

УДК 681.5:681.3

МЕТОДЫ ПОДАВЛЕНИЯ НИЗКОЧАСТОТНЫХ ПОМЕХ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Синицкий Е.В., Прокофьев А.Е., Соболев В.С., Козаченко Л.Н., Дмитров К.С.

*Керченский государственный морской технологический университет, Керчь,
e-mail: sergiiblack@gmail.com*

Наиболее чувствительными к колебаниям частоты считаются управляемые выпрямители, так как их концепции управления напрямую объединены с питающими сетями. На сегодня задачи анализа влияния колебаний частоты на качество выпрямленного напряжения изучены недостаточно, а проблемы компенсации такого влияния вообще не решены. Поэтому задачи этих исследований – влияния колебаний частоты электроэнергии автономных электроэнергетических систем с газовыми двигателями на качественные показатели статических преобразователей – актуальны. Целью работы является исследование влияния колебаний частоты автономных электроэнергетических систем (судовых с газовыми двигателями) на характеристики качества напряжения управляемых выпрямителей, также создание аппаратно-программных систем, специализированных с целью уменьшения воздействия колебаний частоты на выпрямляемое напряжение. Объект исследования: судовая автономная электроэнергетическая система с газовыми приводными двигателями на мощности до 2000 кВт. Предметом исследования являются способы снижения влияния колебаний частоты автономных электроэнергетических систем (судовых с газовыми двигателями) на качественные показатели выходного напряжения управляемых выпрямителей. Методы исследования: чтобы решить поставленные задачи, применялись основные принципы теории Марковских процессов, методы теории случайных процессов. С целью исследования воздействий колебаний частоты применялся метод функции комплексной переменной. Для воздействий колебаний частоты на выпрямляемое напряжение замкнутых вентиляльных систем применялись методы ЛАЧХ и ЛФЧХ совместно с теорией случайных процессов. При проверке теоретических исследований применялось моделирование процессов в Matlab-Simulink, взаимодействуя с исследованиями экспериментального характера. Вследствие исследований определено, что специализированные системы импульсно-фазового управления позволяют обеспечить сокращение воздействия колебаний частоты до требуемых значений, но приводят к определенному усложнению систем управления выпрямителями.

Ключевые слова: низкочастотные помехи, выпрямленное напряжение, судовая электроэнергетическая система, газовые двигатели

METHODS OF SUPPRESSION OF LOW-FREQUENCY NOISE OF ELECTRIC SYSTEMS

Sinitskiy E.V., Prokofev A.E., Sobolev V.S., Kozachenko L.N., Dmitrov K.S.

Kerch State Marine Technological University, Kerch, e-mail: sergiiblack@gmail.com

Controllable rectifiers are considered to be the most sensitive to frequency fluctuations, as their control concepts are directly connected to the mains supply. To date, the problems of analyzing the effect of frequency fluctuations on the quality of the rectified voltage have not been studied enough, and the problems of compensating for such an effect have not been solved at all. Therefore, the tasks of these studies – the influence of fluctuations in the frequency of electricity of autonomous electric power systems with gas engines on the quality indicators of static converters are relevant. The aim of the work is to study the influence of frequency fluctuations of autonomous electric power systems (ship with gas engines) on the characteristics of the voltage quality of controlled rectifiers, as well as the creation of hardware and software systems specialized in order to reduce the effect of frequency fluctuations on the rectified voltage. Object of research: a ship's autonomous electric power system with gas drive engines at a power of up to 2000 kW. The subject of the research is the ways to reduce the influence of frequency fluctuations of autonomous electric power systems (ship with gas engines) on the quality indicators of the output voltage of controlled rectifiers. Research methods: to solve the set tasks, the basic principles of the theory of Markov processes, methods of the theory of random processes were applied. The complex variable function method was used to study the effects of frequency fluctuations. For the effects of frequency fluctuations on the rectified voltage of closed valve systems, the methods of LAPH and LPFH were used in combination with the theory of random processes. When checking theoretical studies, the modeling of processes in Matlab-Simulink was applied, interacting with research of an experimental nature. As a result of research, it has been determined that specialized systems of pulse-phase control can ensure the reduction of the effect of frequency fluctuations to the required values, but lead to a certain complication of rectifier control systems.

