

УДК 621.313

Причины возникновения обменных колебаний мощности в автономных электротехнических комплексах

А.Е. Савенко

ФГБОУВО «Керченский государственный морской технологический университет»,
г. Керчь, Республика Крым, Российская Федерация
E-mail: savenko-70@mail.ru

Авторское резюме

Состояние вопроса: Известные результаты исследований дают представление о природе обменных колебаний мощности при параллельной работе дизель-генераторных агрегатов переменного тока и доказывают необходимость определения критерия устойчивости параллельной работы по величине обменных колебаний активной мощности. Накопленная информация, технический опыт и результаты научных исследований по обменным колебаниям мощности дают основания говорить, что рекомендации по их уменьшению направлены на некоторые конструктивные изменения дизель-генераторных агрегатов (в основном дизелей), что естественно для специалистов механиков. Однако, несмотря на, казалось бы, глубокое изучение природы обменных колебаний мощности, отсутствует информация об успешном внедрении новаций и устранении обменных колебаний, конкретных методах, которые бы дали реальный эффект. Напротив, электромеханическая служба даже суперсовременных судов с классом автоматизации А1 сталкивается с их существованием и отрицательными последствиями. В связи с этим актуальной является задача выяснения причин возникновения обменных колебаний мощности в автономных электротехнических комплексах.

Материалы и методы: Использованы результаты вычислительного эксперимента параллельной работы генераторных агрегатов электротехнического комплекса судна, проведенного с использованием методов математического моделирования. Для определения люфта как причины существования обменных колебаний мощности используется математическая модель судового электротехнического комплекса, где учтено существование люфта в системах автоматического управления частотой вращения дизелей.

Результаты: Получены результаты экспериментальных исследований, подтверждающие существование обменных колебаний мощности при параллельной работе синхронных генераторов электротехнического комплекса по причине наличия люфта в системах автоматического управления частотой вращения дизелей. Результаты математического моделирования подтверждено, что амплитуда обменных колебаний мощности растет с увеличением ширины зазоров параллельно работающих генераторов как в случае равных, так и в случае различных их значений.

Выводы: Люфты являются одной из основных причин возникновения и существования обменных колебаний мощности при параллельной работе судовых синхронных генераторных агрегатов. Полученные результаты дают основания исключить из причин возникновения обменных колебаний мощности при параллельной работе судовых дизель-генераторов различия конструктивных параметров агрегатов.

Ключевые слова: обменные колебания мощности, экспериментальные исследования, математическая модель, параллельная работа, электротехнический комплекс, синхронный генератор, генераторный агрегат, ток генератора, мощность генератора.

Causes of power exchange fluctuations in autonomous electric power equipment

A.E. Savenko

Kerch State Maritime Technological University, Kerch, Republic of Crimea, Russian Federation
E-mail: savenko-70@mail.ru

Abstract

Background: The known research results describe the nature of power exchange fluctuations in case of parallel operation of AC diesel generator units and prove the need to determine the criterion of stability of parallel operation by the active power exchange fluctuations. The accumulated information, technical expertise and research findings on power exchange fluctuations give grounds to say that the recommendations usually reduce the optimization measures to some design changes in diesel-generator units (mainly diesel ones), which is natural for mechanics experts. However, the seemingly profound studies of the nature and causes of metabolic power fluctuations provide no information about the successful implementation of innovations and elimination of exchange fluctuations, or specific methods which would give a real effect. On the contrary, even the ultra-modern electro-service vessels with automation class A1 are affected by the negative consequences of such fluctuations. Therefore, it is quite urgent now to find out the reasons for power exchange fluctuations.

Materials and methods: The study employed the results of a computational experiment of parallel operation of generating units in a ship electrical complex conducted by mathematical modeling methods. To determine the «backlash» as the reason for power exchange fluctuations, we used a mathematical model of the ship electrical complex as it takes into account the «backlash» in the systems of automatic control of diesel rotation speed.

Results: The obtained experimental results have confirmed the presence of power exchange fluctuations in case of parallel operation of synchronous generators of the electrical complex as there is a «backlash» in the automatic control systems of diesel rotation speed. The mathematical modeling results have proved that the power exchange fluctuation amplitude increases with the increase in the width of the gaps of the generators running in parallel whether their values are different or equal.

Conclusions: «Backlashes» are among the main reasons for exchange fluctuations of power in ship synchronous generator units operating in parallel. The obtained results allow us to exclude different design parameters of ship diesel generator units from the list of causes of power exchange fluctuations in case when the units run in parallel.

Key words: power exchange fluctuations, experimental studies, mathematical model, parallel operation, electrotechnical equipment, synchronous generator, generating unit, generator current, generator power.

