

ВЛИЯНИЕ ПОСТОЯННЫХ ВРЕМЕНИ РЕГУЛЯТОРОВ ЧАСТОТЫ НА АМПЛИТУДУ ОБМЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ МОЩНОСТИ В АВТОНОМНЫХ ДИЗЕЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЯХ

А.Е. Савенко, П.С. Савенко

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

Резюме: Рассмотрено применение автономных электротехнических комплексов, имеющих в своем составе параллельно работающие дизель-генераторные агрегаты на основе синхронных генераторов. Описана проблема существования обменных колебаний мощности в таких технических системах. Разработана математическая модель, позволяющая проводить исследования автономного электротехнического комплекса. Графическую визуализацию зависимости амплитуды обменных колебаний мощности от постоянных времени в контурах регулировки частоты вращения дизель-генераторов предложено реализовывать в виде карт настройки. Приведен пример применения предложенной методики конкретного электротехнического комплекса. Обоснована возможность уменьшения амплитуды обменных колебаний мощности путем уменьшения значений постоянных времени контуров регулирования частоты, что является основой нового метода устранения обменных колебаний мощности и дает возможность совершенствования метода, который основан на изменении коэффициентов передачи регуляторов частоты.

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

Для цитирования: Савенко АЕ., Савенко ПС. Влияние постоянных времени регуляторов частоты на амплитуду обменных колебаний мощности в автономных дизельных электростанциях // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2020. Т. 22. № 1. С. 136-144. doi:10.30724/1998-9903-2020-22-1-136-144.

INFLUENCE OF TIME CONSTANTS OF FREQUENCY REGULATORS ON THE AMPLITUDE OF POWER EXCHANGE FLUCTUATIONS IN AUTONOMOUS DIESEL POWER PLANTS

AE Savenko, PS Savenko

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

Abstract: The application of autonomous electrical complexes with parallel diesel generator sets based on synchronous generators is considered. The problem of the existence of exchange power fluctuations in such technical systems is described. A mathematical model has been developed that allows conducting research of an autonomous electrical complex. It is proposed to implement graphical visualization of the dependence of the amplitude of power exchange fluctuations on time constants in the speed control circuits of diesel generators in the form of configuration maps. An example of using the proposed method for a specific electrical complex is given. The possibility of reducing the amplitude of exchange power fluctuations by reducing the values of time constants of frequency control circuits is justified, which is the basis of a new method for eliminating exchange power fluctuations and makes it possible to improve the method, which is based on changing the transmission coefficients of frequency regulators.

Keywords: exchange power fluctuations, parallel operation, autonomous electric power complex, generating set, experimental research.

For citation: Savenko AE, Savenko PS. Influence of time constants of frequency regulators on the amplitude of power exchange fluctuations in autonomous diesel power plants. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2020; 22(1):136-144. doi:10.30724/1998-9903-2020-22-1-136-144.

Введение

Централизованное электроснабжение стало привычным для многих регионов Российской Федерации. Предприятия и население просто не смогут работать и жить без электрической энергии [1]. Десятки атомных, тепловых и гидроэлектростанций производят электрическую энергию для энергосистемы нашей страны и экспорта в соседние государства. Вместе с тем, чрезвычайно востребованными являются автономные электротехнические комплексы с собственным производством электрической энергии [2,3]. Наиболее рациональным и целесообразным оказалось применение в таких комплексах параллельно работающих дизель-генераторных агрегатов или газотурбинных установок. Автономные электростанции не имеют альтернативы и повсеместно применяются на морских и речных судах во время плавания, там они обеспечивают выполнение производственных и технологических задач и безопасность груза и экипажа [4,5].

Целые населенные пункты, например, в Якутии получают электричество от автономных дизельных электростанций, где зимние температуры опускаются ниже -50 градусов и жизнь проживающих там людей полностью зависит от них. Группа предприятий на Таманском полуострове также имеет собственную генерацию. Республика Крым обеспечивалась электрической энергией после воссоединения с Российской Федерацией десятками параллельно работающими газогенераторными и дизель-генераторными установками. В настоящее время Республика Крым живет за счет работы газотурбинных генераторов Балаклавской и Таврической электростанций по 470 МВт каждая. Есть еще Сакская и Керченская ТЭЦ, ветровые и солнечные электростанции. Таким образом, энергосистема Крыма работает в автономном режиме, а энергомост является резервной линией связи с единой энергосистемой страны.

