

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,

например, судно и его энергетическая установка [1–3]. Если затраты на обеспечение экологичности составляют значительную долю материальных ресурсов процессов, важное значение приобретает проблема оптимизации показателей экологичности СТС с учетом затрат и прогнозируемых значений показателей приемлемого риска аварий, особенно на транспорте [4].

В этом случае, считая некоторый риск приемлемым и который сочетает в себе технические, экономические, социальные, экологические и политические аспекты и представляет собой некоторый компромисс между уровнем экологичности и возможностями ее достижения [3, 4]. Целью данной работы по аналогии с работами [5, 6] является разработка математического аппарата по обоснованию требований к показателям приемлемой экологичности СТС и соответствующих программ управления, позволяющих с использованием современных вычислительных средств и методов оптимизации эффективно управлять организационными системами, производством и потенциально опасными объектами, например, судном.

Постановка задачи оптимизации. Под сложной технической системой, например, судовой энергетической установкой (СЭУ) будем понимать множество взаимосвязанных элементов, взаимодействующих между собой и образующих некоторую целостность (общность), которая обладает определенными свойствами, присущими только данной системе и отсутствующими у каждого элемента в отдельности (свойство эмерджентности) [5].

Сложные технические системы характеризуются, прежде всего, большим числом составных элементов, множеством разнообразных связей, разнородностью структурных элементов и многообразием их физической природы. Кроме того, сложные системы обладают свойствами оптимальности [4].

Примерами СТС могут служить корабли, стационарные энергетические комплексы, автоматические и автоматизированные системы управления и т.д. В общем случае обоснование требований к экологичности и надежности СТС связано с соизмерением производственных, эксплуатационных затрат и существующим риском аварий СТС [2]. Поэтому в качестве критерия оптимизации, как это чаще всего принято, рассматривается минимум суммарных экономических издержек (затрат), связанных как с предупреждением возможных происшествий (аварий), так и с ликвидацией последствий (ущерба) от их возникновения [3–5].

Экологичность, как и другие свойства сложных технических систем, обеспечивается свойствами отдельных компонентов (элементов), что требует проведения большого количества контрольно-профилактических и ремонтно-восстановительных мероприятий, выполняемых на всех этапах жизненного цикла систем. Мероприятия обеспечения требуемого уровня экологичности характеризуются показателями стоимости, эффективности, ресурсоемкости и т.п. Следовательно, задача обоснования параметров экологичности сложных технических систем является оптимизационной задачей, а ее решение предполагает нахождение таких параметров $P_1, P_2, \dots, P_i, \dots, P_n$, которые обеспечат минимум функционала [5]:

$$C_{\Sigma}(P) = \sum_{i=1}^n [C_i(P_i) + R_i(P_i)] \longrightarrow \min_{P_i} \quad (1)$$

где P_i — параметры оптимизации, представляющие собой показатели экологичности i -х ($i=1, 2, \dots, n$) систем (компонентов, элементов); $C_i(P_i)$ — затраты (стоимость) на реализацию комплекса организационно-технических мероприятий, связанных с обеспечением выбранного показателя надежности и экологичности P_i ; $R_i(P_i)$ — затраты, связанные с риском аварий в процессе эксплуатации (функционирования) i -й системы (компонентов, элементов); P — вектор с компонентами $P_1, P_2, \dots, P_i, \dots, P_n$.

Далее следует пример, который широко используется в работах [4, 5].

Решение оптимизационной задачи (1) связано с наличием некоторых трудностей: из-за существенной неопределенности исходной информации, обусловленной различными режимами и условиями эксплуатации СТС; сложности структурных схем и множества элементов различной физической природы; неопределенности процессов старения и, как следствие, технического состояния отдельных компонентов и системы в целом [4–6].

Рассмотрим, как и ранее [5], один из возможных подходов к решению задачи. Из опыта эксплуатации известно, что, с одной стороны, затраты (стоимость) на обеспечение заданного уровня надежности и экологичности СТС нелинейно увеличиваются по мере возрастания требований к этим показателям. При этом очевидно, что чем меньше требования к экологичности и надежности систем, тем меньше затраты на их обеспечение и наоборот. Так, при изменении показателей экологичности в пределах 0,2...0,8 увеличение стоимости незначительно, а в пределах 0,8...0,10 — резко возрастает, стремясь к бесконечности (рис. 1) [1–5]:

$$C(P) \longrightarrow \infty \quad \text{при} \quad P(t) \longrightarrow 1,$$

где t — время.

