Автоматизация и Современные Технологии

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ МЕЖОТРАСЛЕВОЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

ИЗДАЁТСЯ С 1947 ГОДА

12

2014

Главный редактор

В.Л. Белоусов — д.э.н., проф., МГУПИ

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

Бучаченко А.Л. — д.х.н., проф., ИПХФ РАН
Гусев А.А. — д.т.н., проф., МГТУ "СТАНКИН"
Дегтярёв Ю.И. — д.т.н., проф., МАИ
Елисеев В.А. — д.т.н., Ин-т инновац.-технологич. менеджмента
Иванов А.П. — д.э.н., проф., МГУПС (МИИТ)
Мальцева С.В. — д.т.н., проф., НИУ ВШЭ
Нефёдов Е.И. — д.ф.-м.н., ИРЭ РАН
Шебалин И.Ю. — к.ф.-м.н., ООО "Изд-во Машиностроение" (заместитель главного редактора)
Янович Е.Л. — д.э.н., проф., Кошалинский политехнич. ин-т (Польша)

Редактор-организатор — **Осипова В.Г.**
Редактор — **Селихова Е.А.**
Компьютерная вёрстка — **Конова Е.В.**

УЧРЕДИТЕЛИ:

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
РЕСПУБЛИКАНСКИЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ НАУЧНО-КОНСУЛЬТАЦИОННЫЙ ЦЕНТР ЭКСПЕРТИЗЫ

Журнал зарегистрирован 9 апреля 1999 г. за № 018684 в Комитете Российской Федерации по печати

Журнал входит в перечень утверждённых ВАК РФ изданий для публикации трудов соискателей учёных степеней

ООО «Издательство Машиностроение»

Адрес редакции:
107076, Москва,
Стромынский пер., 4.
Тел.: (495) 661 3880.
E-mail: ast@mashin.ru; http://www.mashin.ru

Адрес издательства:
107076, Москва,
Стромынский пер., 4.

© Издательство "Машиностроение",
"Автоматизация и современные технологии", 2014 г.

СОДЕРЖАНИЕ

АВТОМАТИЗАЦИЯ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ

Атаманов Ю.Л., Крутиков Г.А., Стрижак М.Г. Влияние структуры и параметров ударного пневмоагрегата на его кинематические и динамические характеристики . . . 3

Кычкин В.И., Кычкин А.В. Управление мобильным комплексом для автоматизации технологических процессов дорожных измерений 8

Бурцев А.Г., Капля В.И., Носенко В.А. Управление моментами включения печных установок циклического действия 13

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Дегтярёв Ю.И., Дегтярёв К.Ю. Проектирование процессов как возможная рабочая функция САПР . . . 17

Курнасов Е.В., Тен В.Э. Алгоритмы анализа и контроля эффективности автоматизированных технологических процессов 21

Яковлев В.В., Шишкин Г.И., Першин И.В. Применение численных методов для изучения сварочных процессов. . . 25

Алексеев П.В., Лоскутов О.Д., Тутнов А.А. Методика расчёта времени падения стержней СУЗ в искривлённых направляющих каналах реакторных установок . 30

Порожняков А.К., Томашевский Ю.Б., Митяшин Н.П., Кац Е.Я. Оптимизация процесса построения ресурсно-технологической модели сложной системы . . . 36

Фролов В.А. Статические характеристики и синергетика сварочной дуги 39

ОБЗОР ПЕРИОДИЧЕСКОЙ ПЕЧАТИ

По страницам журналов 44

Указатель статей, опубликованных в журнале "Автоматизация и современные технологии" в 2014 г. . . . 46

CONTENTS

AUTOMATION OF SCIENTIFIC-RESEARCH AND PRODUCTION

Atamanov Yu.L., Krutikov G.A., Strizhak M.G. Influence of the shock pneumatic unit structure and parameters on its kinematic and dynamic characteristics 3

Kychkin V.I., Kychkin A.V. The mobile complex control for automation of the road measurements technological processes 8

Burtsev A.G., Kaplya V.I., Nosenko V.A. The engage moments control of furnace installations with cyclic action 13

MODERN TECHNOLOGIES

Degtyarev Yu.L, Degtyarev K.Yu. Design of processes as possible working function CAD system 17

Kurnasov E.V., Ten V.E. Analysis and efficiency control algorithms of the automatic technological processes 21

Yakovlev V.V., Shishkin G.I., Pershin I.V. Numeral methods application for welding processes study . . . 25

Alekseev P.V., Loskutov O.D., Tutnov A.A. Calculation method of control and protection system rod falling time in the bend guide channels of the reactor installations . . 30

Porozhnyakov A.K., Tomashevckiy Yu.B., Mityashin N.P., Katz E.Ya. Construction process optimization of resource and technological model for difficult system 36

Frolov V.A. Statically characteristics and synergy of arc 39

SURVEY OF PERIODICALS

Periodicals review 44

The index of articles published in the "Automation and Modern Technologies" magazine, 2014 46

Журнал распространяется по подписке, которую можно оформить в любом почтовом отделении (индекс по каталогу "Роспечать" — 70537, по каталогу "Пресса России" — 27838, по каталогу российской прессы "Почта России" — 60267) или непосредственно в издательстве по факсу (499)269 4897, по e-mail: realiz@mashin.ru, на сайте www.mashin.ru (без почтовых наценок, с любого месяца, со своего рабочего места); телефоны для справок: (499) 269 5298

Сдано в набор 01.10.2014.
Подписано в печать 13.11.2014.
Формат 60 × 88 1/8. Бумага офсетная.
Усл. печ. л. 5,88. Цена свободная

Отпечатано в ООО «Канцлер»,
150008, г. Ярославль, ул. Клубная, д. 4, кв. 49
Оригинал-макет: ООО «Адвансед солюшнз».
119071, г. Москва, Ленинский пр-т, д. 19, стр. 1. Сайт: www.aov.ru

Перепечатка материалов из журнала "Автоматизация и современные технологии" возможна при обязательном письменном согласии редакции журнала. При перепечатке материалов ссылка на журнал "Автоматизация и современные технологии" обязательна. За содержание рекламных материалов ответственность несёт рекламодатель

© Издательство "Машиностроение", "Автоматизация и современные технологии", 2014 г.

УДК 621.05

Ю.Л. Атаманов (ООО "Харьковгазоборудование"),
Г.А. Крутиков, д-р техн. наук, проф., **М.Г. Стрижак**, канд. техн. наук
(Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт",
Республика Украина)
mp9753@mail.ru

ВЛИЯНИЕ СТРУКТУРЫ И ПАРАМЕТРОВ УДАРНОГО ПНЕВМОАГРЕГАТА НА ЕГО КИНЕМАТИЧЕСКИЕ И ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Предложена схема управления ударным пневмоцилиндром, позволяющая улучшить наиболее важные эксплуатационные показатели агрегата: степень энергетического совершенства, долговечность, снижение брака, степень безопасности. Разработана инженерная методика расчёта кинематических параметров ударного пневмоагрегата на основе его математической модели.

Ключевые слова: ударный пневмоагрегат, инженерная методика расчёта, математическая модель.

The scheme of management by the shock pneumatic cylinder, allowing to improve the most important operational indices of the facility is offered: degree of power perfection, durability, waste decrease, safety degree. The engineering calculation method of the shock pneumatic unit kinematic parameters on the basis of its mathematical model is developed.

Key words: shock pneumatic unit, engineering calculation procedure, mathematical model.

Ударные пневматические приводы применяются в отбойных молотках, кузнечных пневмомолотах, прошивочных машинах, машинах клеймения, штамповки и т. д. Наиболее мощными ударными пневмоприводами являются приводы кузнечных молотов (кинетическая энергия удара 2000—20 000 Дж). Наименее мощными — ручные отбойные молотки (кинетическая энергия удара 30—80 Дж) [1]. Промежуточную достаточно обширную нишу между ними занимают пневмоагрегаты с энергией удара 200—2000 Дж. Причём, в последнем случае наиболее удачной следует признать конструкцию пневмоагрегата (ПА) со встроенным резервуаром (рис. 1, *а*).

Ударный эффект в ПА со встроенным резервуаром создаётся за счёт ступенчатого наращивания значительного усилия на поршне при разгерметизации поршня-клапана с седлом. Быстрому наращиванию скорости поршня способствует невысокое противодавление в выхлопной полости в начале движения поршня.

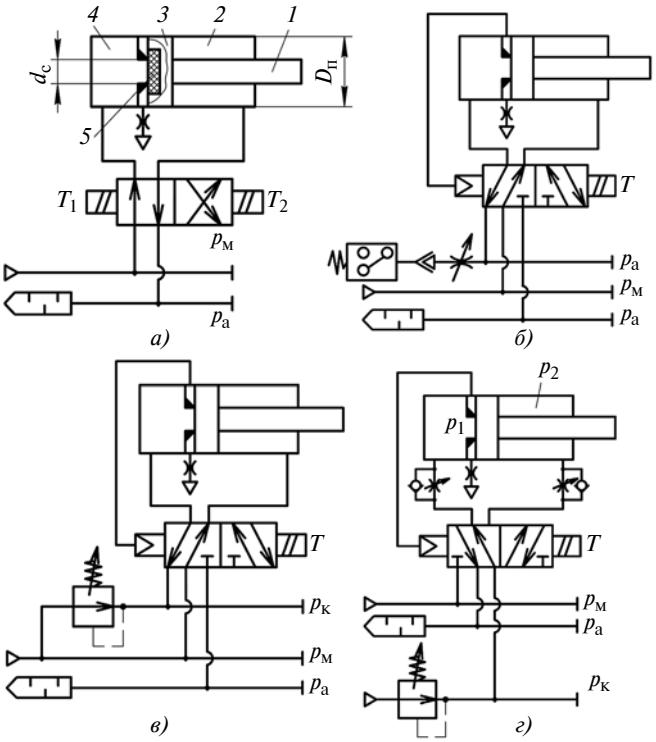


Рис. 1. Схемы управления ударным пневмоагрегатом со встроенным резервуаром:
а, *б*, *в*, *г* — схемы ударного пневмоагрегата со встроенным резервуаром; *1* — шток; *2* — поршневая полость; *3* — поршень-клапан; *4* — накопительная полость; *5* — сопло с выступающим кольцевым буртиком, упирающимся в уплотнительную шайбу; $d_с$ — диаметр седла; $D_п$ — диаметр поршня; T, T_1, T_2 — управляющие сигналы электромагнитов распределителей (0; 1); $p_м$ — давление питания; $p_к$ — давление настройки редукционного клапана; $p_а$ — атмосферное давление; p_1 — давление в накопительной полости; p_2 — давление в поршневой полости

Несмотря на кажущуюся безупречность идеи, заложенной в конструкцию ПА со встроенным резервуаром, реальная динамика движения является достаточно сложной, а результаты практического использования могут быть противоречивы. Быстрый разгон поршня до большого значения скорости приводит к резкому росту противодавления в выхлопной полости цилиндра, автоторможению и появлению ярко выраженного колебательного процесса [2].

При выборе структуры ударного ПА (кроме достижения максимальной скорости удара) необходимо добиваться режима работы, исключающего повторные удары по заготовке (импульсный удар), плавную (безударную) посадку поршня-клапана в седло при обратном ходе, а также минимальные затраты сжатого воздуха при срабатывании ПА. При выборе конструктивных параметров следует учитывать колебательный характер движения поршня, поэтому необходимо определение оптимальной координаты расположения заготовки, при которой реализуется максимальная скорость удара и определяется значение этой скорости.