В автономных электротехнических комплексах с параллельной работой дизель-генераторных агрегатов возникают обменные колебания мощности (ОКМ) [6], которые ограничивают использование электрического оборудования по мощности, уменьшают его ресурс и коэффициент полезного действия и могут привести к обесточиванию, что может иметь катастрофические последствия в критических условиях эксплуатации электростанций [7,8,9]. Системные экспериментальные исследования с использованием современного сертифицированного оборудования, которые длительное время проводились во всех режимах работы электростанции судна морского флота, а затем на его математической модели, позволяют считать наличие люфтов в контурах регулирования частоты основной доказанной причиной ОКМ при параллельной работе дизель-генераторных агрегатов [10]. В результате дальнейших исследований разработан метод, позволяющий устранить полностью обменные колебания мощности или существенно уменьшить их амплитуду. Метод основывается на уменьшении коэффициентов передачи регуляторов частоты. Не смотря на эффективность метода, интересны дальнейшие исследования, которые могут позволить совершенствовать предложенный метод или разработать новый.

Методы

Для проведения дальнейших исследований, направленных на поиск новых методов устранения ОКМ при параллельной работе дизель-генераторных агрегатов автономной электростанции целесообразно использовать хорошо зарекомендовавшую себя математическую модель [11,12,13], позволяющую наблюдать изменение наиболее важных величин Mg_1 , Mg_2 – моментов на валах, I_{A1} , I_{A2} – активных токов, ω_{r1} , ω_{r2} – частот вращения валов, Tet_1 , Tet_2 – электрических углов нагрузки двух синхронных генераторов в режиме их параллельной работы.

Подтверждена целесообразность математического моделирования приводного дизельного двигателя уравнениями в упрощенной форме

$$J_m \frac{d\omega_r}{d\tau} = M_d - M_g ;$$
$$M_d = K_m h , \quad M_g = \psi_{sq} i_{sd} - \psi_{sd} i_{sq} ,$$

где J_m – приведенный момент инерции валов дизель-генераторной установки, M_d – механический момент развиваемый дизельным двигателем, M_g – электромагнитный момент нагрузки на дизельный двигатель, развиваемый генератором, h – регулирующее перемещение топливной рейки, K_m – коэффициент передачи дизельного двигателя по каналу управления частотой вращения.

Для математического описания элемента, оказывающего наиболее значимое влияние на параметры ОКМ – регулятора частоты вращения дизельного двигателя, используем аperiodическое звено первого порядка

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

где T_{ω} – постоянная времени регулятора частоты, K_{ω} – коэффициент передачи управляющего сигнала регулятора, U_{ε} – разность между сигналами заданной частоты вращения ω_{r0} и реальной частотой вращения ω_r дизельного двигателя.

Для математического описания люфта (рис. 1) с зазором D_n в контуре регулирования частоты вращения дизельного двигателя используем следующее выражение

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

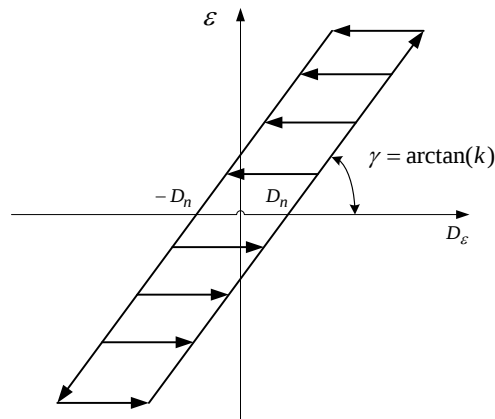


Рис. 1. График характеристики типа люфт контура регулирования частоты вращения дизельного двигателя

где: k – коэффициент передачи, D_n – значение зазора люфта, ε – разность между заданной частотой вращения ω_{r0} и действительной частотой вращения ω_r дизельного двигателя.

