

УЛУЧШЕНИЕ ДИНАМИКИ ЭЛЕКТРОПРИВОДА С ФАЗОВОЙ СИНХРОНИЗАЦИЕЙ, ПОСТРОЕННОГО НА ОСНОВЕ ИМПУЛЬСНОГО ЧАСТОТНО- ФАЗОВОГО ДИСКРИМИНАТОРА С РАСШИРЕННЫМИ ФУНКЦИОНАЛЬНЫМИ ВОЗМОЖНОСТЯМИ

Электропривод с фазовой синхронизацией широко используется в тепловизионных и лазерных сканирующих системах благодаря высоким динамическим характеристикам в широком диапазоне регулирования угловой скорости. Целью статьи является разработка способа управления электроприводом с фазовой синхронизацией, реализованного на основе импульсного частотно-фазового дискриминатора с расширенной линейной зоной в режиме фазового сравнения входных импульсных последовательностей. Усовершенствован способ управления электроприводом с фазовой синхронизацией с реализацией системы управления на основе импульсного частотно-фазового дискриминатора с расширенными функциональными возможностями. Предложены схемные реализации логического устройства сравнения с расширенной линейной зоной ИЧФД в режиме фазового сравнения, позволяющие улучшить динамику электропривода в режиме синхронизации.

Ключевые слова: электропривод с фазовой синхронизацией, импульсный частотно-фазовый дискриминатор, логическое устройство сравнения, дискриминатор, линейная зона.

Работа выполнена в рамках гранта Российского фонда фундаментальных исследований. Проект № 16-08-00325а «Разработка и исследование способов управления синхронно-синфазным электроприводом, реализованных на основе комплексного подхода к обеспечению высоких показателей качества регулирования в широком диапазоне угловых скоростей в режимах стабилизации и слежения».

Введение. В тепловизионных и лазерных сканирующих системах при построении узла оптико-механической развертки используется стабилизированный электропривод, к которому предъявляются высокие требования к показателям качества функционирования. Высокое качество регулирования обеспечивает электропривод с фазовой синхронизацией (ЭПФС), реализуемый на основе принципа фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ) [1], который позволяет обеспечить более высокие точностные и динамические показатели в широком диапазоне регулирования угловой скорости [2–13] по сравнению с цифровыми и аналоговыми системами автоматического управления (САУ).

В электроприводе, построенном на основе принципа ФАПЧ, в качестве сигнала задания угловой

скорости используется частотный сигнал $f_{on'}$, формируемый с помощью прецизионного генератора; в качестве сигнала обратной связи — частотный сигнал f_{oc} , формируемый на выходе импульсного датчика частоты (ИДЧ) вращения; а в качестве сравнивающего элемента — логическое устройство сравнения (ЛУС) частот и фаз входных частотных сигналов (рис. 1, где БЗЧ — блок задания частоты, КУ — корректирующее устройство, СП — силовой преобразователь, БДПТ — бесконтактный двигатель постоянного тока).

Алгоритм функционирования ЛУС, в соответствии с принципом ФАПЧ, обеспечивает три рабочих режима ЭПФС: режим разгона с максимальным ускорением (разомкнутое управление при $f_{on} > f_{oc}$), режим управления с обратной связью (режим

замкнутого управления при $f_{on} \approx f_{oc}$) и режим торможения с максимальным ускорением (разомкнутое управление при $f_{on} < f_{oc}$). Реализация данного алгоритма работы электропривода с фазовой синхронизацией обеспечивается формированием трех режимов работы ЛУС: режимы насыщения при $f_{on} > f_{oc}$ и при $f_{on} < f_{oc}$ и режим фазового сравнения при $f_{on} \approx f_{oc}$.

В ЭПФС в качестве ЛУС применяется импульсный частотно-фазовый дискриминатор (ИЧФД), работа которого основана на сравнении периодов следования импульсов двух частотных сигналов в моменты времени прохождения двух импульсов одной из частот f_{on} или f_{oc} между двумя соседними импульсами другой частоты. Возникновение ситуации прохождения двух подряд импульсов частоты f_{oc} между двумя соседними импульсами частоты f_{on} (ситуация 2/2) соответствует $T_{on} > T_{oc}$ или $f_{on} < f_{oc}$, а возникновение ситуации отсутствия импульсов частоты f_{oc} между двумя соседними импульсами частоты f_{on} (ситуация 0/2) соответствует $T_{on} < T_{oc}$ или $f_{on} > f_{oc}$. Таким образом, в моменты возникновения ситуаций 0/2 или 2/2 осуществляется сравнение периодов входных частотных сигналов и по результатам сравнения определяется необходимость изменения режима работы ИЧФД и, соответственно, ЛУС.