DOI: 10.17588/2072-2672.2016.5.041-048

Введение. В требованиях классификационных обществ, морских конвенций, международного стандарта ISO 8528 отсутствуют требования по обеспечению показателей качества параллельной работы дизель-электрических агрегатов переменного тока [1, 2]. Однако, как показывает опыт эксплуатации современных морских судов, кроме общего требования о том, что параллельно работающие агрегаты не должны выпадать из синхронизма, необходимы критерии или нормы качества работы в параллель. Это связано с тем, что проблема обеспечения устойчивой параллельной работы имеет высокую степень сложности из-за существования обменных колебаний мощности («перетекание мощности») между параллельно работающими дизель-генераторными агрегатами (ДГА) переменного тока [3, 4, 5].

Обменные колебания мощности – это явление своеобразного перехода мощности от одного ДГА к другому с частотой, измеряемой несколькими герцами. Осциллограмма изменения активной мощности каждого из двух параллельно работающих ДГА представляет собой примерно синусоидальные кривые этого изменения с зеркальным характером, т.е. максимуму мощности одного ДГА в данный момент времени соответствует минимум мощности другого ДГА, и наоборот [6].

Внешне эти колебания сопровождаются колебаниями силы тока и напряжения генераторов (что можно увидеть и по приборам), звеньев регуляторов скорости дизелей, реек топливных насосов (с большой амплитудой – вплоть до колебаний от упора до упора), что резко отрицательно влияет на работоспособность агрегатов. В некоторых случаях это является препятствием к нормальному функционированию судовой электростанции (величина перетекаемой мощности составляет 100 % и более с частотой 2–4 Гц и выше) [6].

Проблема существования обменных колебаний мощности между синхронными генераторами была обнаружена давно, но она не решена и до сегодняшнего дня, так как не определены причины, приводящие к таким колебаниям. Можно отметить исследования Б.И. Болотина и В.Л. Вайнера [4]. Наиболее

полная и систематизированная информация, касающаяся современного состояния вопроса обменных колебаний мощности, собрана профессорами В.А. Лашко и Г.А. Конксом [6], которые являются ведущими специалистами в области эксплуатации судовых энергетических установок.

Состояние вопроса. Задача уменьшения амплитуды обменных колебаний мощности может быть решена проектантами ведущих мировых фирм в области конструирования судовых дизель-генераторных агрегатов и электростанций только после глубокого и всестороннего исследования природы и причин их возникновения, и решаться эта задача должна, безусловно, еще на стадии проектирования и разработки, а никак не после спуска судов на воду и сдачи их в эксплуатацию. Также необходимо определиться с допустимыми критериями обменных колебаний, так как необходимо знать, до какого уровня их нужно снижать.

Для формулировки критериев устойчивости нужно проанализировать причины появления и существования обменных колебаний мощности между ДГА, работающими в параллель, и разработать методы их снижения до допустимой величины, поскольку полностью избавиться от обменных колебаний мощности невозможно.

В настоящее время ученые, которые проводят исследования в данном направлении, и специалисты, эксплуатирующие судовые энергетические установки и электростанции, выделяют следующие задачи, имеющие непосредственное отношение к природе обменных колебаний [6]:

1) анализ вынужденных колебаний вследствие возмущающих моментов дизеля классических гармоник, а также возмущений, вызванных работой топливной аппаратуры двигателя, и собственных колебаний системы параллельно работающих дизель-генераторов (ДГ), чтобы оценить околорезонансный характер обменных колебаний и найти технические решения для ухода от совпадения частот вынужденных и собственных колебаний системы ДГ, работающих в параллель;

2) анализ влияния системы регулирования скорости на величину обменных колебаний (например, при совпадении частот колебаний измерителя скорости регулятора и колебаний системы ДГ, что может привести к автоколебаниям элементов регулятора, реек топливных насосов и т.д.);

3) анализ влияния элементов синхронного генератора (система регулирования напряжения, демпфирование и др.) на развитие или подавление обменных колебаний активной мощности;

4) общий анализ устойчивости системы параллельно работающих ДГ на основе оценки амплитудно-фазовых характеристик (АФХ) динамических звеньев системы (например, на основе частотного критерия Найквиста);

5) выбор конструктивных элементов сложной структурной схемы параллельной работы ДГ с оптимизацией величины обменных колебаний активной мощности между ДГ за счет эффективных технических решений.

Анализ результатов решения этих задач позволяет сформулировать известные причины существования обменных колебаний мощности. Поскольку частота собственных колебаний системы параллельно работающих дизель-электрических агрегатов (с учетом влияния синхронной связи между ними, величин моментов инерции маховых масс ДГ) у современных ДГ (со степенью неравномерности вращения $1/200$ – $1/300$) находится в пределах 2 – 6 Гц, то наибольший интерес для четырехтактных дизелей вызывает половинная основная гармоника вынужденных колебаний коленчатого вала дизеля ($n/120$ Гц, где n – частота вращения, мин^{-1}), связанная с проявлением неустойчивости работы по цилиндрам двигателя (например, выпадение одного цилиндра), и существование возмущающих сил со спектром ниже частоты половинной основной гармоники, что может быть обусловлено эффектом работы конкретной топливной аппаратуры дизелей [6].