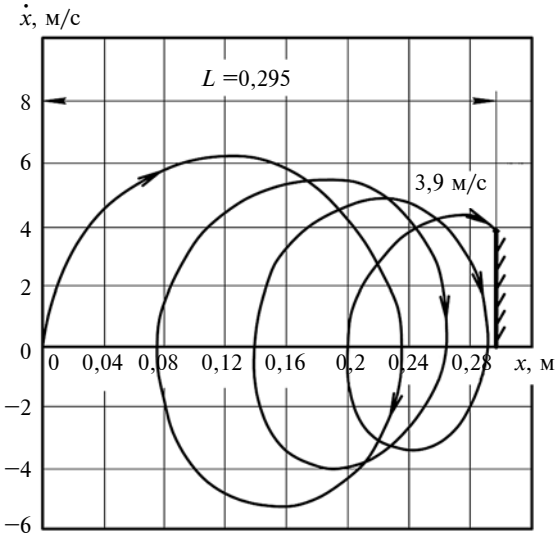


Рис. 2. Фазовая траектория рабочего органа ударного цилиндра при отсутствии заготовки (схема 1, *а*)

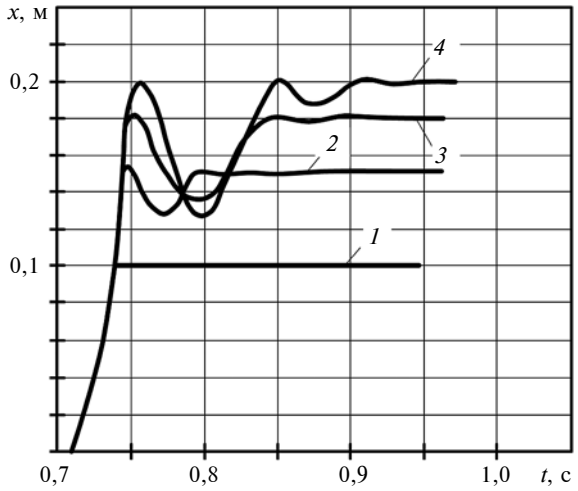


Рис. 3. Перемещение поршня при ударе при разных координатах положения заготовки *x (схема 1, *а*):**
1 — $x^* = 0{,}1$ м, $v = 6{,}1$ м/с; *2* — $x^* = 0{,}15$ м, $v = 6{,}42$ м/с; *3* — $x^* = 0{,}18$ м, $v = 6{,}13$; 2,35 м/с; *4* — $x^* = 0{,}2$ м, $v = 5{,}6$; 3,3; 1,03 м/с; x^* — координата расположения заготовки; v — скорость поршня

Колебательные процессы при стандартной схеме использования (см. рис. 1, *а*) происходят со смещением поршня в сторону крышки и при отсутствии заготовки приводят к сильному удару по крышке, что чаще всего влечёт за собой поломку пневмоцилиндра.

В качестве исследуемого объекта выбран цилиндр с $D_п = 0{,}16$ м, $d_с = 0{,}05$ м, длиной хода $L = 0{,}296$ м, ёмкостью аккумулятора $W_{01} = 4{,}5 \cdot 10^{-3}$ м^3 и массой подвижных частей 30 кг. Фазовая траектория для ПА с данными параметрами и исходной схемой подключения, представленной на рис. 1, *а*, демонстрирует, что при отсутствии заготовки неизбежен очень сильный удар по крышке (рис. 2).

Второй недостаток иллюстрирует рис. 3, где приведены кривые перемещения поршня при разных координатах расположения заготовки x^*. При значениях x^* от 0,14 м до 0,2 м наблюдаются повторные удары по заготовке, что недопустимо (например, при использовании данного привода в клеймовочных машинах).

Третьим существенным недостатком ПА, работающего по схеме на рис. 1, *а*, являются завышенные затраты сжатого воздуха, связанные с тем, что в процессе одного срабатывания полости цилиндра и аккумулятора полностью наполняются и опорожняются.

В значительной степени улучшить эти показатели можно при синхронизации работы цилиндра и пневмораспределителя (см. рис. 1, *б*, *в*, *г*).

При этом наиболее эффективны последние две схемы, обеспечивающие за счёт рационального управления контуром питания с тремя уровнями давления значительное снижение энергозатрат, а также улучшение других эксплуатационных характеристик. На рис. 4 представлены кривые потребления сжатого воздуха для ПА с разными структурами при ранее оговорённых параметрах пневмоцилиндра (*1* — для схемы 1, *а* (см. рис. 1); *2* — для схемы 1, *б* (см. рис. 1); *3* — для схемы 1, *в* (см. рис. 1); *4* — для схемы 1, *г* (см. рис. 1)).

Благодаря рациональной схеме управления ударным пневмоцилиндром (см. рис. 1, *в*, *г*)

удаётся вдвое сократить энергозатраты при сохранении практически той же энергетики удара [3].

Абсолютно безопасным становится срабатывание ПА, работающего по схеме на рис. 1, *в* или 1, *г* при отсутствии заготовки. Фазовая траектория рабочего органа, представленная на рис. 5, свидетельствует о быстро затухающих колебаниях поршня при смещении его в сторону седла с последующей мягкой посадкой в седло.

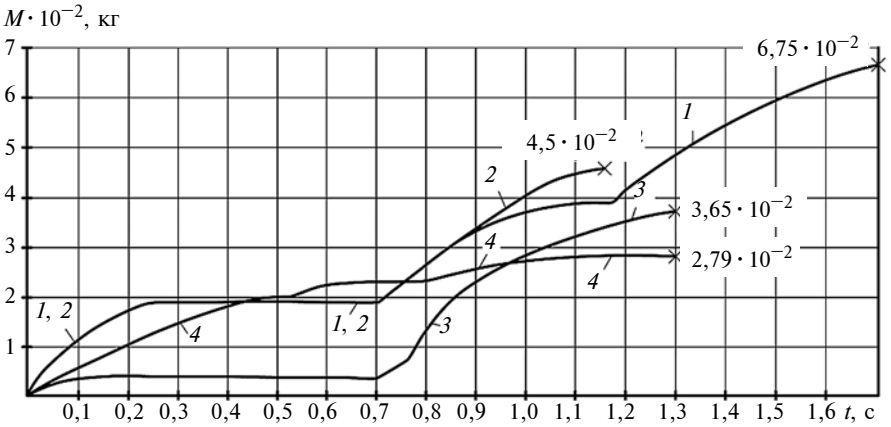


Рис. 4. Кривые потребления сжатого воздуха ударного пневмоагрегата с разными схемами управления

При определении аналитического выражения для координаты достижения максимальной скорости удара (x^*) и самой максимальной скорости удара (v^*) целесообразно использовать математическую модель ПА со встроенным резервуаром в безразмерной форме. При этом, в период работы ПА от момента разгерметизации поршня-клапана и седла до момента соприкосновения ударника с заготовкой ПА можно представить в виде обычного двустороннего пневмопривода с большими начальными объёмами рабочей и выхлопной полостей:

$$\frac{d\sigma_1}{d\tau} = \frac{k}{\lambda_{01} + \lambda}\,[\varphi(\sigma_1) - \sigma_1\upsilon];$$

$$\frac{d\sigma_2}{d\tau} = -\frac{k}{1 + \lambda_{02} - \lambda}\left[\frac{\Omega\sigma_2^{\frac{3k-1}{2k}}}{\Pi_{21}}\varphi\left(\frac{\sigma_a}{\sigma_2}\right) - \sigma_2\upsilon\right]; \quad (1)$$

$$\beta\frac{d\upsilon}{d\tau} = \sigma_1 - \Pi_{21}\sigma_2 - \chi.$$

Условие отрыва поршня от седла в безразмерной форме имеет вид:

$$\Pi_{21}\sigma_2^* + \chi = \sigma_1^*\varphi + (1 - \varphi)\sigma_a, \quad (2)$$

где $\sigma_1 = p_1/p_м$; $\sigma_2 = p_2/p_м$; $\sigma_a = p_a/p_м$ — безразмерные давления; $\lambda = x/L$, $\upsilon = \frac{v}{L}t_б$ — безразмерные координата и скорость поршня; L — польный ход поршня; $\tau = t/t_б$ — безразмерное время; $t_б = \frac{F_1 L}{f_1^э\sqrt{kRT_м}}$ — базовая единица времени; $f_1^э$ — эффективная площадь впускного тракта; $\sqrt{kRT_м}$ — скорость звука; $\varphi(\sigma)$ — расходная функция; $\chi = P_{тр}/(F_1 p_м)$ — параметр нагрузки; σ_1^*, σ_2^* — безразмерные значения давлений в аккумуляторе и выхлопной полости, при которых происходит разгерметизация; $\Pi_{21} = F_2/F_1$.

Критериями динамического подобия являются $\lambda_{01} = W_{01}/F_1 L$ — безразмерный объём встроенного резервуара; $\varphi_c = F_c/F_1$ — безразмерная площадь сопла; $\Omega = f_2^э/f_1^э$ — отношение эффективных площадей выпускного и впускного трактов; $\beta = mL/t_б^{2n}F_1 p_м$ — критерий инерционности (безразмерная масса).

Введём некоторые допущения. Первое допущение связано с тем, что после отрыва поршня от седла он быстро набирает большую скорость, вследствие чего массовый расход, обусловленный движением поршня, на порядок превосходит расход, поступающий в накопительную полость и уходящий из выхлопной полости [4]. Поэтому при работе ПА в этой фазе допустимо считать как рабочую, так и выхлопную полости

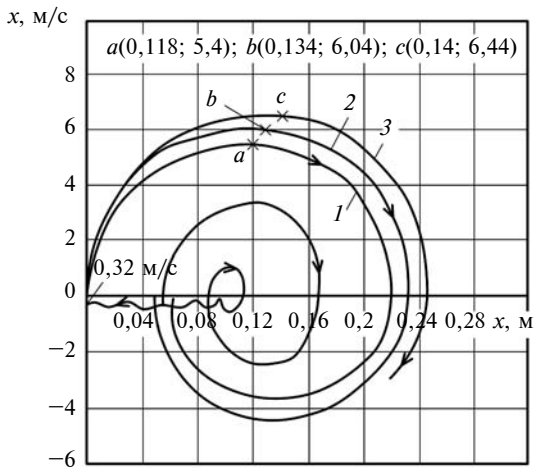


Рис. 5. Фазовые траектории рабочего органа ударного пневмоагрегата при отсутствии заготовки (см. рис. 1, *в*):
1 — $W_{01} = 2{,}5 \cdot 10^{-3}$; *2* — $W_{01} = 3{,}5 \cdot 10^{-3}$; *3* — $W_{01} = 4{,}5 \cdot 10^{-3}$

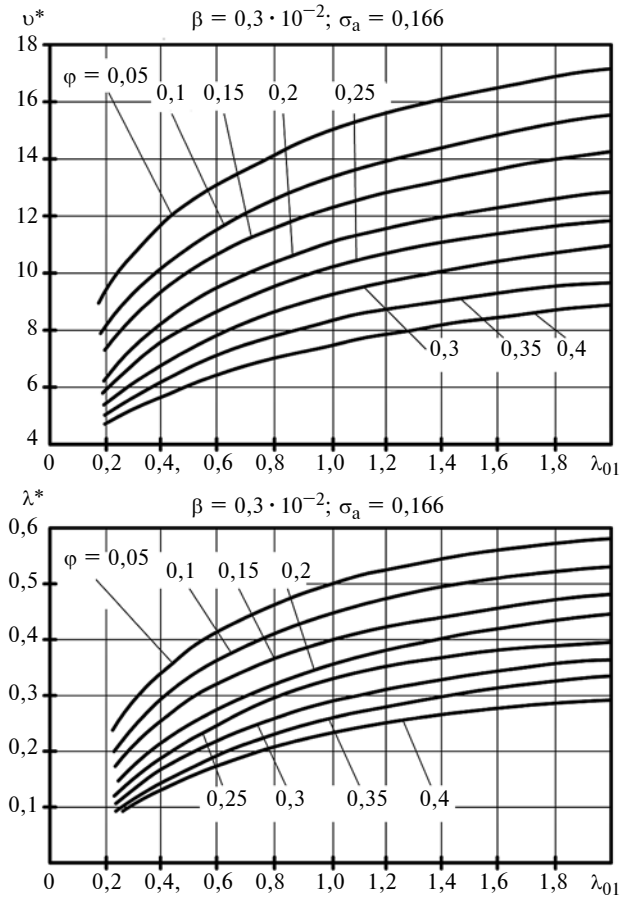


Рис. 6. Зависимость максимальной безразмерной скорости удара υ*, координаты реализации максимальной скорости λ* от критериев подобия λ_{01} и φ при $\sigma_a = 0{,}166$