Результаты математического моделирования для значений зазоров люфтов первого и второго дизель-генератора представлены на рис. 2. Соответственно $D_{n1}=0,002$ и $D_{n2}=0,01$, равными коэффициентами передачи $K_{\omega1}=K_{\omega2}=50$, уставками по частоте вращения $\omega_{r01}=\omega_{r02}=1$ и постоянными времени $T_{\omega1}=T_{\omega2}=60$. Графики представлены для квазиустановившегося режима работы на интервалах 3-7 с.

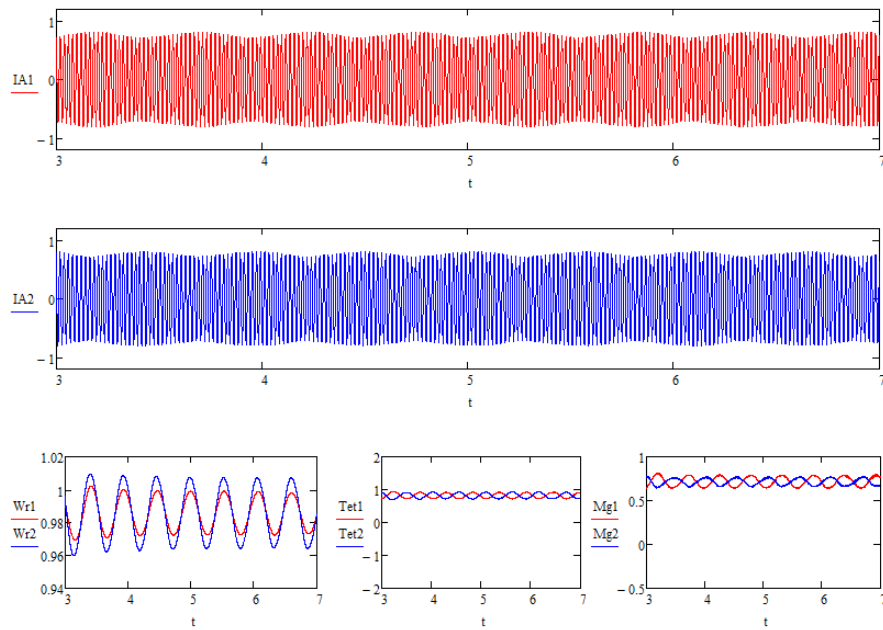


Рис.2. Результаты моделирования. Зазоры люфта $D_{n1}=0,002$ и $D_{n2}=0,01$, коэффициенты передачи $K_{\omega 1} = K_{\omega 2} = 50$, уставки по частоте вращения $\omega_{r01} = \omega_{r02} = 1$ и постоянные времени $T_{\omega 1} = T_{\omega 2} = 60$.

Результаты математического моделирования, представленные на рис. 2 наглядно иллюстрируют существование ОКМ при параллельной работе дизель-генераторных агрегатов с разными значениями зазоров люфтов в контурах регулирования частоты вращения. Это видно по графикам токов, где максимумы огибающей тока первого дизель-генератора соответствуют минимумам огибающей тока второго дизель-генератора и наоборот, что является главным признаком обменных колебаний мощности. Кроме того, дополнительным подтверждением можно обоснованно считать противофазные изменения углов электрической нагрузки и моментов нагрузки на валах параллельно работающих дизель-генераторов. Результаты, приведенные на рис. 2, всесторонне исследовались ранее [14,15], однако значения постоянных времени регуляторов частоты дизельных двигателей принимались неизменными.

Основной задачей нового исследования является поиск ответа на вопрос, есть ли связь между значениями постоянных времени контуров регулирования скорости вращения дизель-генераторных агрегатов и амплитудой ОКМ при параллельной работе.

Математическая модель дает возможность проведения анализа ОКМ, наблюдаемых при длительной параллельной работе двух синхронных генераторов автономного электротехнического комплекса в квазиустановившихся режимах. При проведении исследований примем постоянными значения коэффициентов передачи регуляторов K_{ω} , уставок по частоте вращения регуляторов ω_{r0} , зазоры люфтов контуров регулирования скорости вращения дизель-генераторов установим соответственно $D_{n1}=0,002$ и $D_{n2}=0,01$. Для исключения влияния переходных процессов на результаты выберем временной диапазон от 3 до 7 секунд, что соответствует квазиустановившемуся режиму работы.