Исследования показывают, что особое значение для формирования спектра возмущающих сил низкого порядка в дизеле ($n/240$, $n/360$, $n/480$) имеют характер изменения остаточного давления топлива в трубопроводе высокого давления между ТНВД и форсункой и отсечка подачи топлива во всасывающую полость высокого давления, зависящие от конструктивных и гидродинамических параметров топливной аппаратуры, ее частотных характеристик [6].

Выяснено, что параллельно работающих агрегат можно вывести на резонансную зону работы при изменении только частоты собственных колебаний системы ДГ (при изменении, например, величины податливости электрической синхронной связи) и получить развитые обменные колебания с частотами,

соответствующими спектру возмущающих сил низкого порядка (ниже частоты половинной основной гармоники).

Также доказано, что при увеличении насыщения генератора частота собственных колебаний системы ДГ возрастает, что соответствует емкостному $\cos \varphi_{\text{емк}}$ в сравнении с индуктивным $\cos \varphi_{\text{инд}}$. При таком изменении коэффициента мощности демпфирование генератора уменьшается [6].

Сравнение характера зависимости изменения угла нагрузки $\Delta\theta$ (θ – угол между магнитным полем статора и ротора) от частоты колебаний при нормально функционирующей штатной системе возбуждения и корректора напряжения и при независимом возбуждении генератора показывает, что в первом случае изменения угла нагрузки $\Delta\theta$ и, следовательно, обменные колебания мощности на всех режимах меньше, чем во втором [6].

Таким образом, синхронный генератор является динамическим звеном системы параллельно работающих ДГ, от свойств которого в значительной степени зависят качество параллельной работы ДГ, амплитуда и характер проявления обменных колебаний мощности.

Приведенные результаты исследования дают представление о природе обменных колебаний мощности при параллельной работе дизель-генераторных агрегатов переменного тока и доказывают необходимость определения критерия устойчивости параллельной работы ДГ по величине обменных колебаний активной мощности. Такой критерий определит цели и задачи для проектантов судовых ДГ и судовых электростанций, которые будут определять их действия по разработке необходимых методов и средств для снижения обменных колебаний до допустимой величины.

Исследователи считают, что это могут быть:

- изменение частоты собственных колебаний системы ДГ, работающих в параллель (например, установка маховика дизеля с большим GD^2 , изменение величины синхронизирующего момента);

- исключение возмущающих сил в дизеле низкого порядка (в частности, неустойчивости впрыска топлива от цикла к циклу путем оптимизации конструкции топливных насосов дизелей) для предотвращения околорезонансных крутильных колебаний системы ДГ;

- изменение частоты собственных колебаний измерителя скорости регулятора (например, массы центробежных грузов и жесткости главной пружины);

- введение или усиление демпфирования синхронного генератора.

Очевидно, что решение проблемы обеспечения устойчивой и надежной параллельной

работы судовых дизель-генераторных агрегатов на основе синхронных генераторов путем устранения или уменьшения до минимума амплитуды обменных колебаний мощности является актуальной задачей уже много десятилетий. Изучив накопленную информацию, технический опыт и результаты научных исследований по обменным колебаниям мощности, мы видим, что рекомендации по их уменьшению направлены на некоторые конструктивные изменения дизель-генераторных агрегатов (в основном дизелей), что естественно для специалистов механиков. Однако, несмотря на обширный собранный материал и, казалось бы, глубокое изучение природы и причин обменных колебаний мощности, мы не находим информации об успешном внедрении новаций и устранении обменных колебаний. Не видим мы и конкретных методов, которые дали бы реальный эффект. Напротив, электромеханическая служба даже суперсовременных судов с классом автоматизации А1 сталкивается с их существованием и отрицательными последствиями. Обменные колебания мощности между параллельно работающими агрегатами приводят к повышенному износу регуляторов частоты вращения, ограничивают использование мощности генераторных агрегатов, вызывают пульсацию напряжения судовой сети, уменьшают коэффициент полезного действия механизмов, а также отрицательно сказываются на психофизическом состоянии экипажа, снижают эффективность и надежность работы систем автоматизации, могут привести даже к выпадению синхронного генератора из синхронизма, вплоть до обесточивания судов, что является аварийной ситуацией, а значит, несет угрозу жизни людей, находящихся на борту судна, сохранности груза и самого судна [7].

Конечно, в идеале было бы хорошо исключить наличие обменных колебаний мощности, но на практике существует ряд причин, вследствие которых сделать это не удается, и поэтому необходимо уменьшить их амплитуду до регламентируемых норм, а если возможно, то и ниже.

Материалы и методы. Для определения причин существования обменных колебаний мощности используется математическая модель судового электротехнического комплекса [8], где учтено существование люфта в системах автоматического управления частотой вращения дизелей. Математическая модель позволяет получить в виде графиков мгновенные значения моментов M_{g1} , M_{g2} , токов I_{A1} , I_{A2} , частот вращения роторов ω_{r1} , ω_{r2} , углов нагрузки Te_{t1} , Te_{t2} параллельно работающих генераторов. Результаты вычислительного эксперимента по исследованию параллельной работы генераторных агрегатов электротехнического комплекса судна, проведенного с использова-

нием методов математического моделирования, совпадают с результатами натурального эксперимента на действующем судне морского флота. Этот факт подтверждает достоверность полученных результатов.

