

ISSN 0013-5860



№ 12 ДЕКАБРЬ 2017

СОДЕРЖАНИЕ

Ясаков Г.С., Дмитриев Б.Ф., Калмыков А.Н., Лебедев В.М. Методы повышения качества электроэнергии в единых судовых электроэнергетических системах	3
Столяров С.П., Столяров А.С. Стирлинг-генераторы: проблемы и перспективы	8
Сеньков А.П., Калмыков А.Н., Сеньков А.А., Макин П.В. О перспективных вариантах волновых электростанций	13
Батрак Д.В., Калинин И.М., Кузнецов В.И., Сеньков А.П. Оценка качества напряжения питания в судовой электроэнергетической системе методом компьютерного моделирования	18
Дмитриев Б.Ф., Воршевский П.А., Резниченко В.В. Методы и средства обеспечения электромагнитной совместимости в судовых системах электропитания	24
Галушин С.Я. Особенности управления электропитанием морских транспортных средств с энергетической установкой на базе топливных элементов	30
Воршевский А.А., Гришаков Е.С. Влияние электростатического заряда на устойчивость электронного и электротехнического оборудования	35
Максимова М.А., Хруцкий О.В. Алгоритм определения технического состояния электрической машины	40
Михайлов В.М., Сеньков А.П. Применение вентильных электрических машин в судовых электротехнических системах	45
Галушин С.Я., Шаманов Д.Н. Система управления рециркуляцией газов в батарее топливных элементов	54
Дядик А.Н., Кучинский Д.М., Довыдовская Н.Н., Вахрушина Н.С., Довыдовский В.А. Расчетное определение параметров электролизной ячейки	57
Камачкин А.М., Согонов С.А., Шамберов В.Н. Метод декомпозиции в задачах исследования электроэнергетических систем с сухим трением	63
Авторы опубликованных статей	65
Кужеков С.Л., Дегтярев А.А. О координации функционирования трансформаторов тока и устройств релейной защиты и автоматики электроэнергетических систем в переходных режимах коротких замыканий	73
Сидоренко В.Г., Чко М.А., Алексеев В.М., Розенберг Е.Н., Уманский В.И. Планирование обслуживания электроподвижного состава в условиях ограниченных ресурсов	76
Горелик А.В., Горелик В.Ю., Апатцев В.И., Батурина А.П., Кобзев В.А., Журавлев И.А. Метод исследования электротехнических систем с периодически изменяющимися параметрами	79
Исмаилов О.М. Способы повышения отказоустойчивости баз данных автоматизированных систем управления производством	83
Осипов В.С. К определению параметров эквивалентной схемы замещения трехфазных асинхронных электродвигателей	88
Щучкин Д.А., Павленко А.В., Пузин В.С., Батищев Д.В., Хорошев А.С. Применение программного комплекса GMSH+GetDP для расчета нестационарных магнитных полей электромеханических преобразователей	92
Список статей, опубликованных в журнале «Электротехника» в 2017 г.	92