Соответственно, для каждой i -й системы (элемента) в общем случае функция стоимости $C(P)$ (для системы в целом или для ее i -й компоненты) может быть аппроксимирована зависимостью вида [5]:

$$C(P) = C_A + C_0 \frac{\ln(1-P)}{\ln(1-P_0)} \quad (2)$$

где C_A — постоянная величина затрат, не зависящая от надежности и экологичности СТС; C_0 — затраты (стоимость), связанные с обеспечением технически возможного максимального значения показателя безопасности P_0 .

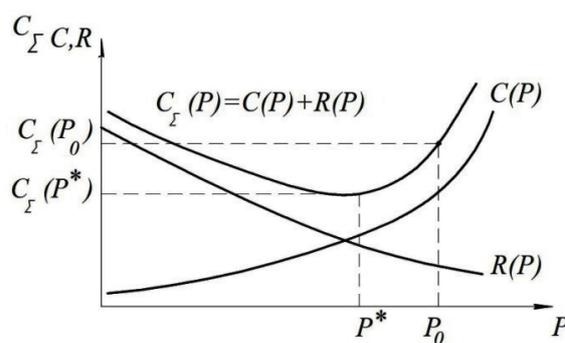


Рис. 1. Графики функций затрат на обеспечение экологичности сложной системы.

P^* — оптимальный уровень экологичности системы по критерию минимума суммарных затрат

С другой стороны, эксплуатация системы с низкими показателями надежности и экологичности связана с высокими эксплуатационными затратами, обусловленными повышенной интенсивностью отказов, увеличением числа неисправностей, ремонтов и технических обслуживаний, а также затратами по устранению последствий (ущерба) аварий. Все это требует содержания большого количества обслуживающего персонала и аварийно-спасательных формирований, специальных средств сигнализации и обслуживания, сложной и дорогостоящей контрольно-измерительной аппаратуры и т.п. При этом по мере роста показателей надежности и экологичности СТС снижаются не только затраты на эксплуатацию системы, но и затраты, связанные с устранением последствий аварий.

Интегральными показателями опасности систем, обладающих параметрами P , являются показатели риска, которые представляют собой произведение вероятности $Q = 1 - P$ некоторого неблагоприятного события (происшествия) на величину ущерба C от этого события [5]:

$$R(Q) = QC_y = (1 - P)C_y. \quad (3)$$

Характерная зависимость эксплуатационного риска (риска аварий) $R(P)$ от надежности и экологичности системы $P = 1 - Q$ может быть аппроксимирована зависимостью (рис. 1, кривая $R(P)$):

$$R(P) = R_\Delta + R_0 \frac{\ln P}{\ln P_0} = R_\Delta + R_0 \frac{\ln(1 - Q)}{\ln(1 - Q_0)}, \quad (4)$$

где R_Δ — постоянная величина риска, не зависящая от показателей экологичности системы; R_0 — значение показателя риска при эксплуатации системы с показателем экологичности P_0 ; Q — вероятность аварии при эксплуатации СТС с показателями экологичности P .

С учетом случайного характера эксплуатационных процессов суммарная стоимость всех затрат, связанных с достижением приемлемого уровня риска эксплуатации СТС, равна:

$$\begin{aligned} C_\Sigma(P) &= C(P) + R(P) = \\ &= C_\Delta + R_\Delta + C_0 \frac{\ln(1 - P)}{\ln(1 - P_0)} + R_0 \frac{\ln P}{\ln P_0} \end{aligned}$$

или

$$\begin{aligned} C_\Sigma(Q) &= C(Q) + R(Q) = \\ &= C_\Delta + R_\Delta + C_0 \frac{\ln(1 - Q)}{\ln(1 - Q_0)} + R_0 \frac{\ln Q}{\ln Q_0} \quad \forall Q = 1 - P, \quad (5) \end{aligned}$$

где $C_\Sigma(P)$ — математическое ожидание суммарных затрат, связанных с затратами на обеспечение (достижение) выбранного уровня экологичности СТС и риском возникновения происшествий в процессе эксплуатации; $C(P)$ — математическое ожидание затрат, связанных с реализацией программы по обеспечению выбранного уровня экологичности СТС (включая затраты на разработку, производство, испытания и эксплуатацию); $R(Q)$ — математическое ожидание затрат, связанных с риском нанесения ущерба самой СТС, окружающей среде и социальным объектам при данном уровне экологичности.