В ИЧФД реализуется следующий алгоритм функционирования. При приходе двух подряд импульсов частоты f_{oc} между двумя соседними импульсами частоты f_{on} (ситуация 2/2) происходят следующие изменения режима работы ИЧФД:

- из режима насыщения при $f_{on} > f_{oc}$ осуществляется переход в режим фазового сравнения при $f_{on} \approx f_{oc}$;
- из режима фазового сравнения осуществляется переход в режим насыщения при $f_{on} < f_{oc}$;
- режим насыщения при $f_{on} < f_{oc}$ сохраняется.

При отсутствии импульсов частоты f_{oc} между двумя соседними импульсами частоты f_{on} (ситуация 0/2) изменения режима работы происходят в обратном порядке.

В режимах насыщения ИЧФД, реализованного на логических элементах, выходной сигнал γ является постоянной величиной и равен логической «1» в режиме разгона ЭПФС и логическому «0» — в режиме торможения электропривода. Выходной сигнал ИЧФД γ в режиме фазового сравнения представляет собой последовательность импульсов с периодом следования $T_{on} = 1/f_{on}$ и длительностью τ , равной временному интервалу между соседними импульсами частот f_{on} и f_{oc} . В этом случае среднее значение выходного сигнала ИЧФД γ пропорционально фазовому рассогласованию $\Delta\phi$ импульсов сравниваемых частот (ШИМ-сигнал фазовой ошибки).

Данный алгоритм работы ИЧФД легко реализуется на цифровых микросхемах и обеспечивает высокую точность формирования выходного сигнала фазовой ошибки. Недостатком данного алгоритма является возможность повторных выходов ИЧФД в режимы насыщения при больших начальных условиях по $\Delta\omega$ в момент начала режима синхронизации ЭПФС (перехода в режим фазового сравнения ИЧФД, а САУ — в режим замкнутого управления).

Постановка задачи. Целью статьи является разработка способа регулирования ЭПФС, реализованного на основе системы автоматического управления с использованием ИЧФД с расширенной линейной зоной в режиме фазового

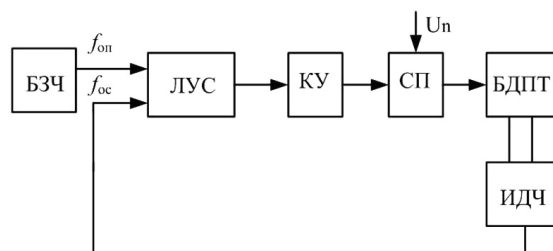


Рис. 1. Функциональная схема электропривода с фазовой синхронизацией

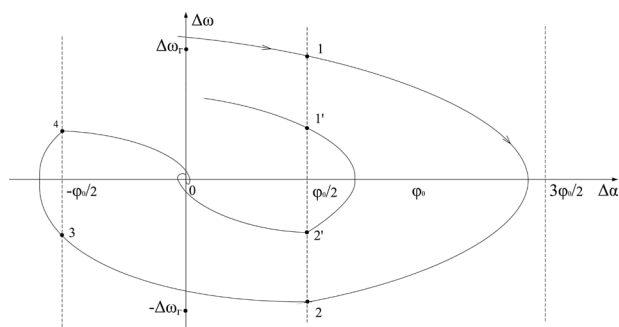


Рис. 2. Фазовый портрет работы ЭПФС

сравнения входных импульсных последовательностей и позволяющего улучшить динамические показатели электропривода.

Теория. Анализ динамических процессов в линеаризованных системах управления ЭПФС (в системах с линеаризованным ШИМ-сигналом ИЧФД [2]) в области высоких частот вращения удобно проводить методом фазовой плоскости, при этом электропривод рассматривается как система с переменной структурой (в соответствии с тремя режимами работы ЭПФС) и для каждой рабочей области строятся семейства фазовых траекторий.

На рис. 2 изображен фазовый портрет работы электропривода для режима вхождения в синхронизм с задающим частотным сигналом f_{on} при различных начальных условиях:

— траектория, обозначенная цифрами 1-2-3-4-0, соответствует работе электропривода в режиме синхронизации с большим значением начальных условий по $\Delta\omega$;

— траектория, обозначенная цифрами 1'-2'-0, соответствует работе электропривода в режиме синхронизации с меньшим значением начальных условий по $\Delta\omega$.