CONTENTS

G.S. Yasakov, B.F. Dmitriev, A.N. Kalmykov, V.M. Lebedev. Methods of improving power quality in a marine unified power systems	3
S.P. Stolyarov, A.S. Stolyarov. Stirling-generators: problems and prospects	8
A.P. Sen'kov, A.N. Kalmykov, A.A. Sen'kov, P.V. Makin. About future options the wave power stations	13
D.V. Batrak, I.M. Kalinin, V.I. Kuznetsov, A.P. Sen'kov. Estimation of the quality of supply voltage in the ship electric power system by computer simulation.	18
B.F. Dmitriev, P.A. Vorschewskii, V.V. Reznichenko. Methods and tools for electromagnetic compatibility in marine electrical power supply	24
S.Ya. Galushin. The power operation features for the marine vehicles with a fuel cells based power plant	30
A.A. Worschewsky, E.S. Grishakov. The influence of electrostatic charge on stability of electronic and electrical equipment	35
M.A. Maksimova, O.V. Khrutskiy. Algorithm for determining the technical state of electric machine	40
V.M. Mikhailov, A.P. Sen'kov. Use of permanent magnet machines in marine power electric systems	45
S.Ya. Galushin, D.N. Shamanov. The control system of recirculation of gases in the fuel cell stack	49
A.N. Dyadik, D.M. Kuchinskiy, N.N. Davydovskaya, N.S. Vahrushina, V.A. Davidowskij. The numerical determination of the parameters of the electrolysis cell	54
A.M. Kamachkin, S.A. Sogonov, V.N. Shamberov. The method of the decomposition in the tasks of research into electric-energetic systems with dry friction	57
Autors of published article	63
S.L. Kuzhekov, A.A. Degtyarev. On the coordination of the functioning of current transformers and relay protection of electric power systems	65
V.G. Sidorenko, M.A. Chzho, V.M. Alekseev, E.N. Rozenberg, V.I. Umanskii. The planning of electric rolling stock maintenance in conditions of limited resources	73
A.V. Gorelik, V.Yu. Gorelik, V.I. Apattsev, A.P. Baturin, V.A. Kobzev, I.A. Zhuravlev. The research method of electrical systems with periodically time-varying parameters	76
O.M. Ismailov. Methods for increasing the fault tolerance of databases of automated production management systems	79
V.S. Osipov. Improved method for determination of three phase asynchronous motor equivalent circuit parameters	83
D.A. Shchuchkin, A.V. Pavlenko, V.S. Puzin, D.V. Batishchev, A.S. Khoroshev. Application of the GMSH+GetDP software package for the calculation of non-stationary magnetic fields of electromechanical transducers	88
The list of the articles that were published in journal «Electrotehnika» in 2017	92

Планирование обслуживания электроподвижного состава в условиях ограниченных ресурсов

СИДОРЕНКО В.Г., ЧЖО МИН АУНГ, АЛЕКСЕЕВ В.М., РОЗЕНБЕРГ Е.Н., УМАНСКИЙ В.И.

Планирование технического обслуживания (ТО) электроподвижного состава (ЭПС) в условиях ограниченных ресурсов может осуществляться на основе следующих критериев эффективности построения графика оборота (ГО) ЭПС: – удовлетворение требований безопасности движения, обеспечивающее путем коррекции планируемого времени движения ЭПС с целью недопустимости превышения времени между ТО над допустимым; – равномерность проведения ТО. Решение поставленной задачи с использованием теории графов дает возможность получить все множество допустимых назначений обслуживаний и выбрать то, которое, с одной стороны, соответствует плановому графику движения поездов (ПГД), а с другой – минимально отличается от оптимального по выбранному критерию. Такой требует значительных затрат времени. Использование генетического алгоритма позволяет решить задачу быстро. Ввод нового критерия – суммарного превышения времени между ТО над допустимым интервалом между двумя обслуживаниями – позволяет получить решение при любых исходных данных, что не всегда достижимо при использовании критерия равномерного обслуживания. Выполнена адаптация алгоритмов кроссинговера и мутации, реализуемых в рамках генетического алгоритма, с учетом особенностей агентов, задействованных в решении поставленной задачи. Исследованы возможность применения для построения ГО различных типов кроссинговера, мутации и влияние параметров генетического алгоритма на результаты. Полученные аналитические результаты апробированы для условий Московского метрополитена.

Ключевые слова: электроподвижной состав, оптимизация, планирование, техническое обслуживание, комбинаторика, теория графов, генетический алгоритм.

Организация технического обслуживания электроподвижного состава метрополитенов характеризуется рядом особенностей, об ограниченных ресурсах для ее решения:

- напряженный график работы ЭПС, полное использование всего наличного ЭПС в часы пик;
- ограниченные возможности расширения площадей депо в рамках мегаполисов в связи с высокой стоимостью земли и плотностью застройки;

This article discusses the planning of electric rolling stock (ERS) maintenance: to implement all maintenance requirements under limited resources. In this case, several effective criteria can be considered for the planning of turn over schedule: – satisfaction of traffic safety requirements, provided by correcting the estimated train movement time which should not exceed limited time between maintenances; – uniformity of maintenance.

