

УДК 621.313

Идентификация обменных колебаний мощности в 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: В настоящее время существующие системы управления параллельной работой генераторных агрегатов не контролируют наличие обменных колебаний мощности и не ограничивают их уровень. Проводимые ранее исследования привели к выявлению отрицательного влияния обменных колебаний мощности между параллельно работающими генераторными агрегатами на качество вырабатываемой электрической энергии и на работу электротехнических комплексов. В связи с этим актуальным является разработка способов идентификации наличия и уровня обменных колебаний мощности в электротехнических комплексах.

Материалы и методы: Исследования основаны на анализе осциллограмм, полученных при проведении натурных экспериментальных исследований параллельной работы генераторных агрегатов электротехнического комплекса судна-парома «Ейск». Используются результаты вычислительного эксперимента работы электротехнического комплекса, основанного на использовании методов математического моделирования.

Результаты: Получены результаты экспериментальных исследований, подтверждающие существование обменных колебаний мощности при параллельной работе синхронных генераторов электротехнического комплекса. Получены осциллограммы тока и активной мощности параллельно работающих генераторов в различных режимах работы электротехнического комплекса. Результатами математического моделирования подтверждена возможность идентификации обменных колебаний мощности по токам фаз параллельно работающих генераторов.

Выводы: Экспериментальные исследования и результаты математического моделирования параллельной работы генераторных агрегатов электротехнического комплекса судна-парома «Ейск» доказали возможность идентификации и контроля уровня обменных колебаний мощности по колебаниям соответствующих им токов. Контроль токов параллельно работающих генераторных агрегатов представляет собой более простую задачу для электротехнических комплексов с точки зрения аппаратной части без потери точности измерения.

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

Identification of exchange power fluctuations in electric power complexes

A.E. Savenko

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

Abstract

Background: Currently, the existing control systems of parallel operation of generating units do not control the availability of exchange capacity fluctuations and do not limit their level. Prior studies led to the identification of the negative impact of exchange fluctuations between the power generator sets running in parallel on the quality of the produced electric energy and electrical systems work. In this regard, it is quite urgent to develop techniques identifying the presence and level of exchange power fluctuations in electrical power complexes.

Materials and methods: The research is based on the analysis of waveforms obtained during full-scale experimental studies of parallel operation of power generators of the ferry-vessel «Yeysk» electrical complex. The study employed the results of computational experiment of the electric power complex based on the use of mathematical modeling methods.

Results: The study experimentally confirmed the existence of exchange power fluctuations in electric power complex synchronous generators running in parallel. Oscillograms of current and active power of generators operating in parallel were recorded in various operation modes of the electric power complex. The results of mathematical modeling also confirm the possibility of identifying exchange power fluctuations by phase currents of the generators running in parallel.

Conclusions: The experimental studies and the results of mathematical modeling of parallel operation of generating units in the ferry-vessel «Yeysk» electric power complex proved the possibility to identify and control the level of exchange power fluctuations by the power fluctuations of the corresponding currents. The control of current generating units operating in parallel is a simpler task for electric power systems in terms of hardware without loss of accuracy.

Key words: exchange power fluctuations, mathematical model, parallel operation, electric power complex, synchronous generator, generating set, generator current, generator power, experimental research.

DOI: 10.17588/2072-2672.2016.2.027-032

Введение. Для обеспечения электрической энергией как автономных, так и стационарных объектов применяются генераторные агрегаты с тепловым приводом, включенные на параллельную работу. В качестве тепловых приводов могут использоваться дизельные, бензиновые и газовые двигатели. К автономным объектам, имеющим электротехнические комплексы с параллельно работающими синхронными генераторами, относятся транспортные средства различного назначения, например морские суда. Стационарные объекты промышленности и бытовой инфраструктуры также могут получать электроэнергию от параллельно работающих генераторных агрегатов стационарного и мобильного исполнения.