замкнутыми. Интегрирование первых двух уравнений в этом случае приводит к уравнениям адиабатических процессов расширения и сжатия воздуха в рабочей и выхлопной полостях:

$$\begin{aligned}&\sigma_1(\lambda_{01}+\lambda)^k \cong \sigma_{1н}\lambda_{01}^k;\\&\sigma_2(1+\lambda_{02}-\lambda)^k \cong \sigma_{2н}(1+\lambda_{02})^k.\end{aligned} \tag{3}$$

Начальные значения безразмерных давлений в правых частях уравнений (3) соответственно равны:

$$\sigma_{1н} = 1^*;\ \sigma_{2н} = \varphi/\Pi_{21} + \frac{\sigma_a}{\Pi_{21}}(1-\varphi). \tag{4}$$

Координата поршня λ*, при которой будет наблюдаться максимальная скорость удара, находится из последнего уравнения системы (1) при $d\upsilon/d\tau = 0$:

$$\sigma_1 - \Pi_{21}\sigma_2 - \chi = 0. \tag{5}$$

Учитывая, что ударный цилиндр в качестве статической силы нагружен только силой трения, примем второе допущение: $\chi = 0$. Тогда из уравнения равновесия поршня (5) с учётом выражений (3) и (4) получим значение координаты поршня, при которой в колебательном процессе достигается максимальная скорость поршня:

$$\lambda^* = \frac{\{1-[\varphi+\sigma_a(1-\varphi)]^{1/k}\}(\lambda_{01}+\lambda_{02}\lambda_{01})}{\lambda_{01}+[\varphi+\sigma_a(1-\varphi)]^{1/k}(1+\lambda_{02})}. \tag{6}$$

Проинтегрируем последнее уравнение системы (1), перейдя от интегрирования по времени к интегрированию по пути и скорости, умножив для этого левую и правую части на $d\lambda$:

$$\beta\upsilon d\upsilon = (\sigma_1 - \Pi_2\sigma_2)d\lambda; \tag{7}$$

$$\beta\int_0^{\upsilon^*} d\left(\frac{\upsilon}{2}\right)^2 = \int_0^{\lambda^*}\sigma_1 d\lambda - \Pi_{21}\int_0^{\lambda^*}\sigma_2 d\lambda; \tag{8}$$

$$\upsilon^* = \sqrt{\frac{2}{\beta}\left(\int_0^{\lambda^*}\sigma_1 d\lambda - \Pi_{21}\int_0^{\lambda^*}\sigma_2 d\lambda\right)}, \tag{9}$$

где υ* — безразмерная скорость при координате поршня $\lambda = \lambda^*$; $\int_0^{\lambda^*}\sigma_1 d\lambda = \frac{\lambda_{01}}{k-1}\left[1-\left(\frac{\lambda_{01}}{\lambda_{01}+\lambda^*}\right)^{k-1}\right] = \Pi_р$ — потенциальная энергия расширения воздуха в рабочей полости; $\int_0^{\lambda^*}\sigma_2 d\lambda = \frac{1}{\Pi_{21}}[\varphi+\sigma_a(1-\varphi)] \times \frac{(1+\lambda_{02})}{(k-1)}\left[\left(\frac{\lambda_{02}+1}{\lambda_{02}+1-\lambda^*}\right)^{k-1}-1\right] = \Pi_с$ — потенциальная энергия сжатия воздуха в выхлопной полости.

В качестве базовой единицы работы для $\Pi_р$ и $\Pi_с$ используется значение $A_б = F_1 p_м L$.

Аналитическое выражение для определения максимальной скорости удара имеет вид:

$$\upsilon^* = \sqrt{\frac{2}{\beta}\left\{\frac{\lambda_{01}}{k-1}\left[1-\left(\frac{\lambda_{01}}{\lambda_{01}+\lambda^*}\right)^{k-1}\right] - [\varphi+\sigma_a(1-\varphi)]\frac{(1+\lambda_{02})}{(k-1)}\left[\left(\frac{\lambda_{02}+1}{\lambda_{02}+1-\lambda^*}\right)^{k-1}-1\right]\right\}}. \tag{10}$$

Связь скорости в размерном виде v^* с безразмерной скоростью υ^* имеет вид:

$$v^* = \frac{f_1^э a_м}{F_1}\upsilon^*. \quad (11)$$

Ввиду громоздкости системы уравнений (6) и (10) для расчёта целесообразно использовать графики-номограммы, на которых приведены зависимости $\lambda^* = f(\lambda_{01}, \varphi)$ и $\upsilon_0^* = f(\lambda_{01}, \varphi, \beta)$ (рис. 6).

На значение максимальной безразмерной скорости υ^*, кроме указанных выше критериев подобия λ_{01} и φ, существенно влияет критерий пропорциональности β. Однако ввиду того, что функциональная связь $\upsilon_0^* = f(\beta)$ носит простейший характер, можно ограничиться графиком на рис. 6 и осуществить пересчёт по формуле:

$$\upsilon^* = \upsilon_0^*\left(\frac{\beta}{\beta_0}\right)^{-1/2}, \quad (12)$$

где υ_0^* — значение, взятое из графика на рис. 6 при известных λ_{01} и φ; $\beta_0 = 0{,}3 \cdot 10^{-3}$ — критерий инерционности, при котором получен график на рис. 6; β — заданное значение критерия инерционности.

Ввиду того, что условие разгерметизации (2) представляет собой уравнение с двумя неизвестными, существует множество значений σ_1^* и σ_2^*, при которых происходит отрыв поршня от седла. Наиболее рациональное соотношение параметров, при которых максимально быстро достигается значение $\sigma_{1н} = 1$, можно получить при совместном решении уравнений заполнения и опорожнения аккумулятора и выхлопной полости с учётом уравнения равновесия (2).

Используя известные интегральные зависимости для времени опорожнения и заполнения [1], перейдя к безразмерной форме записи и аппроксимируя некоторые сложные выражения более простой формой их записи, получим значение относительной эффективной площади выхлопного тракта Ω^*, при котором достигается максимальный перепад давления $\sigma_1^* - \sigma_2^* = 1 - \sigma_{2н}$ при разгерметизации поршня применительно к схеме на рис. 1, *г*:

$$\Omega^* = \frac{6{,}346}{\lambda_{01}\sigma_a^{0{,}143}} \times$$
$$\times\left[\left(0{,}785 + \frac{0{,}25\Pi_{21} - \sigma_a}{\varphi + \sigma_a - \varphi\sigma_a - \chi}\right) - \left(\frac{\sigma_a}{\sigma_k}\right)^{0{,}142}\right], \quad (13)$$

где $\sigma_k = p_k/p_м$ — безразмерное давление настройки редукционного клапана (см. рис. 1, *г*).

Исходя из представленных на рис. 7 графиков, для ПА с указанными выше параметрами наиболее рациональным является $\Omega = 1{,}2$ и $\varphi = 0{,}05$. Барохронная и динамическая диаграммы на рис. 8, полученные при этих условиях, свидетельствуют о том, что при координате расположения заготовки $x = 0{,}1$ м удаётся добиться максимального при заданных массогабаритных характеристиках ПА перепада давления на поршне в момент разгерметизации $p_1 - p_2 = 0{,}48$ МПа, что обеспечивает максимальную скорость удара $v^* = 6{,}63$ м/с.

Предложенная схема управления ударным пневмоцилиндром позволяет значительно улучшить все наиболее важные эксплуатационные показатели ПА: степень энергетического совершенства, долговечность за счёт безударной посадки поршня в седло при обратном ходе, снижение брака при выполнении ударных операций

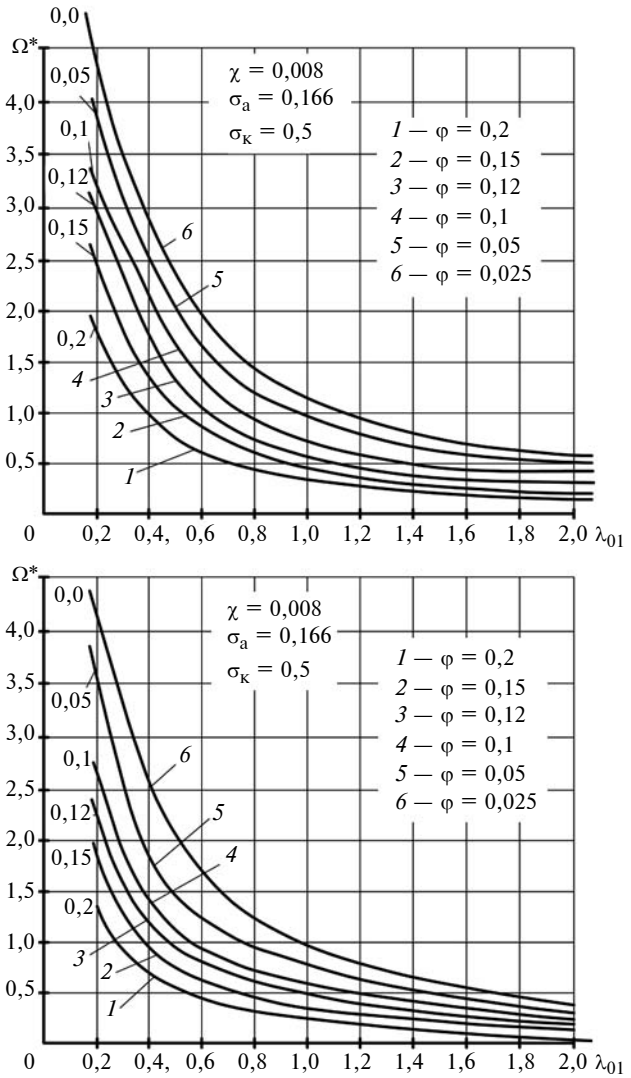


Рис. 7. Значение $\Omega(\lambda_{01}, \varphi)$, обеспечивающее максимальный перепад давления на поршне в момент отрыва поршня от седла

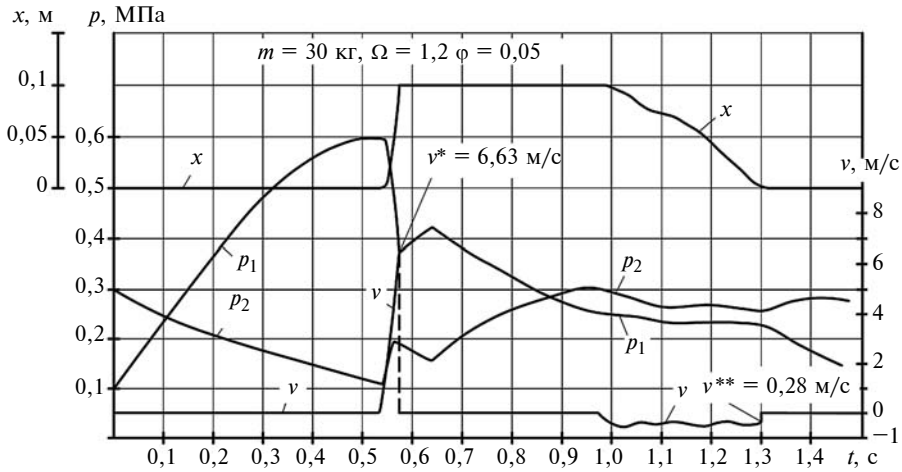


Рис. 8. Барохронная и динамическая диаграмма ударного пневмоагрегата при рациональном значении φ и Ω

в результате отсутствия повторных ударов, степень безопасности вследствие безударного срабатывания при отсутствии заготовки. Предложенная инженерная методика расчёта кинематических параметров ударного ПА основана на нормировании математической модели с выделением минимального количества критериев динамического подобия и представлена в виде аналитических зависимостей и графиков-номограмм. Представлена также методика выбора ряда параметров ПА, обеспечивающих наиболее эффективную реализацию работоспособности сжатого воздуха без изменения массогабаритных параметров ПА. Всё это делает практическое использование ударных ПА со встроенным резервуаром полностью предсказуемым, значительно более экономным и эффективным.

Библиографические ссылки

1. **Герц Е.В.** Динамика пневматических приводов машин-автоматов. М.: Машиностроение, 1964. 235 с.