Участки 1-2 и 1'-2' фазовых траекторий соответствуют режиму разгона электропривода с максимальным ускорением. Участок 2-3 соответствует работе электропривода в пропорциональном режиме (замкнутая система автоматического управления (САУ)). Участок 3-4 — торможение ЭПФС с максимальным ускорением и участки 4-0 и 2'-0 — работа в режиме замкнутого управления электроприводом на завершающем этапе синхронизации электропривода. Изменение режима работы ЭПФС происходит на линиях переключения $\Delta\phi = \phi_0/2$ и $\Delta\phi = -\phi_0/2$.

Фазовые траектории для режимов разгона и торможения представляют собой семейства парабол, смещенных по оси $\Delta\alpha$ [2]. В режиме фазового сравнения ИЧФД система автоматического управления ЭПФС замыкается по фазовой ошибке $\Delta\phi$, и движение изображающей точки на фазовом портрете

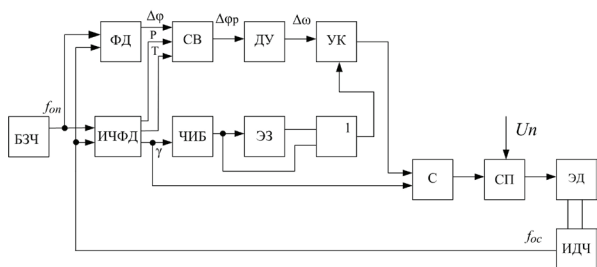


Рис. 3. Функциональная схема электропривода с фазовой синхронизацией с расширенной линейной зоной ФД

осуществляется по траекториям, соответствующим передаточной функции замкнутой САУ.

Для сокращения времени переходного процесса в режиме синхронизации при больших начальных условиях по $\Delta\omega$ при переходе электропривода в режим замкнутого управления используется система управления ЭПФС (рис. 3, где ФД — фазовый дискриминатор, СВ — сумматор-вычитатель, ДУ — дифференцирующее устройство, УК — управляющий ключ, ЧИБ — частотно-измерительный блок, ЭЗ — элемент задержки, ЭД — электродвигатель, С — сумматор, СП — силовой преобразователь) с расширенной линейной зоной дискриминатора [2].

Работы по практической реализации способа регулирования с использованием ИЧФД с расширенной линейной зоной проведены в двух направлениях (рис. 4).

Предложены следующие технические решения по совершенствованию способа управления ЭПФС, реализованного на основе ИЧФД с расширенной линейной зоной:

1) функциональная схема ЭПФС (рис. 5) с введением корректирующих сигналов в основной канал регулирования при кратковременных выходах ИЧФД в режимы насыщения позволяет упростить ранее рассмотренную схемную реализацию электропривода (рис. 3) путем объединения ФД, ИЧФД и ЧИБ в одной схеме ИЧФД [14] с расширенными функциональными возможностями, которая в совокупности со схемой СВ образуют ИЧФД с расширенной линейной зоной в режиме фазового сравнения. Функцию схемы ЧИБ выполняет выходной сигнал П импульсного частотно-фазового дискриминатора;

2) функциональная схема ЭПФС, выполненная на основе ИЧФД с расширенной линейной зоной (рис. 6), формирующего дополнительные сигналы [15]:

- $\Delta\phi_p$ — расширенный до $3\phi_0$ сигнал фазовой ошибки,
- P_p — сигнал индикации режима фазового сравнения.

Для формирования сигнала γ_p в функциональной схеме ЭПФС использован мультиплексор. В режимах насыщения ИЧФД сигнал P_p отсутствует и на выход мультиплексора проходит сигнал γ . При переходе электропривода в пропорциональный режим работы на выходе ИЧФД формируется сигнал P_p индикации режима фазового сравнения с учетом расширенной линейной зоны, и на выход мультиплексора проходит сигнал $\Delta\phi_p$. Электропривод переходит в режим замкнутого управления (режим синхронизации).