Результатами проводимого исследования будем считать амплитуды ОКМ, которые удобнее и правильнее всего характеризовать активными токами I_{A1} , I_{A2} генераторов при их параллельной работе.

Результаты

Натурные экспериментальные исследования достоверно подтвердили существование ОКМ во всех режимах работы автономной дизель-генераторной электростанции парома «Ейск» [6]. Это судно около тридцати лет перевозило людей, транспорт и грузы на Керченской паромной переправе между портами «Крым» и «Кавказ» до ввода в эксплуатацию Крымского моста. В настоящее время судно находится в резерве и готово выполнить рейс в случае необходимости. В математическую модель внесены численные значения элементов электротехнического комплекса парома «Ейск».

Диапазоны изменения значений постоянных времени $T_{\omega 1}$ и $T_{\omega 2}$ регуляторов

частоты вращения расположены от 10 до 100, при этом обеспечивается устойчивая работа судового электротехнического комплекса. Поэтому, целесообразно провести вычисления и определить соответствующие амплитуды ОКМ именно в этих диапазонах изменения постоянных времени. В наших исследованиях шаг выбран равным 10, это обеспечивает достаточную наглядность и информативность. При необходимости шаг может быть как увеличен, так и уменьшен. Полученные результаты исследований занесены в табл. 1, по данным которой представлена графическая визуализация на рис.3.

Таблица 1.

Зависимость амплитуды ОКМ от значений постоянных времени регуляторов частоты

$T_{\omega 1}/T_{\omega 2}$	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
10	0	0	0	0,015	0,037	0,05	0,045	0,045	0,045	0,05
20	0	0	0,022	0,015	0,045	0,052	0,06	0,08	0,07	0,06
30	0	0,022	0,045	0,045	0,052	0,055	0,062	0,065	0,065	0,065
40	0	0,005	0,037	0,037	0,05	0,056	0,06	0,067	0,067	0,067
50	0,005	0,03	0,03	0,037	0,04	0,052	0,055	0,067	0,067	0,067
60	0,005	0,03	0,022	0,03	0,037	0,045	0,05	0,06	0,065	0,067
70	0,045	0,022	0,015	0,022	0,03	0,037	0,045	0,05	0,06	0,067
80	0,015	0,015	0,015	0,02	0,022	0,03	0,037	0,045	0,05	0,055
90	0,03	0,012	0,015	0,017	0,022	0,023	0,03	0,037	0,043	0,05
100	0,037	0,01	0,01	0,015	0,022	0,022	0,025	0,03	0,035	0,043

Построенный график зависимости амплитуды ОКМ от значений постоянных времени $T_{\omega 1}$ и $T_{\omega 2}$ регуляторов частоты вращения представляет собой карту настроек. Из полученной табл. 1 и карты на рис. 3 видно, что амплитуда ОКМ изменяется в зависимости от значений постоянных времени регуляторов частоты и их соотношения. Обменных колебаний мощности практически не возникает при значениях постоянных времени равным 10 или 20 в различных комбинациях. При увеличении значений постоянных времени больше 20 наблюдается возникновение небольших по амплитуде обменных колебаний. Дальнейшему увеличению постоянных времени соответствует еще больший рост амплитуды ОКМ. Максимальное значение амплитуды при проведенном исследовании составляет 0,067, что является значительной величиной. При анализе результатов математического моделирования необходимо отметить, что при значениях постоянных времени больше 40-50, период обменных колебаний постоянен. При уменьшении значений постоянных времени меньше 40-50, вместе с уменьшением амплитуды обменных колебаний, происходит увеличение их периода и огибающая токов становится практически прямой линией, что свидетельствует об исчезновении обменных колебаний. Для диагностики существования обменных колебаний при малых значениях постоянных времени необходимо рассматривать графики моментов и углов нагрузки параллельно работающих генераторов. На рис. 4 приведены результаты математического моделирования параллельной работы двух дизель-генераторных установок для значений зазоров люфтов соответственно $D_{n1}=0,002$ и $D_{n2}=0,01$, равными коэффициентами передачи $K_{\omega 1}=K_{\omega 2}=50$, уставками по частоте вращения $\omega_{r01}=\omega_{r02}=1$ и постоянными времени $T_{\omega 1}=T_{\omega 2}=20$. Из графиков видно, что, начиная примерно с 5 секунды, когда заканчиваются переходные процессы, обменные колебания исчезают.

