных судовых условиях, которые естественно отличаются от идеальных условий математического моделирования.

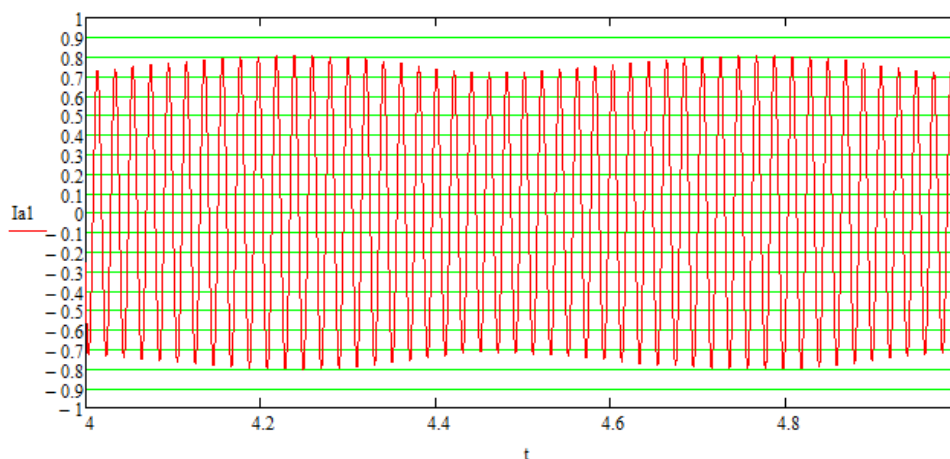


Рис.6. Результаты моделирования. График тока одного из параллельно работающих синхронных генераторов, $D_{n1}=0,002$ и $D_{n2}=0,01$

Fig.6. Simulation results. Graph of the current of one of the parallel synchronous generators, $D_{n1}=0.002$ and $D_{n2}=0.01$

При использовании блоком устранения обменных колебаний мощности критерия определения значения амплитуды обменных колебаний мощности целесообразно заменить огибающие токов генераторов, полученные из графика мгновенных значений токов генераторов (рис.6), на линию угла нагрузки генераторов (рис. 7). Такая линия строится по данным, полученным непосредственно из систем автоматики, контролирующим переход в режим обратной мощности и превышение амплитудой

обменных колебаний мощности предельно допустимых значений.

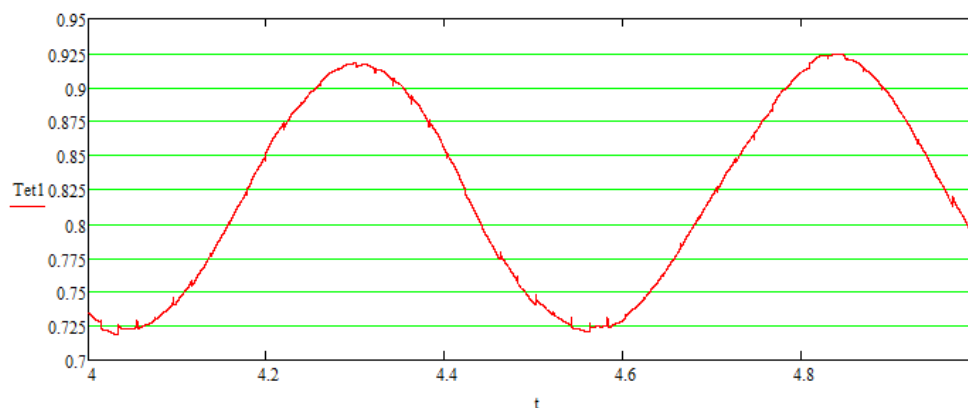


Рис.7. Результаты моделирования. График угла нагрузки одного из параллельно работающих синхронных генераторов, $D_{n1}=0,002$ и $D_{n2}=0,01$

Fig.7. Simulation results. Graph of the load angle of one of the parallel synchronous generators, $D_{n1}=0,002$ and $D_{n2}=0,01$

После такой замены критерий определения амплитуды обменных колебаний для двух параллельно работающих генераторов примет вид, изображенный на рисунке 8. Имея готовые кривые изменения углов нагрузки параллельно работающих генераторов θ_1 и θ_2 , строится кривая их разности $\theta_1 - \theta_2$ и определяется $S=S_1+S_2+\dots+S_n$ за период времени T , по которой и определяется амплитуда обменных колебаний мощности.

В случае параллельной работы произвольного количества синхронных генераторов [11] также может быть применен критерий с использованием угла нагрузки.

