

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ПРОИЗВОДСТВА

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ПРОИЗВОДСТВА

№2 (24) декабрь 2021 г.

Международный научно-технический журнал

Учредитель: ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный
технический университет им. Г.И. Носова»

О журнале

Журнал «Автоматизированные технологии и производства» основан в 2012 году на базе сборника «Автоматизация технологических и производственных процессов в металлургии», который издавался кафедрой промышленной кибернетики и систем управления (с 2013 кафедра автоматизированных систем управления - АСУ) с 2004 по 2012 год. В журнале публикуются научные статьи, посвященные автоматизированным системам в промышленности, управлению технологическими процессами и производствами, практическому применению современных методов управления. Освещаются вопросы, связанные с моделированием систем управления, разработкой промышленных тренажеров и стендов для проведения научных исследований и испытаний. Приоритетным направлением журнала является освящение результатов работ в области управления процессами черной металлургии, а также решения задач энерго- и ресурсосбережения с использованием оптимизирующих алгоритмов управления. Журнал предназначен для специалистов в области автоматизации технологических процессов, для работников производственных предприятий, эксплуатирующих системы автоматики, проектных институтов и вузов, специализирующихся в области информационных технологий.

Основные направления журнала: Автоматизированные системы управления; обработка данных, информационное и программное обеспечение автоматизированных систем управления; автоматизированные технологии в образовании; математическое моделирование технологических систем и объектов управления; автоматизация контроля и испытаний; математические модели процессов в металлургии.

Редакция и редакционный совет

Редакционный совет

Председатель редакционного совета:

Лисиенко Владимир Георгиевич - Вице-президент Академии инженерных наук, президент регионального Уральского отделения Академии инженерных наук, доктор технических наук, профессор ФГАОУ ВО Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Россия

Заместитель председателя редакционного совета:

Парсункин Борис Николаевич - доктор технических наук, профессор ФБГОУ ВО Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия

Члены редакционного совета:

Сарваров Анвар Сабулханович - доктор технических наук, профессор (МГТУ им. Г.И. Носова)

Радионов Андрей Александрович - доктор технических наук, профессор (ЮУрГУ)

Карандаев Александр Сергеевич - доктор технических наук, профессор (МГТУ им. Г.И. Носова)

Логунова Оксана Сергеевна - доктор технических наук, профессор (МГТУ им. Г.И. Носова)

Спирин Николай Александрович - доктор технических наук, профессор (УрФУ)

Дмитриенко Валерий Дмитриевич - доктор технических наук, профессор (НТУ «Харьковский политехнический институт»)

Ишметьев Евгений Николаевич - доктор технических наук (ЗАО «КонсОМ СКС»)

Редакция

Председатель редакционной коллегии

Парсункин Борис Николаевич – доктор технических наук, профессор

Главный редактор:

Андреев Сергей Михайлович – доктор технических наук, доцент

Контакты

Главный редактор: Андреев Сергей Михайлович
Тел.: (3519) 29-85-27
Редакционная коллегия: Парсункин Борис Николаевич
Тел.: (3519) 29-84-32
E-mail: atp@magtu.ru

Адрес редакции: 455000, г. Магнитогорск,
пр. Ленина, 38.
E-mail: atp@magtu.ru

Выходит в свет 12.2021.

СОДЕРЖАНИЕ

Системы автоматизированного проектирования	
<i>А.В. Варганова, А.С. Ирихов</i> САПР расчета и анализа технико-экономических показателей элементов системы электроснабжения с источниками малой генерации	4
Технические средства автоматизации	
<i>В.Д. Павлов</i> Накопитель энергии транспортно-технологической машины с возможностью автоматического управления	7
Математическое моделирование технологических систем и объектов управления	
<i>В.Д. Павлов</i> Математическая модель высокоточного метода холостого хода определения рассеяния обмоток трансформатора по отдельности	11
<i>А.С. Прасолов, С.М. Андреев, В.В. Стебелева</i> Математическая модель последовательного режима работы блока воздухонагревателей доменной печи	14
<i>И.П. Попов</i> Математическое моделирование двухзвенного транспортно-го средства в момент трогания / И.П. Попов // Автоматизированные технологии и производства	18

CONTENTS

CAD/CAM/CAE systems	
<i>A.V. Varganova, A.S. Irikhov</i> CAD calculation and analysis of technical and economic indicators of Smart Grid elements	4
Automation equipment	
<i>V.D. Pavlov</i> Energy storage transportation machine with automatic control possibility	7
Mathematic and simulation of control systems and objects	
<i>V.D. Pavlov</i> Mathematical model of a high-precision idle method for determining the scattering of transformer windings separately	11
<i>A.S. Prasolov, S.M. Andreev, V.V. Stebeleva</i> Mathematical model of the sequential operation mode of hot blast stoves unit	14
<i>I.P. Popov</i> Mathematical modeling of a two-link vehicle at the moment of running	18

ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ СТАТЕЙ

Оформление

Научные статьи, направляемые для публикации в журнал, **должны содержать**: название статьи; - сведения об авторах (Фамилия, Инициалы; место работы, город, страна; электронный адрес), количество авторов - не более 5; аннотацию в объеме от 100 до 250 слов; перечень ключевых слов или фраз в объеме не более 7; список литературы, не менее 8 ссылок. В случае представления статьи на русском языке указанные выше пункты должны быть представлены также и в англоязычном варианте. Если в оригинале статья написана на английском языке, то дополнительно эти сведения рекомендуется привести на русском языке.

Статью следует набирать в шаблоне, представленном на информационной странице портала ФГБОУ ВО "МГТУ" www.magtu.ru (раздел "Автоматизированные технологии и производства").

Рекомендуемая структура статьи: УДК. Аффiliation (фамилии авторов и место их работы). Название статьи. Аннотация. Ключевые слова. Введение. Методы исследования. ... Результаты. Заключение. Источник финансирования (при необходимости). Список литературы. Информация на английском (аффiliation, аннотация, ключевые слова, список литературы).

При оформлении статьи рекомендуется придерживаться следующих правил:

Объем рукописи статьи, оформленный в соответствии с приведенными требованиями, не должен превышать: обзорной статьи более 10 страниц; статьи более 6 страниц; краткого сообщения более 2 страниц.

Самоцитирование: не рекомендуется более 25% от общего числа ссылок.

Размерности величин выбираются и обозначаются согласно ГОСТ 8.417-2002.

В сопровождение рукописи статьи авторами должны быть направлены на официальный адрес электронной почты редакции журнала, следующие документы: **экспертное заключение** о возможности опубликования в открытой печати (цветной скан в формате PDF). Работы, выполненные авторами в инициативном порядке, представления экспертного заключения не требуют; **сведения об авторах** (Фамилия Имя и Отчество полностью, ученая степень и ученое звание, место работы, город, страна, электронный адрес) с указанием одного из авторов, который будет взаимодействовать с редакцией.

Пример оформления

УДК 681.5.015.32

ДОСТОВЕРНОЕ И ОПЕРАТИВНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ УПРАВЛЯЕМОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ПРИ ИНТЕНСИВНЫХ ВОЗМУЩЕНИЯХ

Б.Н. Парсункин¹, Т.Г. Сухоногова²

^{1,2}ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия

²tgobuhova@gmail.com

Аннотация. В работе рассмотрена математическая модель программной реализации достоверного и оперативного метода определения значений динамических параметров управляемого технологического процесса для определения динамических параметров настройки микропроцессорных контуров управления в условиях интенсивного негативного воздействия технологических и организационных возмущений, характерных для реального производства. Эффективное решение поставленной задачи обеспечивается использованием уникальных свойств ортогональных функций Уолша, позволяющих формирование таких планов тестирующих воздействий, которые полностью компенсируют негативное влияние возмущающих воздействий на интегральную оценку отклика (реакцию) управляемого параметра на тестирующее входное воздействие. Использование предлагаемого метода особенно целесообразно при решении многих практических задач, когда необходимо получать достоверные результаты в условиях действия различных возмущающих факторов влияющих на точность определяемого параметра.

Ключевые слова: динамические параметры объекта управления, определение параметров объекта, функция Уолша, компенсация возмущений, тестирующие воздействия, интегральная оценка.

Введение

При адаптации современного микропроцессорного регулирующего комплекса (МРК) к управляемому технологическому процессу приоритетной задачей является оперативное и достоверное определение динамических параметров объектов управления: коэффициента передачи объекта $K_{об}$, постоянной

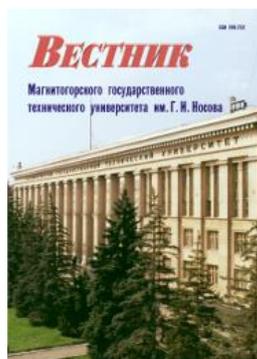
Например, кривые разгона по температуре поверхности нагреваемой заготовки в первой сварочной зоне методической печи №1 стана 2500 ОАО «ММК» (до реконструкции) при различных величинах расхода природного газа во второй сварочной зоне представлены на рис. 1 [2]. Динамические параметры, полученные при обработке экспериментальных кривых разгона на рис. 1 представлены в табл. 1. В зависимости от условий работы

Предоставление материалов

Для опубликования статьи в журнале необходимо представить в электронном виде по e-mail: atp@magtu.ru текст статьи, сведения об авторах и экспертное заключение о возможности опубликования.

За достоверность научно-технической информации ответственность несет автор. Перепечатка материалов возможна только с письменного разрешения редакции. При перепечатке ссылка на «Автоматизированные технологии и производства» обязательна.

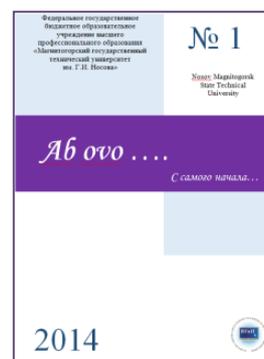
Другие рекомендуемые периодические издания



Вестник магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова



Электротехнические системы и комплексы



Журнал молодых исследователей: магистров и аспирантов



Математическое и программное обеспечение систем в промышленной и социальной сферах

УДК 621.3

**САПР РАСЧЕТА И АНАЛИЗА ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ
ЭЛЕМЕНТОВ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ С ИСТОЧНИКАМИ МАЛОЙ
ГЕНЕРАЦИИ**

А.В. Варганова, А.С. Ирихов

ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова»

aleksandra-khlamova@yandex.ru

Аннотация. Темпы ввода в эксплуатацию новых объектов энергетики и реновации, существенно ускоряются год от года. Как правило, при проектировании не решаются вопросы выбора наилучшего варианта объекта электроэнергетики, так как такие расчеты требуют больших временных затрат и большого числа исходных данных. Проектирование электроустановок осуществляется на основании нормативных документов и технических условий заказчика. С целью выбора наилучшего варианта проектируемого объекта, опираясь на нормы и правила проектирования, широко применяются системы автоматизированного проектирования. В данной работе приведена САПР расчета и анализа технико-экономических показателей систем электроснабжения с источниками малой генерации. На основании типа, мощности, местоположения нагрузок и возможных мощностей, точек установки генераторов САПР оценивает затраты на строительство, срок окупаемости и надежность электроснабжения в зависимости от принятой схемы электроснабжения.

Ключевые слова: САПР, система электроснабжения, надежность электроснабжения, подстанция, распределенная генерация.

ВВЕДЕНИЕ

Темпы строительства городских и промышленных объектов приводят к необходимости увеличения мощностей, что в настоящее время, обеспечивается за счет ввода в эксплуатацию источников малой генерации.

На этапе проектирования все больше и больше встает вопрос поиска оптимальной схемы электроснабжения, отвечающей минимуму затрат на передачу мощности, строительство и максимуму надежности.

Особое внимание в данных вопросах уделено автономным энергорайонам [1], в которых вопросы надежности встают на первый план. Кроме того, рассматриваются вопросы технико-экономического обоснования отдельных элементов системы электроснабжения: линий электропередачи [2], трансформаторных подстанций [3].

Отдельно проводятся научные исследования в части строительства различных источников мощности, от традиционных [4-5], до возобновляемых [6]. Рассматриваются вопросы экономического обоснования установки источников электроэнергии и их мощности.

Важным этапом технико-экономических расчетов является оценка надежности, как отдельных элементов, так и всей системы электроснабжения в целом [7-9].

В данной работе рассматривается САПР [10] оценки технико-экономических показателей систем электроснабжения с источниками распределенной генерации с целью поиска наилучшей конфигурации схемы сети, обеспечивающей максимум надежности от перерыва электроснабжения и минимум затрат на строительство и эксплуатацию системы электроснабжения.

САПР ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ РАСЧЕТОВ

САПР ориентирована на расчет стоимости строительство системы электроснабжения в целом или отдельных ее частей. Критерием оптимизации является минимум затрат на строительство сети, передачу мощности в сети и ущерб от перерыва электроснабжения

$$\min (3) = \min (\beta \cdot P + C_{\Delta W} + \alpha \cdot Y), \quad (1)$$

где β – тариф на электроэнергию от конкретного поставщика, руб./кВт·ч; P – необходимая потребителю мощность, или мощность от внешнего источника, кВт; $C_{\Delta W}$ – стоимость потерь электроэнергии в системе электроснабжения, руб.; Y – экономический ущерб от перерыва электроснабжения, руб.; α – коэффициент надежности генераторов.

При расчетах учитываются ограничения

$$\begin{cases} \sum P_{\text{ист}} + \sum P_{G_N} = P_{\text{нагрузки}} + \Delta P_{\text{СЭС}}, \\ U_{i\text{min}} \leq U_i \leq U_{i\text{max}}, \\ S_{i\text{min}} \leq S_i \leq S_{i\text{max}}. \end{cases} \quad (1)$$

где $\sum P_{\text{ист}}$ – суммарная мощность источников распределенной генерации, кВт; $P_{\text{нагрузки}}$ – нагрузка системы электроснабжения с распределенной генерацией, кВт; $\Delta P_{\text{СЭС}}$ – потери активной мощности в системе электроснабжения с учетом мощности, принимаемой от внешнего источника, кВт; $\sum P_{G_N}$ – активная мощность, вырабатываемая собственными источниками системы

электрообеспечения, кВт; $U_{i \min}$, $U_{i \max}$ – предельно допустимые потери напряжения в узле ($\pm 10\%$ от номинального значения), кВ; $S_{i \min}$, $S_{i \max}$ – минимально и максимально допустимое значение мощности, протекающей по элементам электрической сети, определяется нагрузочной способностью, кВА.