2. **Крутиков Г.А., Вурье Б.А.** Ударный пневмопривод для холодного клеймения металла // Автоматизация и современные технологии. 1995. № 10. С. 3—6.

3. **Атаманов Ю.Л., Крутиков Г.А., Стрижак М.Г.** Повышение экономичности ударных пневмоагрегатов за счёт рационального управления контуром питания // Інтегровані технології та енергозбереження. 2013. № 4. С. 51—59.

4. **Перельцвайг М.И.** Исследование динамики ударного пневматического поршневого привода // Анализ и синтез машин-автоматов. М.: Наука, 1964. С. 164—170.

УДК 625.30

В.И. Кычкин, канд. техн. наук, доц., **А.В. Кычкин**, канд. техн. наук, доц.
(Пермский национальный исследовательский политехнический университет)
aleksey.kychkin@gmail.com

УПРАВЛЕНИЕ МОБИЛЬНЫМ КОМПЛЕКСОМ ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ДОРОЖНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Предложен метод управления мобильным комплексом для автоматизации технологического процесса непрерывного измерения коэффициента сцепления колеса автомобиля с поверхностью дороги. Разработаны структура мобильного комплекса и алгоритм управления. Показаны результаты исследования показателей качества измерений.

Ключевые слова: мобильный комплекс, управление, автоматизация, измерение, коэффициент сцепления, электромагнитная порошковая муфта.

The mobile complex control method for continuous measurement technological process automation of the car wheel with a road surface cohesion coefficient is offered. The structure of a mobile complex and algorithm of management are developed. Research results of measurements quality indices are shown.

Key words: mobile complex, management, automation, measurement, cohesion coefficient, electromagnetic powder coupling.

Введение. В настоящее время проблемами эксплуатации автомобильного транспорта являются высокая аварийность, рост энергопотребления, экология, неэффективность затрат на проектирование, строительство и эксплуатацию дорог, что указывает на необходимость выпол-

нения положений "О техническом регулировании" [1], "Рекомендации" [2] для обеспечения минимальных рисков несоответствия транспортно-эксплуатационных показателей требуемым.

В "Правилах" [3], в частности, указан ГОСТ 30413—96, в соответствии с которым диагностика состояния поверхности автомобильных дорог выполняется по параметрам сцепных качеств покрытия. Однако специалисты отрасли указывают на необходимость совершенствования существующих технологических процессов дорожных измерений и разработку перспективных автоматизированных комплексов [4—6]. Автоматизация измерения и контроля параметров открывает новые возможности для повышения качества технологических процессов [7, 8].

Поэтому актуальной задачей при создании современных технологий для дорожных измерений является разработка метода управления мобильными комплексами для автоматизации технологических процессов измерения параметров, характеризующих сцепление колеса автомобиля с дорожным покрытием.

Мобильный комплекс для автоматизации технологических процессов измерения коэффициента сцепления колеса автомобиля с дорожным покрытием как объект управления. Задача управления мобильным комплексом [9] для автоматизации измерения коэффициента сцепления может быть сведена к математической модели прямолинейного движения подвижного объекта по горизонтальной поверхности. Комплекс состоит из свободно катящегося и измерительного колеса с редуктором, муфтой сцепления и тормозным устройством на основе электромагнитной порошковой муфты (ЭПМ), управляемой цифровым электронным блоком [10—12] (рис. 1).

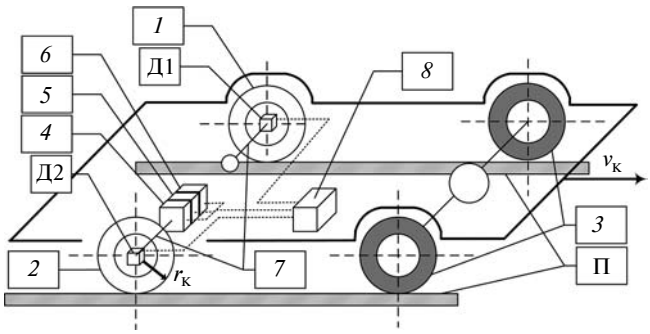


Рис. 1. Мобильный комплекс для автоматизации дорожных измерений:
1 — свободно катящееся колесо; *2* — измерительное колесо; *3* — ведущие колеса; *4* — редуктор; *5* — муфта сцепления; *6* — ЭПМ; *7* — полуоси; *8* — цифровой электронный блок управления; Д1, Д2 — датчики оборотов; П — поверхность дороги; $v_к$ — скорость движения мобильного комплекса

Система уравнений, описывающая процессы в режиме торможения измерительного колеса, запишется в виде:

$$\begin{cases} ma = -\gamma mg - \varphi mg; \\ J_к\delta = \varphi m r_к g - M_т; \\ M_т = C_u U; \\ \varphi = kU; \\ S = (\omega_1 - \omega_2)/\omega_2, \end{cases} \quad (1)$$

где a — ускорение центра масс колеса; m — масса колеса; γ и φ — коэффициенты сопротивления качения колеса и сцепления; $J_к$ — момент инерции колеса; δ — угловое ускорение колеса; $r_к$ — радиус колеса, равный динамическому радиусу колеса; $M_т$ — тормозной момент, прикладываемый к колесу со стороны ЭПМ; U — управляющее воздействие; C_u и k — коэффициенты пропорциональности; g — ускорение свободного падения; ω_1 и ω_2 — угловые скорости вращения колёс *1* и *2*; S — скольжение.

Цель управления мобильным комплексом заключается в автоматическом переводе измерительного колеса в состояние, при котором реализуется заданное скольжение, созданием тормозного момента с использованием ЭПМ и регистрацией косвенных параметров, позволяющих рассчитывать коэффициент сцепления.

Решение системы уравнений (1) предполагает получение законов изменения линейной и угловой скоростей колеса во времени при нелинейных характеристиках коэффициента сцепления от скольжения при воздействии тормозного момента ЭПМ и является сложной процедурой, так как ряд параметров динамического процесса не доступны измерению и требуют специального анализа информации.

Воспользуемся структурой второго уравнения системы (1), предварительно составив уравнение баланса энергии для рассматриваемой схемы мобильного комплекса. Принимая допущение, что энергия ведомых колес *1* и *2* при отключённом тормозном устройстве одинакова и передаточном коэффициенте редуктора равном 1, запишем:

$$\int_0^t M_1\omega_1 dt - \Pi_1 =$$

$$= \int_0^t M_2\omega_2 dt - \int_0^t M_т(\omega_0 - \omega_2)dt - \frac{J_к\omega_2^2}{2} - \Pi_2, \quad (2)$$

где M_1 и M_2 — вращающие моменты на свободно катящемся и измерительном колёсах; $M_т$ — тормозной момент; ω_0 — угловая скорость ведущей части ЭПМ;

t — время измерения; Π_1 и Π_2 — энергетические потери в зоне контакта шин с покрытием дороги и в механических передачах комплекса [12].

Дифференцируя выражение (2) по времени, получим уравнение мощности:

$$M_1\omega_1 - \frac{\partial \Pi_1}{\partial t} = $$

$$= M_2\omega_2 - M_т(\omega_0 - \omega_2) - J_к\omega_2\delta - \frac{\partial \Pi_2}{\partial t}, \qquad (3)$$

где $\omega_0 = 0$ при заблокированной ведущей части ЭПМ.

Принимая во внимание зависимость моментов от коэффициентов сцепления, представим соотношение (3) в виде:

$$\varphi_1 Pr_к\omega_1 - \Delta N_1 =$$
$$= \varphi_2 Pr_к\omega_2 + M_т\omega_2 - J_к\omega_2\delta - \Delta N_2, \qquad (4)$$

где P — нормальная нагрузка на колесо мобильного комплекса; ΔN_1 и ΔN_2 — потери мощности.

Преобразуем соотношение (4) к виду:

$$Pr_к(\varphi_1\omega_1 - \varphi_2\omega_2) - \Delta N_1 = M_т\omega_2 - J_к\omega_2\delta - \Delta N_2. \qquad (5)$$

Обозначив отношение $\varphi_2/\varphi_1 = k$, получим:

$$\varphi_1 Pr_к(\omega_1 - k\omega_2) - \Delta N_1 = M_т\omega_2 - J_к\omega_2\delta - \Delta N_2. \qquad (6)$$

Представим потери энергии в виде [12]:

$$\Delta N_1 = \varphi_1\sigma K_\upsilon B\omega_1 \frac{1}{r_к} a^3; \ \Delta N_2 = \varphi_2\sigma K_\upsilon B\omega_2 \frac{1}{r_к} a^3. \qquad (7)$$

После подстановки получим:

$$\varphi_1 Pr_к \frac{\omega_1 - k\omega_2}{\omega_2} =$$

$$= M_т - J_к\delta + \sigma K_\upsilon B \frac{1}{r_к} a^3 \frac{(\varphi_1\omega_1 - \varphi_2\omega_2)}{\omega_2} \qquad (8)$$

или

$$\varphi_1 \frac{\omega_1 - k\omega_2}{\omega_2}\left(Pr_к - \sigma K_\upsilon B \frac{1}{r_к} a^3\right) = M_т - J_к\delta. \qquad (9)$$

Из выражения (9) определим значение коэффициента сцепления φ_1. При этом необходимо задавать значение отношений коэффициентов сцепления k для реальной зависимости коэффициента сцепления от скольжения, имеющей максимум. Кроме того, необходимо измерять количество оборотов или угловые скорости колёс комплекса.

Принимаем, что оба колеса движутся по однородной поверхности дорожного полотна, тогда $\frac{\varphi_1}{\varphi_2} \approx 1$, и пренебрегая потерями, выражение (9) запишем в виде:

$$\varphi_1 \frac{\omega_1 - \omega_2}{\omega_2} Pr_к = M_т - J_к\delta. \qquad (10)$$

Выражение для определения коэффициента сцепления для двух колёс будет иметь вид:

$$\varphi_{1,2} = \frac{M_т - J_к\delta}{Pr_к S}.$$

Момент, передаваемый муфтой, запишем в виде:

$$M_т = C_u\left(U_y + T_м \frac{\partial U_y}{\partial t}\right), \qquad (11)$$

где C_u — коэффициент пропорциональности, зависящий от тока ЭПМ; U_y — напряжение возбуждения ЭПМ; $T_м$ — постоянная времени муфты.

Коэффициент пропорциональности C_u определяется статическими испытаниями ЭПМ. В качестве примера рассмотрена ЭПМ типа БПМ-20. Результаты испытаний ЭПМ в статическом режиме приведены на рис. 2, где $G_{гр}$ — масса тарировочного груза, формирующего вращающий момент на ведомом валу ЭПМ; U — напряжение на катушке управления, создающее предельное тормозное усилие, соответствующее прикладываемому моменту.

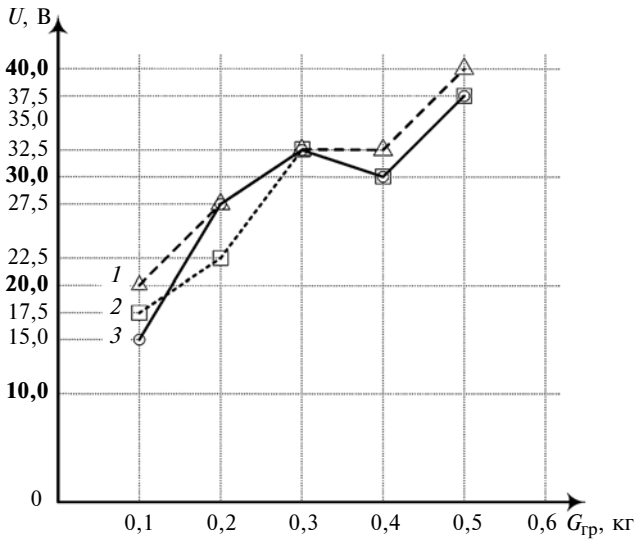


Рис. 2. Статическая характеристика БПМ-20:
1, 2, 3 — результаты испытаний ЭПМ

Метод управления мобильным комплексом и оценка точности измерений. На участке дорожного полотна, на котором необходимо провести измерения коэффициента сцепления в автоматизированном режиме при заданной скорости движения мобильного комплекса, блок управления выдает команды на катушку управления ЭПМ, соответствующие программе задания уровня скольжения, который определяется измерением количества оборотов свободно катящегося и измерительного колес. При этом уровень напряжения на катушке устанавливается пропорциональным тормозному моменту, обеспечивающему задаваемое по технологии скольжение. Временны́е диаграммы управления мобильным комплексом представлены на рис. 3.