Результаты. Влияние люфта на существование обменных колебаний мощности. Необходимо выяснить, как влияют значения зазоров и их соотношения на амплитуду обменных колебаний мощности.

На рис. 1 приведены результаты моделирования параллельной работы двух синхронных дизель-генераторов со значениями зазоров регуляторов частоты вращения дизелей $D_{n1} = 0,002$ и $D_{n2} = 0,01$. На графиках токов и моментов генераторов видны примерно синусоидальные кривые с зеркальным характером, т.е. максимуму мощности одного генератора соответствует минимум другого генератора, и наоборот, что и является основным признаком наличия обменных колебаний мощности.

Проведем исследования, изменяя значения зазоров люфта. На рис. 2 представлены результаты моделирования параллельной работы двух генераторных агрегатов при $D_{n1} = 0$ и $D_{n2} = 0$, т.е. явление люфт у обоих генераторных агрегатов отсутствует. При этом видно полное отсутствие обменных колебаний. Это можно определить по следующим признакам: амплитуда синусоид токов генераторов не меняется и их огибающими являются прямые линии, параллельные оси абсцисс; графики моментов генераторов M_{g1} и M_{g2} , углов нагрузки Te_{t1} , Te_{t2} и частот вращения генераторов ω_{r1} и ω_{r2} после входа в установившийся режим совпадают. При одновременном увеличении зазоров D_{n1} и D_{n2} до равных значений 0,005 (рис. 3) видно появление небольших по амплитуде обменных колебаний по кривым токов и моментов генераторов, графики скоростей вращения агрегатов также имеют колебательный характер.

При дальнейшем равном увеличении зазоров (рис. 4) наблюдаем увеличение амплитуд обменных колебаний. Однако существование равных зазоров даже у однотипных параллельно работающих генераторов возможно только в идеальном случае, на практике же зазоры имеют разные значения.

Сравним результаты моделирования, представленные на рис. 1 и рис. 5. В обоих случаях зазоры различны, при этом имеющиеся в обоих случаях обменные колебания различаются по амплитуде. Согласно результатам моделирования, амплитуда обменных колебаний мощности растет с увеличением ширины зазоров параллельно работающих генераторов как в случае равных, так и в случае различных их значений.

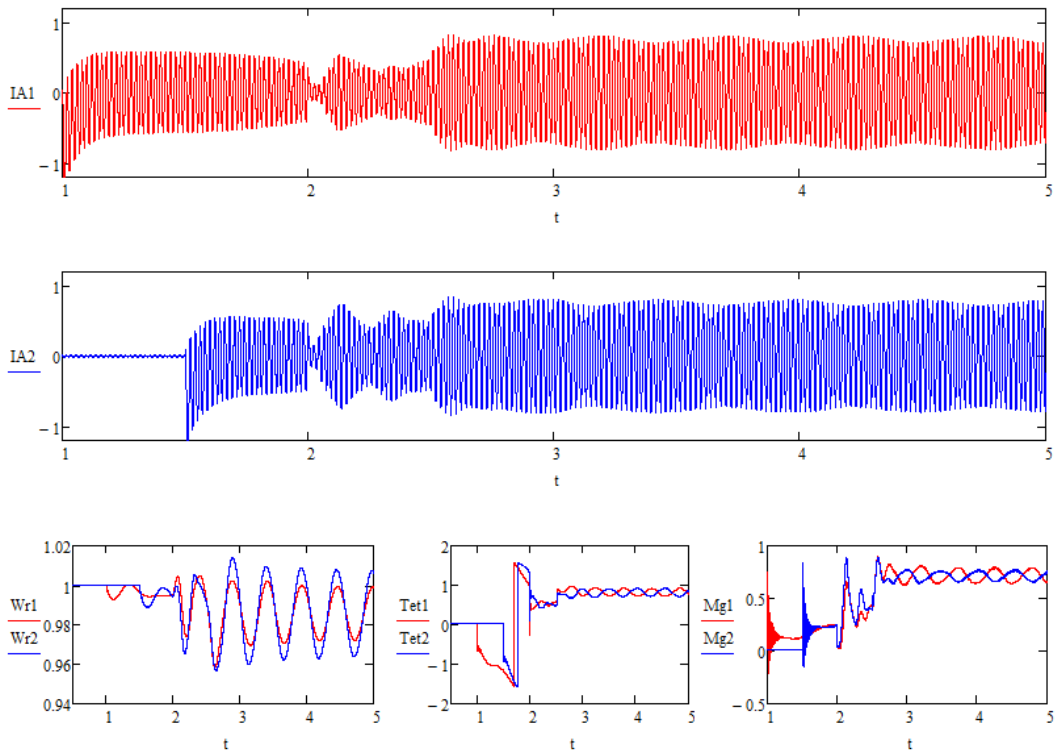


Рис. 1. Результаты моделирования при $D_{n1} = 0,002$, $D_{n2} = 0,01$, $K_{01} = 50$, $K_{02} = 50$, $\omega_{r01} = 1$, $\omega_{r02} = 1$