Работа предложенных функциональных схем ЭПФС поясняется фазовым портретом (рис. 7)

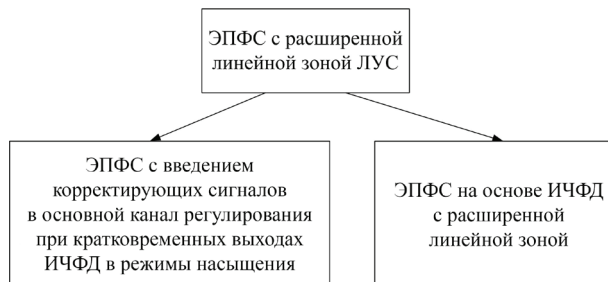


Рис. 4. Классификация вариантов реализации ЭПФС на основе ИЧФД с расширенной линейной зоной

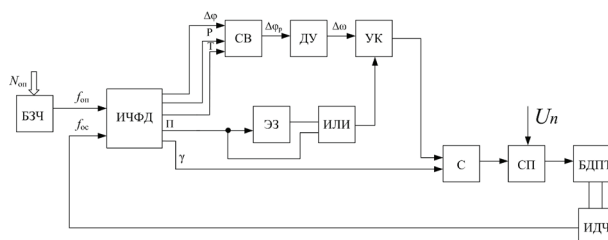


Рис. 5. Функциональная схема ЭПФС с упрощенной схемной реализацией

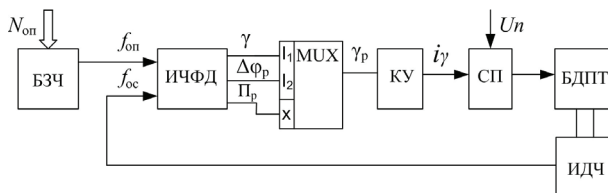


Рис. 6. Функциональная схема ЭПФС на основе ИЧФД с расширенной линейной зоной

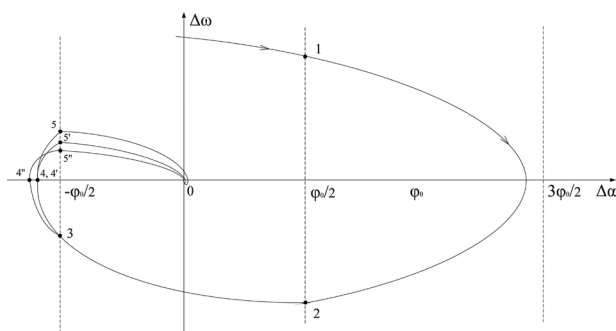


Рис. 7. Фазовые портреты синхронизации ЭПФС с расширенной линейной зоной ИЧФД

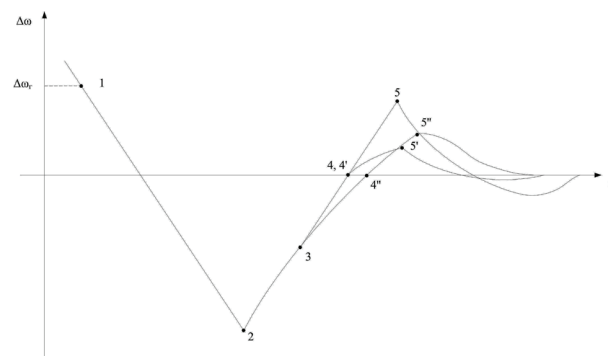


Рис. 8. Временные диаграммы работы ЭПФС с обычным алгоритмом работы ИЧФД и с расширенной линейной зоной дискриминатора

и временными диаграммами работы электропривода (рис. 8). На фазовом портрете приведены 3 фазовые траектории:

— траектория, обозначенная цифрами 1-2-3-4-5-0, соответствует работе ЭПФС с обычным алгоритмом работы ИЧФД;

— траектория, обозначенная цифрами 1-2-3-4'-5'-0, соответствует работе ЭПФС, в котором корректирующие сигналы вводятся в основной канал регулирования в режиме синхронизации при кратковременных выходах ИЧФД в режимы насыщения;

— траектория, обозначенная цифрами 1-2-3-4''-5''-0, соответствует работе ЭПФС с реализацией ИЧФД с расширенной линейной зоной в режиме фазового сравнения.

Участки фазовых траекторий 1-2 и 2-3 и соответствующие им участки временных диаграмм при одинаковых начальных условиях совпадают для всех трех перечисленных реализаций ЭПФС. Участок 1-2 соответствует режиму разгона электропривода с максимальным ускорением. В точке 2 возникает ситуация взаимного расположения входных импульсов ИЧФД 2/2 и происходит переход дискриминатора в режим фазового сравнения. Участок 2-3 соответствует работе электропривода в пропорциональном режиме, соответствующем режиму синхронизации (замкнутая САУ). В точке 3 повторяется ситуация взаимного расположения входных импульсов ИЧФД 2/2.