Алгоритм расчета реализован в оригинальном программном продукте «ТЭР САД» [10]. Одна из вкладок программного продукта приведена на рис. 1.

После ввода основных данных об оборудовании САПР, например, позволяет оценить стоимость строительства внешних источников электроэнергии (главные понизительные подстанции). На рис. 2 приведен пример вывода результатов, полученных с использованием «ТЭР САД».

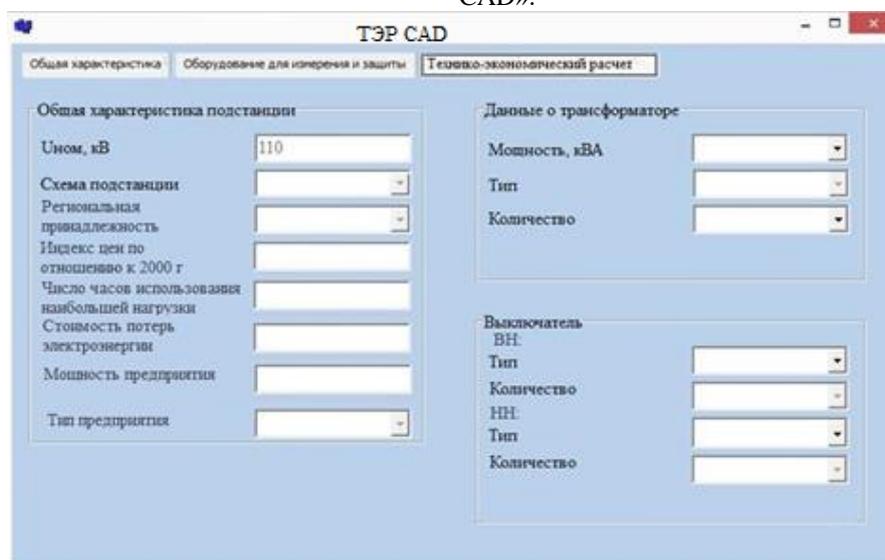


Рис. 1. Вкладка «Технико-экономический расчет»

Составляющие затрат	Величина затрат, тыс. руб.	
	Вариант 1	Вариант 2
Стоимость силовых трансформаторов	29400	
Стоимость ячеек 220 кВ	100000	112500
Стоимость ячеек 10 кВ	3230	
Стоимость оборудования ПС	132630	145130
Противоаварийная автоматика	1200	
Постоянная часть затрат	52000	
Капитальные вложения в оборудование ПС	185830	198330
Стоимость строительства ПС с учетом сопутствующих затрат	224854,3	239979,3
Стоимость постоянного отвода земельного участка (ОРУ и ЗРУ)	532000	596000
Капитальные вложения на строительство ПС	756854,3	835979,3
С учетом коэффициента инфляции на 2019 г.	4010949	4430272
Издержки на обслуживание и ремонт	15385,08	16835,408
Издержки на потерю электроэнергии	4288,286	
Эксплуатационные издержки	19673,37	21123,37
Годовая продолжительность аварийных отключений, ч	20,8	12,1
Ущерб от нарушения электрообеспечения	101004	59073
Приведенные народнохозяйственные затраты	601991,5	611829
Экономически-целесообразный вариант	схема с двумя рабочими система шин	

Рис. 2. Пример вывода результатов технико-экономических расчетов

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанная САПР позволяет оценивать технико-экономические показатели стоимости строительства как отдельных элементов, так и всей системы электрообеспечения. САПР обеспечивает возможность технико-экономического сопоставления вариантов схем различных конфигураций, определять наилучшие точки подключения к внешней сети, место расположения источников малой генерации.

Важным является учет надежности при оценке наилучшего варианта электрообеспечения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Соснина Е.Н., Шалухо А.В. Технико-экономический анализ применения ветро-дизельных электростанций для электрообеспечения энергоудаленных поселений // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2016. № 1. С. 65-72.
2. Геркусов А.А., Макаров В.М. Технико-экономическое обоснование выбора параметров и режимов работы проектируемых линий электропередачи // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. 2016. № 2. С. 66-73.
3. Бурлов Ю.А. Технико-экономическое обоснование применения комплектных трансформаторных подстанций

6 – 220 кВ // Международная научно-техническая конференция студентов и аспирантов. 2017. № 23. С. 341.

4. Гусаков В.В., Бастин Е.А., Яковкин Т.Н. Технико-экономическое сравнение вариантов строительства КЭС мощностью 1200 МВт // Труды Братского государственного университета. 2017. № 1. С. 19-24.

5. Фурсова Т.Н. Автоматизация определения и анализа технико-экономических показателей энергоблоков // Машинооборудование: сборник научных работ. 2012. № 9. С. 233-244.

6. Сарсикеев Е.Ж., Шолохова И.И. Технико-экономическая оценка проектов электроснабжения в автономных системах на базе возобновляемых источников энергии // Международный научно-исследовательский журнал. 2017. № 3-4. С. 85-90.

7. Gong Jianping, Wu Guopei and Luo Zhenhai, "Power supply reliability analysis and improvement measures of re-

gional power grid," 2008 China International Conference on Electricity Distribution, Guangzhou, 2008, pp. 1-7.

8. M. Yuan, Y. Liu, R. Liu and X. Niu, "Monitoring and Analysis of Power Supply Reliability of Low Voltage Consumers," 2006 International Conference on Power System Technology, Chongqing, 2006, pp. 1-4.

9. T. Wei, Z. Zhen, L. Wei and G. Yuan, "Research on the Prediction Optimization of Power Outage Duration of 10Kv Distribution Network Based on the Reliability Data of Power Supply Analysis," 2018 China International Conference on Electricity Distribution (CICED), Tianjin, 2018, pp. 496-503.

10. А.с. 2021668699 Российская Федерация, ТЭР CAD / Варганова А.В., Ирихов А.С.; заявитель ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова». № 2021668002; заявл. 15.11.2021; опубл. 19.11.21.

CAD CALCULATION AND ANALYSIS OF TECHNICAL AND ECONOMIC INDICATORS OF SMART GRID ELEMENTS

A.V. Varganova, A.S. Irikhov

Nosov Magnitogorsk State Technical University

Abstract. The pace of commissioning of new energy facilities and renovation of existing ones is accelerating from year to year. As a rule, when designing, the issues of choosing the best option for an electric power facility are not solved, since such calculations are time consuming and require a large amount of input data. The design of electrical installations is carried out on the basis of regulatory documents and technical specifications of the customer. In order to select the best option for the designed object, based on the design norms and rules, computer-aided design systems are widely used. This work provides a CAD calculation and analysis of the technical and economic indicators of power supply systems with small generation sources. Based on the type, capacity, location of loads and possible capacities, installation points of generators, CAD estimates the construction costs, payback period and reliability of power supply, depending on the adopted power supply scheme.

Keywords: CAD, power supply system, power supply reliability, substation, distributed generation.

REFERENCES

1. Sosnina E.N., Shalukho A.V. [Technical and economic analysis of the use of wind-diesel power plants for power supply of power-distant settlements] *Trudy NGTU im. R.E. Alekseeva* [Proceedings of NSTU im. R.E. Alekseeva.], 2016, no. 1, pp. 65-72. (In Russian)

2. Gerkusov A.A., Makarov V.M. [Feasibility study of the choice of parameters and operating modes of the projected power lines] *Vestnik Ivanovskogo gosudarstvennogo energeticheskogo* [Bulletin of the Ivanovo State Power Engineering University], 2016, no. 2, pp. 66-73. (In Russian)

3. Burlov Yu.A. [feasibility study for the use of complete transformer substations 6 - 220 kV] *Mezhdunarodnaya nauchno-tekhnicheskaya konferenciya studentov i aspirantov* [International Scientific and Technical Conference of Students and Postgraduates], 2017, no. 23, pp. 341. (In Russian)

4. Gusakov V.V., Bastin E.A., Yakovkin T.N. [technical and economic comparison of options for the construction of IES with a capacity of 1200 MW] *Trudy Bratskogo gosudarstvennogo universiteta* [Proceedings of the Bratsk State University], 2017, no. 1, pp. 19-24. (In Russian)

5. Fursova T.N. [Automation of determination and analysis of technical and economic indicators of power units] *Mashi-*

nooborudovanie: sbornik nauchnyh rabot [Machine equipment: collection of scientific papers], 2012, no. 9, pp. 233-244. (In Russian)

6. Sarsikeev E.Zh., Sholokhova I.I. [Technical and economic assessment of power supply projects in autonomous systems based on renewable energy sources] *Mezhdunarodnyj nauchno-issledovatel'skij zhurnal* [International research journal], 2017, no. 3-4, pp. 85-90. (In Russian)

7. Gong Jianping, Wu Guopei and Luo Zhenhai, "Power supply reliability analysis and improvement measures of regional power grid," 2008 China International Conference on Electricity Distribution, Guangzhou, 2008, pp. 1-7.

8. M. Yuan, Y. Liu, R. Liu and X. Niu, "Monitoring and Analysis of Power Supply Reliability of Low Voltage Consumers," 2006 International Conference on Power System Technology, Chongqing, 2006, pp. 1-4.

9. T. Wei, Z. Zhen, L. Wei and G. Yuan, "Research on the Prediction Optimization of Power Outage Duration of 10Kv Distribution Network Based on the Reliability Data of Power Supply Analysis," 2018 China International Conference on Electricity Distribution (CICED), Tianjin, 2018, pp. 496-503.

10. Varganova A.V., Irikhov A.S. *TER CAD* [TER CAD]. Software RF, no. 2021668699, 2021.

УДК 629.1.04

НАКОПИТЕЛЬ ЭНЕРГИИ ТРАНСПОРТНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ МАШИНЫ С
ВОЗМОЖНОСТЬЮ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

В.Д. Павлов

Владимирский электромеханический завод, Владимир, Россия

e-mail: pavlov.val.75@mail.ru

Аннотация. Рассматривается возможность оснащения транспортно-технологических машин инертно-емкостным накопителем энергии, что позволит сгладить нагрузку на силовую установку и за счет этого снизить ее мощность и массогабаритные характеристики. Наличие электромеханической трансмиссии у некоторых транспортно-технологических машин минимизирует разработку для них инертно-емкостного накопителя и создает возможность автоматического управления.

Ключевые слова: транспортно-технологическая машина, накопитель, супермаховик, силовая установка, энергоэффективность, искусственный конденсатор, заряд, разряд.

Нагрузка ряда транспортно-технологических машин, таких как бульдозеры, экскаваторы и др. имеет существенно неравномерный характер [1]. Мощность их силовой установки определяется пиковой нагрузкой. Очевидно, что при импульсной нагрузке силовая установка большую часть времени работает в недогруженном режиме [2].

Целью работы является разработка технического решения по компенсации пиковых нагрузок транспортно-технологических машин с возможностью автоматического управления.

Актуальность настоящего исследования обусловлена тем, что использование накопителя энергии позволит сгладить нагрузку на силовую установку и за счет этого снизить ее мощность и массогабариты. Относительно частая смена режима работы транспортно-технологической машины обуславливает эффективность и целесообразность оснащения ее накопителем энергии.

Рассматривается инертно-емкостной накопитель энергии, в качестве которого можно использовать машину постоянного тока (или вентильную) с супермаховиком.

Подача на якорную обмотку постоянного напряжения U инициирует следующие механический и электрический процессы:

$$\begin{cases} J \frac{d^2\varphi}{dt^2} + k \frac{d\varphi}{dt} = B2lw \frac{D}{2} i \\ B2lw \frac{D}{2} \frac{d\varphi}{dt} + Ri = U \end{cases},$$

где J – суммарный момент инерции; k – коэффициент трения; B – магнитная индукция [3]; $2l$ – активная длина проводника; w – количество витков; D – эффективный диаметр ротора; R – электрическое сопротивление.