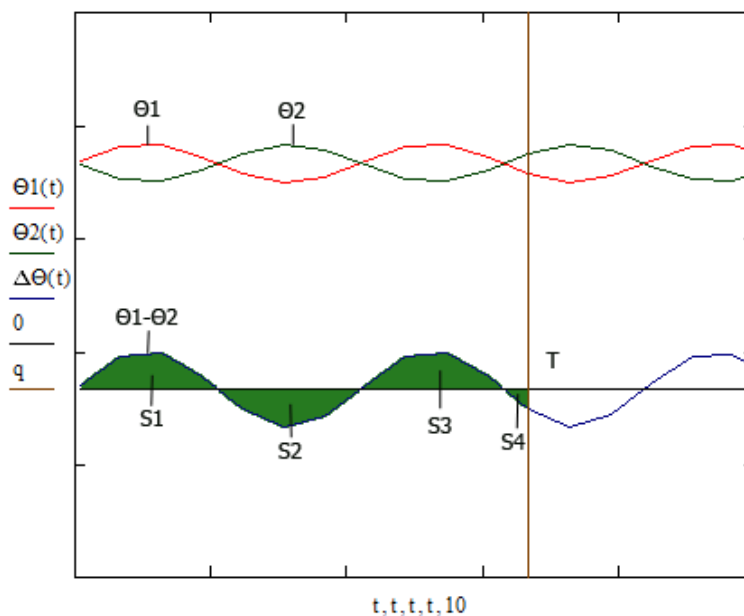


Рис.8. Критерий определения амплитуды обменных колебаний мощности на основе углов нагрузки двух генераторов

Fig.8. Criterion for determining the amplitude of power exchange fluctuations based on the load angles of two generators

Заключение

Таким образом, представлена актуальная информация о проблемах, возникающих в автономных электротехнических комплексах морских судов при параллельной работе синхронных генераторов. Проведенные исследования позволяют внести изменения в метод устранения обменных колебаний мощности с целью улучшения быстродействия и точности работы системы, а также для формирования единого подхода в управлении углами нагрузки параллельно работающих генераторов. Для контроля и устранения обменных колебаний мощности получена карта зависимости угла нагрузки генератора от

зазоров люфта, вызывающих такие колебания. Сравнительный анализ карт зависимости токов генераторов от зазоров люфта и карт зависимости углов нагрузки от зазоров люфта показал их полную идентичность с точки зрения значений амплитуд обменных колебаний мощности.

Литература

1. Грачева Е.И., Ильясов И.И., Алимова А.Н. Сравнительный анализ и исследование методов расчета потерь электроэнергии в системах электроснабжения промышленных предприятий // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2018. Т. 20 № 3-4. С. 62-71.
2. Низамиев М.Ф., Ившин И.В., Владимиров О.В и др. Измерительно-диагностический комплекс для диагностики энергетических установок // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2014. № 3-4. С. 109-114.
3. Khvatov O.S., Kobyakov D.S. Increasing the Efficiency of a Diesel-Generator Power Plant. Russian Electrical Engineering, 2020. 91(12). С. 742–748.
4. Dar'Enkov A.B., Samoyavchev I., Khvatov O.S., et al. Improving energy performance power station of ship with integrated electric propulsion. MATEC Web of Conferences, 2017, 108, 14002.
5. Sen'kov A.P., Dmitriev B.F., Kalmykov A.N., et al. Ship unified electric-power systems. Russian Electrical Engineering, 2017, 88(5):253-258.
6. Губанов Ю.А., Калинин И.М., Корнев А.С., и др. Направления совершенствования судовых единых электроэнергетических систем. Морские интеллектуальные технологии, 2019, №1-1(43), С. 103–109.
7. Zhu, Sipeng, Ma Zetai, Zhang, Kun, et al. Energy and exergy analysis of the combined cycle power plant recovering waste heat from the marine two-stroke engine under design and off-design conditions. Energy. 2020. Т. 210. №118558.
8. Zhu Sipeng, Zhang Kun, Deng, Kangyao. A review of waste heat recovery from the marine engine with highly efficient bottoming power cycles. Renewable & sustainable energy reviews 2020.Т. 120. № 109611.
9. Geertsma R.D., Visser, K., Negenborn R.R. Adaptive pitch control for ships with diesel mechanical and hybrid propulsion. Applied energy. 2018. Т. 228. С. 2490-2509
10. Mondejar, M.E., Andreasen, J.G., Pierobon, L., et al. A review of the use of organic Rankine cycle power systems for maritime applications. Renewable & sustainable energy reviews. 2018. Т. 91. №126-151.
11. 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.
12. Савенко А.Е., Савенко П.С. Влияние люфта на амплитуду обменных колебаний мощности в автономных электротехнических комплексах // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2018. Т. 20. № 5-6. С. 46-54.
13. Savenko A.E. Development of Method for Eliminating Exchangeable Power Fluctuations in Shipboard Electrical Systems. Proceedings - 2019 International Ural Conference on Electrical Power Engineering, UralCon 2019.С. 234-238.
14. Tyutikov V.V., Panteleev E.R., Zhilnikova Y.F. Analysing impact of transfer function zeros in controlled object on parametric sensitivity of systems synthesized by method of aggregated controller analytical design (ACAD). Proceedings - 2020 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2020, 2020, 9111877.
15. Алейников А.В., Голубев А.Н., Мартынов В.А. Разработка уточненной математической модели синхронного двигателя с постоянными магнитами для расчетов в реальном времени // Вестник ИГЭУ. 2017. №. 5. С. 37-43.