Далее на фазовой плоскости происходит разделение фазовых траекторий в зависимости от рассматриваемой функциональной схемы ЭПФС. Приведем сравнительный анализ динамики процессов синхронизации предложенных структур электропривода по отношению к ЭПФС с обычным алгоритмом работы ИЧФД.

1. ЭПФС с обычным алгоритмом работы ИЧФД.

Участок 3-4-5 соответствует работе электропривода в режиме торможения с максимальным ускорением. В точке 5 возникает ситуация взаимного расположения входных импульсов ИЧФД 0/2, и происходит переход ИЧФД в режим фазового сравнения. Участок 5-0 соответствует работе электропривода в пропорциональном режиме и отражает процесс синхронизации ЭПФС в точке 0.

2. ЭПФС с введением корректирующих сигналов в основной канал регулирования в режиме синхронизации при кратковременных выходах ИЧФД в режимы насыщения.

На участке 3-4'-5' электропривод находится в режиме торможения, при этом за счет организации введения корректирующих сигналов в основной канал регулирования в режиме синхронизации при кратковременных выходах ИЧФД в режимы насыщения изменяется вид фазовой траектории и соответственно переходного процесса. На участке 3-4' электропривод находится в режиме торможения с максимальным ускорением, т.к. к выходному сигналу γ (отрицательное значение) прибавляется отрицательное значение $\Delta\omega$, но результат суммирования за счет наличия токоограничения БДПТ ограничивается на уровне γ . На участке 4'-5' электропривод находится в режиме торможения с переменным ускорением, т.к. к выходному сигналу γ (отрицательное значение) прибавляется положительное значение $\Delta\omega$, и наличие токоограничения БДПТ не влияет на результат суммирования. В результате происходит улучшение начальных условий по $\Delta\omega$ в точке 5' для завершающего этапа синхронизации

ЭПФС (участок 5'-0) и, как следствие, улучшается динамика электропривода в переходных режимах синхронизации.

3. ЭПФС с реализацией ИЧФД с расширенной линейной зоной в режиме фазового сравнения.

На участке 3-4''-5''-0 электропривод за счет расширенной линейной зоны ИЧФД остается в пропорциональном режиме работы, и процесс синхронизации завершается в точке 0. В результате повышается качество регулирования (уменьшение перерегулирования и сокращение времени переходного процесса) электропривода в переходных режимах синхронизации.

Выводы и заключение. Анализ приведенных фазовых портретов работы предложенных технических решений построения ЭПФС, реализованных на основе ИЧФД с расширенной линейной зоной в режиме фазового сравнения, позволяет сделать вывод об улучшении динамики электропривода по сравнению с системой управления ЭПФС, реализованной на основе ИЧФД с обычным алгоритмом функционирования.

Полученные результаты могут быть использованы при проектировании современных ЭПФС и ССЭ для сканирующих и обзорно-поисковых систем.

Библиографический список

1. Трахтенберг Р. М. Импульсные астатические системы электропривода с дискретным управлением. М.: Энергоиздат, 1982. 169 с.
2. Бубнов А. В., Бубнова Т. А., Федоров В. Л. Современное состояние и перспективы развития теории синхронно-синфазного электропривода: моногр. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2010. 101 с. ISBN 978-5-8149-0988-6.
3. Ясинский Г. И., Быстров А. М., Трахтенберг Р. М. [и др.]. Анализ и систематизация требований к электроприводам оптико-механических сканирующих систем // Усовершенствование и автоматизация промышленных электроприводов и электроустановок: сб. науч.-исслед. работ. 1980. С. 73–75.
4. Выскуб В. Г. Пути совершенствования оптико-механических сканирующих систем с магнитоэлектрическим приводом // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2001. № 6. С. 61–63.
5. Аристов А. В., Аристова Л. И. Предельные характеристики оптико-механических систем со сканированием // Вестник ЮУрГУ. Сер. Энергетика. 2015. Т. 15, № 1. С. 41–46. DOI: 10.14529/power150105.
6. Wu Y., Zhao H., Zhao N. PLL control system based on FPGA for brushless DC motor // Proc. of the 33rd Chinese Control Conf. Nanjing, China, 2014. P. 7897–7902. DOI: 10.1109/CHIC.2014.6896319.
7. Pan C.-T., Fang E. A phase-locked-loop-assisted internal model adjustable-speed controller for BLDC motors // IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2008. Vol. 55, Issue 9. P. 3415–3425. DOI 10.1109/TIE.2008.922600.
8. Zhang J., Zhao H., Ma K. Phase-Locked Loop in constant speed control for the flywheel motor // Recent Advances in Computer Science and Information Engineering. 2012. Vol. 6. P. 323–330. DOI 10.1007/978-3-642-25778-0_45.
9. Hsieh G. C., Hung J. C. Phase-Locked Loop Techniques. A Survey // IEEE Transactions on Industrial Electronics. 1996. Vol. 43, Issue 6. P. 609–615. DOI 10.1109/41.544547.
10. Best R. E. Phase-locked loops: design, simulation, and applications. NY: McGraw-Hill, 2003. 421 p.
11. Brock S., Zawirski K. New approaches to selected problems of precise speed and position control of drives // IECON 2012 – 38th Annual Conf. on IEEE Industrial Electronics Society. 2012. P. 6291–6296. DOI: 10.1109/IECON.2012.6389020.