Можно ввести параметрический коэффициент

$$BlwD = Y, \tag{1}$$

Пусть начальные условия

$$\varphi(0) = \varphi_0,$$

$$\frac{d\varphi}{dt}(0) = \omega_0. \tag{2}$$

Из уравнения электрического равновесия следует

$$\frac{d\varphi}{dt} = -\frac{R}{Y}i + \frac{U}{Y}, \tag{3}$$

$$\frac{d^2\varphi}{dt^2} = -\frac{R}{Y} \frac{di}{dt}.$$

Подстановка в первое уравнение системы дает

$$-\frac{JR}{Y} \frac{di}{dt} - \frac{kR}{Y}i + \frac{kU}{Y} = Yi,$$

$$\frac{di}{dt} + \left(\frac{Y^2}{JR} + \frac{k}{J} \right) i = \frac{kU}{JR}.$$

Пусть

$$\frac{Y^2}{JR} + \frac{k}{J} = A,$$

$$\frac{kU}{JR} = B.$$

Тогда

$$\frac{di}{dt} + Ai = B. \tag{4}$$

Общим решением является

$$i_1 = C_1 e^{-At}.$$

Частным –

$$i_2 = C_2.$$

Подстановка его в формулу (4) дает

$$0 + AC_2 = B,$$

$$C_2 = \frac{B}{A}.$$

Искомый ток равен

$$i = i_1 + i_2 = C_1 e^{-At} + \frac{B}{A}. \quad (5)$$

С учетом (2) и (3)

$$i(0) = \frac{U}{R} - \frac{Y\omega_0}{R}.$$

С учетом (5)

$$\begin{aligned} C_1 &= \frac{U}{R} - \frac{Y\omega_0}{R} - \frac{B}{A}, \\ i &= \left(\frac{U}{R} - \frac{Y\omega_0}{R} - \frac{B}{A} \right) e^{-At} + \frac{B}{A}, \\ i &= \left(\frac{U - Y\omega_0}{R} - \frac{U}{Y^2/k + R} \right) e^{-t/\tau} + \frac{U}{Y^2/k + R} = \\ &= \left(\frac{U - E_0}{R} - \frac{U}{R_k + R} \right) e^{-t/\tau} + \frac{U}{R_k + R}, \end{aligned} \quad (6)$$

где $E_0 = Y\omega_0$.

$$\begin{aligned} \frac{1}{\tau} &= \frac{1}{R} \frac{1}{J/Y^2} + \frac{1}{J/k} = \frac{1}{R} \frac{1}{J/Y^2} + \frac{1}{(J/Y^2)(Y^2/k)} = \\ &= \frac{1}{RC_J} + \frac{1}{R_k C_J} = \frac{1}{\tau_e} + \frac{1}{\tau_m}. \end{aligned} \quad (7)$$

При $k=0$ $R_k = \infty$ и

$$i = \frac{U - E_0}{R} e^{-t/\tau}, \quad (8)$$

$$\tau = \frac{RJ}{Y^2} = RC_J. \quad (9)$$

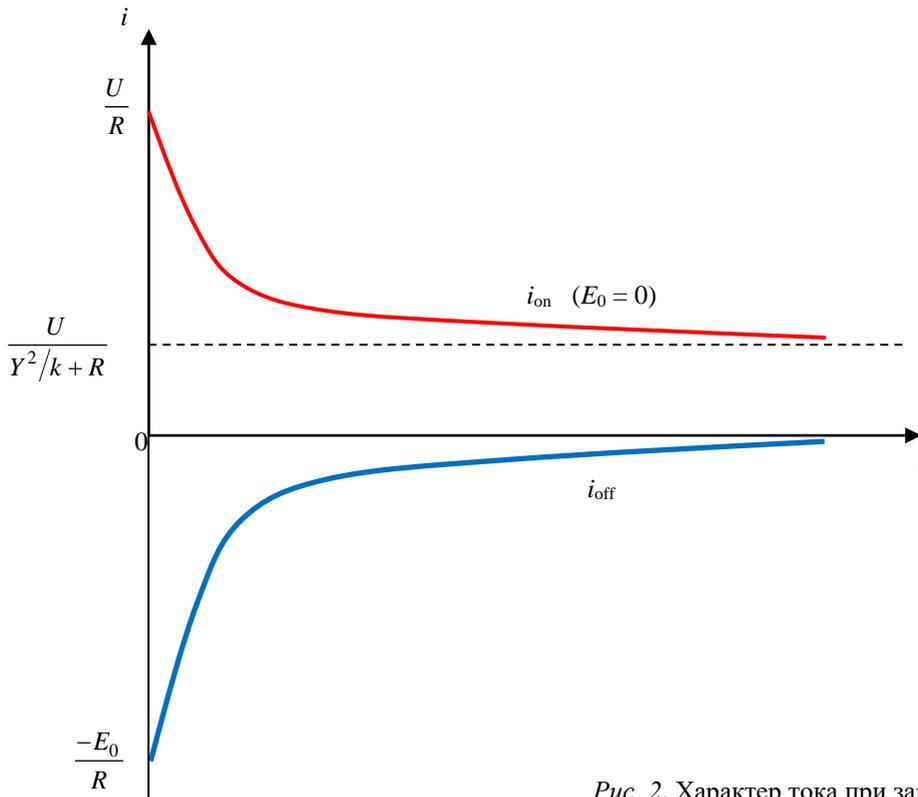


Рис. 2. Характер тока при зарядке и разрядке инертно-емкостного накопителя

Формулы (8) и (9) неотличимы от формул, описывающих заряд конденсатора.

При замыкании накоротко клемм якорной обмотки

$$i = \frac{-E_0}{R} e^{-t/\tau}.$$

Эта формула неотличима от формулы, описывающей разряд конденсатора.

Выражения (6) – (9) свидетельствуют о емкостном характере рассматриваемого накопителя мощности.

Искусственная электрическая емкость накопителя равна

$$C_J = \frac{J}{Y^2}.$$

Электромеханическое сопротивление

$$R_k = \frac{Y^2}{k}.$$

Запасаемая накопителем энергия равна

$$W = \frac{C_J U^2}{2} = \frac{JU^2}{2Y^2} = \frac{J\omega^2}{2}.$$

На рис. 1 изображена электрическая схема инертно-емкостного накопителя, на рис. 2 – характер тока при его зарядке и разрядке.

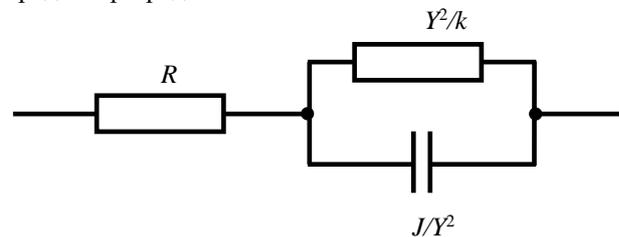


Рис. 1. Электрическая схема инертно-емкостного накопителя

В настоящее время созданы высокоэффективные супермаховики, и даже рассматривается возможность применение их на легковых автомобилях. Очевидно, что использование маховиков на транспортно-технологических машинах, таких как бульдозеры, экскаваторы и др. значительно менее проблематично в силу существенно менее жестких требований к общему весу.

Еще более выгодным преимуществом некоторых транспортно-технологических машин является наличие электромеханической трансмиссии [4, 5] (или возможности ее установки) [6], что минимизирует разработку для них рассмотренного инертно-емкостного накопителя (искусственной электрической емкости) и доставляет возможность автоматического управления [7] путем изменения параметров B и R .

ЛИТЕРАТУРА

1. Баловнев В.И., Данилов Р.Г., Рябикова И.М., Чэн Х. Определение оптимальных параметров транспортно-технологических машин методами теории подобных преобразований // Строительные и дорожные машины. 2019. № 12. С. 3–11.
2. Исаков В.С., Ерейский А.В., Кветкин А.А. Структурный анализ тормозных энергосберегающих систем

транспортно-технологических машин // Техника и технология транспорта. 2019. № 5 (13). С. 11.

3. Павлов В.Д. Магнитный поток и его квантование // Известия Уфимского научного центра РАН. 2020. № 4. С. 25–28. DOI 10.31040/2222-8349-2020-0-4-25-28

4. Сычев А.В., Шилияев С.А., Шаихов Р.Ф. Обоснование базовых параметров транспортно-технологических машин, оснащенных электроприводом // Евразийское Научное Объединение. 2019. № 12-1 (58). С. 69–72.

5. Носков В.И., Заковоротный А.Ю., Мезенцев Н.В., Гейко Г.В. Моделирование электромеханической системы моторного вагона с учетом диссипативных сил // Автоматизированные технологии и производства. 2016. № 3 (13). С. 23–28.

6. Пенчук В.А., Белицкий Д.Г. Модернизация транспортно-технологических машин в современных условиях // Ремонт. Восстановление. Модернизация. 2019. № 8. С. 20–23.

7. Заковоротный А.Ю. Интеллектуальная система поддержки принятия решений машинистом с возможностью автоведения поезда // Автоматизированные технологии и производства. 2015. № 3 (9). С. 40–45.

ENERGY STORAGE TRANSPORTATION MACHINE WITH AUTOMATIC CONTROL POSSIBILITY

V.D. Pavlov

Vladimir Electromechanical Plant, Vladimir, Russia

e-mail: pavlov.val.75@mail.ru

Abstract. The possibility of equipping transport and technological machines with an inert-capacitive energy storage is being considered, which will allow to smooth the load on the power plant and thereby reduce its power and weight and dimensions. The presence of an electromechanical transmission in some transport and technological machines minimizes the development of an inert-capacitive storage for them and creates the possibility of automatic control.

Keywords: transport and technological machine, storage, super flywheel, power plant, energy efficiency, artificial capacitor, charge, discharge.

REFERENCES

1. Balovnev V.I., Danilov R.G., Ryabikova I.M., Cheng H. Determination of the optimal parameters of transport and technological machines by methods of the theory of such transformations [Opredeleniye optimal'nykh parametrov transportno-tekhnologicheskikh mashin metodami teorii podobnykh preobrazovaniy]. *Stroitel'nyye i dorozhnyye mashiny* [Construction and road machines], 2019, no. 12, pp. 3–11. (in Russian)
2. Isakov V.S., Ereisky A.V., Kvetkin A.A. Structural analysis of brake energy-saving systems of transport and technological machines [Strukturnyy analiz tormoznykh energosberegayushchikh sistem transportno-tekhnologicheskikh

mashin]. *Tekhnika i tekhnologiya transporta* [Tekhnika i tekhnologiya transporta], 2019, no. 5 (13), pp. 11. (in Russian)

3. Pavlov V.D. Magnetic flux and its quantization [Magnitnyy potok i yego kvantovaniye]. *Izvestiya Ufimskogo nauchnogo tsentra RAN* [Bulletin of the Ufa Scientific Center of the Russian Academy of Sciences], 2020, no. 4, pp. 25–28. DOI 10.31040/2222-8349-2020-0-4-25-28 (in Russian)

4. Sychev A.V., Shilyaev S.A., Shaikhov R.F. Justification of the basic parameters of transport and technological machines equipped with an electric drive [Obosnovaniye bazovykh parametrov transportno-tekhnologicheskikh mashin, osnashchennykh elektroprivodom], *Yevraziyskoye Nauchnoye*

Ob'yedineniye [Eurasian Scientific Association], 2019, no. 12-1 (58), pp. 69–72. (in Russian)

5. Noskov V.I., Zakovorotny A.Yu., Mezentsev N.V., Geiko G.V. Modeling the electromechanical system of a motor car taking into account dissipative forces [Modelirovaniye elektromekhanicheskoy sistemy motornogo vagona s uchetom dissipativnykh sil]. *Avtomatizirovannyye tekhnologii i proizvodstva [Automated technologies and production]*, 2016, no. 3 (13), pp. 23–28. (in Russian)

6. Penchuk V.A., Belitsky D.G. Modernization of transport and technological machines in modern conditions [Modernizatsiya transportno-tekhnologicheskikh mashin v sovremen-

nykh usloviyakh]. *Remont. Vosstanovleniye. Modernizatsiya [Remont. Recovery. Modernization]*, 2019, no. 8, pp. 20–23. (in Russian)

7. A.Yu. Zakovorotny Intelligent decision support system for the driver with the ability to drive the train [Intelektual'naya sistema podderzhki prinyatiya resheniy mashinistom s vozmozhnost'yu avtovedeniya poyezda]. *Avtomatizirovannyye tekhnologii i proizvodstva [Automated technologies and production]*, 2015, no. 3 (9), pp. 40–45. (in Russian)

Павлов, В.Д. Накопитель энергии транспортно-технологической машины с возможностью автоматического управления / В.Д. Павлов // Автоматизированные технологии и производства. 2021. №2(24). С.7-10.

V.D. Pavlov Energy storage transportation machine with automatic control possibility. *Avtomatizirovannyye tekhnologii i proizvodstva [Automation of technologies and production]*, 2021, no.2(24), pp.7-10. (In Russian).

УДК 621.314.21.042.52

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ВЫСОКОТОЧНОГО МЕТОДА ХОЛОСТОГО ХОДА ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАССЕЙЯНИЯ ОБМОТОК ТРАНСФОРМАТОРА ПО ОТДЕЛЬНОСТИ

В.Д. Павлов

Владимирский электромеханический завод, Владимир, Россия

e-mail: pavlov.val.75@mail.ru

Аннотация. Цель исследования состоит в обосновании возможности экспериментального определения реактивных сопротивлений рассеяния для каждой обмотки трансформатора в отдельности, которые могут быть установлены высокоточным методом холостого хода.

Ключевые слова: трансформатор, обмотка, рассеяние, индуктивный, емкостной, потокосцепление, магнитный поток.

Суммарное реактивное сопротивление рассеяния трансформатора с концентрическими цилиндрическими обмотками равно

$$x = \frac{\omega \mu_0 \pi D w^2}{l} \left(\frac{a_1}{3} + a_0 + \frac{a_2}{3} \right), \quad (1)$$

где ω – циклическая частота тока, μ_0 – постоянная магнитная, D – средний диаметр обмотки, w – число витков (приведенное), l – высота обмотки, a_0 – зазор между катушками, a_1 , a_2 – толщины катушек.

Существующие методы не позволяют измерять реактивные сопротивления рассеяния для каждой обмотки в отдельности, поэтому часто для простоты полагают их равными половине от (1) [1–3].

В действительности, применительно к рассматриваемому случаю, они существенно не равны.

В самом деле, потокосцепление внешней обмотки равно

$$\Psi_2 = \frac{\mu_0 \pi D}{l} \left(\int_0^{a_1} w_2 i \frac{w_1}{a_1} x dx + \int_0^{a_0} w_2 i w_2 dx + \int_0^{a_2} \frac{w_2}{a_2} x \frac{w_2}{a_2} x dx \right) = \frac{i \mu_0 \pi D w^2}{l} \left(\frac{a_1}{2} + a_0 + \frac{a_2}{3} \right),$$

где i – приведенный ток, а $w_1 = w_2 = w$ (индексы показаны для наглядности интегрирования). Отсюда реактивное сопротивление рассеяния внешней обмотки равно

$$x_2 = \frac{\omega \mu_0 \pi D w^2}{l} \left(\frac{a_1}{2} + a_0 + \frac{a_2}{3} \right). \quad (2)$$

Вычитание его из (1) дает реактивное сопротивление рассеяния внутренней обмотки

$$x_1 = - \frac{\omega \mu_0 \pi D w^2}{l} \frac{a_1}{6}. \quad (3)$$

Этот результат получен Е.Г. Марквардтом [4]. Однако, он не получил признания из-за отсутствия экспериментальной проверки.