Обменные колебания мощности в электротехнических комплексах. В условиях энергетической блокады со стороны Украины для обеспечения электрической энергией Крымского и Севастопольского федеральных округов используются мобильные дизельные, бензиновые и газовые генераторы, газотурбогенераторы, генераторы тепловых электростанций, электростанции судов, ветровые и солнечные электростанции. Для безопасной и экономически выгодной работы потребителей необходимо обеспечить высокое качество производимой электрической энергии. Сложность решения этой задачи объясняется использованием многогенераторных электростанций и необходимостью обеспечения параллельной работы источников электрической энергии [1, 2]. Организация эффективной параллельной работы генераторов является важной задачей для электротехнического комплекса, особенно в условиях соизмеримости мощностей источников и потребителей [3]. Здесь можно выделить два аспекта, которые поясняют важность этой проблемы. Во-первых, обеспечение безопасности оборудования и людей, так как нарушение параллельной работы может привести к развалу энергосистемы, обесточиванию, нарушению технологических процессов и катастрофе. Во-вторых, важна экономическая составляющая эксплуатации оборудования. Низкое качество производимой электроэнергии приводит к повышенному расходу топлива, увеличению производственного времени, появлению дополнительных расходов, связанных с ремонтом оборудования. Современные электроэнергетические системы имеют большое количество систем автоматики, обеспечивающих параллельную работу генераторных агрегатов в соответствии с требо-

ваниями нормативных документов и инструкций. Однако очень часто возникают аварийные ситуации, связанные с неудовлетворительным качеством параллельной работы источников электроэнергии. Замеры, проводимые специалистами во время исследований, также выявляют низкое качество электрической энергии, вырабатываемой автономными электростанциями [4]. Причинами таких фактов является неполная изученность всех происходящих процессов, несовершенство систем автоматики и недостаточная квалификация обслуживающего персонала. Одной из малоизученных проблем параллельной работы генераторных агрегатов на основе синхронных генераторов переменного тока, которые в основном применяются в электротехнических комплексах, являются обменные колебания мощности [5, 6, 7]. Требования классификационных обществ и международных стандартов не содержат допустимых норм, ограничивающих уровень таких колебаний. А между тем ограничение амплитуды обменных колебаний мощности напрямую связано с обеспечением устойчивой работы электротехнических комплексов.

Известно, что обменные колебания мощности между параллельно работающими агрегатами приводят к повышенному износу регуляторов частоты вращения, ограничивают использование мощности генераторных агрегатов, вызывают пульсацию напряжения сети, уменьшают коэффициент полезного действия электроприводов и механизмов, отрицательно сказываются на психофизическом состоянии персонала, снижают эффективность и надежность работы систем автоматизации, могут привести даже к выпадению синхронного генератора из синхронизма, вплоть до обесточивания электротехнического комплекса, что является аварийной ситуацией, а значит, несет угрозу жизни людей и сохранности товаров и продукции.

Экспериментальная идентификация обменных колебаний мощности. Обменные колебания мощности – это явление своеобразного перехода мощности от одного генератора к другому с частотой, измеряемой несколькими герцами. Для успешного устранения обменных колебаний мощности при параллельной работе генераторных агрегатов [8] необходимо идентифицировать такие колебания [9]. Наиболее просто и эффективно сделать вывод о наличии и амплитуде обменных колебаний мощности можно по осциллограммам токов параллельно работающих генераторов. Это подтверждают резуль-

таты экспериментальных исследований, проведенных на судне-пароме «Ейск» государственной судоходной компании «Керченская паромная переправа», осуществляющем регулярные грузопассажирские перевозки между портом «Крым» (Керчь) и портом «Кавказ» (Кубань). В качестве источников электроэнергии на пароме установлены три главных дизель-генератора 6VD26/20-AL-2 с генераторами S450MG 800кВА, 390В, 50 Гц для параллельной работы и один вспомогательный дизель-генератор S350SB 200кВА, 390В, 50 Гц.

Осциллограммы тока и активной мощности (рис. 1, 2) одного из параллельно работающих генераторов, зафиксированные при пуске подруливающего устройства, при его работе, при работе гребных двигателей и в других режимах, изображенные в одной системе координат, показывают, что эти величины изменяются синфазно.