The solution by using graph theory allows to get the whole set of reasonable maintenances schedule and to choose which maintenance corresponds to the train movement schedule and minimum differs from the optimal by selected criteria. It takes a significant amount of time. The discussed task can be solved quickly by using genetic algorithm. New criterion – total exceeded time over permissible interval time between maintenances – allows to get a solution for any initial data. It is not always available when using the criterion of uniform maintenance. In this article developed mathematical tool is based on combinatorics, graph theory, and genetic algorithms. The authors executed the adaptation of crossover algorithms and mutations, implemented in the framework of the genetic algorithm, with the features of the agent involved in the solution. The authors investigated the possibility of using various crossover types, mutations and the parameters' influence of the genetic algorithm on the obtained results for turnover schedule planning. The obtained results have been tested for the conditions of the Moscow subway.

Key words: electric rolling stock, optimization, planning, maintenance, combinatorics, graph theory, genetic algorithm.

– ограниченные возможности использования линейных пунктов технического осмотра (ПТО), расположенных на станционных путях станций в связи с использованием этих путей для регулировочных действий (оборотов и отстоев);

– распределение ПТО и маршрутов между депо.

Планированию технического обслуживания ЭПС посвящено большое число работ, которые рассматривают эту задачу либо как математическую:

- классическую задачу о назначениях;
- задачу, решаемую с использованием теории графов и принципа оптимальности Беллмана [1];
- задачу, решаемую с использованием генетического алгоритма;
- либо как задачу управления процессами перевозок – организации эксплуатации и технического обслуживания ЭПС железных дорог в условиях жестких временных ограничений при наличии нескольких конкурирующих компаний [2];
- либо как задачу организации мониторинга технического обслуживания [3, 4].

Применение теории графов для решения задачи планирования ТО ЭПС показало свою эффективность [1] так же, как и для решения других задач автоматизации управления движением поездов.

Генетические алгоритмы (ГА) [5] также нашли широкое применение для решения задач автоматизации управления транспортными системами.

В [1, 6] в качестве критерия рационального планирования ТО предложен критерий равномерности размещения обслуживаний R_R , определяемый одним из двух способов:

1. Как сумма квадратов отклонений времени начала обслуживания для кандидата, проводящего обслуживание, от желаемого времени:

$$R_R = \frac{\sum_{i=1}^{N_c} \sum_{j=1}^{c_i:N_r} (\mathbf{c}_i:\mathbf{I}_j:t_{dex} - \mathbf{c}_i:\mathbf{I}_j:\mathbf{k}:t_b)^2}{N_{\Sigma r} - 1} \rightarrow \min, \quad (1)$$

где \mathbf{c} – это кортеж, называемый «цепочка» и описывающий поведение транспортного средства (ТС) с момента его выхода из депо до момента захода в депо; $\mathbf{c}:N_r$ – необходимое количество обслуживаний внутри цепочки; N_c – количество цепочек; \mathbf{I} – кортеж, называемый «звено» и описывающий поведение ТС с момента его выхода из депо до момента захода на ТО, с момента выхода из ТО до момента захода в депо или между двумя ТО; $\mathbf{c}_i:\mathbf{I}_j:t_{dex}$ – желаемое время начала проведения ТО, которое следует за звеном $\mathbf{c}_i:\mathbf{I}_j$ – время начала обслуживания, при выполнении которого все обслуживания внутри цепочки отстоят один от другого на одинаковые промежутки времени; $\mathbf{c}_i:\mathbf{I}_j:\mathbf{k}$ – кортеж, называемый «кандидат» и описывающий ресурсы, используемые для проведения обслуживания, соответствующего звену; $\mathbf{c}_i:\mathbf{I}_j:\mathbf{k}:t_b$ – время начала обслуживания для кандидата $\mathbf{c}_i:\mathbf{I}_j:\mathbf{k}$; $N_{\Sigma r}$ – сумма необходи-

мых количеств обслуживаний внутри всех рассматриваемых цепочек.