Keywords: low-frequency interference, rectified voltage, ship power system, gas engines

Проблемы экономии энергетических ресурсов как в России, так и для других государств становятся все более актуальными, в связи с постоянным ростом цен на нефтепродукты. Исходя из этого, трудности использования газового топлива становятся все более актуальными. Широко

применяют газ в автомобильной технике, но при этом возрастают требования к его качеству. Большой спрос стал у газовых двигателей с мощностью от нескольких десятков до тысяч киловатт, работающих на природном газовом топливе [1–3]. Автономные электростанции такого исполнения

находят все более широкую область применения, в том числе на местах газо- и нефтедобычи, а также как аварийные, для питания ответственных объектов. Распространяется использование газовых электростанций в когенерационных установках.

В этом направлении известны газовые двигатели, изготавливаемые заводами России. Общим недостатком этих устройств являются более мягкие механические характеристики по сравнению с дизелями, а также значительно меньшая стабильность оборотов, что приводит к заметным колебаниям частоты электроэнергии, производимой в таких электростанциях. Это приводит, с одной стороны, к проблемам синхронизации отдельных генераторов к общей сети, к колебаниям мощности, преобразуемой как отдельными генераторными агрегатами, так и электростанцией в целом. Помимо этого, воздействием на потребителей, что есть чувствительные к колебаниям частоты [4]. Так как в различных автономных электростанциях применяются статические преобразователи электроэнергии, в таком случае колебания частоты воздействуют на характеристики свойства электроэнергии таких преобразователей. Более восприимчивыми к колебаниям частоты считаются управляемые выпрямители, в силу того, что их системы контроля напрямую объединены с сетями питания. На сегодня задачи анализа влияния колебаний частоты на качество выпрямленного напряжения изучены недостаточно, а проблемы компенсации такого влияния вообще не решены [5–7]. Поэтому задачи этих исследований – влияния колебаний частоты электроэнергии автономных электростанций на качественные показатели статических преобразователей – актуальны.

Целью работы является исследование компенсации низкочастотных колебаний частоты приводных газовых двигателей на качество выходного напряжения управляемых выпрямителей, также создание аппаратно-программных систем, специализированных с целью уменьшения воздействия колебаний частоты на выпрямляемое напряжение.

Объект исследования: судовая автономная электроэнергетическая система с газовыми приводными двигателями на мощности до 2000 кВт.

Предметом исследования являются способы снижения влияния колебаний частоты автономных электроэнергетических систем (судовых с газовыми двигателями) на качественные показатели выходного напряжения управляемых выпрямителей.

Методы исследования: чтобы решить поставленные задачи, применялись частотные методы анализа классической теории автоматического управления, основанные на передаточных функциях Лапласа и логарифмических частотных характеристиках. С целью исследования воздействий колебаний частоты применялся метод функции комплексной переменной. Для воздействий колебаний частоты на выпрямляемое напряжение замкнутых вентильных систем применялись методы ЛАЧХ и ЛФЧХ совместно с теорией случайных процессов. При проверке теоретических исследований применялось моделирование процессов в Matlab-Simulink, взаимодействуя с исследованиями экспериментального характера. Вследствие проведенного анализа определено, что специализированные системы импульсно-фазового управления позволяют обеспечить сокращение воздействия колебаний частоты до требуемых значений, но приводят к определенному усложнению систем управления выпрямителями [5, 8, 9].