Функциональная зависимость суммарных затрат от достигнутого уровня экологичности приведена на рис. 1 (кривая $C_\Sigma(P)$), из которого следует, что суммарные затраты имеют минимум при определенном значении P^* , которое и является оптимальным уровнем экологичности системы по критерию минимума суммарных затрат. Для определения P^* необходимо взять производную от выражения (5) и решить уравнение

$$\frac{\partial C_\Sigma(P)}{\partial P} = 0. \quad (6)$$

Для этого выражение (5) запишем в следующем виде:

$$[C_\Sigma(P)] = [A + B \ln(1 - P) + D \ln P], \quad (7)$$

$$\text{где } A = C_\Delta + R_\Delta; B = \frac{C_0}{\ln(1 - P_0)}; D = \frac{R_0}{\ln P_0}.$$

После дифференцирования выражения (7) с учетом (6) получим уравнение вида:

$$\frac{D(1 - P) - BP}{P(1 - P)} = 0. \quad (8)$$

Так как $P \neq 0$ и $P \neq 1$, то и знаменатель $P(1 - P) \neq 0$.

Следовательно, числительно $D(1 - P) - BP = 0$.

Отсюда решение этого уравнения:

$$P^* = \frac{D}{B + D}. \quad (9)$$

После подстановки B и D получим окончательное выражение:

$$P^* = \frac{R_0}{\ln P_0} \left/ \left[\frac{C_0}{\ln(1 - P_0)} + \frac{R_0}{\ln P_0} \right] \right. = \frac{R_0}{R_0 + C_0} \frac{\ln P_0}{\ln(1 - P_0)}. \quad (10)$$

Пример решения задачи оптимизации. Для иллюстрации возможностей и апробации разработанного математического аппарата приведем пример решения задачи оптимизации (1) параметров экологичности некоторой идеализированной сложной технической системы по критерию минимума суммарных затрат [5].

В качестве исходных данных при моделировании функций эксплуатационного риска и суммарных затрат по формулам (2), (4) – (5) приняты значения параметров, не противоречащие современной производственной и эксплуатационной практике в различных отраслях экономики: $C_g = 970$ у.е.; $R_\Delta = 2300$ у.е.; $C = 1\,773\,950$ у.е.; $C_y = 6\,957\,57$ у.е.; $P_0 = 0,9999$. Полученные результаты решения, представленные на рис. 2 в виде графиков, показали наличие оптимального значения параметра экологичности СТС $P^* = P_{opt} = 0,973062$, обеспечивающего минимум суммарных затрат $Q(P) = 8,894 \text{ Ю}^5$ у.е.

В целом, результаты моделирования, полученные с помощью системы MATHCAD [7, 8], показали универсальность, адекватность и эффективность разработанных моделей, что подтверждается чувствительностью моделей к исходным данным и параметрам оптимизации, а также совпадением

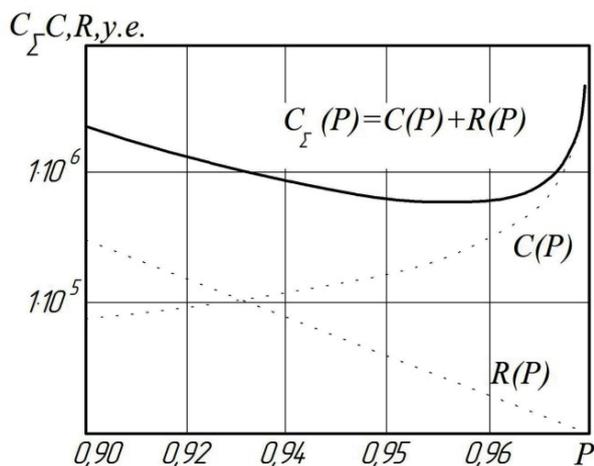


Рис. 2. Результаты оптимизации показателей экологичности сложной системы по критерию минимума суммарных затрат

ем результатов вычислений, полученных как расчетным путем $P = 0,973062$ по формуле (10), так и с помощью встроенных функций оптимизации — $\text{Minimize}(C_z, P) = 0,97306$.

Особенности формализации задачи оптимизации. В общем случае требования к экологичности СТС в целом трансформируются в требования к показателям экологичности и надежности отдельных компонентов (элементов) системы. Соответственно, распределение требований к показателям экологичности и надежности функционирования элементов (компонентов) $p(t)$ системы в течение времени также предполагает решение оптимизационной задачи [9].