Знак «–» в выражении (3) указывает на два обстоятельства. Первое – внутренняя обмотка поглощает магнитный поток [5] в большей степени, чем рассеивает (рассеивает свой, поглощает от внешней обмотки). Второе – ее (эквивалентное) реактивное сопротивление рассеяния является емкостным.

Из (2) и (3) следует

$$L_2 = \frac{\mu_0 \pi D w^2}{l} \left(\frac{a_1}{2} + a_0 + \frac{a_2}{3} \right), \quad (4)$$

$$C_1 = \frac{6l}{\omega^2 \mu_0 \pi D w^2 a_1}. \quad (5)$$

Цель исследования состоит в обосновании возможности экспериментального определения реактивных сопротивлений рассеяния для каждой обмотки в отдельности и, в частности, верификации выражений (2)–(5).

Актуальность работы обусловлена повсеместным распространением трансформаторов [6, 7].

С экспериментальным определением активных сопротивлений R_1 и R_2 обмоток нет никаких проблем.

Реактивное сопротивление рассеяния любой обмотки можно определить из формулы

$$x = \sqrt{z^2 - r^2}.$$

Полное сопротивление z , казалось бы, можно определить в соответствии с законом Ома для участка цепи. Однако, при коротком замыкании, при котором принято измерять реактивное сопротивление рассеяния, напряжение на вторичной обмотке равно нулю. Это как раз та причина, которая не позволяет раздельно измерять рассеяния обмоток.

Вместе с тем, проблему можно решить высокоточным методом холостого хода

Из схемы замещения трансформатора (см. рисунок) следует, что приведенное напряжение на вторичной обмотке равно

$$\dot{U}'_2 = \dot{U}_0 = \dot{I}_0 \underline{z}_0.$$

Отсюда следует, что

$$\dot{U}'_{z1} = \dot{U}_1 - \dot{U}_0 = \dot{U}_1 - \dot{U}'_2 = \dot{I}_1 \underline{z}_1,$$

$$\underline{z}_1 = \frac{\dot{U}_1 - \dot{U}'_2}{\dot{I}_1}.$$

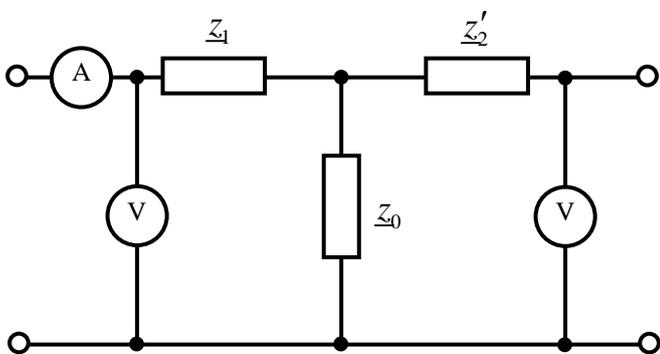


Схема замещения трансформатора

Из обратимости трансформатора следует

$$\underline{z}'_2 = \frac{{}^2\dot{U}'_2 - {}^2\dot{U}_1}{\dot{I}'_2}.$$

Здесь и далее верхний левый индекс «2» указывает, что величина получена во втором (обратимом) эксперименте.

Пример 1. Определить сопротивления рассеяния для трансформатора ОСМ-1,00. Измеренные с высокой точностью величины:

$$\dot{U}_1 = 219,138 \text{ В}; \dot{U}'_2 = 219,054e^{j0,23^\circ} \text{ В}; \dot{I}_1 = 0,819e^{-j80,12^\circ} \text{ А};$$

$${}^2\dot{U}'_2 = 218,825 \text{ В}; {}^2\dot{U}_1 = 218,343e^{j0,02^\circ} \text{ В};$$

$$\dot{I}'_2 = 0,817e^{-j80,32^\circ} \text{ А}.$$

В соответствии с полученными формулами

$$\underline{z}_1 = \frac{\dot{U}_1 - \dot{U}'_2}{\dot{I}_1} = \frac{219,138 - 219,054e^{j0,23^\circ}}{0,819e^{-j80,12^\circ}} = 1,075e^{-j4,33^\circ} \text{ (Ом)},$$

$$r_1 = 1,072 \text{ Ом},$$

$$x_1 = -0,081 \text{ Ом},$$

$$C_1 = -\frac{1}{2\pi f x_1} = \frac{1}{2\pi \cdot 50 \cdot 0,081} = 0,039 \text{ (Ф)},$$

$$\underline{z}'_2 = \frac{{}^2\dot{U}'_2 - {}^2\dot{U}_1}{\dot{I}'_2} = \frac{218,825 - 218,343e^{j0,02^\circ}}{0,817e^{-j80,32^\circ}} =$$

$$= 0,601e^{j69,39^\circ} \text{ (Ом)},$$

$$r'_2 = 0,211 \text{ Ом},$$

$$x'_2 = 0,562 \text{ Ом},$$

$$L'_2 = \frac{x'_2}{2\pi f} = \frac{0,562}{2\pi \cdot 50} = 1,790 \cdot 10^{-3} \text{ (Гн)}.$$

Таким образом, реактивное сопротивление рассеяния каждой обмотки трансформатора в отдельности может быть определено высокоточным методом холостого хода, дающим удовлетворительное совпадение результатов с формулами (2) и (3).

Почти парадоксальный результат – емкостный характер сопротивления рассеяния внутренней обмотки получен лишь для концентрических цилиндрических обмоток. Обобщать его на другие типы обмоток не следует. Этот результат не является беспрецедентным. Индуктивная электрическая машина – синхронный компенсатор в перевозбужденном состоянии тоже имеет емкостный характер.

Представленный высокоточный метод холостого хода не привязан к характеру реактивности сопротивлений рассеяния. Он является универсальным – его можно использовать при любых типах обмоток.

Полученные результаты рекомендуется использовать при проектировании и исследовании трансформаторов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кантор В.В. К расчёту индуктивности рассеяния обмоток трансформаторов // Электротехника. 2009. № 4. С. 51–55.
2. Иванова Т.Г., Шевцов В.М. Определение по цифрограммам индуктивности рассеяния обмоток силового трансформатора // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 2013. № 1. С. 88–91.
3. Лихачев Д.И. Аналитический расчет индуктивности рассеяния трансформаторов машин контактной сварки // Евразийский союз ученых. 2015. № 12-5 (21). С. 70–72.
4. Марквардт Е. Г. Об электромагнитном рассеянии // Электричество. 1935. № 9. С. 44–51.
5. Павлов В.Д. Магнитный поток и его квантование // Известия Уфимского научного центра РАН. 2020. № 4. С. 25–28. DOI 10.31040/2222-8349-2020-0-4-25-28
6. Лицин К.В., Орехов В.В., Сарманов Т.М. Сравнительный анализ системы управления векторно-импульсного пуска при наличии промежуточных трансформаторов и без них // Автоматизированные технологии и производства. 2016. № 1 (11). С. 74–76.
7. Лицин К.В., Басков С.Н. Пуск высоковольтных электродвигателей с промежуточным трансформатором // Автоматизированные технологии и производства. 2013. № 5 (11). С. 185–187.

MATHEMATICAL MODEL OF A HIGH-PRECISION IDLE METHOD FOR DETERMINING THE SCATTERING OF TRANSFORMER WINDINGS SEPARATELY

V.D. Pavlov

Vladimir Electromechanical Plant, Vladimir, Russia

e-mail: pavlov.val.75@mail.ru

Abstract. The purpose of the study is to substantiate the possibility of experimentally determining the leakage reactance for each transformer winding separately, which can be set by a high-precision idle method.

Keywords: transformer, winding, dissipation, inductive, capacitive, flux linkage, magnetic flux.

REFERENCES

1. V. V. Kantor To the calculation of the leakage inductance of transformer windings [K raschotu induktivnosti rassseyaniya obmotok transformatorov]. *Elektrotehnika [Electrical Engineering]*, 2009, no. 4, pp. 51–55. (in Russian)
2. Ivanova T.G., Shevtsov V.M. Determination of the leakage inductance of the windings of a power transformer by digits [Opredeleniye po tsifro-grammam induktivnosti rassseyaniya obmotok silovogo transformatora]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Elektromekhanika [Proceedings of higher educational institutions. Electromechanics]*, 2013, no. 1, pp. 88–91. (in Russian)
3. Likhachev D.I. Analytical calculation of the leakage inductance of transformers of resistance welding machines [Analiticheskiy raschet induktivnosti rassseyaniya transformatorov mashin kontaktnoy svarki]. *Yevraziyskiy soyuz uchenykh [Eurasian Union of Scientists]*, 2015, no. 12-5 (21), pp. 70–72. (in Russian)
4. Marquardt E.G. On electromagnetic scattering [Ob elektromagnitnom rassseyanii]. *Elektrichestvo [Electricity]*, 1935, no. 9, pp. 44–51. (in Russian)
5. Pavlov V.D. Magnetic flux and its quantization [Magnitnyy potok i yego kvantovaniye]. *Izvestiya Ufimskogo nauchnogo tsentra RAN [Bulletin of the Ufa Scientific Center of the Russian Academy of Sciences]*, 2020, no. 4, pp. 25–28. DOI 10.31040/2222-8349-2020-0-4-25-28 (in Russian)
6. Litsin K.V., Orekhov V.V., Sarmanov T.M. Comparative analysis of the vector-pulse start control system with and without intermediate transformers [Sravnitel'nyy analiz sistemy upravleniya vektorno-impul'snogo pushka pri nalichii promezhutochnykh transformatorov i bez nikh]. *Avtomatizirovannyye tekhnologii i proizvodstva [Automated technologies and production]*, 2016, no. 1 (11), pp. 74–76. (in Russian)
7. Litsin K.V., Baskov S.N. Start of high-voltage electric motors with an intermediate transformer [Pushk vysokovol'tnykh elektrodvigateley s promezhutochnym transformatorom]. *Avtomatizirovannyye tekhnologii i proizvodstva [Automated technologies and production]*, 2013, no. 5 (11), pp. 185–187. (in Russian)

Павлов, В.Д. Математическая модель высокоточного метода холостого хода определения рассеяния обмоток трансформатора по отдельности / В.Д. Павлов // Автоматизированные технологии и производства. 2021. №2(24). С.11-13.

V.D. Pavlov Mathematical model of a high-precision idle method for determining the scattering of transformer windings separately. *Avtomatizirovannyye tekhnologii i proizvodstva [Automation of technologies and production]*, 2021, no.2(24), pp.11-13. (In Russian).

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО РЕЖИМА РАБОТЫ БЛОКА ВОЗДУХОНАГРЕВАТЕЛЕЙ ДОМЕННОЙ ПЕЧИ

А.С. Прасолов, С.М. Андреев, В.В. Стебелева

2ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова»,
г. Магнитогорск, Россия

aspr.88@yandex.ru

Аннотация. Теплотехнические характеристики доменных воздухонагревателей меняются с течением времени, при этом изменения носят случайный характер и требуют настройки режимной карты с течением времени. В работе представлена математическая модель последовательного режима работы блока воздухонагревателей доменной печи с целью разработки режимной карты переключения циклов работы блока. Использование математической модели, позволяет разработать режимную карту без проведения соответствующих исследований на действующем блоке. Создание режимной карты сводится к анализу показаний с датчиков действующего блока воздухонагревателей. В качестве исходных данных были взяты параметры действующего блока. Методом аппроксимации получены полиномиальные уравнения режимов нагрева и дутья для каждого воздухонагревателя блока. На основе полученных данных разработана математическая модель последовательного режима работы блока. Математическая модель может использоваться для создания режимной карты циклов переключения блока воздухонагревателей доменной печи без проведения натуральных экспериментов.

Ключевые слова: Воздухонагреватель, доменное производство, последовательный режим, математическая модель, режимная карта.

ВВЕДЕНИЕ

В процессе работы блока воздухонагревателей (ВН) характеристики каждого воздухонагревателя изменяются из-за постепенного износа материала насадки. Изменение характеристик происходит непредсказуемым образом и требует постоянного контроля для подстройки моментов переключения [1]. Для создания режимной карты проводятся исследования, в ходе которых последовательно изменяются периоды нагрева и дутья воздухонагревателей, однако данные исследования занимают много времени, проводятся большой группой специалистов и проводятся один раз в несколько лет. Однако возможности современных средств АСУ ТП позволяют сохранять большие объемы информации и после обработки параметров разрабатывать модели объектов управления для оптимизации различных режимов работы.

Проблеме разработки математических моделей ВН доменной печи и их оптимизации посвящено множество исследований. В целом исследования можно разделить на две категории.

К первой категории относятся модели, основанные на физических процессах, протекающих в кауперах и сводящиеся к решению дифференциальных уравнений.

В данном исследовании [2] рассматривается трехмерная модель ВН которая базируется на нелинейных дифференциальных уравнениях учитывающая перенос тепла в насадке ВН и свойства потока дымовых газов. Модель позволяет определять распределение температур в объеме

и во времени, используя заданные свойства теплоносителя. Использование данной модели позволяет оказывать управляющее воздействие как на группу ВН, так и на каждый ВН группы.

В данной статье [3] трехмерную модель ВН свели к двумерной на основе нелинейных дифференциальных уравнений теплообмена. Сравнение результатов расчета показало достаточную адекватность модели.

Буткарев А.А. и др. [4], разработал обобщенную прогнозирующую детерминированную математическую модель, включающую характеристики, основанные на уравнениях теплообмена и аэродинамики. Модель включает в себя прогнозирующий модуль

В данном исследовании [5] разработана аналитико-численная модель, которая позволяла определить состав и температуру продуктов сгорания входящих в насадку и на их основе выработать стратегию по оптимизации работы блока.

Данные модели позволяют довольно точно прогнозировать параметры ВН, однако не учитывают ухудшение эксплуатационных характеристик ВН со временем.

Ко второй группе относятся экспериментально-статистическими модели, позволяющие на основе большого числа современных методик статистического анализа и последующей оптимизации по специально сформированным критериям проводить формирование режимной карты [6].