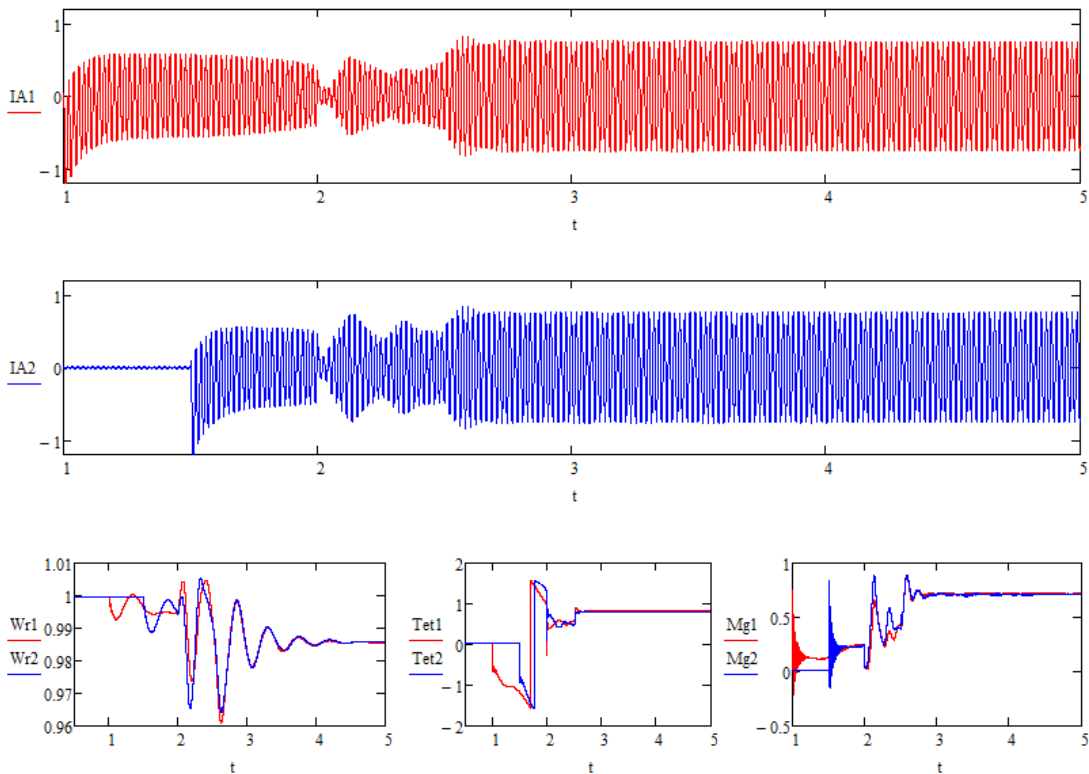


Рис. 2. Результаты моделирования при $D_{n1} = 0$, $D_{n2} = 0$, $K_{01} = 50$, $K_{02} = 50$, $\omega_{r01} = 1$, $\omega_{r02} = 1$