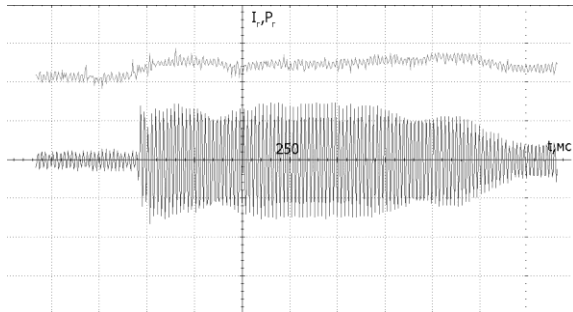


Рис. 1. Ток и активная мощность одного из параллельно работающих генераторов при пуске подруливающего устройства

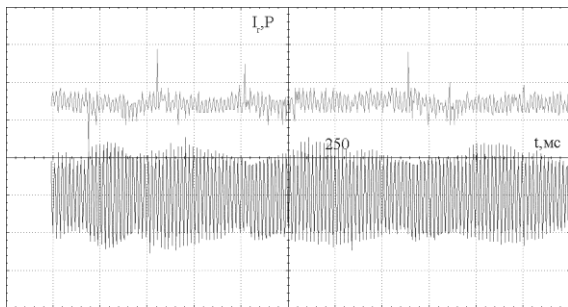


Рис. 2. Ток и активная мощность одного из параллельно работающих генераторов в установившемся режиме работы

Этот факт дает право говорить о существовании обменных колебаний мощности на основании существования обменных колебаний токов. Таким образом, осциллограммы токов двух параллельно работающих генераторов во всех режимах работы судна подтверждают существование обменных колебаний мощности.

На линии активной мощности присутствуют колебания с частотой 50 Гц. Дизель паромы имеет частоту вращения 1000 об/мин и состоит из 6 цилиндров. Проведем несложные расчеты, поясняющие причину этих колебаний.

Время одного рабочего цикла двигателя внутреннего сгорания (ДВС), с/цикл, составляет

$$t_{ц} = \frac{60}{nz},$$

где n – частота вращения, об/ мин; $z = 0,5$ – коэффициент для 4-х тактных ДВС.

Период колебаний суммарного крутящего момента, с, равен

$$T_{м} = \frac{t_{ц}}{i} = \frac{60}{inz},$$

где i – число цилиндров.

Частота колебаний суммарного крутящего момента ДВС, 1/с = Гц, рассчитывается как

$$\omega_{м} = \frac{1}{T_{м}} = \frac{inz}{60}.$$

При $i = 6$, $n = 1000$ об/мин, $z = 0,5$ имеем

$$\omega_{м} = \frac{6 \cdot 1000 \cdot 0,5}{60} = 50 \text{ Гц.}$$

Таким образом, для дизеля паромы с частотой вращения 1000 об/мин и шестью цилиндрами частота получилась равной 50 Гц, а значит, колебания возникают из-за неравномерности работы цилиндров.

Осциллограмма изменения тока двух параллельно работающих дизель-генераторов (ДГ) представляет собой примерно синусоидальные кривые этого изменения с зеркальным характером, т.е. максимуму мощности одного ДГ в данный момент времени соответствует минимум мощности другого ДГ (и наоборот).

Осциллограммы токов, полученные в квазиустановившемся режиме работы, т.е. без изменения нагрузки судовой электростанции (рис. 3), имеют ярко выраженные обменные колебания: в то время как один из параллельно работающих генераторов сбрасывает нагрузку, другой ее увеличивает. Амплитуда обменных колебаний достигает 20 %, а их период составляет 600–800 мс. Во время снятия этих осциллограмм включена судовая нагрузка, за исключением гребных двигателей, и не производится пусков и остановов каких-либо мощных потребителей.