Анализ эффективности применения систем фазового управления (СФУ) с компенсацией воздействий колебаний частоты

Обеспечения инвариантности выпрямленного напряжения к колебаниям частоты можно предложить два закона управления преобразователем: реальный угол регулирования α изменять с помощью умножения на коэффициент $\frac{\omega_0}{\omega}$ и стабилизация амплитуды опорного пилообразного напряжения. Рассмотрим первый закон управления преобразователем. Реальный угол регулирования α изменять путем умножения его на коэффициент $\frac{\omega_0}{\omega}$. Данный способ позволяет создать систему управления, исключаящую грубые требования к частоте сети питания. Однако имеются трудности, связанные с ресурсоемкими вычислениями, какие следует осуществлять в порядке реального времени. Стремление реализовать такой метод в режиме микроконтроллерной системы управления повергнет или к усилению условий к быстройдействию основного процессора этой системы или к катастрофическому уменьшению быстройдействию системы. Также неспособности ее функционирования в порядке реального времени при стремлении приобрести в наименьшей степени допустимую точность проделанных ресурсоемких вычислений. Усиление условий к микропроцессору повергнет к увеличению стоимости исследования, а в итоге и повышению цены окончательного изде-

лия. Одной из существующих альтернатив постановлению этой трудности считается использование компьютеризированных систем управления.

В аналогичных системах контроллер осуществляет только получение данных и передачу их согласно каналам взаимосвязи с ПК, который проводит расчеты, а также возвращает контроллеру итоги результатов углов управления в каждый определенный промежуток времени. Описанный метод имеет некоторые минусы: повышение финансовых затрат за счет использования компьютера с индивидуальным узконаправленным программным обеспечением; трудности, вытекающие вследствие обмена данными по каналу связи контроллера с управляющим ПК [10–12]. В случае если вопрос об увеличении финансовой поддержки решается повышением качества работы системы, то трудности, связанные с каналом обмена данными, снижают стабильность работы системы управления. Временные задержки, повышающиеся в канале передачи данных, способствуют сокращению запаса стабильности работы системы согласно фазе. Исходя из того, что системы работают в предельно допустимых режимах, такие задержки по времени могут нарушить работоспособность и привести к сбою. Угроза выхода системы за границы стабильности крайне высока. Другой способ решения проблемы – использование системы управления на базе БИС. Эта концепция даст возможность осуществлять ресурсоемкие расчеты в порядке реального времени. К тому же ее стоимость

значительно меньше цены системы на базе компьютера. Помимо этого, в системе отсутствует проблема с временными задержками в канале передачи данных, вследствие этого отсутствуют проблемы с неустойчивостью системы согласно фактору параметрического непостоянства компонентов.

Анализ второго закона управления преобразователем осуществим на примере структуры, реализующей второй закон управления. Образец генератора пилообразного напряжения (ГПН) с контуром подстройки представлен на рис. 1, а. Приведенной принципиальной схеме соответствует структурная схема, изображенная на рис. 1, б. ГПН выполнен на элементах ДА1, R_r , C_r и описывается придаточной функцией $\omega_{ГПН}$, $\omega_{ГПН}$ представляет периодическое изменение пилообразного напряжения [11, 13]:

$$W_{ГПН} = \frac{T_m p + 1 - \exp(-T_m p)}{T_{II} T_m p^2 (1 + \exp(-T_m p))}, \quad (1)$$

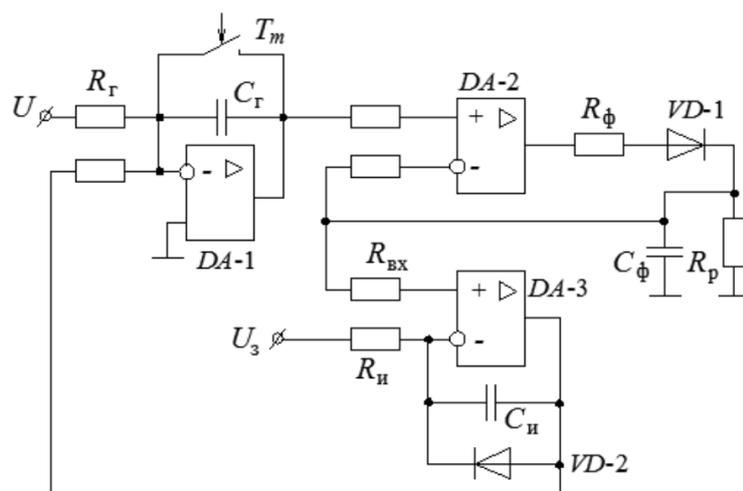
где T_{II} – константа времени ГПН.