Авторы публикации

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

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

References

1. Gracheva EI, Il'jasov I, Alimova AN. 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. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2018;20(3-4):62-71.
2. Ivshin IV, Nizamiev MF, Vladimirov OV. Measuring-diagnostic complex for the diagnosis of power plants. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2014;3-4:109-114.
3. Khvatov O.S., Kobayakov D.S. Increasing the Efficiency of a Diesel-Generator Power Plant. *Russian Electrical Engineering*. 2020;91(12):742–748.
4. Dar'Enkov AB, Samoyavchev I, Khvatov OS, et al. *Improving energy performance power station of ship with integrated electric propulsion*. MATEC Web of Conferences, 2017;108:14002.
5. Sen'kov AP, Dmitriev BF, Kalmykov AN, et al. Ship unified electric-power systems. *Russian Electrical Engineering*. 2017;88(5):253-258.
6. Gubanov YA, Kalinin IM, Kornev AS, et al. Directions of improvement for ship unified power systems. *Marine Intelligent Technology*. 2019;1-1(43):103-109.
7. Zhu Sipeng, Ma Zetai, Zhang Ku, et al. Energy and exergy analysis of the combined cycle power plant recovering waste heat from the marine two-stroke engine under design and off-design conditions. *Energy*. 2020;210:118558. doi: 10.1016/j.energy.2020.118558.
8. Zhu Sipeng, Zhang Kun, Deng Kangyao. A review of waste heat recovery from the marine engine with highly efficient bottoming power cycles. *Renewable & sustainable energy reviews*. 2020;120:109611. doi: 10.1016/j.rser.2019.109611.
9. Geertsma RD, Visser K, Negenborn RR. Adaptive pitch control for ships with diesel mechanical and hybrid propulsion. *Applied energy*. 2018;228:2490-2509. doi: 10.1016/j.apenergy.2018.07.080
10. Mondejar ME, Andreasen JG, Pierobon L, et al. A review of the use of organic Rankine cycle power systems for maritime applications. *Renewable & sustainable energy reviews*. Book: 91. 2018;91:126-151. doi: 10.1016/j.rser.2018.03.074.
11. Savenko AE, Golubev AN. *Exchange power fluctuations in ship electrotechnical complexes*. Ivanovskiy gosudarstvennyy energeticheskiy universitet imeni V.I. Lenina. Ivanovo, 2016. 172 p.
12. Savenko AE, Savenko PS. Influence of backlash on amplitude of exchange power fluctuations in autonomous electric power equipment. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2018;20(5-6):46-54.
13. Savenko AE. *Development of Method for Eliminating Exchangeable Power Fluctuations in Shipboard Electrical Systems*. Proceedings - 2019 International Ural Conference on Electrical Power Engineering, UralCon 2019;2:234–238.
14. Tyutikov VV, Panteleev ER, Zhilnikova YF. *Analysing impact of transfer function zeros in controlled object on parametric sensitivity of systems synthesized by method of aggregated controller analytical design (ACAD)*. Proceedings - 2020 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2020, 2020, 9111877.
15. Aleynikov AV, Golubev AN, Martynov VA. Development of a mathematical model of synchronous permanent magnet motor for real-time calculations. *Vestnik IGEU*. 2017;5:37-43.

Authors of the publication

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

Pavel S. Savenko – Kerch State Maritime Technological University.

Получено

27 февраля 2021г.

Отредактировано

05 марта 2021г.

Принято

05 марта 2021г.