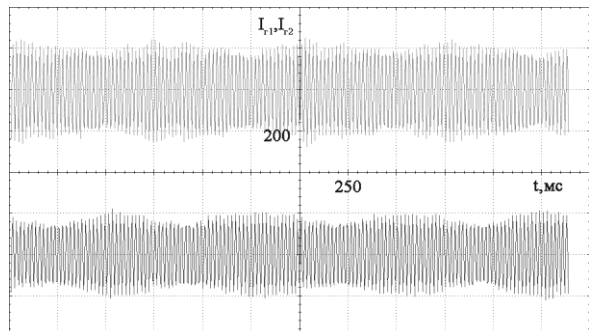


Рис. 3. Токи параллельно работающих генераторов в квазиустановившемся режиме

Исследования по идентификации обменных колебаний мощности при параллельной работе судовых синхронных генераторов являются актуальными и полезными для обеспечения надежной, безаварийной и экономически эффективной работы судового электротехнического комплекса. Результаты могут быть применены для любого электротехнического комплекса.

Идентификация обменных колебаний мощности на математической модели.

При проведении экспериментальных исследова-

ний на пароме «Ейск» получены осциллограммы тока фазы и активной мощности одного из двух параллельно работающих генераторов (рис. 1, 2). Синфазность изменения указанных величин позволяет говорить об обменных колебаниях мощности по аналогичным колебаниям токов генератора. Для подтверждения справедливости такого заявления смоделируем ток и мощность одного (рис. 4) и двух (рис. 5) параллельно работающих генераторов [10, 11].