Применяя разложение экспоненты, формулу (1) преобразуем к виду

$$W_{ГПН}(P) = \frac{1}{2T_m p \left(1 + \frac{T_{II}}{2} p\right)}$$

Амплитудный детектор, выполненный на ДА2, R_ϕ , C_ϕ , $VD-1$, R_p , описывается передаточной функцией

$$W_\phi(P) = \frac{1}{T_\phi p + 1}$$



а

Рис. 1. а – генератор пилообразного напряжения; б – контур подстройки; в – контур подстройки; г – разности ПИИ-регулятора (начало рисунка)

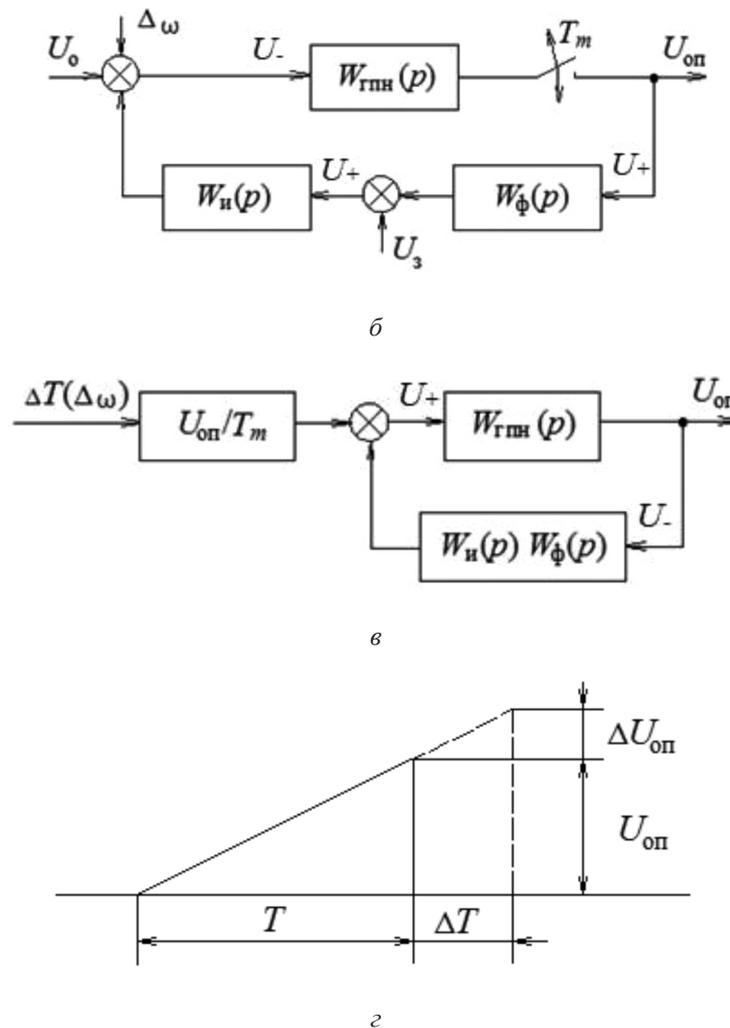


Рис. 1. а – генератор пилообразного напряжения; б – контур подстройки; в – контур подстройки; г – разности ПИ-регулятора (окончание рисунка)

где $T_\phi = C_\phi R$ – постоянная времени фильтра.