Обсуждение

Результаты исследования работы автономного электротехнического комплекса, полученные при помощи методов математического моделирования, показывают, что амплитуда ОКМ параллельно работающих дизель-генераторных агрегатов изменяется в зависимости от значений постоянных времени в контурах управления частотами вращения. Информация в табл.1 и на рис. 3 и 4 дает основания для заключения о том, что при малых значениях постоянных времени обменные колебания практически отсутствуют, а их увеличение соответствует увеличению амплитуды обменных колебаний, при этом все остальные параметры автономного электротехнического комплекса не изменялись. Результаты получены для значений зазоров люфтов двух дизель-генераторов соответственно $D_{n1}=0,002$ и $D_{n2}=0,01$, которые в свою очередь являются основной причиной обменных колебаний и от значений которых зависит амплитуда обменных колебаний мощности [10]. Таким образом, для получения исчерпывающей информации необходимо для каждой пары значений люфтов в диапазоне

их изменения (табл. 2) провести аналогичные исследования и получить локальные карты зависимости амплитуды обменных колебаний мощности от значений постоянных времени контуров регулирования частоты. Значения амплитуды ОКМ в табл. 2 получены для

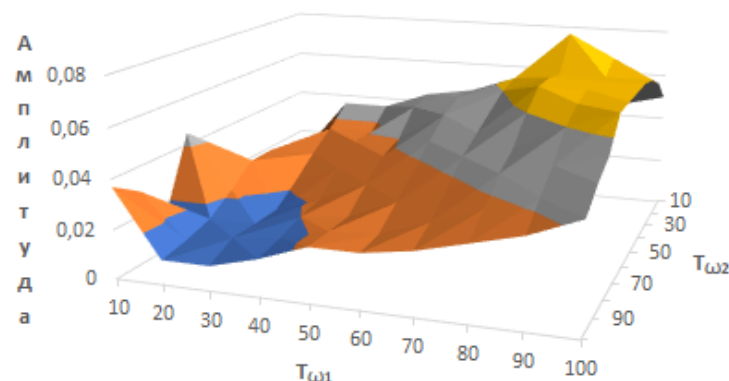


Рис. 3. Карта настроек зависимости амплитуды ОКМ от значений постоянных времени регуляторов частоты. $T_{\omega 1}$ и $T_{\omega 2}$ – постоянные времени регуляторов частоты двух параллельно работающих дизель-генераторных установок соответственно.