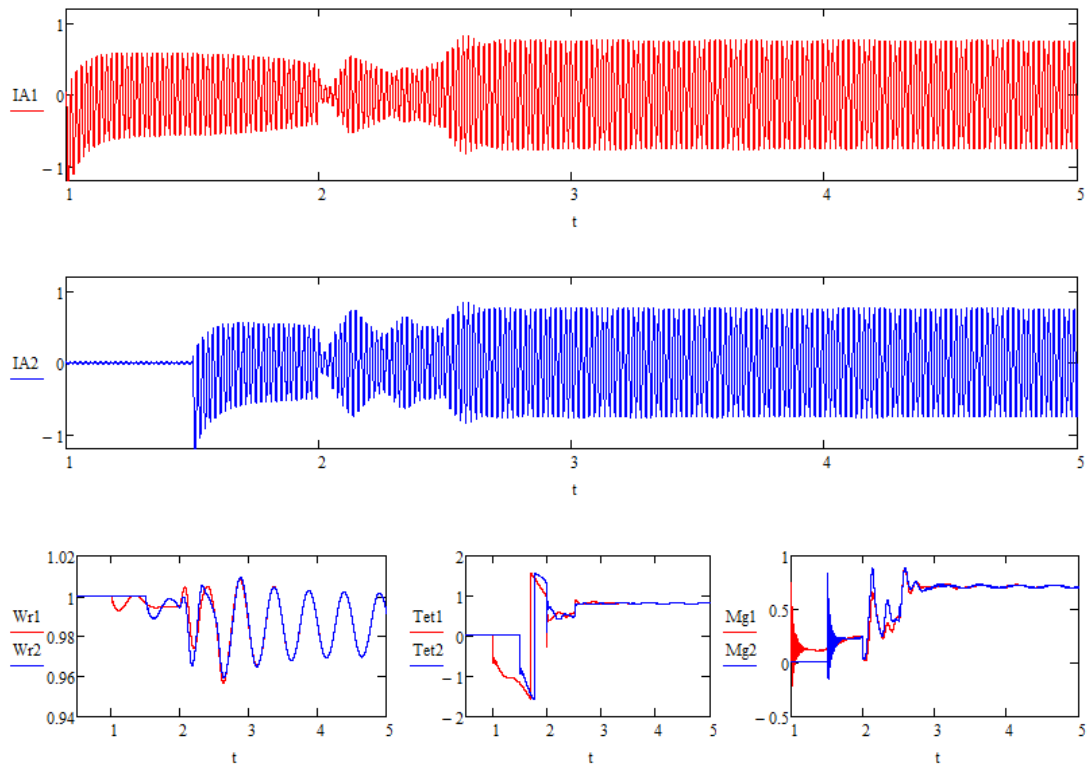


Рис. 3. Результаты моделирования при $D_{n1} = 0,005$, $D_{n2} = 0,005$, $K_{01} = 50$, $K_{02} = 50$, $\omega_{r01} = 1$, $\omega_{r02} = 1$

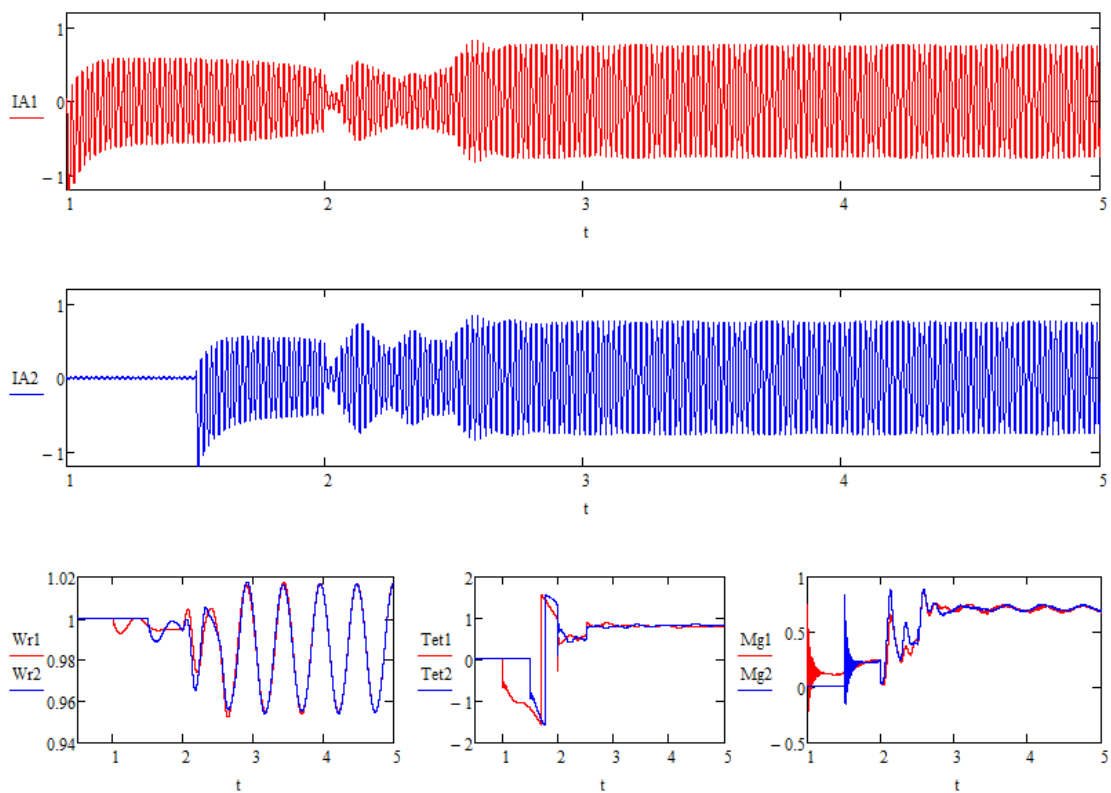


Рис. 4. Результаты моделирования при $D_{n1} = 0,01$, $D_{n2} = 0,01$, $K_{01} = 50$, $K_{02} = 50$, $\omega_{r01} = 1$, $\omega_{r02} = 1$