Разности ПИ-регулятора амплитуды (ДАЗ, $R_{вх}$, $C_{и}$, $R_{и}$, $VD - 2$) описываются пропорционально-интегральным звеном (рис. 2), где C – обратное сопротивление диода $VD - 2$; $T_{иГ} = R_{и}C_{и}$

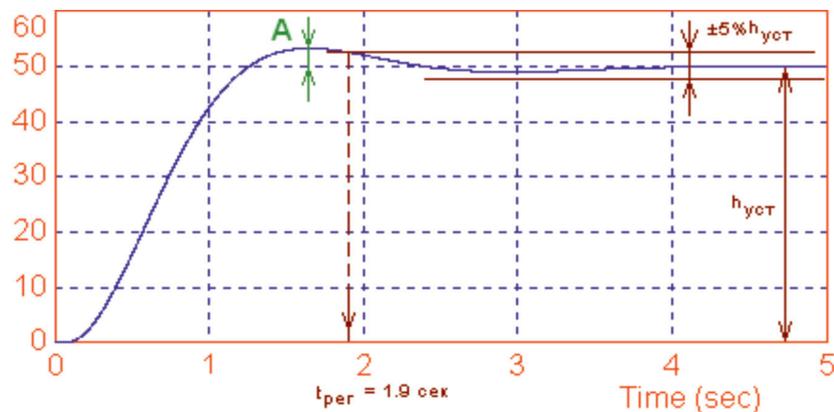


Рис. 2. Переходная функция с ПИ (пропорционально-интегральным)-регулятором

Из рис. 1, г, следует

$$\Delta U_{\text{оп}} = \frac{U_{\text{оп}}}{T} \Delta T. \quad (2)$$

Для анализа прохождения помехи на выход замкнутой системы контура автоподстройки амплитуды пилообразного напряжения, преобразуем [13, 14] структуру, изображенную на рис. 1, б, к типу, подобающему на рис. 1, в, в которой входным воздействием является помеха Λ_{ω} . Передаточная функция замкнутой системы будет равна

$$\Phi(p) = \frac{(T_{\phi} p + 1) T_{\text{иг}} p}{2 T_m p (1 + T_{\text{п}} p / 2) (T_{\phi} p + 1) T_{\text{иг}} p + K_p T_{\text{иг}} p + 1}. \quad (3)$$

Реальные постоянные времени соответственно равны: $T_{\text{иг}} = 0,0047$ с; $T_{\text{п}} = 0,012$ с; $T_{\phi} = 0,011$ с; $T_p = 40$.

Колебания частоты сетевых напряжений обладают низкочастотной характеристикой, по этой причине звенья с небольшими константами времени никак не станут воздействовать на протекание помехи посредством системы автоподстройки амплитуды пилообразного напряжения [3]. Рационально по этой причине можно отметить только лишь низкочастотные звенья передаточной функции, упростив этим данную функцию (3):

$$\Phi(p) = \frac{T_{\phi} T_{\text{иг}} P^2 T_{\text{иг}} p}{T_{\phi} T_m p^2 / 2 + (T_{\phi} + T_m / 2 + K_p T_{\text{иг}}) p + 2}. \quad (4)$$

Представим (4) в виде

$$\Phi(p) = \frac{g_2 P^2 + g_1 P + g_0}{b_2 P^2 + b_1 P + b_0},$$

где

$$g_2 = T_{\phi} T_{\text{иг}}; g_1 = T_{\text{иг}}; g_0 = 0; b_2 = T_{\phi} T_m / 2; b_1 = (T_{\phi} + T_m / 2 + K_p T_{\text{иг}}) / 2; b_0 = 2$$

и вводя следующие обозначения

$$\frac{g_0}{g_1} = \omega_{B1} = 0; \frac{g_1}{g_2} = \omega_{B2} = 90,9^{-1} \text{ с}; \frac{b_0}{b_1} = \omega_{a1} = 9,3^{-1} \text{ с}; \frac{b_1}{b_2} = \omega_{a2} = 45^{-1} \text{ с},$$