Задача состоит в распределении требований между отдельными подсистемами (элементами) СТС таким образом, чтобы были удовлетворены требования экологичности ко всей системе в целом [5]. В тех ситуациях, когда система состоит из n подсистем примерно эквивалентного объема (подсистемы близки по сложности, например, по числу элементов), а их отказы являются опасными и независимыми событиями (т. е. отказ любой из подсистем может привести к происшествию), требуемое значение показателя $P(t)$ может быть найдено методом равномерного распределения квот экологичности [5].

Например, если в простейшем случае надежные характеристики элементов примерно равны, а отказ любого элемента n системы является опасным и независимым, то

$$P_c(t) \geq P_{mp}(t) = \prod_{i=1}^n P_i(t) \approx P_i^n(t), \quad (11)$$

следовательно,

$$P_i(t) = \sqrt[n]{P_{mp}(t)}, \quad (12)$$

где $P_i(t)$ — вероятность безопасного функционирования (работы) элемента (компонента) системы в течение времени t ; P_c — показатель экологичности системы; $P_{mp}(t)$ — требуемые значения показателя экологичности СТС.

В других случаях между показателями надежности и экологичности отдельных элементов и си-

стемы в целом могут существовать более сложные зависимости. Для их установления и формализации используются методы системного анализа и моделирования опасных процессов, например, аппарат логико-вероятностной теории экологичности сложных систем [1, 4].

Для описания дополнительных затрат, связанных с обеспечением экологичности СТС, воспользуемся экспоненциальной зависимостью вида [5]:

$$C_i(X_i) = \alpha_i e^{-\theta_i X_i}, \quad (13)$$

где X_i — оптимизируемый параметр (например, показатель экологичности, P); α_i — постоянный коэффициент с размерностью целевой функции; θ_i — постоянный коэффициент с размерностью, обратной размерности X_i ($\theta_i > 0$).

Из выражения (13) следует, что уменьшение параметра X_i приводит к снижению затрат. Применительно к задаче оптимизации (рис. 1) это означает, что чем ниже показатели экологичности системы (элементов), тем меньше затраты, связанные с их обеспечением (достижением). Например, если $p < p_2$, то $C(p) < C(p_2)$.

Для показателя риска можно записать аналогичную зависимость:

$$R_i(X_i) = \beta_i e^{-\chi_i X_i}, \quad (14)$$

где X_i — оптимизируемый параметр; β_i — постоянный коэффициент с размерностью целевой функции; χ_i — постоянный коэффициент с размерностью, обратной размерности X_i ($\chi_i > 0$).

Из выражения (14), в отличие от выражения (13), следует, что чем выше показатели экологичности системы (элементов), тем меньше затраты, связанные с ликвидацией последствий происшествий. То есть если $P_1 < P_2$, то $R(P_1) > R(P_2)$.

Примем допущение, что для всех i -х элементов системы ($i = 1, \dots, n$) зависимость между показателями экологичности и стоимостью мероприятий обеспечения экологичности определяется функцией вида

$$C(P_i) = \alpha_i \ln(Q), \quad (15)$$

а между экологичностью и показателями эксплуатационного риска — функцией:

$$R(P_i) = \beta_i \ln(P_i) = \beta_i \ln(1 - Q), \quad (16)$$

где α_i и β_i — постоянные величины; $p = 1 - Q$.

Соответственно, критерий оптимизации в виде минимума суммарных затрат, связанных с обеспечением экологичности функционирования множества элементов (компонентов) системы и риска происшествий, будет определяться как [5]:

$$C_{\Sigma}(P) = \sum_{i=1}^n [\alpha_i \ln(1 - P_i) + \beta_i \ln(P_i)] = \sum_{i=1}^n [\alpha_i \ln(Q_i) + \beta_i \ln(1 - Q_i)] \Rightarrow \min_{P_i}. \quad (17)$$

Для того, чтобы формула (17) выражала зависимость между показателями экологичности системы и суммарной стоимостью, необходимо $p(t)$ выразить через $P_c(t)$. При этом очевидно, что определенному

значению $P_c(t)$ показателя экологичности системы может удовлетворять множество комбинаций значений ($P(t)$), дающих в производстве одно и то же значение $P_c(t)$. Однако с учетом критерия оптимизации (14) необходимо найти такую комбинацию произведений $P(t)$, $i = 1, \dots, n$, которая обеспечит выполнение ограничения:

$$P_c(t) = \prod_{i=1}^n P_i(t) \geq P_{mp}(t) \text{ при } C_{\Sigma}(P_i) \Rightarrow \min_{P_i}. \quad (18)$$

Другими словами, задача сводится к нахождению значений $P(t)$, при которых показатель экологичности системы $P_c(t)$ удовлетворяет условию $P_c(t) > P_{mp}(t)$, а суммарная стоимость минимальна, т. е.