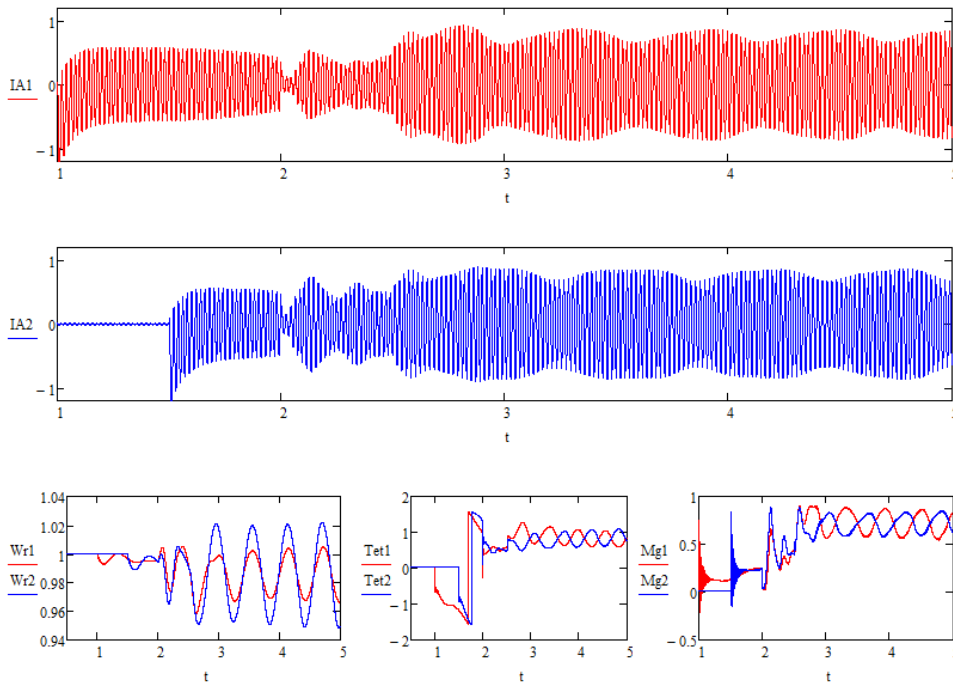


Рис. 5. Результаты моделирования при $D_{r1} = 0,002$, $D_{r2} = 0,02$, $K_{\omega 1} = 50$, $K_{\omega 2} = 50$, $\omega_{r1} = 1$, $\omega_{r2} = 1$

Влияние отличия конструктивных параметров ДГА на обменные колебания мощности. При экспериментальных исследованиях и математическом моделировании принимается равенство конструктивных параметров параллельно работающих дизель-генераторных агрегатов. Вместе с тем известно, что в реальных условиях значения этих параметров имеют некоторые различия. Необходимо исследовать, как влияют различия конструктивных параметров однотипных ДГА на существование обменных колебаний мощности при их параллельной работе. При-

ем для модельного эксперимента вариант отличия на 25 % значений всех конструктивных параметров ДГА, которые используются при математическом моделировании, речь идет об активных и индуктивных сопротивлениях и моментах инерции дизель-генераторных агрегатов.

Результаты моделирования (рис. 6) показывают, что различия конструктивных параметров на 25 % однотипных параллельно работающих ДГА не приводят к возникновению и существованию обменных колебаний мощности.

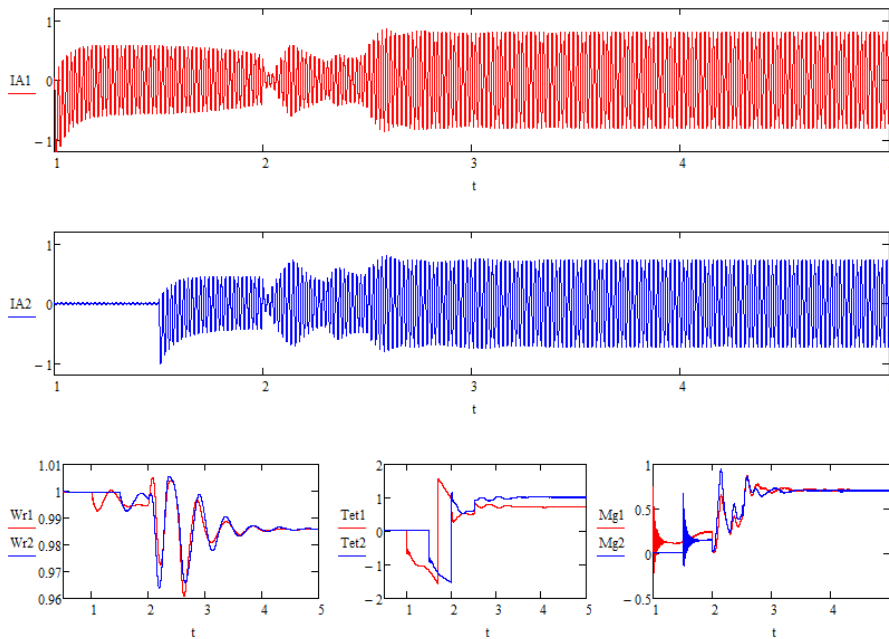


Рис. 6. Результаты моделирования при $D_{m1} = 0$, $D_{m2} = 0$, $K_{\omega 1} = 50$, $K_{\omega 2} = 50$, $\omega_{r1} = 1$, $\omega_{r2} = 1$. Конструктивные параметры ДГ 2 на 25 % превышают параметры ДГ 1

Аналогичные результаты получаются при различии параметров на 15 %, 35 %, 50 %. По результатам исследования видно, что различия конструктивных параметров приводят к некоторому перераспределению мощностей, однако процессы имеют квазиустойчивый характер.