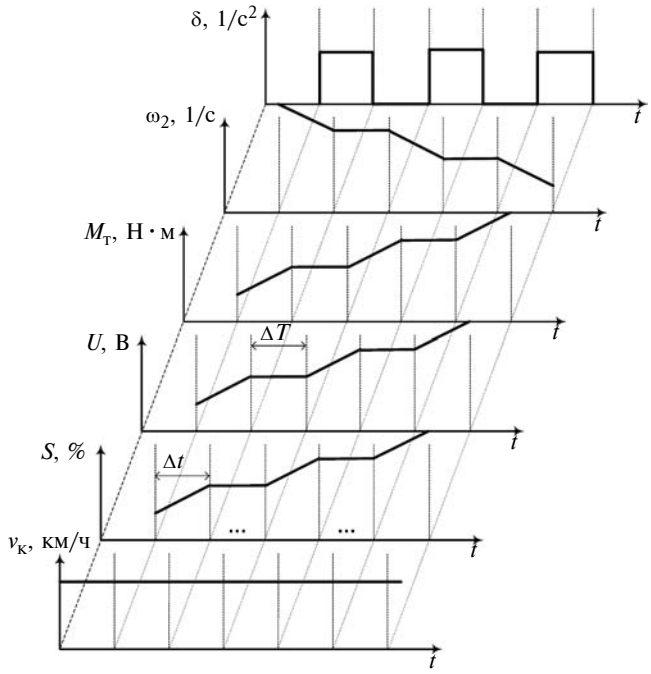


Рис. 3. Временны́е диаграммы управления мобильным комплексом:
Δt — интервал времени переходного процесса; ΔT — время установившегося движения измерительного колеса в режиме скольжения

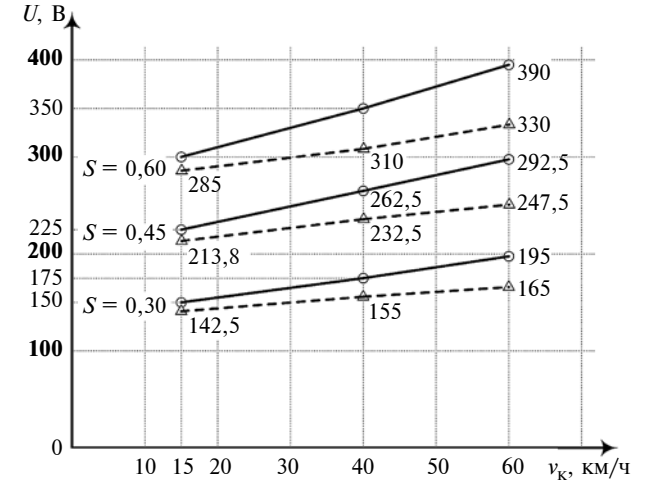


Рис. 4. Зависимость напряжения управления от скорости мобильного комплекса при Δt = 0,5 с (сплошная линия) и Δt = 1 с (пунктирная линия)

Для получения необходимой выборки результатов измерений коэффициента сцепления необходимо достаточное количество точек контроля на протяжённом участке дорожного полотна. Например, при скорости движения мобильного комплекса $v_К$ = 60 км/ч и времени измерения t = 6 с наименьшее расстояние составляет 100 м.

Метод управления обеспечивает отсутствие блокировки измерительного колеса при реальном состоянии дорожной поверхности, скорости движения мобильного комплекса и может учитывать другие факторы, например температуру и влажность окружающей среды.

Управление мобильным комплексом при разных скоростях движения позволяет определить уровень подаваемого напряжения на катушку намагничивания ЭПМ. При этом с ростом скорости управляющее напряжение возрастает и зависит от требуемого скольжения измерительного колеса. Напряжения управления катушкой ЭПМ в зависимости от скорости движения мобильного комплекса приведены на рис. 4.

Точность измерений коэффициента сцепления рассматриваемого метода управления мобильным комплексом оценена абсолютной погрешностью косвенных измерений $\Delta\varphi$ и является функцией абсолютных погрешностей прямых измерений [13]:

$$\Delta\varphi = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial a}\right)^2 \Delta a^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial b}\right)^2 \Delta b^2 + \ldots}, \qquad (12)$$

где $\frac{\partial f}{\partial a}$; $\frac{\partial f}{\partial b}$; ... — частные производные функций f по переменным a, b.

При принятых абсолютных значениях погрешностей входящих величин, представленных в таблице, получим абсолютную погрешность

$v_К$, км/ч	$\Delta M_Т$, кг · м	$\Delta J_К$, кг · м²	$\Delta r_К$, м	ΔS	ΔP, Н	$\Delta\delta$, м/с²	$\Delta\varphi$
15	0,075	0,00045	0,005	0,0015	5	0,833	0,042
40	0,087	0,00045	0,005	0,0015	5	2,222	0,052
60	0,097	0,00045	0,005	0,0015	5	3,333	0,062

косвенных измерений коэффициента сцепления для расчётных параметров $S = 0{,}3$; $\Delta t = 0{,}5$ с и $P = 500$ Н.

Заключение. Совершенствование технологических процессов в дорожных измерениях требует применения современных программно-аппаратных средств, мобильных измерительных комплексов, методов и алгоритмов управления средствами автоматизации, включая создание перспективных технологий.

Предложенный вариант автоматизации технологии измерения основан на применении управляемого тормозного устройства с помощью ЭПМ, позволяющего проводить необходимые измерительные и тарировочные процедуры для определения коэффициента сцепления колеса транспортного средства с дорожным покрытием.

На основании приведённых исследований можно рекомендовать к практическому применению метод управления автоматизированным комплексом с установленными основными параметрами для дальнейшего проектирования интеллектуальных устройств в технологиях диагностики автомобильных дорог [9, 14].

Библиографические ссылки

1. **Федеральный закон** № 184-ФЗ "О техническом регулировании". [Электронный ресурс]. URL: http://www.consultant.ru/popular/techreg. (Дата обращения 20.12.2013).

2. **Отраслевой** дорожный методический документ ОДМ 218.1.001—2005 "Рекомендации по разработке и применению документов технического регулирования в сфере дорожного хозяйства". [Электронный ресурс]. URL: http://www.gosthelp.ru/text/ODM21810012005Rekomendaci.html. (Дата обращения 20.12.2013).

3. **Отраслевые** дорожные нормы ОДН 218.0.006—2002 "Правила диагностики и оценки состояния автомобильных дорог. Основные положения". [Электронный ресурс]. URL: http://www.bestpravo.ru/rossijskoje/so-gosudarstvo/g3w.htm. (Дата обращения 20.12.2013).

4. **Кузнецов Ю.В.** Для контроля скользкости // Автомобильные дороги. 2013. № 10. С. 89—94.

5. **Немчинов М.В.** Ещё раз о качестве // Автомобильные дороги. 2013. № 2 (975). С. 74—77.

6. **Шалобаев Е.В.** Об интеллектуальном управлении мехатронными системами // Датчики и системы. 2002. № 2. С. 8—12.

7. **Нестеров А.В., Мусолин А.К.** Автоматизация процессов измерения и контроля ширины зазора при промышленном производстве фильтрующих элементов // Автоматизация и современные технологии. 2013. № 12. С. 2—7.

8. **Яцун С.Ф., Мальчиков А.В.** Автоматизированный мобильный комплекс для диагностики трубопроводов переменного диаметра // Автоматизация и современные технологии. 2012. № 12. С. 3—8.

9. **Кычкин В.И., Кычкин А.В., Юшков В.С.** Принципы проектирования мобильных лабораторий и вибродиагностика состояния автомобильных дорог // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Охрана окружающей среды, транспорт, безопасность жизнедеятельности. 2010. № 1. С. 82—92.

10. **Кычкин В.И., Пугин К.Г., Кычкин А.В.** Устройство для определения коэффициента сцепления колеса транспортного средства с дорожным и аэродромным покрытием // Патент России № 2379408 РФ. Бюл. 2010. № 2.

11. **Кычкин В.И., Кычкин А.В., Болотов Д.А.** Устройство для измерения коэффициента сцепления колеса транспортного средства с дорожным и аэродромным покрытием // Патент России № 2415990 РФ. Бюл. 2011. № 10.

12. **Кычкин В.И., Кычкин А.В., Болотов Д.А.** Прибор для оценки сцепных качеств дорожных покрытий на основе нечёткой логики // Мехатроника, автоматизация, управление. 2008. № 11. С. 19—23.

13. **Белов Л.Е., Бондаренко Т.А.** Определение потерь мощности на трение в области контакта пневматического колеса // Исследование и испытание дорожных и строительных машин: Сб. науч. тр. СибАДИ. Вып. 3. Омск, 1972. С. 199—205.

14. **Старинская Н.Б.** Элементы теории погрешностей. М.: МАИ. 1975. 64 с.

Вниманию авторов!

Требования к оформлению статей, присылаемых для публикации,

можно найти на сайте **www.mashin.ru**

УДК 62-52

А.Г. Бурцев, канд. техн. наук., доц., **В.И. Капля**, канд. техн. наук., доц.,
В.А. Носенко, д-р техн. наук., проф.
(Волжский политехнический институт (филиал)
Волгоградского государственного технического университета)
burtsev-86@mail.ru

УПРАВЛЕНИЕ МОМЕНТАМИ ВКЛЮЧЕНИЯ ПЕЧНЫХ УСТАНОВОК ЦИКЛИЧЕСКОГО ДЕЙСТВИЯ

Предложено решение задачи об обеспечении заданного энергопотребления группы печных установок в контрольные моменты времени за счёт выбора оптимального времени включения печей в работу. Разработана математическая модель данной задачи в виде системы нелинейных уравнений, учитывающих требуемое значение лимита электроэнергии в контрольные моменты времени. Решение составленной системы уравнений получено численным методом Левенберга—Марквардта. Проведено тестирование алгоритма на наборе исходных данных. Анализ полученного решения показал, что рассчитанные моменты старта печей оптимальны и позволяют выполнить требуемый лимит электроэнергии в каждом контрольном временном интервале.

Ключевые слова: печная установка, система нелинейных уравнений, метод Левенберга—Марквардта.

The task solution for the set power consumption ensuring of the oven installations group in control time moments through the choice of the furnaces engaging optimum time is proposed. This task mathematical model in the form of the nonlinear equations system considering demanded value of the electric power limit in the control time moments is developed. The decision of the worked out equations system is received by Levenberga-Markvardt's numerical method. Algorithm testing via a basic data set is conducted. The analysis of the received decision showed that the calculated moments of the furnaces start are optimum and allow to fulfill a demanded limit of the electric power in each control time interval.

Key words: furnace installation, the nonlinear equations system, Levenberga-Markvardt's method.

Работа электрических печных установок циклического действия характеризуется наличием последовательных этапов плавильного процесса: загрузка печи, включение в работу, набор заданного уровня потребляемой мощности, плавка на заданной мощности, выключение и разбор печи [1].

Параллельная работа группы печных установок (ПУ) характеризуется суммарной потребляемой мощностью. Суммарное среднечасовое потребление электроэнергии (ССПЭ) является учётным параметром, который должен находиться в жёстко установленных пределах. Основными возмущающими воздействиями по отношению к нему являются события старта новых печей, сопровождающиеся скачком мощности, и события отключения печей, вызывающие её падение.

Технологический режим плавки предполагает поддержание требуемого уровня мощности и обеспечение заданного ССПЭ, определяющего длительность плавки [1]. В итоге основным параметром, влияющим на среднечасовое энергопотребление, является управление временем старта процесса плавки. Расчёт точного времени старта позволяет выполнить требуемое ССПЭ, компенсируя провалы мощности в суммарном энергопотреблении.