2. Как сумма квадратов интервалов времени между обслуживаниями

$$R_R = \frac{\sum_{i=1}^{N_c} \sum_{j=1}^{c_i:N_r-1} z_{ij}^2}{N_{\Sigma r} + N_c - 1} \rightarrow \min, \quad (2)$$

где

$$z_{ij} = \begin{cases} \mathbf{c}_i:\mathbf{I}_1:\mathbf{k}:t_b - \mathbf{c}_i:t_b, & \text{если } j=1; \\ \mathbf{c}_i:\mathbf{I}_j:\mathbf{k}:t_b - (\mathbf{c}_i:\mathbf{I}_{j-1}:\mathbf{k}:t + \mathbf{r}:D), & \text{если } j=2\dots c_i:N_r; \\ \mathbf{c}_i:t_e - (\mathbf{c}_i:\mathbf{I}_{c_i:N_r}:\mathbf{k}:t_b + \mathbf{r}:D), & \text{если } j=c_i:N_r+1; \end{cases}$$

\mathbf{r} – кортеж, называемый «ремонт» и описывающий ТО; $\mathbf{r}:D$ – продолжительность обслуживания; $\mathbf{c}:t_b$ – момент выхода ТС из депо; $\mathbf{c}:t_e$ – момент захода ТС в депо.

Использование критериев (1) и (2) предполагает, что для каждого из кандидатов и каждого звена выполняются ограничения на выбор места проведения ТО и периодичность его проведения:

$$z_{ij} \leq \mathbf{r}:P; \quad i=1\dots N_c; \quad j=1\dots c_i:N_r, \quad (3)$$

где $\mathbf{r}:P$ – допустимый интервал времени между двумя обслуживаниями.

В противном случае значение критерия R_R назначается равным «функции штрафа», значение которой существенно превышающее

$\mathbf{r}:P \times N_{\Sigma r}$, где $N_{\Sigma r} = \sum_{i=1}^{N_c} \mathbf{c}_i:N_r$ – сумма необходимых количеств обслуживаний внутри всех рассматриваемых цепочек.

Необходимым условием построения плана ТО является превышение количества кандидатов N_k над суммой необходимых количеств обслуживаний внутри всех рассматриваемых цепочек $N_{\Sigma r}$ или равенство этих величин:

$$N_k \geq N_{\Sigma r}. \quad (4)$$

При невыполнении необходимого условия построения плана ТО (4), а это и есть ситуация наличия ограниченных ресурсов для реализации требований проведения ТО ЭПС, в качестве критерия выбора варианта реализации плана ТО R_E может быть принято суммарное превышение времени между ремонтами над $\mathbf{r}:P$:

$$R_E = \frac{\sum_{i=1}^{N_c} \sum_{j=1}^{c_i:N_r-1} \begin{cases} z_{ij} - \mathbf{r}:P, & \text{если } z_{ij} > \mathbf{r}:P \\ 0, & \text{если } z_{ij} \leq \mathbf{r}:P \end{cases}}{\sum_{i=1}^{N_c} \mathbf{c}_i:N_r + N_c - 1}, \quad (5)$$

где $\mathbf{c}_i:N_{rr}$ – реализованное количество обслуживаний внутри цепочки.