Выводы. Таким образом, реализованная в математической модели возможность изменения зазоров регуляторов, т.е. учета люфтов, наглядно показала, что именно они являются одной из основных причин возникновения и существования обменных колебаний мощности при параллельной работе судовых синхронных генераторных агрегатов. Полученные результаты дают основания исключить из причин возникновения колебаний мощности при параллельной работе судовых ДГ различия конструктивных параметров агрегатов.

Список литературы

1. Баранов А.П. Судовые автоматизированные электроэнергетические системы. – М.: Транспорт, 1988. – 328 с.
2. Хватов О.С., Дарьенков А.Б. Электростанция на базе дизель-генератора переменной частоты вращения // Электротехника. – 2014. – № 3. – С. 28–32.
3. Бурянина П.С., Корольюк Ю.Ф. Качество электроэнергии и потери мощности в автономных системах республики Саха (Якутия) // Вестник Северо-Восточного федерального университета им. М.К. Аммосова. – 2007. – № 1. – С. 56–59.
4. Болотин Б.И., Вайнер В.Л. Инженерные методы расчетов устойчивости судовых автоматизированных систем. – Л.: Судостроение, 1974. – 332 с.
5. Федоров О.В., Сарваров А.С., Шевырев Ю.В. Ресурсное обеспечение новых технологических укладов в промышленности. – М.: Кнорус, 2016. – 142 с.
6. Конкс Г.А., Лашко В.А. Мировое судовое дизелестроение. Концепции конструирования, анализ международного опыта. – М.: Машиностроение, 2005. – 512 с.
7. Оценка участия синхронного генератора в демпфировании низкочастотных колебаний по данным синхронизированных векторных измере-

ний / Ю.П. Захаров, А.С. Бердин, А.С. Герасимов и др. // Вестник Южно-уральского государственного университета. – 2013. – № 2. – С. 62–68.

8. Савенко А.Е. Математическая модель судового электротехнического комплекса // Вестник ИГЭУ. – 2015. – Вып. 5. – С. 54–59.

References

1. Baranov, A.P. *Sudovye avtomatizirovannye elektroenergeticheskie sistemy* [Ship automated electrotechnical systems]. Moscow, Transport, 1988. 328 p.
2. Khvatov, O.S., Dar'enkov, A.B. *Elektrostantsiya na baze dizel'-generatora peremennoy chastoty vrashcheniya* [Variable speed diesel generator power plant]. *Elektrotekhnika*, 2014, no. 3, pp. 28–32.
3. Buryanina, P.S., Korolyuk, Yu.F. *Kachestvo elektroenergii i poteri moshchnosti v avtonomnykh sistemakh respubliky Sakha (Yakutiya)* [Power quality and power loss in the Autonomous Republic of Sakha systems (Yakutia)]. *Vestnik Severo-Vostochnogo federal'nogo universiteta im. M.K. Ammosova*, 2007, no. 1, pp. 56–59.
4. Bolotin, B.I., Vayner, V.L. *Inzhenernye metody raschetov ustoychivosti sudovykh avtomatizirovannykh system* [Engineering techniques of calculating the stability of ship automated systems]. Leningrad, Sudostroenie, 1974. 332 p.
5. Fedorov, O.V., Sarvarov, A.S., Shevyrev, Yu.V. *Resursnoe obespechenie novykh tekhnologicheskikh ukladov v promyshlennosti* [Resource maintenance of new technological structures in industrial manufacturing]. Moscow, Knorus, 2016. 142 p.
6. Konks, G.A., Lashko, V.A. *Mirovoe sudovoe dizelstroenie. Kontseptsii konstruirovaniya, analiz mezhdunarodnogo opyta* [World diesel engine manufacturing. Concepts of design, analysis of international experience]. Moscow, Mashinostroenie, 2005. 512 p.
7. Zakharov, Yu.P., Berdin, A.S., Gerasimov, A.S., Kovalenko, P.Yu., Moiseychev, A.N. *Otsenka uchastiya sinkhronnogo generatora v dempfirovanii nizkochastotnykh kolebaniy po dannym sinkhronizirovannykh vektornykh izmereniy* [Evaluation of synchronous generator contribution to damping of low-frequency vibrations according to the synchronized vector measurements]. *Vestnik Yuzhno-ural'skogo gosudarstvennogo universiteta*, 2013, no. 2, pp. 62–68.
8. Savenko, A.E. *Matematicheskaya model' sudovogo elektrotekhnicheskogo kompleksa* [A mathematical model of ship electrical complex]. *Vestnik IGEU*, 2015, issue 5, pp. 54–59.

Савенко Александр Евгеньевич,
ФГБОУВО «Керченский государственный морской технологический университет»,
доцент кафедры электрооборудования судов и автоматизации производства,
e-mail: savenko-70@mail.ru