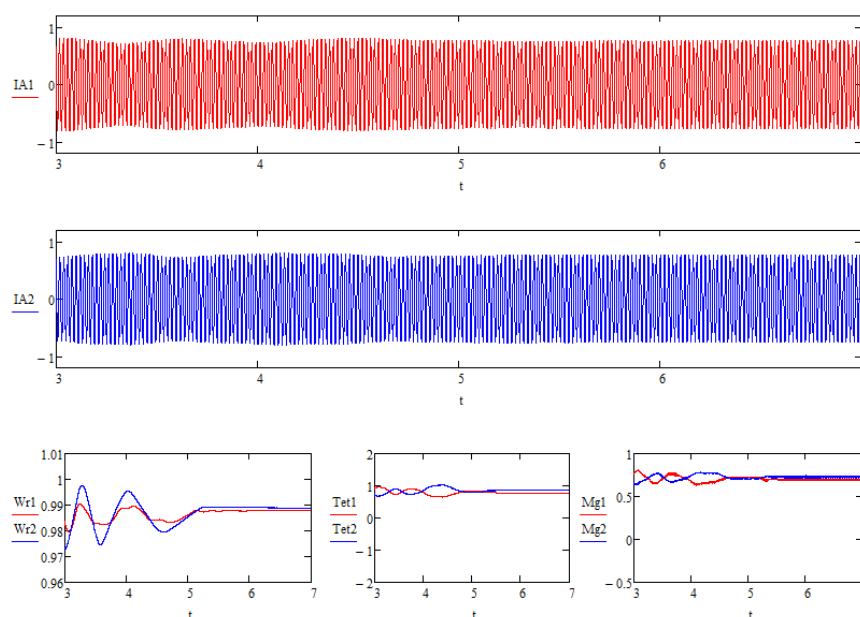


Рис.4. Результаты моделирования. Зазоры люфта $D_{n1}=0,002$ и $D_{n2}=0,01$, коэффициенты передачи $K_{\omega 1} = K_{\omega 2} = 50$, уставки по частоте вращения $\omega_{r01} = \omega_{r02} = 1$ и постоянные времени $T_{\omega 1} = T_{\omega 2} = 20$.

Их изменения (табл. 2) позволяют провести аналогичные исследования и получить локальные карты зависимости амплитуды обменных колебаний мощности от значений постоянных времени контуров регулирования частоты. Значения амплитуды ОКМ в табл.2 получены для постоянных времени регуляторов частоты вращения $T_{\omega 1} = T_{\omega 2} = 60$. Результатом таких исследований будет семейство поверхностей, изображенной на рис. 3. Так как результаты исследования, представленные в таблице 1 и на рис. 3, получены с использованием численных значений дизель-генераторов 6VD26/20-AL-2 и генераторов S450MG 800кВА, которые установлены на пароме «Ейск», то информация детально описывает ОКМ для этого электротехнического комплекса. Аналогичные результаты в виде карт зависимости амплитуд ОКМ от значений постоянных времени.

Таблица 2

Зависимость амплитуды ОКМ от значений 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

контуров регулирования частоты могут быть получены для произвольных автономных дизельных электростанций.

Основным теоретическим результатом проведенных исследований является возможность разработки нового метода устранения обменных колебаний мощности путем уменьшения значений постоянных времени контуров частоты. Также возможно дополнение ранее разработанного метода, в котором обменные колебания мощности устранялись за счет изменения коэффициентов передачи регуляторов частоты параллельно работающих генераторов, т.е. можно одновременно или поочередно изменять значения постоянных времени и коэффициентов передачи контуров частоты.

Заключение

Представленные в статье результаты представляют собой развитие и совершенствование чрезвычайно важной работы [6], направленной на разработку методов и средств устранения ОКМ в автономных дизельных электростанциях с использованием параллельной работы. Они позволяют существенно повысить показатели качества и эффективности работы таких технических систем. Разработанная и представленная методика построения карт зависимости амплитуды ОКМ от значений постоянных времени контуров регулирования частоты продемонстрирована на примере автономного электротехнического комплекса конкретного объекта. Обоснована возможность уменьшения амплитуды ОКМ путем уменьшения значений постоянных времени контуров регулирования частоты, что является основой нового метода устранения обменных колебаний мощности и дает возможность совершенствования метода, который основан на изменении коэффициентов передачи регуляторов частоты.

Литература

1. Грачева Е.И., Алимова А.Н. Calculating Methods and Comparative Analysis of Losses of Active and Electric Energy in Low Voltage Devices International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon), 2019 с. 361-367.
2. Delgado C., Dominguez-Navarro J.A. Optimal design of a hybrid renewable energy system ecological vehicles and renewable energies // Ninth international conference on publication year (EVER). 2014. pp. 1-8.
3. Хватов О.С., Дарьенков А.Б. Электростанция на базе дизель-генератора переменной частоты вращения // Электротехника. 2014. № 3. С. 28-32.
4. Хватов О.С., Дарьенков А.Б. Единая электростанция транспортного объекта с электродвижением на базе дизель-генераторной установки переменной частоты вращения // Электротехника. 2016. № 3. С. 35-40.
5. Калмыков А.Н., Кузнецов В.И., Сеньков А.П., и др. Судовые бестрансформаторные гребные электрические установки // Морской вестник. 2013. № 1. С. 40-42.
6. 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.
7. Sylvain L.S. Voltage oriented control of three- phase boost pwm converters. Göteborg: Chalmers University of Technology. 2010. 114 p.
8. Nguyen Q.-K., Schuster J., Roth-Stielow J. Energy Optimal Control of an Electrically Excited Synchronous Motor used as Traction Drive. 9th International Conference on Power Electronics. ECCE

Asia June 1-5, 2015. pp. 2789-2795.