$$\left. \begin{aligned} C_{\Sigma}(P_c) &= \sum_{i=1}^n [\alpha_i \ln(1 - P_i) + \beta_i \ln(P_i)] = \min_{P_i} \\ P_c(t) &= \prod_{i=1}^n P_i(t) \forall 0 < P_i < 1 \end{aligned} \right\}. \quad (19)$$

Результаты моделирования подтвердили универсальность, адекватность и работоспособность разработанного математического аппарата при решении многопараметрических задач оптимизации экологичности СТС, что позволяет формализовать процессы принятия решений с применением современных информационных технологий

Заключение. Разработанная математическая модель позволяет учитывать ситуационные особенности потенциально опасных объектов и проводить оптимизацию показателей экологичности сложных систем путем соизмерения эксплуатационных затрат с прогнозируемым риском аварий. Показан способ решения задачи оптимизации показателей экологичности СТС по критерию минимума суммарных затрат (19).

Таким образом, можно сделать следующие выводы:

1. Разработанные модели позволяют автоматизировать процесс решения задачи оптимизации требований к безопасности сложных систем с помощью программных комплексов MATHCAD и MATLAB, которые имеют большой набор встроенных функций и простой интерфейс.
2. Универсальность, адекватность, эффективность и чувствительность моделей к исходным данным и параметрам оптимизации подтверждена результатами компьютерного моделирования.

Библиографический список

1. Острейковский В. А. Теория надежности. М.: Высшая школа, 2003. 463 с. ISBN 5-06-004053-4.
2. Северцев Н. А. Системный анализ и моделирование безопасности. М.: Высшая школа, 2006. 462 с. ISBN 5-06-005564-7.

3. Рябинин И. А. Надежность и безопасность структурно сложных систем: моногр. СПб.: Политехника, 2000. 248 с.

4. Ведрученко В. Р., Крайнов В. В., Кокшаров М. В. О системном подходе в исследовании проблемы загрязнения окружающей среды вредными выбросами энергетических установок железнодорожного транспорта // Промышленная энергетика. 2001. № 5. С. 55–60.

5. Майструк А. А., Майструк А. В., Резчиков Е. А. Моделирование задачи оптимизации показателей безопасности сложных систем с учетом эксплуатационных затрат и показателей риска // Машиностроение и инженерное образование. 2013. № 3 (36). С. 42–51.

6. Ведрученко В. Р., Крайнов В. В., Кокшаров М. В., Галимский Е. В. О системном подходе в методологии научных исследований // Омский научный вестник. 2002. Вып. 19. С. 199–202.

7. Майструк А. В. Управление безопасностью эксплуатации сложных технических систем: математические методы и практика их применения: моногр. М.: Изд-во ВА РВСН им. Петра Великого, 2007. 256 с.

8. Майструк А. В., Майструк А. А., Боркин В. С. Моделирование безопасности энергетических систем // Известия МГИУ. Естественные и технические науки. 2012. № 2 (26). С. 69–74.

9. Корниенко В. П. Методы оптимизации. М.: Высшая школа, 2007. 664 с. ISBN 978-5-06-005531-3.

ВЕДРУЧЕНКО Виктор Родионович, доктор технических наук, профессор (Россия), профессор кафедры «Теплоэнергетика» Омского государственного университета путей и сообщения (ОмГУПС).

SPIN-код: 1462-4926

AuthorID (РИНЦ): 514202

Адрес для переписки: vedruchenkovr@mail.ru

ШТИБ Алексей Викторович, аспирант кафедры «Теплоэнергетика» ОмГУПС.

SPIN-код: 6654-0400

AuthorID (РИНЦ): 904940

Адрес для переписки: shtib93@mail.ru

МАЛАХОВ Иван Игоревич, кандидат технических наук, доцент (Россия), заведующий кафедрой «Специальные технические дисциплины» Омского института водного транспорта филиала «СГУВТ».

SPIN-код: 5612-4010

AuthorID (РИНЦ): 647738

Адрес для переписки: mivan.doc@yandex.ru

Для цитирования

Ведрученко В. Р., Штиб А. В., Малахов И. И. О моделировании задачи оптимизации показателей экологичности судовой энергетической установки как сложной технической системы // Омский научный вестник. 2018. № 4 (160). С. 42–46. DOI: 10.25206/1813-8225-2018-160-42-46.

Статья поступила в редакцию 20.03.2018 г.

© В. Р. Ведрученко, А. В. Штиб, И. И. Малахов