Задача расчёта моментов старта усложняется тем, что период набора мощности "молодыми" печами занимает, как правило, несколько часов и оптимальное время старта новой печи может быть рассчитано только с учётом предыстории предыдущих стартов и прогноза будущей ситуации. Кроме того, из-за меняющихся условий в течение контрольного интервала времени (часа), задачу необходимо решать периодически для минимизации ошибки управления. Это обуславливает необходимость разработки алгоритма решения задачи средствами вычислительной техники.

Проблема централизованного управления группой электропечей рассмотрена в ряде публикаций. В работе [2] предложена экспертная система, управляющая группой печей на основе нечётких алгоритмов и минимизируемого функционала качества. Предложены общие подходы к задаче оптимального управления группой печей с использованием обучаемых моделей. В работе [3]

рассматривается задача оптимального планирования включения печей в работу для снижения нагрузки на питающую сеть при соблюдении технологического режима плавки.

Математическая модель задачи составлена, исходя из условия минимального отклонения ССПЭ от требуемого значения в контрольные моменты времени. Среднее время набора мощности до планового уровня составляет N. Это время принято за длительность интервала прогнозирования системой моментов включения печных установок. Контрольными моментами времени можно считать последнюю минуту каждого часа, если контролю подлежит среднечасовое энергопотребление. Длительность контрольных интервалов может быть иной, но на общность результатов это не влияет.

Величина потребления электрической энергии складывается из двух составляющих: мощности потребляемой ранее включёнными печами и мощности, которую потребят вновь включаемые печи. Будем считать, что выключение печей, закончивших плавку, учитывается в первой составляющей в виде определённого снижения уровня потребляемой энергии. Величина снижения потребляемой энергии пропорциональна мощности выключаемой печи и интервалу времени между моментами выключения и очередным контрольным моментом. Требование нулевых значений отклонений потребляемой электроэнергии от заданного лимита в каждый контрольный момент времени позволяет получить следующую систему уравнений:

$$\begin{cases} Wp(tc_1) + \sum\limits_{k=1}^{m} Wh(tc_1, ts_k) - L(tc_1) = 0 \\ \ldots \\ Wp(tc_N) + \sum\limits_{k=1}^{m} Wh(tc_N, ts_k) - L(tc_N) = 0, \end{cases} \quad (1)$$

где $tc_{1,\ldots,N}$ — вектор контрольных моментов времени; $ts_{1,\ldots,m}$ — искомый вектор моментов старта печей; $Wp(tc_N)$ — прогноз ССПЭ на момент времени tc_N с учётом печей заканчивающих плавку; $Wh(tc_N, ts_m)$ — прогноз среднечасового выбора печи на контрольный момент tc_N, стартовавшей в момент времени ts_m; $L(tc_N)$ — заданное значение лимита электроэнергии на N-й временной интервал.

Систему (1) целесообразно представить в компактном обобщённом виде:

$$\{f(tc_1, ts) = 0; f(tc_2, ts) = 0; \ldots; f(tc_n, ts) = 0\}. \quad (2)$$

Решением данной системы уравнений являются искомые m моментов старта новых печей. Условие однозначности решения заключается в равенстве контрольных моментов времени и искомых моментов старта печей ($m = N$).

Вид функции $Wh(t, ts)$ определяется аппроксимирующей функцией $P(t, ts)$, принятой для моделирования роста мощности в начале плавки и после достижения планового уровня. Линейная аппроксимация динамики роста активной мощности печи записывается в виде

$$P(t, ts) = Ps + dP(t - ts),$$

где Ps, dP определяются по экспериментальным данным плавок.

Принятая модель используется для вычисления функции выбора электроэнергии печи $W(t, ts)$ в произвольный момент времени внутри n-часового интервала:

$$W(t, ts) = \int\limits_{-\infty}^{t} P(t^*, ts)dt^*.$$

Величина потреблённой электроэнергии между смежными контрольными моментами времени вычисляется по формуле:

$$Wh(tc_i, ts) = \frac{W(tc_i, ts) - W(tc_{i-1}, ts)}{tc_i - tc_{i-1}}.$$

Уравнения системы (2) являются нелинейными относительно неизвестных ts, так как, в случае линейной модели, они входят в уравнения системы во второй степени. Решение системы нелинейных уравнений (СНУ) (2) может быть получено численным методом Левенберга—Марквардта, который обладает быстрой сходимостью и не требует вычисления матрицы вторых производных [4].

Поиск решения описывается следующим рекуррентным соотношением:

$$ts^{\langle i+1\rangle} = \\ = ts^{\langle i\rangle} - (J(ts^{\langle i\rangle})^T J(ts^{\langle i\rangle}) + \lambda I)^{-1} J(ts^{\langle i\rangle})^T R(ts^{\langle i\rangle}), \quad (3)$$

где $R(ts^{\langle i\rangle}) = \{f(tc_1, ts^{\langle i\rangle}) f(tc_2, ts^{\langle i\rangle}) \ldots f(tc_N, ts^{\langle i\rangle})\}^T$ — вектор невязок системы; $ts^{\langle i\rangle}$ — вектор i-го приближения к решению системы нелинейных уравнений; $J(ts^{\langle i\rangle})$ — матрица Якоби, образованная множеством первых производных от уравнений системы; I — единичная матрица $N \times N$; λ — параметр метода; i — номер итерации.

Матрица Якоби для рассматриваемой системы уравнений имеет вид:

$$J(tc, ts) = \begin{bmatrix} \frac{df(tc_1, ts)}{dts_1} & \frac{df(tc_1, ts)}{dts_2} & \cdots & \frac{df(tc_1, ts)}{dts_N} \\ \frac{df(tc_2, ts)}{dts_1} & \frac{df(tc_2, ts)}{dts_2} & \cdots & \frac{df(tc_2, ts)}{dts_N} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ \frac{df(tc_N, ts)}{dts_1} & \frac{df(tc_N, ts)}{dts_2} & \cdots & \frac{df(tc_N, ts)}{dts_N} \end{bmatrix}.$$

Параметр λ корректируется на каждом шаге алгоритма в зависимости от состояния вектора невязок системы R [5]. Алгоритм решения СНУ методом Левенберга—Марквардта представлен на рис. 1.

Тестирование алгоритма проведено для $N = 4$ ч (240 мин) интервала и следующего набора исходных данных:

$$L = \begin{pmatrix} Lim \\ Lim \\ Lim \\ Lim \end{pmatrix}; \Delta Wp = \begin{pmatrix} -15 \\ -30 \\ -60 \\ -100 \end{pmatrix};$$

$$tc = \begin{pmatrix} \Delta T \\ 2\Delta T \\ 3\Delta T \\ 4\Delta T \end{pmatrix}; ts_0 = \begin{pmatrix} 1/2\Delta T \\ 3/2\Delta T \\ 5/2\Delta T \\ 7/2\Delta T \end{pmatrix};$$

$Wp = L + \Delta Wp$; $\Delta T = 60$; $Lim = 1000$.

Значения векторов ts и tc заданы в минутах. Искомыми неизвестными системы уравнений являются $m = 4$ момента старта печей. Полученное решение представлено на рис. 2.

Решение системы: $ts_1 = 6$; $ts_2 = 99$; $ts_3 = 155$; $ts_4 = 209$ — рассчитанные моменты старта печей в минутах. В контрольные моменты времени $\{tc_i\}$ линия графика W касается линии графика Lim (см. рис. 2). Это означает, что система уравнений решена верно, и моменты старта печей рассчитаны оптимально.

На рис. 3 приведены зависимости каждой из компонент невязки (рис. 3, *а*) и суммы квадратов невязок (рис. 3, *б*) как функции от момента старта второй печи ts_2, в то время как остальные переменные соответствуют полученному оптимальному решению. Из рис. 3 видно, что существует только одно оптимальное решение, когда невязка равна нулю (при $t = 99$ мин). Это соответствует полученному ранее решению СНУ (1). Резкие скачки в графиках приходятся на начало каждого часа и обусловлены ступенчатым изменением прогноза Wp на очередной час.

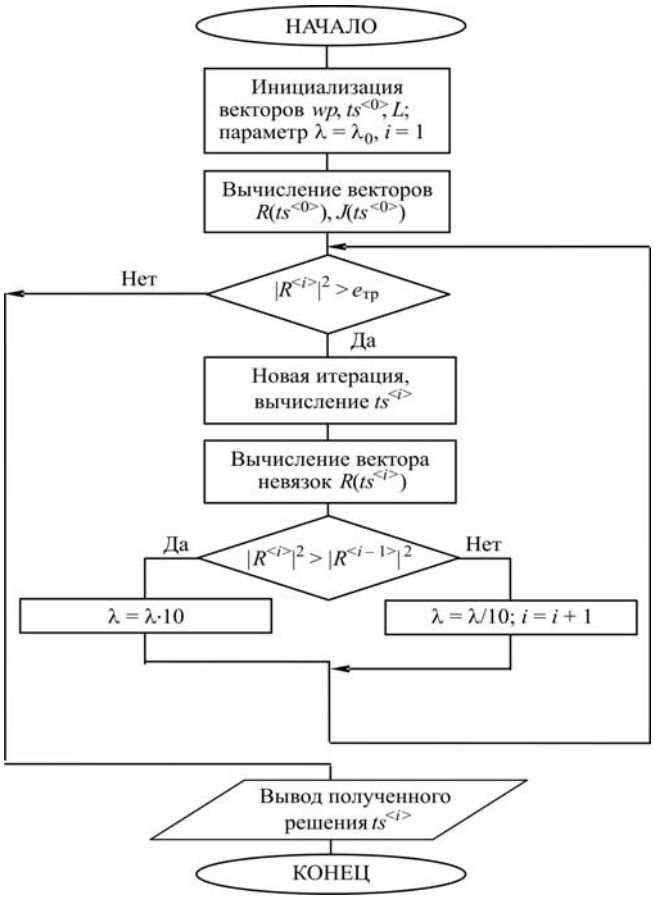


Рис. 1. Алгоритм решения системы уравнений численным методом

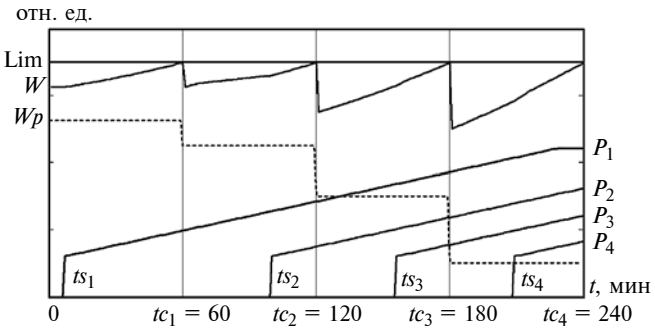


Рис. 2. Решение задачи расчёта оптимального старта печей для $N = 4$ и $m = 4$:

Lim — заданная среднечасовая мощность (лимит электроэнергии); *Wp* — прогноз потребления энергии всеми печами без учёта стартующих или растущих в текущем часе; *W* — суммарная фактическая среднечасовая мощность всех печей; *P*1, *P*2, *P*3, *P*4 — мощности печей, стартующих или растущих

Реальным процессам производства свойственно воздействие на управляемую систему множества случайных факторов: нестабильность

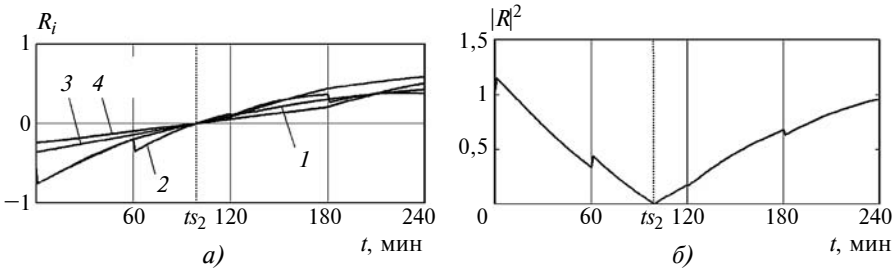


Рис. 3. Зависимость компонент вектора невязок (*а*) и полной суммарной невязки (*б*) от времени старта одной печи

электрической сети, изменение параметров печей, возникновение неисправностей оборудования. Автоматизированная система управления должна реагировать на эти возмущения. Компенсация последствий воздействия перечисленных факторов требует периодического повторения описанных выше расчётов для коррекции моментов включения печей на основе обновлённой информации о реальном состоянии системы.