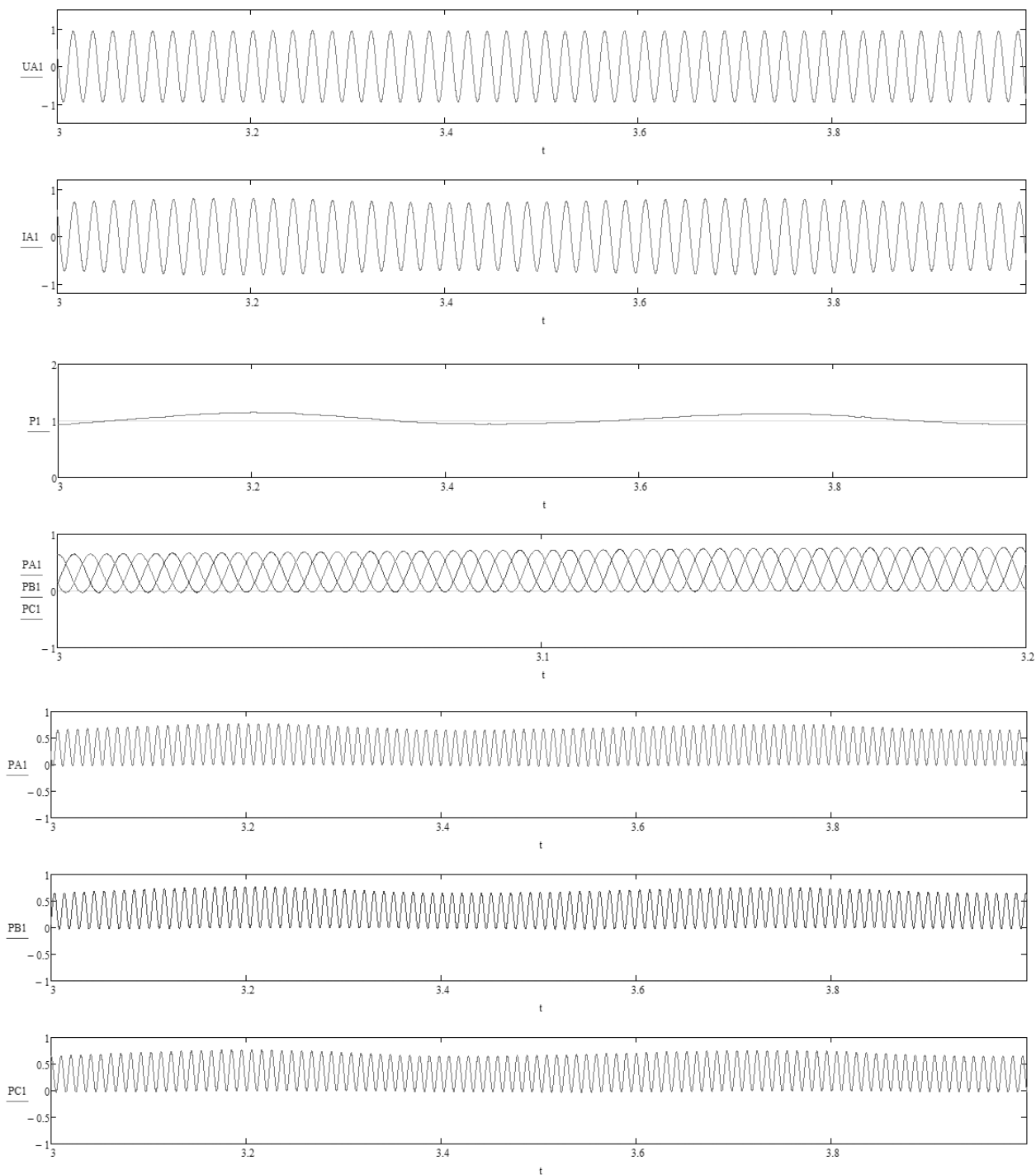


Рис. 4. Результаты моделирования для одного работающего генератора

Мгновенные значения мощностей фаз генератора составляют:

- мощность фазы А

$$P_{A1} = i_{A1} u_{A1};$$

- мощность фазы В

$$P_{B1} = i_{B1} u_{B1};$$

- мощность фазы С

$$P_{C1} = i_{C1} u_{C1}.$$

Токи фаз i_{A1} , i_{B1} , i_{C1} и напряжения фаз u_{A1} , u_{B1} , u_{C1} генератора находятся из матриц перехода от системы координат (α, β) к системе координат (А,В,С):

$$\begin{pmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{pmatrix}, \quad \begin{pmatrix} u_A \\ u_B \\ u_C \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \end{pmatrix},$$

т.е. $i_{A1} = i_{\alpha 1}$, $u_{A1} = u_{\alpha 1}$,

$$i_{B1} = -\frac{1}{2} i_{\alpha 1} + \frac{\sqrt{3}}{2} i_{\beta 1}; \quad u_{B1} = -\frac{1}{2} u_{\alpha 1} + \frac{\sqrt{3}}{2} u_{\beta 1};$$

$$i_{C1} = -\frac{1}{2} i_{\alpha 1} - \frac{\sqrt{3}}{2} i_{\beta 1}; \quad u_{C1} = -\frac{1}{2} u_{\alpha 1} - \frac{\sqrt{3}}{2} u_{\beta 1}.$$