12. Ramirez-Figueroa F. D., Pacas M. Model based control of a PMSM with variable switching frequency and torque ripple control // IEEE Ind. Electron. Soc., IECON 2015. P. 1418–1423. DOI: 10.1109/IECON.2015.7392299.

13. Feng K. [et al.]. Modeling and bifurcation research of phase-locked loop speed control of induction motor drive // IEEE Ind. Electron. Soc. 26th Annu. Conf. Nagoya, Aichi, Japan. 2000. P. 2327–2333. DOI: 10.1109/IECON.2000.972361.

14. Пат. 163831 Российская Федерация, МПК Н 02 Р 7/06, 7/28. Стабилизированный электропривод / Бубнов А. В., Четверик А. Н., Чудинов А. Н. № 2016104223/07; заявл. 09.02.2016; опубл. 10.08.2016, Бюл. № 22.

15. Пат. 2647678 Российская Федерация, МПК Н 03 D 13/00, Н 03 L 7/09. Частотно-фазовый компаратор / Бубнов А. В., Четверик А. Н. № 2017120667; заявл. 13.06.2017; опубл. 16.03.2018, Бюл. № 8.

БУБНОВ Алексей Владимирович, доктор технических наук, профессор (Россия), заведующий кафедрой «Электрическая техника».
SPIN-код: 5358-0661
AuthorID (РИНЦ): 250020
ORCID: 0000-0002-0604-3795

AuthorID (SCOPUS): 7004195241

ResearcherID: A-6669-2015

Адрес для переписки: bubnov-av@bk.ru

ЧЕТВЕРИК Алина Наилевна, старший преподаватель кафедры «Электрическая техника».

SPIN-код: 2930-8935

AuthorID (РИНЦ): 688459

ORCID: 0000-0001-8470-9823

AuthorID (SCOPUS): 57193411398

ResearcherID: O-4913-2017

Адрес для переписки: alina.an@mail.ru

Для цитирования

Бубнов А. В., Четверик А. Н. Улучшение динамики электропривода с фазовой синхронизацией, построенного на основе импульсного частотно-фазового дискриминатора с расширенными функциональными возможностями // Омский научный вестник. 2018. № 4 (160). С. 38–42. DOI: 10.25206/1813-8225-2018-160-38-42.

Статья поступила в редакцию 21.05.2018 г.

© А. В. Бубнов, А. Н. Четверик

УДК 621.1:629.5.064.5-049.5

DOI: 10.25206/1813-8225-2018-160-42-46

В. Р. ВЕДРУЧЕНКО¹

А. В. ШТИБ¹

И. И. МАЛАХОВ²

¹Омский государственный университет путей и сообщения, г. Омск

²Омский институт водного транспорта (филиал) Сибирского государственного университета водного транспорта, г. Омск

О МОДЕЛИРОВАНИИ ЗАДАЧИ ОПТИМИЗАЦИИ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЭКОЛОГИЧНОСТИ СУДОВОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ КАК СЛОЖНОЙ ТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Представлена математическая модель задачи оптимизации показателей экологичности сложных технических систем по критерию минимума суммарных затрат. Разработанный критерий оптимизации позволяет учитывать как эксплуатационные затраты, так и показатели риска аварий при эксплуатации сложных систем. Эффективность разработанных моделей подтверждена результатами моделирования.

Ключевые слова: численное моделирование, экологичность и экономичность сложной теплоэнергетической системы, показатели риска аварий, эксплуатационные затраты, критерий минимума суммарных затрат.

Требования экологичности производственных процессов, в том числе транспортных, являются одним из важнейших факторов, стимулирующих

развитие научно-методического метода анализа и управления риском при эксплуатации сложных технических систем (СТС), в том числе транспортных,