которые можно приближенно анализировать, каким образом сопрягающие частоты ЛАЧХ и ЛФЧХ системы контура автоподстройки частоты. Необходимо определить коэффициент сглаживания случайной помехи Λ_{ω}

$$K_C = \sqrt{\frac{(T_{\phi} + T_m / 2 + K_p T_{\text{иг}}) [a_{\omega} (T_{\phi} + K_p T_{\text{иг}}) + 2]}{4 T_{\phi}^2 a_{\omega}}}$$

Пробный контроль системы автоподстройки амплитуды пилообразного напряжения, показанной на рис. 1, а, продемонстрировал то, что коэффициент сглаживания ею дисперсии помехи Λ_{ω} доходит до 30 единиц, а система, которая изображена на рис. 3, имеющая астатизм второго порядка, достигает значения в 100–120 ед. Результирующая дисперсия процесса рассчитывается согласно формуле

$$R_{\omega\text{ф}}(0) = \frac{R_{\omega}(0) a_{\omega} T_{\alpha\beta}^2 T_{\lambda} [T_{\lambda}^2 + 4 \xi T_{\alpha\beta}^2 (a_{\omega} T_{\lambda} + \xi) - T_{\alpha\beta}^2]}{4 \xi [T_{\alpha\beta}^4 (1 + 4 a_{\omega} \xi T_{\lambda} + 4 a_{\omega}^2 T_{\lambda}^2) + 2 T_{\lambda}^2 T_{\alpha\beta}^2 (4 a_{\omega} \xi T_{\lambda} + 4 \xi^2 - 1) + T_{\lambda}^4]}$$

где $T_{\alpha\beta}^2 = 1(\alpha_{\omega}^2 + \beta_{\omega}^2)$.

Видимый эффект сглаживания возмущения Λ_{ω} прослеживается только при высоких константах времени фильтра, как и в предыдущих вариантах. Но в крайнем случае при соразмерности констант T_a и T_{λ} эффект сглаживания значительно больше, чем в предшествующих.

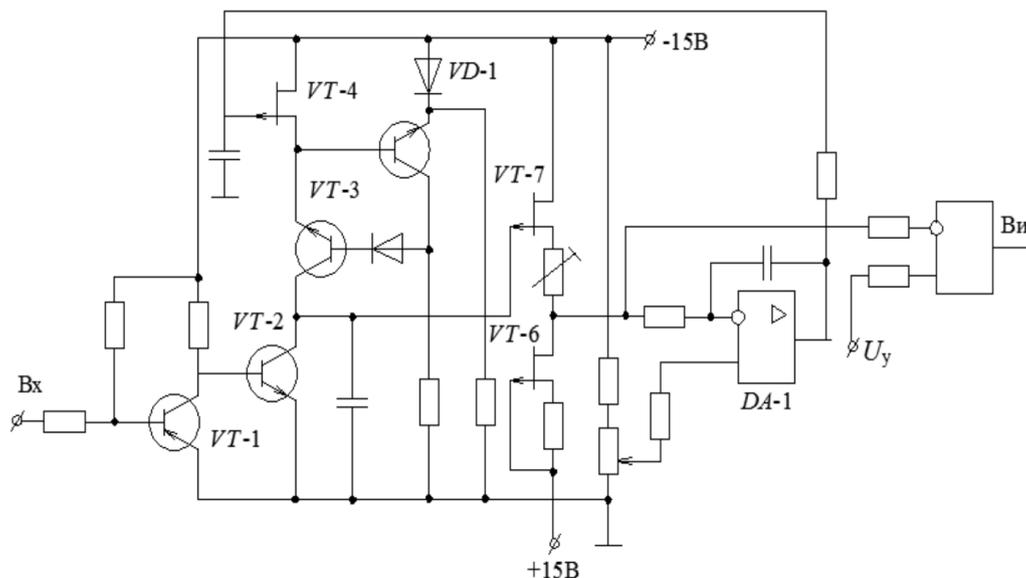


Рис. 3. Система, имеющая астатизм второго порядка

Исходя из вышеперечисленного, можно сделать вывод, что общий вид корреляционных функций на выходе сетевых фильтров синхронизации почти не изменяется, в отношении к входу. Но эффект сглаживания помехи по установленному методу расчета фильтров незначительный [6–9].