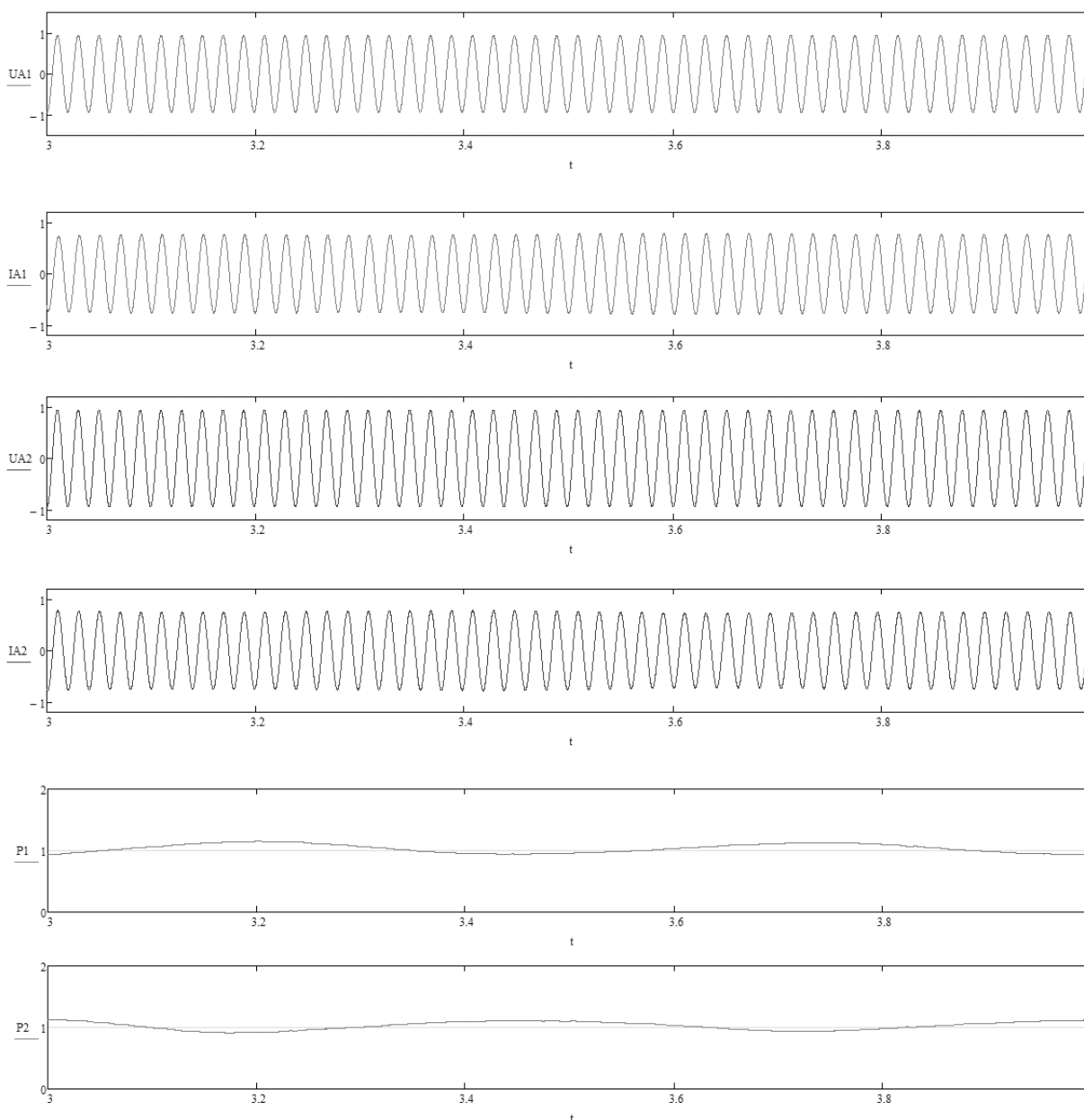


Рис. 5. Результаты моделирования для двух параллельно работающих генераторов

Мощность генератора, которая совпадает с его активной мощностью, составляет $P_1 = P_A + P_B + P_C$. Огибающая тока i_{A1} изменяется синфазно с мощностью P_1 , огибающая тока i_{A2} изменяется синфазно с мощностью P_2 , а максимумы мощности P_1 соответствуют минимумам мощности P_2 , и наоборот, что также подтверждает возможность идентификации обменных колебаний мощности по токам фаз параллельно работающих генераторов.

Заключение

Таким образом, проведенные экспериментальные исследования и результаты математического моделирования параллельной работы дизель-генераторных агрегатов электротехнического комплекса судна-парома «Ейск» доказали возможность идентификации и контроля уровня обменных колебаний мощности по колебаниям соответствующих им токов. Контроль токов параллельно работающих генераторных агрегатов представляет собой более простую задачу для электротехнических комплексов с точки зрения аппаратной части без потери точности измерения.