Авторы данной работы [7] разработали математическую модель для оценки производительности ВН с использованием конечно-разностной аппроксимации для теплопередачи внутри ВН. процессе эксплуатации. Иссле-

дование показывает хорошее соответствие между измеренными и смоделированными данными.

В данном исследовании [8] описана математическая модель и оптимальная система управления ВН. Была разработана точная математическая имитационная модель печи горячего дутья, и точность модели была подтверждена.

Авторы данной статьи [9] использовали натурные данные действующей системы управления, для разработки экспертной подсистемы регулирования для прогнозирования перекидки клапанов.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО РЕЖИМА

Полный рабочий период регенеративных воздухонагревателей состоит из двух рабочих циклов:

-цикл нагрева насадки, когда продукты горения отопительного газа (доменного или смешанного) подаются сверху и, проходя через насадку, нагревают её;

-цикл дутья, когда нагреваемый воздух (холодное дутьё) подается снизу в разогретую насадку и, проходя через неё снизу вверх, нагревается. Насадка при этом охлаждается.

В связи с этим количество воздухонагревателей не может быть меньше двух. В доменном производстве используются блоки в составе трёх или четырёх аппаратов.

Особенностью АСУ ТП большинства ВН является определение теплового состояния насадки, с помощью измерения температуры на входе в насадку (температура купола) и на выходе (температура отходящих дымов) в цикле нагрева насадки. И измерение температуры горячего дутья в цикле нагрева дутья, иногда для измерения температуры горячего дутья используются показания с датчика температуры купола [10].

В качестве исходных данных были взяты параметры блока, состоящего из трех ВН работающего в последовательном режиме.

Для модели были отдельно рассмотрены динамические характеристики нагрева и охлаждения.

После аппроксимации данных по температуре дыма, были получены полиномиальные уравнения регрессии третьего порядка вида (1):

$$f_{\text{дн}}(\tau) = \alpha_1 \tau^3 + \alpha_2 \tau^2 + \alpha_3 \tau + \alpha_4, \quad (1)$$

где, τ - время; α_i - коэффициенты регрессионного уравнения.

Графики изменения температур дыма от времени представлены на рис.1.

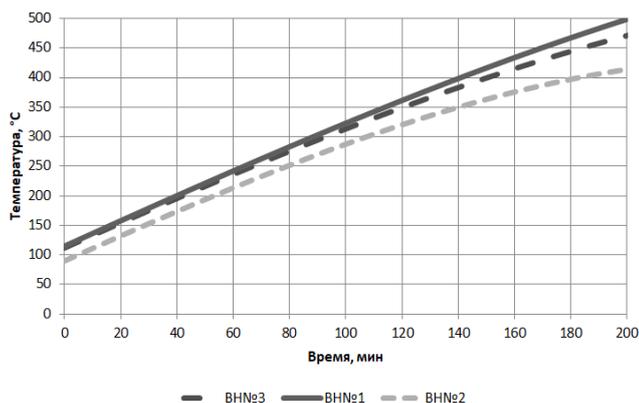


Рис. 1. Графики изменения температуры дыма при нагреве для последовательного режима

Так как после окончания дутьевого периода в насадке еще может сохраняться тепловая энергия, то при переходе в режим нагрева к значению температуры добавляется первая производная уравнения (1).

$$T_{\text{дн}}(\tau) = f'_{\text{дн}}(\tau) + T_{i-1}, \quad (2)$$

где T_{i-1} - значение температуры дыма в предыдущий момент времени; $T_{\text{дн}}$ - температуры насадки.

Изменение температуры насадки во время дутьевого периода имеет вид обратной параболы, так как в начале дутьевого периода с помощью смесительного клапана через насадку проходит меньшее количество холодного дутья, но потом количество нагреваемого воздуха необходимо увеличивать. Для модели используется следующая формула (3).

$$T_{\text{дн}}(\tau) = K_{\text{дн}}(-0,0006 \times \tau - 0,09211) + T_{i-1} \quad (3)$$

где $K_{\text{дн}}$ - коэффициент скорости изменения температуры при дутье.

График изменения температуры насадки при дутьевом периоде представлен на рис.2.

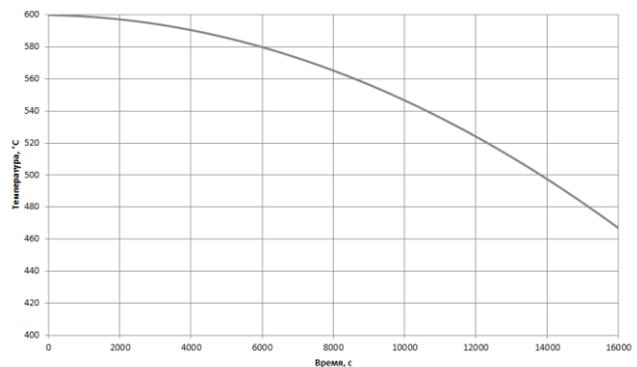


Рис. 2. График изменения температуры насадки во время дутьевого периода

Временная дискретизация модели осуществляется по следующему выражению (4).

$$\tau_i = \tau_{i-1} + \Delta\tau, \quad (4)$$

где τ_i - текущее время; τ_{i-1} - время предыдущего шага дискретизации.

Для смены циклов работы воздухонагревателей используется релейный элемент со следующим условием (5):

$$\begin{aligned} K_i &= 1, \text{ если } D_{i-1} = 3 \wedge t_{\text{дз}} \geq t_{\text{дн}i}; \\ K_i &= 2, \text{ если } D_{i-1} = 1 \wedge t_{\text{д1}} \geq t_{\text{дн}i}; \\ K_i &= 3, \text{ если } D_{i-1} = 2 \wedge t_{\text{д2}} \geq t_{\text{дн}i}; \end{aligned} \quad (5)$$

где K_i - ВН находящийся на дутье; K_{i-1} - предыдущий ВН находящийся на дутье; $t_{\text{дн}}$ - время цикла дутья n-го ВН.

В итоге зависимости от значения K_i будет выбираться режим работы конкретного ВН.

Как видно модель предусматривает изменение только параметра нагрева насадки. Моделирование будет производиться для трех ВН, работающих в последовательном режиме, при цикле нагрева ВН будет использовать формулу (2), при переходе в режим дутья формулу (3). Структурная схема ОУ представлена на рис.3.

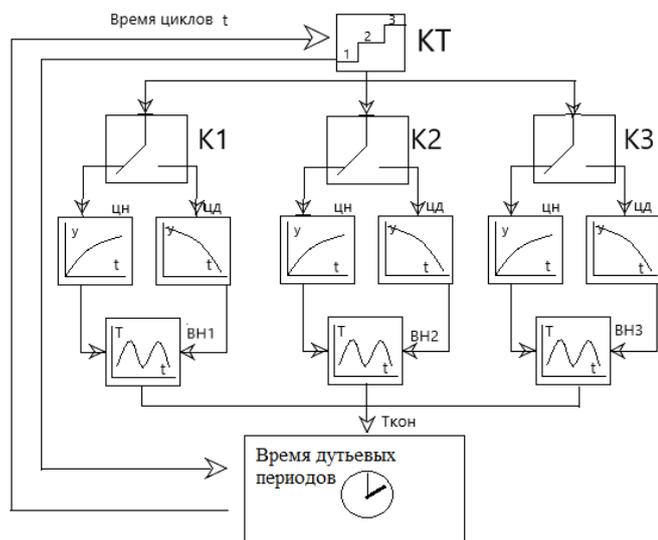


Рис. 3. Структурная схема системы определения времени цикла воздушонагревателя

Схема включает в себя реле времени (КТ) которое управляет реле переключения блоками циклов нагрева и дутья (К1, К2, К3). Блоки ЦН и ЦД изменяют динамические характеристики, для изменения температуры насадки. После обработки данных в начале нового цикла работы отправляет новое значение времени. Работа модели приведена на рис.4

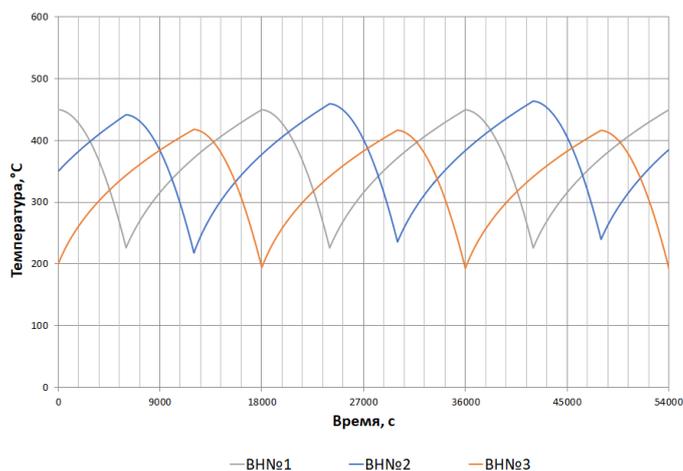


Рис. 4. Изменение температуры насадки ВН

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

ВН являются одними из самых больших потребителей энергоресурсов на металлургическом предприятии. В связи с этим остро встает вопрос оптимизации циклов работы. Оптимизация времени работы ВН позволяет эффективно использовать теплотехнические характеристики каждого отдельного ВН. Следствием правильно настроенной режимной карты является более эффективное использование энергоресурсов, повышение температуры горячего дутья, увеличение сроков эксплуатации.

В данной математической модели используется принцип переключения динамических характеристик с запоминанием предыдущего значения температура.

Использование данной математической модели позволяет провести исследование для разработки режимной карты. Также данную модель можно использовать при разработке автоматической системы регулирования периодами работы блока ВН.

ЛИТЕРАТУРА

1. Андреев, С. М. Автоматическая настройка времени периодов работы доменных воздушонагревателей в параллельном режиме / С. М. Андреев, А. С. Прасолов, А. В. Варганова // Современные достижения университетских научных школ : сборник докладов национальной научной школы-конференции, Магнитогорск, 25–26 ноября 2021 года. – Магнитогорск: Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, 2021. – С. 61-66
2. Здроздас, Д. С. Симкин, А. И. Койфман, А. А. Юзвенко С. В. Численно-математическая модель работы насадки доменного воздушонагревателя и её применение в моделировании работы группы воздушонагревателей // Наука та виробництво. 2020. Т. 22. С. 54–64..
3. Хаджинов, А. С. Математическое моделирование тепловой работы доменного воздушонагревателя / А. С. Хаджинов, Е. А. Хаджинов, В. А. Тищенко // Вестник Приазовского государственного технического университета. Серия: Технические науки. – 2010. – № 20. – С. 154-159.
4. Буткарев А.А. Буткарев А.П. Птичников А.Г. и др. Увеличение температуры горячего дутья доменных воздушонагревателей с помощью подсистемы оптимального управления // Сборник докладов международной научно-практической конференции. - Екатеринбург, 2015. – С. 182-197
5. Грес Л.П., Каракаш Е.А., Флейшман Ю.М. и др. Математическое моделирование тепловой работы доменного воздушонагревателя//Металлургическая теплотехника: Сб. научных трудов НМетАУ. - Днепропетровск: «ПП Грес О.С.», 2006, с. 99 - 109.
6. Кривцов А.Ю. Исследование и разработка методов повышения эффективности режимов работы доменных воздушонагревателей с учетом их индивидуальных теплотехнических характеристик: Автореферат диссертации. ЛГТУ. – Липецк, 2007. 22 с.7. Никеров В.А. Физика для вузов. Механика и молекулярная физика / Никеров В.А. – М.: Издательско-торговая корпорация «Дашков и Ко», 2011 стр. 15
7. Zetterholm J. и др. Dynamic modelling for the hot blast stove // Appl. Energy. 2017. Т. 185. С. 2142–2150.
8. Matoba Y. и др. Mathematical Model and Automatic Control System of Hot-Blast Stove // IFAC Proc. Vol. 1987. Т. 20. С. 437–442.
9. Трофимов, В. Б. Автоматизированная система контроля и управления бесшахтным воздушонагревателем доменной печи / В. Б. Трофимов // Вестник Череповецкого государственного университета. – 2014. – № 2(55). – С. 16-21.
10. Парсункин Б.Н. Локальные стабилизирующие контура автоматического управления в АСУ ТП: монография / Б.Н. Парсункин, С.М. Андреев, О.С. Логунова – Магнитогорск: КТ «Буки Веди», 2012. –406

MATHEMATICAL MODEL OF THE SEQUENTIAL OPERATION MODE OF HOT BLAST STOVES UNIT

A.S. Prasolov, S.M. Andreev, V.V. Stebeleva

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

Abstract. The thermal characteristics of hot blast stoves change over time, while the changes are random and require adjustment of the mode card over time. The paper presents a mathematical model of the sequential mode of operation of the hot blast stoves unit in order to develop a mode map for switching the operating cycles of the unit. The use of a mathematical model allows you to develop a regime map without conducting appropriate research on the current unit. The creation of a regime map is reduced to the analysis of readings from the sensors of the current unit of hot blast stoves. The parameters of the current block were taken as the initial data. The approximation method is used to obtain polynomial equations of heating and blowing modes for each hot blast stoves of the unit. Based on the data obtained, a mathematical model of the sequential mode of operation of the unit has been developed. The mathematical model can be used to create a regime map of switching cycles of the hot blast stoves unit without conducting field experiments.

Keywords: hot blast stoves, blast furnace production, hot blasting, sequential mode, mathematical model, mode map.