Заключение

Специализированные системы импульсно-фазового управления позволяют обеспечить сокращение воздействия колебаний частоты до требуемых значений, но приводят к определенному усложнению систем управления выпрямителями. Применялись два метода снижения колебаний частоты, и каждый из них имел свои особенности. Первый метод – регулирование угла α с помощью умножения на коэффициент $\frac{\omega_0}{\omega}$.

Сложность возникает в том, что в реальном времени необходимо производить ресурсоемкие вычисления, которые снижают быстродействие системы. Второй метод – стабилизация амплитуды опорного пилообразного напряжения. В итоге эффект сглаживания помех на выходе сетевых фильтров присутствует, но незначительный.

Список литературы

1. Бородин И.Ф. Автоматизация технологических процессов и системы автоматического управления (ССУЗ). М.: КолосС, 2006. 352 с.
2. Савостин А.А., Риттер Д.В., Савостина Г.В., Кошков А.К. Сравнительный анализ алгоритмов устранения низкочастотной помехи электрокардиосигнала // Измерительная техника. 2018. № 7. С. 66–70.

3. Ботуз С. Интеллектуальные интерактивные системы и технологии управления удаленным доступом: учебное пособие. М.: Солон-пресс, 2014. 340 с.
4. Доровской В.А., Черный С.Г., Железняк А.А., Бордюг А.С. Анализ методов подавления низкочастотных помех выпрямленного напряжения // Энергобезопасность и энергосбережение. 2019. № 6. С. 45–48.
5. Корнилов М.В., Сысоев И.В. Оценка работоспособности метода причинности по Грейнджеру для выявления однонаправленной связи при наличии общей внешней низкочастотной помехи // Нелинейная динамика. 2017. Т. 13. № 3. С. 349–362.
6. Варжапетян А.Г., Глущенко В.В. Системы управления: исследование и компьютерное проектирование. М.: Вузовская книга, 2012. 328 с.
7. Прохоренков А. Системы управления судовыми энергетическими процессами. М.: Моркнига, 2017. 443 с.
8. Бухалев В.А., Болдинов В.А. Фильтрация сигналов при низкочастотных помехах в измерительно-информационных системах беспилотных летательных аппаратов // Труды МАИ. 2017. № 97. С. 12.
9. Ощепков А.Ю. Системы автоматического управления: теория, применение, моделирование в MATLAB: учебное пособие. СПб.: Лань, 2013. 208 с.
10. Соболев А.С., Вынгра А.В., Черный С.Г. Разработка имитационной модели активного фильтра для морских интеллектуальных транспортных систем // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. 2021. № 2. С. 90–98.
11. Черный С.Г., Ерофеев П.А., Доровской В.А., Будник В.Ю. Разработка алгоритмов идентификации образов сигналов и объектов на морском транспорте // Судостроение. 2021. № 1 (854). С. 50–54.
12. Вынгра А.В., Черный С.Г., Соболев А.С. Активный фильтр последовательного типа для компенсации воздействий периодической нагрузки электродвигателей // Производственные технологии в судостроении – вопросы информатизации (ПТС ВИ-2021): труды Первой отраслевой научно-практической конференции. АО «Центр технологии судостроения и судоремонта». НТФ «Судотехнология»; АО «ЦТСС», 2021. С. 60–63.
13. Вынгра А.В., Черный С.Г., Новак Б.П., Ерофеев П.А. Разработка компонентов системы управления нейроструктурного регулятора для контроля энергетических процессов // Системы управления и обработки информации. 2020. № 4 (51). С. 27–37.
14. Черный С.Г., Новак Б.П., Доровской В.А., Дегтярев А.В. Интроспективный анализ условий возникновения информационно сложных ситуаций // Актуальные проблемы морской энергетики: материалы Девятой международной научно-технической конференции. 2020. С. 416–419.