9. Pyrhonen J., Jokinen T., Hrabovcov'a V. Design of Rotating Electrical Machines // John Wiley & Sons, Ltd. 2008. 31 p.

10. 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.

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

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

13. 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.

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

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

Авторы публикации

Савенко Александр Евгеньевич – канд. техн. наук, доцент кафедры Электрооборудования судов и автоматизации производства, Керченский государственный морской технологический университет.

Савенко Павел Станиславович – курсант, Керченский государственный морской технологический университет.

References

1. Gracheva EI, Alimova AN. Calculating Methods and Comparative. *Analysis of Losses of Active and Electric Energy in Low Voltage Devices International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon)*, 2019. pp. 361-367

2. Delgado C, Dominguez-Navarro JA. Optimal design of a hybrid renewable energy system ecological vehicles and renewable energies. *Ninth international conference on publication year (EVER)*. 2014. pp. 1-8.

3. Hvatov OS, Dar'enkov AB. Elektrostantsiya na baze dizel'-generatora peremennoy chastoty vrashcheniya. *Elektrotehnika*. 2014;3:28-32.

4. Hvatov OS, Dar'enkov AB. Edinaya elektrostanciya transportnogo ob'ekta s elektrodvizheniem na baze dizel'-generatornoj ustanovki peremennoy chastoty vrashcheniya. *Elektrotehnika*. 2016;3:35-40.

5. Kalmykov AN, Kuznetsov VI, Sen'kov AP. et al. Sudovye bestransformatornye grebnye elektricheskie ustanovki. *Morskoy vestnik*. 2013;1:40-42.

6. Savenko AE, Golubev AN. Obmennye kolebaniya moshchnosti v sudovykh elektrotekhnicheskikh kompleksakh. *Ivanovskiy gosudarstvennyy energeticheskiiy universitet imeni V.I. Lenina*. Ivanovo. 2016. 172 p.

7. Sylvain LS. Voltage oriented control of three- phase boost PWM converters. *Göteborg: Chalmers University of Technology*. 2010. 114 p.

8. Nguyen Q.-K, Schuster J, Roth-Stielow J. Energy Optimal Control of an Electrically Excited Synchronous Motor used as Traction Drive. *9th International Conference on Power Electronics - ECCE Asia June 1-5, 2015*. pp. 2789-2795.

9. Pyrhonen J, Jokinen T, Hrabovcov'a V. Design of Rotating Electrical Machines. *John Wiley & Sons, Ltd*. 2008. 531 p.

10. Savenko AE, Savenko PS. Vliyanie ljufta na amplitudu obmennykh kolebaniy moshchnosti v avtonomnykh jelektrotekhnicheskikh kompleksakh. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenij. Problemy jenergetiki*. 2018;20(5-6):46-54.

11. Savenko AE. Matematicheskaya model' sudovogo elektrotekhnicheskogo kompleksa. *Vestnik IGEU*, 2015;5:54-59.

12. Golubev AN, Martynov VA., Aleynikov AV. Matematicheskaya model' dlya rascheta elektromagnitnykh sil v sinkhronnom elektroprivoде s postoyannymi magnitami. *Vestnik IGEU*, 2015;1:10-13.

13. Golubev AN, Martynov VA, Aleynikov AV. Razrabotka utochnennoj matematicheskoy modeli sinkhronnogo dvigatelja s postoyannymi magnitami dlja raschetov v real'nom vremeni. *Vestnik IGEU*.

2017;5:37-43.

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

15. Tyutikov VV, Voronin AI. Metodika sinteza regulyatorov dlya nezavisimogo formirovaniya staticheskikh i dinamicheskikh pokazateley nelineynykh ob'ektov. *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki*, 2015;3(164):154-164.

Authors of the publication

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

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

Поступила в редакцию

28 января 2019г.