REFERENCES

1. Andreev, S. M. Automatic adjustment of the time periods of operation of blast furnace air heaters in parallel mode / S. M. Andreev, A. S. Prasolov, A.V. Varganova // Modern achievements of university scientific schools : collection of reports of the National scientific school-conference, Magnitogorsk, November 25-26, 2021. - Magnitogorsk: Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2021. – P. 61-66
2. Zdradas, D. S. Simkin, A. I. Koifman, A. A. Yuzvenko S. V. Numerical-mathematical model of nozzle operation blastfurnace air heater and its application in simulation of air heater group operation// Science and production. 2020. V. 22. P. 54–64..
3. Khadzhinov, A. S. Mathematical modeling of the thermal operation of a blast furnace air heater / A. S. Khadzhinov, E. A. Khadzhinov, V. A. Tishchenko // Bulletin of the Azov State Technical University. Series: Technical Sciences. 2010. – № 20. – P. 154-159.
4. Butkarev A.A. Butkarev A.P. Ptichnikov A.G. et al. Increasing the hot blast temperature of blast furnace air heaters using the optimal control subsystem // Collection of reports of the international scientific and practical conference. - Yekaterinburg, 2015. - pp. 182-197.
5. Gres L.P., Karakash E.A., Fleishman Yu.M. et al. Mathematical modeling of the thermal operation of a blast furnace air heater//Metallurgical heat engineering: Collection of scientific works of NMetAU. - Dnepropetrovsk: "PP Grek O.S.", 2006, pp. 99 - 109.
6. Krivtsov A.Yu. Research and development of methods for improving the efficiency of blast furnace air heaters, taking into account their individual thermal characteristics: Abstract of the dissertation. LGTU. - Lipetsk, 2007. 22 p.7. Nikerov V.A. Physics for universities. Mechanics and molecular Physics / Nikerov V.A. - M.: Publishing and Trading Corporation "Dashkov & Co.", 2011 p. 15
7. Zetterholm J. и др. Dynamic modelling for the hot blast stove // Appl. Energy. 2017. Т. 185. С. 2142–2150.
8. Matoba Y. и др. Mathematical Model and Automatic Control System of Hot-Blast Stove // IFAC Proc. Vol. 1987. V. 20. pp. 437–442.
9. Trofimov, V. B. Automated control and control system of a shaft-less air heater of a blast furnace / V. B. Trofimov // Bulletin of Cherepovets State University. – 2014. –V № 2(55). – pp. 16-21.
10. Parsunkin B.N. Local stabilizing automatic control circuits in industrial control system: monograph / B.N. Parsunkin, S.M. Andreev, O.S. Logunova –Magnitogorsk: CT "Buki Vedi", 2012. –p. 406

Прасолов, А.С. Математическая модель последовательного режима работы блока воздухонагревателей доменной печи / А.С. Прасолов, С.М. Андреев, В.В. Стебелева // Автоматизированные технологии и производства. 2021. №2(24). С.14-17.

A.S. Prasolov, S.M. Andreev, V.V. Stebeleva Mathematical model of the sequential operation mode of hot blast stoves unit. *Avtomatizirovannye tehnologii i proizvodstva* [Automation of technologies and production], 2021, no.2(24), pp.14-17. (In Russian).

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВУХЗВЕННОГО ТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА В МОМЕНТ ТРОГАНИЯ

И.П. Попов

Центр высоких технологий, Москва, Россия

e-mail: i.popov@yandex.ru

Аннотация. Режим трогания для транспортного средства является наиболее тяжелым. Целью работы является построение математической модели двухзвенного транспортного средства с упругим тягово-сцепным устройством в момент трогания. Показано, что трогание транспортного средства с упругим тягово-сцепным устройством значительно легче, чем недеформируемого.

Ключевые слова: ускорение, энергия, масса, секция, тягач, прицеп, колебания, демпфер.

Сила трения покоя значительно превосходит силу трения движения. Это приводит к тому, что режим трогания для транспортного средства является наиболее тяжелым [1, 2].

Целью работы является построение математической модели «легкого» трогания двухзвенного транспортного средства с упругим тягово-сцепным устройством [3–5].

Для минимизации расчетов принимаются следующие допущения: сила F , развиваемая тягачом, – величина постоянная; массы тягача и прицепа равны между собой и составляют m .

Уравнение сил, приложенных к тягачу, имеет вид:

$$F = m \frac{d^2 x_1}{dt^2} + k(x_1 - x_2), \quad (1)$$

где x_1, x_2 – перемещение, соответственно, тягача и прицепа, k – коэффициент упругости сцепки.

Силы, приложенные к прицепу, удовлетворяют уравнению:

$$0 = m \frac{d^2 x_2}{dt^2} - k(x_1 - x_2).$$

Из последнего уравнения следует

$$x_1 = \frac{m}{k} \frac{d^2 x_2}{dt^2} + x_2. \quad (2)$$

Подстановка этого выражения в (1) дает

$$F = \frac{m^2}{k} \frac{d^4 x_2}{dt^4} + m \frac{d^2 x_2}{dt^2} + m \frac{d^2 x_2}{dt^2} + kx_2 - kx_2 = \frac{m^2}{k} \frac{d^4 x_2}{dt^4} + 2m \frac{d^2 x_2}{dt^2}. \quad (3)$$

Пусть

$$\frac{d^2 x_2}{dt^2} = z. \quad (4)$$

Тогда (3) запишется в виде

$$z'' + 2 \frac{k}{m} z = \frac{kF}{m^2}. \quad (5)$$

Характеристическое уравнение

$$r^2 + 2 \frac{k}{m} = 0.$$

Его корни равны

$$r_{1,2} = \pm i \sqrt{2 \frac{k}{m}}.$$

Общее решение соответствующего однородного уравнения [6]

$$z_1 = C_1 \cos \sqrt{2 \frac{k}{m}} t + C_2 \sin \sqrt{2 \frac{k}{m}} t.$$

Частное решение в соответствии с (5) имеет вид

$$z_2 = A.$$

Подстановка его в (5) дает

$$2 \frac{k}{m} A = \frac{kF}{m^2},$$

Откуда

$$A = \frac{F}{2m}.$$

Общее решение уравнения (5) находится как

$$z = z_1 + z_2 = C_1 \cos \sqrt{2 \frac{k}{m}} t + C_2 \sin \sqrt{2 \frac{k}{m}} t + \frac{F}{2m}.$$

В момент времени $t=0$ сцепка не деформирована, следовательно, на прицеп сила не действует и величина (4) равна нулю. Поэтому для $t=0$ последнее выражение примет вид:

$$z(0) = 0 = C_1 \cos \sqrt{2 \frac{k}{m}} 0 + C_2 \sin \sqrt{2 \frac{k}{m}} 0 + \frac{F}{2m},$$

откуда

$$C_1 = -\frac{F}{2m}.$$

С учетом этого

$$z = -\frac{F}{2m} \cos \sqrt{2 \frac{k}{m}} t + C_2 \sin \sqrt{2 \frac{k}{m}} t + \frac{F}{2m}, \quad (6)$$

В соответствии с (4)

$$v_2 = \int z dt = -\frac{F}{2m} \sqrt{\frac{m}{2k}} \sin \sqrt{2 \frac{k}{m}} t -$$

$$\begin{aligned}
& -C_2 \sqrt{\frac{m}{2k}} \cos \sqrt{2\frac{k}{m}t + \frac{F}{2m}t} + C_3, \\
x_2 &= \int v_2 dt = \frac{F}{4k} \cos \sqrt{2\frac{k}{m}t} - \\
& -C_2 \frac{m}{2k} \sin \sqrt{2\frac{k}{m}t + \frac{F}{4m}t^2} + C_3 t + C_4. \quad (7)
\end{aligned}$$

С учетом (2), (4), (6) и (7)

$$\begin{aligned}
x_1 &= -\frac{F}{2k} \cos \sqrt{2\frac{k}{m}t} + C_2 \frac{m}{k} \sin \sqrt{2\frac{k}{m}t + \frac{F}{2k}t} + \\
& + \frac{F}{4k} \cos \sqrt{2\frac{k}{m}t} - C_2 \frac{m}{2k} \sin \sqrt{2\frac{k}{m}t + \frac{F}{4m}t^2} + C_3 t + C_4, \\
v_1 &= \frac{dx_1}{dt} = \frac{F}{2k} \sqrt{2\frac{k}{m}} \sin \sqrt{2\frac{k}{m}t} + C_2 \sqrt{2\frac{k}{m}} \frac{m}{k} \cos \sqrt{2\frac{k}{m}t} - \\
& - \frac{F}{4k} \sqrt{2\frac{k}{m}} \sin \sqrt{2\frac{k}{m}t} - C_2 \sqrt{2\frac{k}{m}} \frac{m}{2k} \cos \sqrt{2\frac{k}{m}t + \frac{F}{2m}t} + C_3, \\
a_1 &= \frac{dv_1}{dt} = \frac{F}{2k} 2\frac{k}{m} \cos \sqrt{2\frac{k}{m}t} - C_2 2\frac{k}{m} \frac{m}{k} \sin \sqrt{2\frac{k}{m}t} - \\
& - \frac{F}{4k} 2\frac{k}{m} \cos \sqrt{2\frac{k}{m}t} + C_2 2\frac{k}{m} \frac{m}{2k} \sin \sqrt{2\frac{k}{m}t + \frac{F}{2m}t}.
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
x_2(0) &= 0 = \frac{F}{4k} \cos \sqrt{2\frac{k}{m}} 0 - \\
& - C_2 \frac{m}{2k} \sin \sqrt{2\frac{k}{m}} 0 + \frac{F}{4m} 0^2 + C_3 0 + C_4, \\
\frac{F}{4k} + C_4 &= 0,
\end{aligned}$$

$$C_4 = -\frac{F}{4k}.$$

$$v_2(0) = 0 = -C_2 \sqrt{\frac{m}{2k}} + C_3,$$

$$v_1(0) = 0 = C_2 \sqrt{2\frac{k}{m}} \frac{m}{k} - C_2 \sqrt{2\frac{k}{m}} \frac{m}{2k} + C_3 = C_2 \sqrt{2\frac{k}{m}} \frac{m}{2k} + C_3,$$

$$\begin{cases} -C_2 \sqrt{\frac{m}{2k}} + C_3 = 0 \\ C_2 \sqrt{\frac{m}{2k}} + C_3 = 0 \end{cases},$$

$$C_2 = 0, \quad C_3 = 0.$$

Окончательное решение:

$$\begin{aligned}
x_1 &= -\frac{F}{4k} \cos \sqrt{2\frac{k}{m}t} + \frac{F}{4m} t^2 + \frac{F}{4k}, \\
x_2 &= \frac{F}{4k} \cos \sqrt{2\frac{k}{m}t} + \frac{F}{4m} t^2 - \frac{F}{4k}, \\
v_1 &= \frac{F}{2\sqrt{2km}} \sin \sqrt{2\frac{k}{m}t} + \frac{F}{2m} t, \\
v_2 &= -\frac{F}{2\sqrt{2km}} \sin \sqrt{2\frac{k}{m}t} + \frac{F}{2m} t, \\
a_1 &= \frac{F}{2m} \cos \sqrt{2\frac{k}{m}t} + \frac{F}{2m},
\end{aligned}$$

$$a_2 = -\frac{F}{2m} \cos \sqrt{2\frac{k}{m}t} + \frac{F}{2m}.$$

Характерный отрезок времени τ_2 (индекс «2» означает количество составных частей транспортного средства) для рассматриваемого случая определяется из условия максимального растяжения упругой сцепки. При этом

$$a_1(\tau_2) - \frac{F}{2m} = 0$$

или

$$\frac{F}{2m} \cos \sqrt{2\frac{k}{m}} \tau_2 = 0,$$

$$\sqrt{2\frac{k}{m}} \tau_2 = \frac{\pi}{2},$$

$$\tau_2 = \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{m}{2k}}.$$

За время τ_2 тягач пройдет расстояние

$$x_1(\tau_2) = -\frac{F}{4k} \cos \sqrt{2\frac{k}{m}} \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{m}{2k}} + \frac{F}{4m} \frac{\pi^2}{4} \frac{m}{2k} + \frac{F}{4k} = \frac{F\pi^2}{32k} + \frac{F}{4k}$$

и разовьет скорость

$$\begin{aligned}
v_1(\tau_2) &= \frac{F}{2\sqrt{2km}} \sin \sqrt{2\frac{k}{m}} \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{m}{2k}} + \\
& + \frac{F}{2m} \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{m}{2k}} = \frac{F}{2\sqrt{2km}} + \frac{F\pi}{4\sqrt{2km}}.
\end{aligned}$$

Уместно сравнить эти показатели с соответствующими величинами для недеформируемого транспортного средства.

$$a = \frac{F}{2m},$$

$$v = \frac{F}{2m} t,$$

$$x = \frac{F}{4m} t^2,$$

$$x(\tau_2) = \frac{F}{4m} \frac{\pi^2}{4} \frac{m}{2k} = \frac{F\pi^2}{32k},$$

$$v(\tau_2) = \frac{F}{2m} \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{m}{2k}} = \frac{F\pi}{4\sqrt{2km}}.$$

$$\frac{x_1(\tau_2)}{x(\tau_2)} = \frac{F\pi^2/(32k) + F/(4k)}{F\pi^2/(32k)} = 1 + \frac{32}{4\pi^2} \approx 1,81.$$

$$\frac{v_1(\tau_2)}{v(\tau_2)} = \frac{F/(2\sqrt{2km}) + F\pi/(4\sqrt{2km})}{F\pi/(4\sqrt{2km})} = 1 + \frac{2}{\pi} \approx 1,64.$$

Отношение для кинетических энергий локомотива составляет

$$\frac{E_1(\tau_2)}{E(\tau_2)} = 2,69.$$

Полученные соотношения наглядно демонстрируют, что трогание двухзвенного транспортного средства с упругими сцепками значительно легче, чем недеформируемого.

ЛИТЕРАТУРА

1. Попов И.П. Компенсация пиковых нагрузок транспортно-технологических машин // Вестник МГТУ им.

Н.Э. Баумана. Серия «Машиностроение». 2020. № 3 (132). С. 85–93.

2. Зырянов И.В., Кондратюк А.П. Опыт промышленная эксплуатация многозвенных автопоездов Scania и Volvo в АК "АЛРОСА" (ОАО) // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2015. № S30. С. 71–83.