Значение критерия (5) не отражает того факта, что превышение времени между ремонтами над допустимым интервалом времени между двумя обслуживаниями $r:P$ может распределяться по-разному при одинаковой общей продолжительности. Если значимым является разделение этого времени на непродолжительные интервалы, то имеет смысл рассматривать квадратичный критерий:

$$R_E = \frac{\sum_{i=1}^{N_c} \sum_{j=1}^{N_{rr}-1} \begin{cases} (z_{ij} - r:P)^2, & \text{если } z_{ij} > r:P \\ 0, & \text{если } z_{ij} \leq r:P \end{cases}}{\sum_{i=1}^{N_c} \mathbf{c}_i:N_{rr} + N_c - 1}. \quad (6)$$

Введение нового критерия выбора рационального плана ТО предполагает модификацию синтезированных ранее алгоритмов [1, 6]

В [1] разработан рекурсивный алгоритм, который решает задачу методом полного перебора. Выбор из полученного множества назначений оптимального по критерию (1) выполняется на базе аппарата дискретного варианта динамического программирования Беллмана [7]. В результате выполнения этого алгоритма получается ориентированный граф вариантов плана ТО. Успешно построенному варианту плана ТО в графе соответствует путь от истока до одного из стоков длиной $N_{\Sigma r}$.

При использовании критерии (5) или (6) условие, накладываемое на длину пути от истока до одного из стоков для успешно построенного варианта плана ТО, перестает быть обязательным. Если реализованное количество обслуживаний внутри цепочки меньше необходимого, то есть

$$\mathbf{c}_i:N_{rr} < \mathbf{c}_i:N_r, \quad ,$$

то в пути, соответствующем успешно построенному варианту плана ТО, на некоторых уровнях могут отсутствовать вершины и длина пути будет меньше $N_{\Sigma r}$.

Одновременно на каждом из уровней графа может увеличиться число вершин, так как использование критериев (5) или (6) предполагает, что для каждого из задействованных в плане кандидатов и для каждого звена выполняются ограничение на выбор места проведения ТО, однако требование на периодичность проведения ТО (3) перестает быть обязательным, что расширяет множество рассматриваемых вариантов назначений.

В [6] описано решение поставленной задачи посредством генетического алгоритма. Изменение фитнес-функции (критерия выбора рационального решения [5]) требует изменения множества аллелей (одно из альтернативных состояний гена – атомарного элемента хромосомы, которая является упорядоченной последовательностью генов):

– если необходимое условие построения плана ТО (4) выполняется и фитнес-функция в виде (1) или (2) отражает равномерность размещения ТО, то в качестве множества аллелей выступает множество кандидатов, доступных для исполнения ТО;

– если необходимое условие построения плана ТО (4) не выполняется и фитнес-функция (5) или (6) отражает превышение времени между ремонтами над допустимым интервалом времени между двумя обслуживаниями $r:P$, то в качестве множества аллелей выступает расширенное множество кандидатов, мощность которого доведена до суммы необходимых количеств обслуживаний внутри всех рассматриваемых цепочек $N_{\Sigma r}$ путем включения в состав множества «мнимых» ремонтов в количестве $N_{\Sigma r} - N_k$. Размещение «мнимого» осмотр со следующим, то есть уменьшению количества звеньев в составе цепочки на единицу.

В ходе исследований была разработана система поддержки принятия решения (СППР), позволяющая выполнять численное решение оптимизационных задач генетическими алгоритмами.

Список литературы

1. Сидоренко В.Г., Филипченко К.М. Метод эффективного планирования обслуживания с применением теории графов // Информатизация образования и науки. 2015. Т. 4. № 28.
2. Ho T.K., Tsang C.W., Ip K.H., Kwan K.S. Train service timetabling in railway open markets by particle swarm optimisation // Expert System Applications. 2012. V. 39.
3. Zhang W. Study on internet of things application for highspeed train maintenance, repair and operation (MRO) // Proceedings of the 2012 National Conference on Information Technology and Computer Science (CITCS 2012). 2012. № 8.
4. <http://www.railway-technical.com/train-maint.shtml>
5. Рутковская Д., Пилинский М., Рутковский Л. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы. М.: Горячая линия-Телеком, 2008.

6. Сидоренко В.Г., Филипченко К.М., Чжо М.А. Влияние ночной расстановки составов на режим работы электроподвижного состава метрополитена // Электротехника. 2016. № 9.

7. Белман Р. Динамическое программирование. Л.: «Иностранная литература», 1960.