Предложенный алгоритм позволяет соблюдать требуемое суммарное потребление электроэнергии группой печных установок в каждом контрольном временном интервале за счёт оптимального времени включения печных установок циклического действия. Блок-схема алгоритма решения задачи (см. рис. 1) позволяет запрограммировать его на языке высокого уровня, что необходимо при использовании алгоритма в управляющей системе на производстве. Тестирование алгоритма на наборе реальных исходных данных подтвердило его работоспособность.

Библиографические ссылки

1. **Носенко В.А., Гольцов А.С., Бурцев А.Г.** Система адаптивного управления полезной мощностью печи сопротивления // Вестник СевНТУ. Серия "Машиноприборостроение и транспорт": сборник научн. тр. Севастополь: СевНТУ, 2012. Вып. 128. С. 159—164.

2. **Белоусов О.А., Кольтюков Н.А.** Интеллектуальная радиоэлектронная система энергосберегающего управления электрокамерными печами // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2007. № 12. С. 40—44.

3. **Зацепина В.И., Шпиганович А.Н., Шурыгин Ю.А.** Метод рационального запуска дуговых печей в работу // Вести высших учебных заведений Черноземья. 2011. № 1. С. 22—28.

4. **Дэннис Дж., мл., Р. Шнабель**. Численные методы безусловной оптимизации и решения нелинейных уравнений: Пер. с англ. / М.: Мир, 1988. 440 с.

5. **Nocedal J., Wright S.J.** Numerical Optimization / *Springer*: New York, 1999. 631 p.

Шаталов В.А. **Космические будни.**

ISBN 978-5-217-03420-8

Цена с НДС 385 руб.

Автор этой книги – целеустремленный и отважный человек. Он хотел стать классным летчиком-истребителем и стал им. После полета Ю.А. Гагарина «заболел» космосом и, несмотря на преграды, буквально прорвался в отряд космонавтов. Совершил три космических полета, а затем в 1971 г. после Героя Советского Союза генерал-полковника Н.П. Каманина был назначен помощником Главнокомандующего ВВС, ответственным за организацию и обеспечение космических полетов, и проработал на этой должности 20 лет.

Читатель найдет в этой книге воспоминаний Космонавта-13 немало нового, дополняющего неисчерпаемую и непростую историю нашей космонавтики.

Приобрести книгу можно непосредственно в издательстве "Машиностроение", прислав заявку в отдел реализации по факсу: (495) 269-48-97; по e-mail: realiz@mashin.ru; по почте: 107076, Москва, Стромынский пер., 4. ООО "Издательство Машиностроение". Справки по тел. (495) 269-66-00. http://www.mashin.ru

УДК 658.51

Ю.И. Дегтярёв, д-р техн. наук, проф.
(ФГБНУ "Экспертно-аналитический центр" Минобрнауки России, г. Москва),
К.Ю. Дегтярёв, канд. техн. наук
(Национальный исследовательский университет "Высшая школа экономики", г. Москва)
kdegtiarev@hse.ru

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ КАК ВОЗМОЖНАЯ РАБОЧАЯ ФУНКЦИЯ САПР

Исследована проблематика проектирования процессов на основе создания и последующих преобразований их графических образов. Обозначена важность использования для этих целей потенциала существующих систем автоматизированного проектирования.

Ключевые слова: системы автоматизированного проектирования, производственный процесс, проектирование процессов, график Ганта.

The processes design range of problems on the basis of creation and the subsequent transformations their graphic images is investigated. Utilization importance for these purposes of the existing systems capacity of the automatic design is designated.

Key words: systems of the automated design, production process, design of processes, Gant's diagram.

Системы автоматизированного проектирования (САПР) получили широкое распространение и продолжают совершенствоваться как средство повышения эффективности труда инженеров (и проектировщиков других профессий), связанной с сокращением трудоёмкости и сроков выполнения заданий, ростом качества получаемых результатов, разнообразием предлагаемых решений и т. д. Области применения САПР охватывают сегодня самые разные виды деятельности — от планирования помещений до создания современной космической техники, причём каждая категория задач предъявляет свои требования к системе проектирования в части её информационного, программного, организационно-технического обеспечения.

Наряду с распространёнными представлениями о проектировании тех или иных объектов инфраструктуры, строительства, машиностроения, необходимо обратить внимание на редко встречающиеся (но не менее важные) задачи проектирования процессов проведения определённых работ или операций (исследовательских, производственно-технологических, поисковых и даже военизированных). Существующие САПР, к числу которых относятся активно используемые инженерами, проектировщиками и конструкторами системы *AutoCAD*, *Mathcad*, *MicroStation* [1—3], как правило, не нацелены непосредственно на проектирование подобных процессов, что во многом связано с трудностями и особенностями их описания.

Практически любой процесс может быть достаточно подробно изучен и проанализирован, если получены ответы на следующие вопросы:

каков перечень проводимых работ (операций) и каково их количество;

в какие моменты времени могут (должны) начаться и закончиться намеченные работы (операции), включая их возможные этапы;

где и на каком "оборудовании" выполняются данные работы (операции);

сколько времени затрачивается на проведение всех намеченных работ (операций), т. е. каким может быть время осуществления всего процесса;

какие материальные (финансовые) ресурсы требуются для реализации планируемого процесса и т. д.

Информация, содержащаяся в ответах и характеризующая процесс, должна быть, по возможности, наглядной, удобной для обработки, представленной в компактном виде. Этим условиям отвечают так называемые графики (диаграммы) Ганта (Генри Лоуренс Гант, американский инженер, исследователь проблем научной организации труда и менеджмента), введённые им в рассмотрение почти 100 лет назад и остающиеся до сегодняшнего дня полезным и эффективным инструментом исследований задач планирования (организации) производственных процессов. Каждой работе (операции) ставится в соответст-

вие отрезок или полоса определённой длины, каждой единице "оборудования" — ось времени, на которой размещаются отрезки-работы, выполняемые на этом "оборудовании". При известном начале отсчёта времени (начале процесса) взаимное расположение отрезков даёт всю картину проведения работ (операций), что позволяет говорить о графическом образе процесса и его возможных (допустимых) преобразованиях. В качестве примера на рис. 1 показан график Ганта для известной "задачи о двух станках" [4], которая была успешно решена и аналитическим путём, в отличие от многих других задач из разряда трудноформализуемых.

Одним из важнейших ресурсов в большинстве процессов является временной ресурс, т. е. запас времени, расходуемый на реализацию процесса и не восстанавливаемый в принципе. Если нужно отслеживать ход выполнения работ (операций), укладываться в установленные сроки, обеспечивать согласованность действий, соблюдать введённые ограничения и т. д., то становятся очевидными преимущества использования графических образов исследователями (проектировщиками) того или иного процесса, особенно в случаях, когда другие формально-описательные подходы крайне затруднены или невозможны.

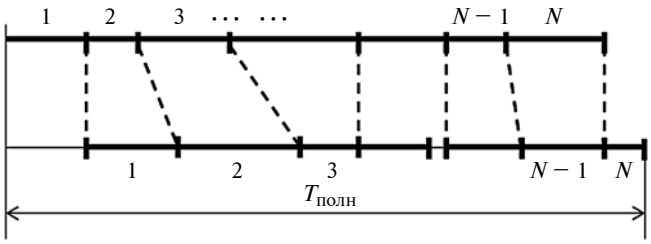


Рис. 1. График Ганта для "задачи о двух станках"

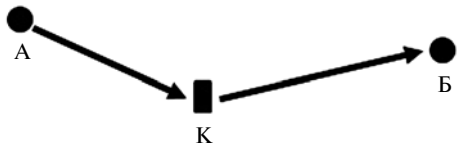


Рис. 2. Маршрут груза

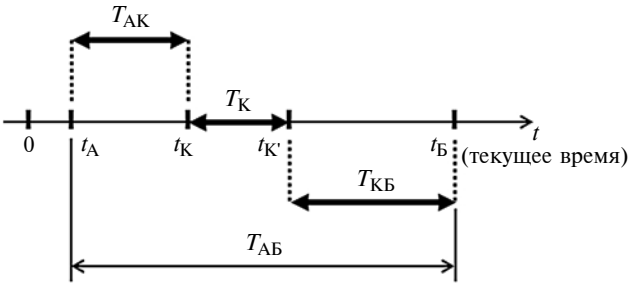


Рис. 3. График движения груза по единичному маршруту

Отмеченные выше особенности графиков Ганта и целесообразность их построения (перестроения) для поиска наилучшей организации различных процессов могут быть развиты, дополнены и поддержаны аппаратом машинной графики существующих САПР. Это будет способствовать и совершенствованию методов решения задач проектирования сложных процессов, и расширению функциональных возможностей (областей применения) самих САПР.

Продемонстрировать и оценить указанные возможности и перспективы удобно на примере слабоформализованной задачи о перевозках грузов, осложнённой появлением "узкого места" в рассматриваемом (проектируемом) процессе. Предположим, что в пункте отправления (А) находится груз, который должен быть доставлен в заданный пункт назначения (Б). По условиям доставки груз должен пройти контрольную проверку (досмотр) в специально оборудованном месте (К) на пути следования из А в Б, после чего прибыть в конечную точку маршрута (рис. 2).

Характер проверки груза в данном случае не имеет значения — например, это может быть таможенный, санитарный, радиационный контроль, оценка комплектности, оформление сопроводительных документов или какие-то другие подобные действия. Важным является то, что груз задерживается на некоторое время в пункте контроля, и это отрицательно влияет на весь процесс перевозки (снижается средняя скорость, растут затраты и т. д.).

В результате общее время перемещения груза из А в Б ($T_{АБ}$) определяется тремя слагаемыми — временем движения от А до К ($T_{АК}$), временем задержки в К ($T_К$) и временем движения от К до Б ($T_{КБ}$). В графическом представлении это может выглядеть так, как показано на рис. 3.

Следует отметить, что на рис. 3 показан простейший график Ганта, на котором отражены три основные этапа рассматриваемого процесса перевозки груза и их временные характеристики. Главными элементами графика являются горизонтальные линии, показывающие, как протекает процесс во времени, какова продолжительность его этапов, какие существуют возможности для ускорения процесса и т. п. При необходимости сюда можно внести дополнительные пояснения, относящиеся к задаче, но делать это здесь вряд ли нужно. Важно заметить, что размеры графика по вертикали (пунктирные линии) ничего не определяют и выбираются произвольно. Из таких графических образов могут составляться сложные конструкции, исследуемые ниже

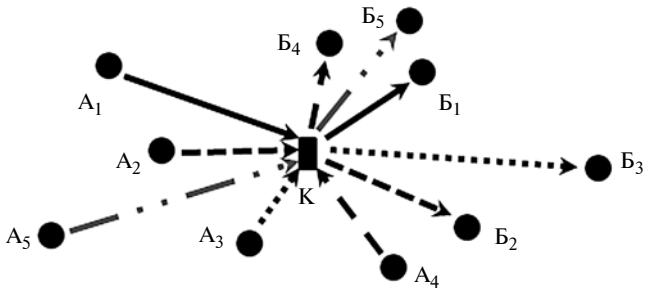


Рис. 4. Маршруты движения нескольких партий грузов

и имеющие практическое значение для работы больших транспортных систем.

На практике обычно приходится иметь дело с перевозкой не одного груза, а нескольких партий грузов по схеме, показанной на рис. 4. При этом ограниченные технические возможности пункта контроля (К) создают очередь проверяемых грузов и замедляют весь процесс перевозок (особенно тогда, когда время $T_К$ меняется в зависимости от типа груза). Здесь график Ганта приобретает более сложный вид и может перестраиваться в зависимости от того, какое место займет тот или иной груз в очереди на контроль. На рис. 5 показан произвольно взятый вариант графика с обозначениями, принятыми на рис. 4. Всего таких вариантов для нашего случая — 120 (т. е. 5!).