3. Горелов В.А. Математическое моделирование движения многозвенных колесных транспортных комплексов с учетом особенностей конструкций сцепных устройств // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2012. № 2. С. 14.

4. Сергеев А.И. Математическая модель двухзвенного транспортного средства с индивидуальным электромеха-

ническим приводом колес перекачивающегося типа // Автомобильная промышленность. 2011. № 6. С. 7–10.

5. Горелов В.А., Косицын Б.Б., Мирошниченко А.В., Стадухин А.А. Метод определения характеристик индивидуального тягового электропривода двухзвенной гусеничной машины на этапе проектирования // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2019. № 3 (126). С. 120–134.

6. Павлов В.Д. Математические модели резонансных и антирезонансных процессов // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения. 2021. № 1(49). С. 17–27. DOI: 10.20291/2079-0392-2021-1-17-27

MATHEMATICAL MODELING OF A TWO-LINK VEHICLE AT THE MOMENT OF RUNNING

I.P. Popov

Center of High Technologies, Moscow, Russia

e-mail: i.popow@yandex.ru

Abstract. The starting mode for the vehicle is the most difficult. The aim of the work is to construct a mathematical model of a two-link vehicle with an elastic traction coupling at the moment of starting. It is shown that starting a vehicle with an elastic towing device is much easier than that of a non-deformable one.

Keywords: acceleration, energy, mass, section, tractor, trailer, vibrations, damper.

REFERENCES

1. Popov I.P. Compensation of peak loads of transport and technological machines [Kompensatsiya pikovykh nagruzok transportno-tekhnologicheskikh mashin], *Vestnik MGTU im. N.E. Bauman. Seriya «Mashinostroyeniye» [Bulletin MGTU im. N.E. Bauman. Series "Mechanical Engineering"]*, 2020, no. 3 (132), pp. 85–93. (in Russian)

2. Zyryanov I.V., Kondratyuk A.P. Pilot industrial operation of multi-link road trains Scania and Volvo at AK "ALROSA" (OJSC) [Opytno-promyshlennaya ekspluatatsiya mnogozvennykh avtopoyezdov Scania i Volvo v AK "ALROSA" (OAO)], *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten' (nauchno-tekhnicheskiy zhurnal) [Mining information and analytical bulletin (scientific and technical journal)]*, 2015, no. 830, pp. 71–83. (in Russian)

3. Gorelov V.A. Mathematical modeling of the movement of multi-link wheeled transport complexes taking into account the design features of coupling devices [Matematicheskoye modelirovaniye dvizheniya mnogozvennykh kolesnykh transportnykh kompleksov s uchetom osobennostey konstruktivnykh ustroystv], *Nauka i obrazovaniye: nauchnoye izdaniye MGTU im. N.E. Bauman [Science and Education: scientific publication of the Moscow State Technical*

University named after M.V. N.E. Bauman], 2012, no. 2, pp. 14. (in Russian)

4. Sergeev A.I. Mathematical model of a two-link vehicle with an individual electromechanical wheel drive of rolling type [Matematicheskaya model' dvukhzvennogo transportnogo sredstva s individual'nym elektromekhanicheskim privodom koles perekatyvayushchegosya tipa], *Avtomobil'naya promyshlennost' [Automotive industry]*, 2011, no. 6, pp. 7–10. (in Russian)

5. Gorelov V.A., Kositsyn B.B., Miroshnichenko A.V., Stadukhin A.A. Method for determining the characteristics of an individual traction electric drive of a two-link tracked vehicle at the design stage [Metod opredeleniya kharakteristik individual'nogo tyagovogo elektroprivoda dvukhzvennoy gusenichnoy mashiny na etape proyektirovaniya], *Trudy NGTU im. R.Ye. Alekseyeva [Proceedings of NSTU im. R.E. Alekseeva]*, 2019, no. 3 (126), pp. 120–134. (in Russian)

6. Pavlov V.D. Mathematical models of resonant and anti-resonant processes [Matematicheskiye modeli rezonansnykh i antirezonansnykh protsessov], *Vestnik Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya [Bulletin of the Ural State University of Railways]*, 2021, no. 1 (49), pp. 17–27. DOI: 10.20291/2079-0392-2021-1-17-27 (in Russian)

Попов, И.П. Математическое моделирование двухзвенного транспортного средства в момент трогания / И.П. Попов // Автоматизированные технологии и производства. 2021. №2(24). С.18-20.

I.P. Popov Mathematical modeling of a two-link vehicle at the moment of running. *Avtomatizirovannyye tehnologii i proizvodstva [Automation of technologies and production]*, 2021, no.2(24), pp.18-20. (In Russian).

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРЕХЗВЕННОГО ТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА В МОМЕНТ ТРОГАНИЯ

И.П. Попов

Центр высоких технологий, Москва, Россия

e-mail: i.popow@yandex.ru

Аннотация. Целью работы является построение математической модели «легкого» трогания трехзвенного транспортного средства с упругими тягово-сцепными устройствами. Показано, что трогание транспортного средства с упругими тягово-сцепными устройствами значительно легче, чем недеформируемого. При этом, чем больше число прицепов, тем больше преимущество первого над вторым.

Ключевые слова: ускорение, энергия, масса, секция, тягач, прицеп, колебания, демпфер.

Целью работы является построение математической модели «легкого» трогания трехзвенного транспортного средства с упругими тягово-сцепными устройствами.

Для минимизации расчетов принимаются следующие допущения: сила F , развиваемая тягачом, – величина постоянная; массы тягача и прицепов равны между собой и составляют m .

Уравнения сил, приложенных, соответственно, к тягачу и прицепах, имеют вид:

$$F = m \frac{d^2 x_1}{dt^2} + k(x_1 - x_2), \quad (8)$$

$$k(x_1 - x_2) = m \frac{d^2 x_2}{dt^2} + k(x_2 - x_3), \quad (9)$$

$$k(x_2 - x_3) = m \frac{d^2 x_3}{dt^2}.$$

Из последнего уравнения следует

$$x_2 = \frac{m}{k} \frac{d^2 x_3}{dt^2} + x_3. \quad (10)$$

Производная этого выражения равна

$$\frac{d^2 x_2}{dt^2} = \frac{m}{k} \frac{d^4 x_3}{dt^4} + \frac{d^2 x_3}{dt^2}.$$

Подстановка последних двух выражений в (9) дает

$$\begin{aligned} x_1 &= \frac{m}{k} \frac{d^2 x_2}{dt^2} + 2x_2 - x_3 = \frac{m^2}{k^2} \frac{d^4 x_3}{dt^4} + \\ &+ \frac{m}{k} \frac{d^2 x_3}{dt^2} + 2 \frac{m}{k} \frac{d^2 x_3}{dt^2} + 2x_3 - x_3 = \\ &= \frac{m^2}{k^2} \frac{d^4 x_3}{dt^4} + 3 \frac{m}{k} \frac{d^2 x_3}{dt^2} + x_3. \end{aligned} \quad (11)$$

Производная этого выражения равна

$$\frac{d^2 x_1}{dt^2} = \frac{m^2}{k^2} \frac{d^6 x_3}{dt^6} + 3 \frac{m}{k} \frac{d^4 x_3}{dt^4} + \frac{d^2 x_3}{dt^2}.$$

Подстановка полученных выражений в (8) дает

$$\frac{F}{k} = \frac{m^3}{k^3} \frac{d^6 x_3}{dt^6} + 3 \frac{m^2}{k^2} \frac{d^4 x_3}{dt^4} + \frac{m}{k} \frac{d^2 x_3}{dt^2} +$$

$$\begin{aligned} &+ \frac{m^2}{k^2} \frac{d^4 x_3}{dt^4} + 3 \frac{m}{k} \frac{d^2 x_3}{dt^2} + x_3 - \frac{m}{k} \frac{d^2 x_3}{dt^2} - x_3 = \\ &= \frac{m^3}{k^3} \frac{d^6 x_3}{dt^6} + 4 \frac{m^2}{k^2} \frac{d^4 x_3}{dt^4} + 3 \frac{m}{k} \frac{d^2 x_3}{dt^2}, \\ &\frac{d^6 x_3}{dt^6} + 4 \frac{k}{m} \frac{d^4 x_3}{dt^4} + 3 \frac{k^2}{m^2} \frac{d^2 x_3}{dt^2} = \frac{k^2 F}{m^3}. \end{aligned} \quad (12)$$

Пусть

$$\frac{d^2 x_3}{dt^2} = z. \quad (13)$$

Тогда (12) запишется в виде

$$z'''' + 4 \frac{k}{m} z'' + 3 \frac{k^2}{m^2} z = \frac{k^2 F}{m^3}. \quad (14)$$

Характеристическое уравнение

$$r^4 + 4 \frac{k}{m} r^2 + 3 \frac{k^2}{m^2} = 0.$$

$$r_{1,2}^2 = -2 \frac{k}{m} \pm \frac{k}{m} = ,$$

$$r_1^2 = -3 \frac{k}{m},$$

$$r_2^2 = -\frac{k}{m},$$

$$r_{1,2} = \pm i \sqrt{3 \frac{k}{m}},$$

$$r_{3,4} = \pm i \sqrt{\frac{k}{m}}.$$

Общее решение соответствующего однородного уравнения

$$z_1 = C_1 \cos \sqrt{3 \frac{k}{m}} t + C_2 \sin \sqrt{3 \frac{k}{m}} t + C_3 \cos \sqrt{\frac{k}{m}} t + C_4 \sin \sqrt{\frac{k}{m}} t.$$

Частное решение имеет вид

$$z_2 = A.$$

Подстановка его в (14) дает

$$3 \frac{k^2}{m^2} A = \frac{k^2 F}{m^3},$$

$$A = \frac{F}{3m}.$$

Общее решение находится как

$$z = z_1 + z_2 = C_1 \cos \sqrt{\frac{3k}{m}}t + C_2 \sin \sqrt{\frac{3k}{m}}t + C_3 \cos \sqrt{\frac{k}{m}}t + C_4 \sin \sqrt{\frac{k}{m}}t + \frac{F}{3m}. \quad (15)$$

В соответствии с (13)

$$v_3 = \int z dt = C_1 \sqrt{\frac{m}{3k}} \sin \sqrt{\frac{3k}{m}}t - C_2 \sqrt{\frac{m}{3k}} \cos \sqrt{\frac{3k}{m}}t + C_3 \sqrt{\frac{m}{k}} \sin \sqrt{\frac{k}{m}}t - C_4 \sqrt{\frac{m}{k}} \cos \sqrt{\frac{k}{m}}t + \frac{F}{3m}t + C_5, \quad (16)$$

$$x_3 = \int v_3 dt = -C_1 \frac{m}{3k} \cos \sqrt{\frac{3k}{m}}t - C_2 \frac{m}{3k} \sin \sqrt{\frac{3k}{m}}t - C_3 \frac{m}{k} \cos \sqrt{\frac{k}{m}}t - C_4 \frac{m}{k} \sin \sqrt{\frac{k}{m}}t + \frac{F}{6m}t^2 + C_5t + C_6, \quad (17)$$

С учетом (10), (13), (15) и (17)

$$x_2 = \frac{m}{k} C_1 \cos \sqrt{\frac{3k}{m}}t + \frac{m}{k} C_2 \sin \sqrt{\frac{3k}{m}}t + \frac{m}{k} C_3 \cos \sqrt{\frac{k}{m}}t + \frac{m}{k} C_4 \sin \sqrt{\frac{k}{m}}t + \frac{m}{k} \frac{F}{3m} - C_1 \frac{m}{3k} \cos \sqrt{\frac{3k}{m}}t - C_2 \frac{m}{3k} \sin \sqrt{\frac{3k}{m}}t - C_3 \frac{m}{k} \cos \sqrt{\frac{k}{m}}t - C_4 \frac{m}{k} \sin \sqrt{\frac{k}{m}}t + \frac{F}{6m}t^2 + C_5t + C_6 = \frac{2m}{3k} C_1 \cos \sqrt{\frac{3k}{m}}t + \frac{2m}{3k} C_2 \sin \sqrt{\frac{3k}{m}}t + \frac{F}{3k} + \frac{F}{6m}t^2 + C_5t + C_6, \quad (18)$$

$$v_2 = \frac{dx_2}{dt} = -\frac{2m}{3k} \sqrt{\frac{3k}{m}} C_1 \sin \sqrt{\frac{3k}{m}}t + \frac{2m}{3k} \sqrt{\frac{3k}{m}} C_2 \cos \sqrt{\frac{3k}{m}}t + \frac{F}{3m}t + C_5 = -\frac{2}{3} \sqrt{\frac{3m}{k}} C_1 \sin \sqrt{\frac{3k}{m}}t + \frac{2}{3} \sqrt{\frac{3m}{k}} C_2 \cos \sqrt{\frac{3k}{m}}t + \frac{F}{3m}t + C_5, \quad (19)$$

$$a_2 = \frac{dv_2}{dt} = -2C_1 \cos \sqrt{\frac{3k}{m}}t - 2C_2 \sin \sqrt{\frac{3k}{m}}t + \frac{F}{3m}, \quad (20)$$