Сидоренко Валентина Геннадьевна – профессор кафедры «Управление и защита информации» ФГБОУ ВО «Российский университет транспорта (МИИТ)» (МИИТ) и профессор кафедры «Моделирование и оптимизация бизнес-процессов» Национального исследовательского университета «Высшая школа экономики» (НИУ ВШЭ), доктор техн. наук, профессор. Окончила факультет «Железнодорожная автоматика, телемеханика и связь» Московского института инженеров транспорта (МИИТ) в 1994 г. Защищила диссертацию по теме «Методологическое и алгоритмическое обеспечение автоматизации управления движением поездов метрополитена» в 2004 г.

Чжо Мин Аунг – аспирант кафедры «Управление и защита информации» МИИТ. Окончил МИИТ по специальности «Управление и информатика в технических системах» в 2014 г.

Алексеев Виктор Михайлович – профессор кафедры «Управление и защита информации» МИИТ, док-

тор техн. наук, профессор. Окончил Омский институт инженеров железнодорожного транспорта по специальности «Автоматика, телемеханика и связь» в 1976 г. Защитил диссертацию по теме «Теория и методы самоорганизации в системах технической диагностики» в 1999 г.

Розенберг Ефим Наумович – первый заместитель генерального директора ОАО «НИИАС» (г. Москва), доктор техн. наук, доцент. Окончил МИИТ в 1974 г. Защитил диссертацию по теме «Многоуровневая система управления и обеспечения безопасности движения поездов» в 2004 г.

Уманский Владимир Ильич – заместитель генерального директора ОАО «НИИАС», доктор техн. наук, старший научный сотрудник. Окончил Московский авиационный институт им. С. Орджоникидзе по специальности «Системы управления летательных аппаратов» в 1977 г. и Российскую экономическую академию им. Г.В. Плеханова по специальности «Экономика» в 2001 г. Защитил диссертацию по теме «Автоматизация управления технологическими процессами железнодорожного транспорта на базе интеграции методов высокоточного спутникового позиционирования и инерциальной навигации» в 2012 г.

Метод исследования электротехнических систем с периодически изменяющимися параметрами

ГОРЕЛИК А.В., ГОРЕЛИК В.Ю., АПАТЦЕВ В.И., БАТУРИН А.П., КОБЗЕВ В.А., ЖУРАВЛЕВ И.А.

Предлагается метод исследования устойчивости импульсной переходной функции электротехнических систем с периодически изменяющимися во времени параметрами. Метод использует аппарат преобразования Лапласа и определителей Хилла, носит общий характер и предполагает минимальные ограничения на вид дифференциального уравнения. Получены выражения для характеристического уравнения импульсной переходной характеристики. Дан пример расчета для дифференциального уравнения второго порядка.

Ключевые слова: системы управления, параметрические усилители, переменные параметры, определители Хилла, переходные процессы.

Интерес к разработке методов анализа и синтеза периодически нестационарных систем не уменьшается на протяжении нескольких десятилетий, что связано с актуальностью задачи, а также с большими трудностями, возникающими при исследовании подобных систем.

В электротехнике, радиотехнике и связи используются устройства, основанные на использовании параметрического резонанса и других свойств электрических цепей с переменными параметрами. Это объясняется тем,

The research method of the impulse response function stability of electrical systems with periodically time-varying parameters. The method uses the Laplace transformation and the Hill's determinants and involves the minimum restriction on the form of the differential equation. Expressions for the characteristic equation of the impulse response function are received. The example of calculation for the differential equation of the 2nd order is given.

Key words: control systems, parametric amplifiers, variables, determinants of the hill, transients.

что такие основные преобразования, как генерирование высокочастотных колебаний, модуляция, детектирование, преобразование частоты и многие другие процессы можно выполнить лишь с помощью нелинейных систем, либо линейных систем с переменными параметрами [1–3].

Например, синхронная электрическая машина представляет собой одну из наиболее распространенных в технике систем, содержащих периодически изменяющиеся параметры.