Список литературы

1. Баранов А.П. Судовые автоматизированные электроэнергетические системы. – М.: Транспорт, 1988. – 328 с.
2. Режимы работы энергетических систем: доклады XXII сессии Международной конференции по большим энергетическим системам (СИГРЭ) / под ред. В.А. Веникова. – М.: Энергия, 1968. – 754 с.
3. Энговатова В.В. Перспективные технологии для автономных систем электроснабжения предприятий / В.В. Энговатова, О.В. Григораш, А.В. Энговатов // Научные труды КубГТУ. – 2015. – № 4.
4. Бурянина П.С. Качество электроэнергии и потери мощности в автономных системах республики Саха (Якутия) / П.С. Бурянина, Ю.Ф. Королюк // Вестник Северо-Восточного федерального университета им. М.К. Аммосова. – 2007. – № 1. – С. 56–59.
5. Болотин Б.И., Вайнер В.Л. Инженерные методы расчетов устойчивости судовых автоматизированных систем. – Л.: Судостроение, 1974. – 332 с.
6. Тимченко В.Ф. Колебания нагрузок и обменной мощности энергосистем. – М.: Энергия, 1975. – 208 с.
7. Конкс Г.А., Лашко В.А. Мировое судовое дизелестроение. Концепции конструирования, анализ международного опыта. – М.: Машиностроение, 2005. – 512 с.
8. Савенко А.Е. Ограничение амплитуды обменных колебаний мощности в судовом электротехническом комплексе // Вестник ИГЭУ. – 2015. – Вып. 2. – С. 52–57.
9. Оценка участия синхронного генератора в демпфировании низкочастотных колебаний по данным синхронизированных векторных измерений / Ю.П. Захаров, А.С. Бердин, А.С. Герасимов и др. // Вестник Южноуральского государственного университета. – 2013. – № 2. – С. 62–68.

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

ров, А.С. Бердин, А.С. Герасимов и др. // Вестник Южноуральского государственного университета. – 2013. – № 2. – С. 62–68.

10. Сипайлов Г.А., Лоос А.В. Математическое моделирование электрических машин. – М.: Высш. шк., 1980. – 176 с.

11. 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 electric power systems]. Moscow, Transport, 1988. 328 p.
2. Rezhimy raboty energeticheskikh sistem [Operation modes of power systems]. *Doklady XXII sessii Mezhdunarodnoy konferentsii po bol'shim energeticheskim sistemam* [Papers of the XXIIth session of the International Conference on Large Electric Systems]. Moscow, Energiya, 1968. 754 p.
3. Engovatova, V.V., Grigorash, O.V., Engovatov, A.V. *Perspektivnye tekhnologii dlya avtonomnykh sistem elektrosnabzheniya predpriyatii* [Promising technologies for autonomous power systems of enterprises]. *Nauchnye trudy KubGTU*, 2015, no. 4.
4. Buryanina, P.S., Korolyuk, Y.F. *Kachestvo elektroenergii i poteri moshchnosti v avtonomnykh sistemakh respubliki 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.
5. Bolotin, B.I., Vayner, V.L. *Inzhenernye metody raschetov ustoychivosti sudovykh avtomatizirovannykh sistem* [Engineering techniques of calculating the stability of ship automated systems]. Leningrad, Sudostroenie, 1974. 332 p.
6. Timchenko, V.F. *Kolebaniya nagruzok i obmennoy moshchnosti energosistem* [Fluctuations in exchange loads and power energy systems]. Moscow, Energiya, 1975. 208 p.
7. 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.
8. Savenko, A.E. *Ogranichenie amplitudy obmennykh kolebaniy moshchnosti v sudovom elektrotekhnicheskome komplekse* [Restricting the amplitude of power exchange fluctuations in ship electrotechnical equipment]. *Vestnik IGEU*, 2015, issue 2, pp. 52–57.
9. Zakharov, Yu.P., Berdin, A.S., Gerasimov, A.S., Kovalenko, P.Yu., Moiseychev, A.N. *Otsenka uchastiya sin-khronnogo generatora v dempfirovanii nizkochastotnykh kolebaniy po dannym sinkhronizirovannykh vektornykh izmereniy* [Evaluation of synchronous generator participation in damping low-frequency vibrations according to the synchronized vector measurement]. *Vestnik Yuzhno-ural'skogo gosudarstvennogo universiteta*, 2013, no. 2, pp. 62–68.
10. Sipaylov, G.A., Loos, A.V. *Matematicheskoe modelirovanie elektricheskikh mashin* [Mathematical modeling of electrical machines]. Moscow, Vysshaya shkola, 1980. 176 p.
11. Savenko, A.E. *Matematicheskaya model' sudovogo elektrotekhnicheskogo kompleksa* [A mathematical model of a ship's electric power complex]. *Vestnik IGEU*, 2015, issue 5, pp. 54–59.