С учетом (11), (20), (18) и (17)

$$x_1 = -2C_1 \frac{m}{k} \cos \sqrt{\frac{3k}{m}}t - 2C_2 \frac{m}{k} \sin \sqrt{\frac{3k}{m}}t + \frac{F}{3m} \frac{m}{k} + 2 \frac{2m}{3k} C_1 \cos \sqrt{\frac{3k}{m}}t + 2 \frac{2m}{3k} C_2 \sin \sqrt{\frac{3k}{m}}t + \frac{2F}{3k} + \frac{2F}{6m}t^2 + 2C_5t + 2C_6 - C_1 \frac{m}{3k} \cos \sqrt{\frac{3k}{m}}t + C_2 \frac{m}{3k} \sin \sqrt{\frac{3k}{m}}t + C_3 \frac{m}{k} \cos \sqrt{\frac{k}{m}}t + C_4 \frac{m}{k} \sin \sqrt{\frac{k}{m}}t - \frac{F}{6m}t^2 - C_5t - C_6 = -C_1 \frac{m}{3k} \cos \sqrt{\frac{3k}{m}}t - C_2 \frac{m}{3k} \sin \sqrt{\frac{3k}{m}}t + C_3 \frac{m}{k} \cos \sqrt{\frac{k}{m}}t +$$

$$+ C_4 \frac{m}{k} \sin \sqrt{\frac{k}{m}}t + \frac{F}{k} + \frac{F}{6m}t^2 + C_5t + C_6. v_1 = \frac{dx_1}{dt} = C_1 \sqrt{\frac{m}{3k}} \sin \sqrt{\frac{3k}{m}}t - C_2 \sqrt{\frac{m}{3k}} \cos \sqrt{\frac{3k}{m}}t - C_3 \sqrt{\frac{m}{k}} \sin \sqrt{\frac{k}{m}}t + C_4 \sqrt{\frac{m}{k}} \cos \sqrt{\frac{k}{m}}t + \frac{F}{3m}t + C_5. \quad (21) a_1 = C_1 \cos \sqrt{\frac{3k}{m}}t - C_3 \cos \sqrt{\frac{k}{m}}t + \frac{F}{3m}.$$

В соответствии с (20)

$$a_2(0) = -2C_1 + \frac{F}{3m} = 0, C_1 = \frac{F}{6m}.$$

В соответствии с (15)

$$z(0) = 0 = \frac{F}{6m} + C_3 + \frac{F}{3m}, C_3 = -\frac{F}{2m}.$$

В соответствии с (18)

$$x_2(0) = \frac{2m}{3k} C_1 + \frac{F}{3k} + C_6 = 0, \frac{F}{9k} + \frac{F}{3k} + C_6 = 0, C_6 = -\frac{4F}{9k}.$$

В соответствии с (21), (16) и (19)

$$v_1(0) = -C_2 \sqrt{\frac{m}{3k}} + C_4 \sqrt{\frac{m}{k}} + C_5 = 0, v_3(0) = -C_2 \sqrt{\frac{m}{3k}} - C_4 \sqrt{\frac{m}{k}} + C_5 = 0, C_4 = 0, v_2(0) = \frac{2}{3} \sqrt{\frac{3m}{k}} C_2 + C_5 = 0, C_2 = 0, C_5 = 0.$$

Окончательное решение:

$$x_1 = -\frac{F}{18k} \cos \sqrt{\frac{3k}{m}}t - \frac{F}{2k} \cos \sqrt{\frac{k}{m}}t + \frac{F}{6m}t^2 + \frac{5F}{9k}, x_2 = \frac{F}{9k} \cos \sqrt{\frac{3k}{m}}t + \frac{F}{6m}t^2 - \frac{F}{9k}, x_3 = -\frac{F}{18k} \cos \sqrt{\frac{3k}{m}}t + \frac{F}{2k} \cos \sqrt{\frac{k}{m}}t + \frac{F}{6m}t^2 - \frac{4F}{9k}, v_1 = \frac{F}{6\sqrt{3km}} \sin \sqrt{\frac{3k}{m}}t + \frac{F}{2\sqrt{km}} \sin \sqrt{\frac{k}{m}}t + \frac{F}{3m}t, v_2 = -\frac{F}{3\sqrt{3km}} \sin \sqrt{\frac{3k}{m}}t + \frac{F}{3m}t, v_3 = \frac{F}{6\sqrt{3km}} \sin \sqrt{\frac{3k}{m}}t - \frac{F}{2\sqrt{km}} \sin \sqrt{\frac{k}{m}}t + \frac{F}{3m}t, a_1 = \frac{F}{6m} \cos \sqrt{\frac{3k}{m}}t + \frac{F}{2m} \cos \sqrt{\frac{k}{m}}t + \frac{F}{3m},$$

$$a_2 = -\frac{F}{3m} \cos \sqrt{\frac{3k}{m}} t + \frac{F}{3m},$$

$$a_3 = \frac{F}{6m} \cos \sqrt{\frac{3k}{m}} t - \frac{F}{2m} \cos \sqrt{\frac{k}{m}} t + \frac{F}{3m}.$$

Характерный отрезок времени τ_3 для рассматриваемого случая определяется из условия максимального растяжения упругой сцепки. При этом

$$a_1(\tau_3) - \frac{F}{3m} = 0 \text{ или } \frac{F}{6m} \cos \sqrt{\frac{3k}{m}} \tau_3 + \frac{F}{2m} \cos \sqrt{\frac{k}{m}} \tau_3 = 0,$$

$$\frac{1}{3} \cos \sqrt{3} \sqrt{\frac{k}{m}} \tau_3 + \cos \sqrt{\frac{k}{m}} \tau_3 = 0.$$

Решение последнего уравнения имеет вид:

$$\sqrt{\frac{k}{m}} \tau_3 = 0,427\pi,$$

$$\tau_3 = 0,427\pi \sqrt{\frac{m}{k}}.$$

За время τ_3 тягач пройдет расстояние

$$x_1(\tau_3) = -\frac{F}{18k} \cos \sqrt{\frac{3k}{m}} \cdot 0,427\pi \sqrt{\frac{m}{k}} -$$

$$-\frac{F}{2k} \cos \sqrt{\frac{k}{m}} \cdot 0,427\pi \sqrt{\frac{m}{k}} +$$

$$+\frac{F}{6m} \left(0,427\pi \sqrt{\frac{m}{k}}\right)^2 + \frac{5F}{9k} =$$

$$= \frac{F}{k} \left[-\frac{1}{18} \cos \sqrt{3} \cdot 0,427\pi - \frac{1}{2} \cos 0,427\pi + \frac{1}{6} (0,427\pi)^2 + \frac{5}{9} \right] =$$

$$= \frac{F}{k} \left[-\frac{1}{18} \cos \sqrt{3} \cdot 0,427\pi - \frac{1}{2} \cos 0,427\pi + \right.$$

$$\left. + \frac{1}{6} (0,427\pi)^2 + \frac{5}{9} \right] = 0,78 \frac{F}{k}$$

и разовьет скорость

$$v_1(\tau_3) = \frac{F}{6\sqrt{3km}} \sin \sqrt{\frac{3k}{m}} \cdot 0,427\pi \sqrt{\frac{m}{k}} +$$

$$+\frac{F}{2\sqrt{km}} \sin \sqrt{\frac{k}{m}} \cdot 0,427\pi \sqrt{\frac{m}{k}} + \frac{F}{3m} 0,427\pi \sqrt{\frac{m}{k}} =$$

$$= \frac{F}{\sqrt{km}} \left(\frac{1}{6\sqrt{3}} \sin \sqrt{3} \cdot 0,427\pi + \frac{1}{2} \sin 0,427\pi + \right.$$

$$\left. + \frac{1}{3} 0,427\pi \right) = \frac{F}{\sqrt{km}}.$$

Уместно сравнить эти показатели с соответствующими величинами для недеформируемого транспортного средства.

$$a = \frac{F}{3m},$$

$$v = \frac{F}{3m} t,$$

$$x = \frac{F}{6m} t^2,$$

$$x(\tau_3) = \frac{F}{6m} \left(0,427\pi \sqrt{\frac{m}{k}}\right)^2 = 0,3 \frac{F}{k},$$

$$v(\tau_3) = \frac{F}{3m} \cdot 0,427\pi \sqrt{\frac{m}{k}} = 0,45 \frac{F}{\sqrt{mk}}.$$

$$\frac{x_1(\tau_3)}{x(\tau_3)} = 2,6,$$

$$\frac{v_1(\tau_3)}{v(\tau_3)} = 2,22.$$

Отношение для кинетических энергий локомотива составляет

$$\frac{E_1(\tau_3)}{E(\tau_3)} = 4,93.$$

Применение упруго деформируемых сцепок решает проблему трогания тяжелого транспортного средства [1–5].

В таблицу сведены перемещения, скорости и кинетические энергии тягача для моментов максимального растяжения упругой сцепки, отнесенные к соответствующим параметрам недеформируемого транспортного средства.

Количество секций транспортного средства	$\frac{x_1(\tau)}{x(\tau)}$	$\frac{v_1(\tau)}{v(\tau)}$	$\frac{E_1(\tau)}{E(\tau)}$
2	1,81	1,64	2,69
3	2,6	2,22	4,93

Полученные соотношения наглядно демонстрируют, что трогание транспортного средства с упругими сцепками значительно легче, чем недеформируемого. При этом, чем больше число секций, тем больше преимущество первого над вторым.

Смягчение режима трогания транспортного средства по существу обуславливается заменой одновременного трогания секций на поочередное. Выше этот процесс описан для инерционных сил. Применительно к силе трения покоя механизм будет подобным, т.е. преодолевается не вся сила трения покоя одновременно, а поочередно преодолеваются ее малые части.

Полученные выражения для перемещений, скоростей и ускорений тягача и прицепов имеют гармонические составляющие [6]. Для исключения продольных колебаний транспортного средства а после достижения максимального растяжения сцепки следует механически заблокировать возможность ее гармонического сжатия с последующей выборкой упругой деформации, например, с использованием демпфирующих устройств.

ЛИТЕРАТУРА

1. Попов И.П. Компенсация пиковых нагрузок транспортно-технологических машин // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия «Машиностроение». 2020. № 3 (132). С. 85–93.
2. Зырянов И.В., Кондратюк А.П. Опытная промышленная эксплуатация многоосевных автопоездов Scania и Volvo в АК "АЛРОСА" (ОАО) // Горный инфор-

мационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2015. № S30. С. 71–83.

3. Горелов В.А. Математическое моделирование движения многосвязных колесных транспортных комплексов с учетом особенностей конструкций сцепных устройств // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2012. № 2. С. 14.

4. Сергеев А.И. Математическая модель двухзвенного транспортного средства с индивидуальным электромеханическим приводом колес перекатывающегося типа // Автомобильная промышленность. 2011. № 6. С. 7–10.

5. Горелов В.А., Косицын Б.Б., Мирошниченко А.В., Стадухин А.А. Метод определения характеристик индивидуального тягового электропривода двухзвенной гусеничной машины на этапе проектирования // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2019. № 3 (126). С. 120–134.

6. Павлов В.Д. Математические модели резонансных и антирезонансных процессов // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения. 2021. № 1(49). С. 17–27. DOI: 10.20291/2079-0392-2021-1-17-27

MATHEMATICAL MODELING OF A THREE-LINK VEHICLE AT THE MOMENT OF RUNNING

I.P. Popov

Center of High Technologies, Moscow, Russia

e-mail: i.popow@yandex.ru

Abstract. The aim of the work is to build a mathematical model of "easy" starting of a three-link vehicle with elastic traction coupling devices. It is shown that starting a vehicle with elastic towing coupling devices is much easier than that of a non-deformable one. Moreover, the greater the number of trailers, the greater the advantage of the first over the second.

Keywords: acceleration, energy, mass, section, tractor, trailer, vibrations, damper.

REFERENCES

1. Popov I.P. Compensation of peak loads of transport and technological machines [Kompensatsiya pikovykh nagruzok transportno-tekhnologicheskikh mashin], *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Seriya «Mashinostroyeniye» [Bulletin MGTU im. N.E. Bauman. Series "Mechanical Engineering"]*, 2020, no. 3 (132), pp. 85–93. (in Russian)

2. Zyryanov I.V., Kondratyuk A.P. Pilot industrial operation of multi-link road trains Scania and Volvo at AK "ALROSA" (OJSC) [Opytno-promyshlennaya ekspluatatsiya mnogozvennykh avtopoyezdov Scania i Volvo v AK "ALROSA" (OAO)], *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten' (nauchno-tekhnicheskii zhurnal) [Mining information and analytical bulletin (scientific and technical journal)]*, 2015, no. 830, pp. 71–83. (in Russian)

3. Gorelov V.A. Mathematical modeling of the movement of multi-link wheeled transport complexes taking into account the design features of coupling devices [Matematicheskoye modelirovaniye dvizheniya mnogozvennykh kolesnykh transportnykh kompleksov s uchetom osobennostey konstruktivnykh ustroystv], *Nauka i obrazovaniye: nauchnoye izdaniye MGTU im. N.E. Baumana [Science and Education: scientific publication of the Moscow State Technical*

University named after M.V. N.E. Bauman], 2012, no. 2, pp. 14. (in Russian)

4. Sergeev A.I. Mathematical model of a two-link vehicle with an individual electromechanical wheel drive of rolling type [Matematicheskaya model' dvukhzvennogo transportnogo sredstva s individual'nym elektromekhanicheskim privodom koles perekatyvayushchegosya tipa], *Avtomobil'naya promyshlennost' [Automotive industry]*, 2011, no. 6, pp. 7–10. (in Russian)

5. Gorelov V.A., Kositsyn B.B., Miroshnichenko A.V., Stadukhin A.A. Method for determining the characteristics of an individual traction electric drive of a two-link tracked vehicle at the design stage [Metod opredeleniya kharakteristik individual'nogo tyagovogo elektroprivoda dvukhzvennoy gusenichnoy mashiny na etape proyektirovaniya], *Trudy NGTU im. R.E. Alekseyeva [Proceedings of NSTU im. R.E. Alekseyeva]*, 2019, no. 3 (126), pp. 120–134. (in Russian)

6. Pavlov V.D. Mathematical models of resonant and anti-resonant processes [Matematicheskiye modeli rezonansnykh i antirezonansnykh protsessov], *Vestnik Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya [Bulletin of the Ural State University of Railways]*, 2021, no. 1 (49), pp. 17–27. DOI: 10.20291/2079-0392-2021-1-17-27 (in Russian)

Попов, И.П. Математическое моделирование трехзвенного транспортного средства в момент трогания / И.П. Попов // Автоматизированные технологии и производства. 2021. №2(24). С.21-24.

I.P. Popov Mathematical modeling of a three-link vehicle at the moment of running. *Avtomatizirovannyye tekhnologii i proizvodstva [Automation of technologies and production]*, 2021, no.2(24), pp.21-24. (In Russian).