Если предположить, что "сложными" перевозками (рис. 4) занимается транспортная компания, то должна возникнуть серьёзная заинтересованность в ускорении всего процесса, представленного графиком на рис. 5, т. е. в его рациональной организации. Это достигается выбором (поиском) такой очередности контроля грузов, при которой рассматриваемый график Ганта максимально уплотняется (сжимается в допустимых пределах). В общем случае, показателем "плотности" графика является величина $T_{полн} = \max\{t_{Б1}, t_{Б2}, ..., t_{Бn}\} - \min\{t_{А1}, t_{А2}, ..., t_{Аn}\}$, где n — количество маршрутов перевозок, $T_{полн}$ — время существования (продолжительность) процесса перевозок (от самого раннего момента отправления $t_{Аi}$ до самого позднего момента прибытия $t_{Бi}$, $i = \overline{1, n}$. Для варианта, показанного на рис. 5, $T_{полн} = t_{Б2} - t_{А1}$. Таким образом, суть задачи проектирования подобных процессов заключается в построении (нахождении) графиков Ганта с наименьшим $T_{полн}$.

Формализовать полностью условия рассматриваемой задачи не удается. Можно лишь сказать, что "сложный" (общий) график (рис. 5) состоит из одинаковых элементов, каждый из которых представлен тремя связанными между собой отрезками I, II, III со своими линейными размерами d_I, d_{II}, d_{III}, соответствующими длительностям $T_{АК}$, $T_К$, $T_{КБ}$ работ I (начальная транспортная операция), II (операция контроля), III (заключительная транспортная операция) (рис. 6). В общем случае, требуется найти вариант графика, имеющий наименьший размер $T_{полн}$ при известных параметрах d_I, d_{II}, d_{III} работ I, II и III в каждом из n его элементов.

С практической точки зрения это означает проектирование процесса наименьшей продолжительности, что весьма важно для решения производственных и экономических проблем. Очевидно, решить поставленную задачу при $n \leqslant 6$ можно методом полного перебора вариантов, однако с увеличением n ситуация усложняется и приходится применять другие приёмы поиска решений, предусматривающие, в частности, обращение к специализированным САПР с развитыми графическими возможностями и организацию диалога проектировщика (пользователя) с системой проектирования.

Похожие слабоформализованные задачи с присущими им особенностями сложных графических образов проектируемых процессов встре-

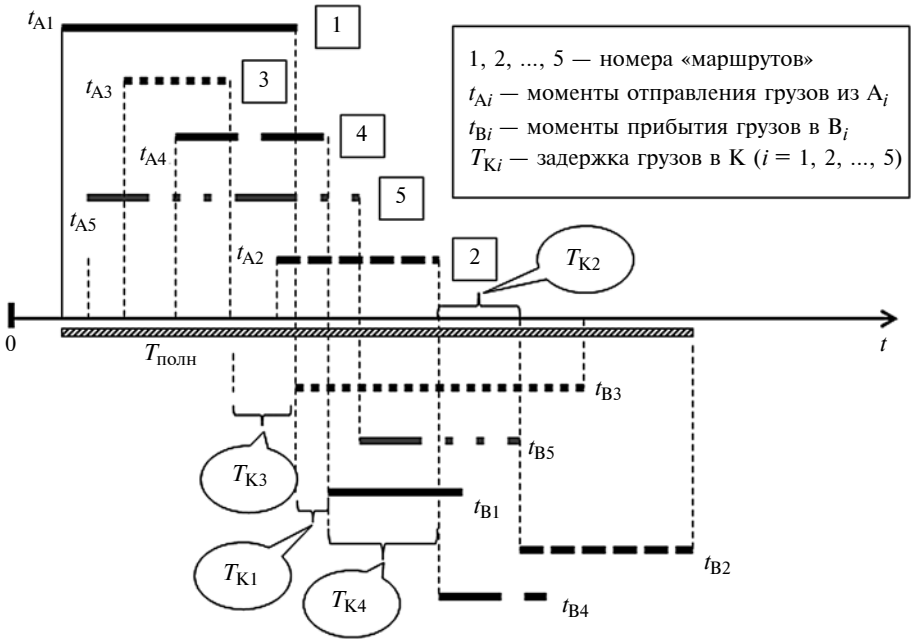


Рис. 5. Вариант организации (планирования) процесса перевозок

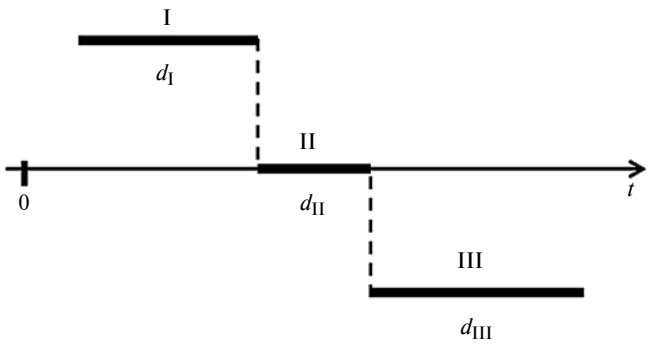


Рис. 6. Элемент "сложного" графика Ганта

чаются в разных областях деятельности, поэтому идея использования соответствующей графики оказывается полезной и применимой независимо от конкретного содержания таких задач. Это позволяет унифицировать приёмы подготовки нужных решений, сведя их к следующим стандартным шагам:

1) выбор графического образа (графика Ганта), представляющего исследуемый (проектируемый) процесс, в качестве исходного объекта рассмотрения;

2) выделение базовых (основных, неизменяемых) элементов принятого графика, фиксация их характерных особенностей и числовых параметров;

3) выбор способа построения базового элемента и последующих преобразований (перестроений) исходного графика (перестановка самих элементов, вариации их параметров или другие аналогичные действия);

4) определение критерия оценки качества организации процесса (т. е. вариантов графика Ганта, получаемых в ходе его перестроений) и правил вычисления (измерения) критерия в соответствии с решаемой задачей (чаще всего им оказывается полное время реализации процесса, см. выше);

5) подтверждение возможности выполнения пунктов 1—4 в программной среде используемой САПР и доработка или обновление (при необходимости) установленных программных средств;

6) построение оси времени t с установленным началом отсчёта и всех элементов будущего графика Ганта с заданными параметрами и привязкой к построенной оси t;

7) составление произвольного варианта графика из всех (n) его элементов, вычисление получаемого при этом значения критерия качества и оценка проектировщиком его приемлемости или необходимости перехода к рассмотрению других вариантов;

8) перестроение признанного непригодным (предыдущего) графика по принятым правилам согласно пункта 3 с целью улучшения (по смыслу задачи) значения критерия (в автоматизированном режиме, формированием команды системе проектирования осуществить такое перестроение и получить тем самым новый вариант графика Ганта);

9) повторение оценочных действий (пункт 7) и возвращение по их результатам к пункту 8 до тех пор, пока очередной вариант перестраиваемого графика будет признан приемлемым (допустимым) с точки зрения проектировщика или других лиц, принимающих решения;

10) анализ полученного (принятого) окончательного решения, т. е. "рабочего варианта" графика Ганта, с попыткой определить степень его приближения к строго оптимальному, но неизвестному решению (по косвенным признакам, в частности, по количеству возвращений к пунктам 7, 8 в ходе проводимой работы).

Рассмотренная последовательность шагов проектирования процессов является "рамочной" и может уточняться (расширяться) применительно к конкретным задачам. По существу, речь здесь идет о поиске решений в режиме диалога человека и машины, что характерно для САПР, но в данном случае имеет свою специфику, связанную с необходимостью разработки сценариев диалога, т. е. правил, по которым он будет вестись. Эти правила могут быть самыми разными даже в условиях решения одной и той же задачи и регулироваться либо соображениями "здравого смысла", либо введением элементов случайности в схемы преобразований (перестроений) графиков Ганта, либо разработкой эвристических алгоритмов действий исследователя (проектировщика) того или иного процесса применительно к его особенностям.

Если снова обратиться к примеру планирования процесса перевозок грузов (рис. 2—5), то для него приемлемыми оказываются следующие рекомендации:

все элементы графика Ганта упорядочиваются по признаку уменьшения их "длины" $L = d_I + d_{II} + d_{III}$;

элемент $Э_1$ с наибольшей L ставится в середину будущего графика;

элемент со второй по величине L ($Э_2$) ставится справа или слева от $Э_1$, в зависимости от соотношения между размерами d_I и d_{III} для $Э_1$ и $Э_2$;

элемент с третьей по величине L ($Э_3$) ставится справа или слева от "связки" $Э_1$ и $Э_2$ так, чтобы "длина" $T_{полн}$ связки увеличилась минимально;

последующие расстановки элементов с уменьшающимися L осуществляются по такой же схеме до тех пор, пока не сформируется весь n-элементный график Ганта как образ проектируемого процесса и основа для дальнейшей работы с ним.

Результат применения этих правил представляется приемлемым (допустимым) и в тех случаях, когда желаемое значение критерия $T_{полн}$ достичь не удаётся (оно может быть задано заранее, исходя из каких-то дополнительных соображений). Это послужит сигналом либо для пересмотра исходных позиций проектирования, либо для уточняющих перестроений полученного графика, либо для перехода к менее жестким сценариям ведения диалога и других подобных действий, в ходе которых появляется новая информация о свойствах исследуемой задачи. Можно лишь заметить, что практически всегда удаётся получить заметный выигрыш в затратах сил и времени на решение аналогичных слабоформализованных задач, заменяя попытки найти для них строгий оптимум рассмотренными выше эвристическими приемами приближения к нему с оценками возникающих ситуаций.

Расширение возможностей и областей применения существующих САПР остаётся актуальным, несмотря на уже достигнутые успехи. Перспективным направлением является проектирование производственных процессов, представляемых их графическими образами (графиками Ганта), которые исследуются с целью выбора наилучших (рациональных) вариантов решений. Это особенно важно тогда, когда затруднены другие подходы к решению многих задач (отсутствуют аналитические методы, велика вычислительная сложность алгоритмов и т. п.). Проектирование процессов, по мере своего совершенствования, должно стать самостоятельной функцией САПР.

Библиографические ссылки

1. **Божко А.Н.**, **Жук Д.М.**, **Маничев В.Б.** Система автоматизированного проектирования MicroStationV8/XM. М.: изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010. 488 с.

2. **Дегтярёв Ю.И.** Системный анализ и исследование операций. М.: "Высшая школа", 1996. 335 с.

3. **Полещук Н.Н.** AutoCAD 2012 (серия "В подлиннике") // СПб: БХВ-Петербург, 2012. 752 с.

4. **Теория** расписаний и вычислительные машины (под ред. Кофмана Э.Г.), пер. с англ. М.: Наука, 1984. 336 с.

УДК 658.511.3:658.562.3:519.1 + 005.932

Е.В. Курнасов, канд. техн. наук, **В.Э. Тен**
(Московский государственный университет приборостроения и информатики)
mra2013@yandex.ru

АЛГОРИТМЫ АНАЛИЗА И КОНТРОЛЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

На типичном примере рассмотрен вариант анализа и оценки эффективности процесса производства изделий и механизмов. Основной технологический процесс дан в виде графа, представляющего совокупность отдельных подпроцессов. Предложены алгоритмы оценки эффективности отдельных подпроцессов при декомпозиции технологического процесса и комплексной оценки эффективности технологического процесса в результате синтеза подпроцессов по частным технико-экономическим показателям.

Ключевые слова: технологический процесс; производство; анализ и контроль эффективности; алгоритм оценки эффективности; технико-экономические показатели; автоматизация.

On a typical example the version of the analysis and an efficiency valuation of the articles and mechanisms production process is considered. The basic technological process is given in the form of the diagram (column) representing set of separate subprocesses. Separate subprocesses efficiency valuation algorithms at technological process decomposition and complex efficiency valuation of the technological process as a result of subprocesses synthesis on particular technical and economic indices are offered.

Key words: technological process; production; efficiency analysis and control; efficiency valuation algorithm; technical and economic indices; automation.

Эффективное функционирование автоматизированного технологического процесса (ТП) характеризуется значительным числом параметров и оценивается по экономической, технико-экономической, технологической и экологической составляющей процесса. При этом возникают следующие научно-практические проблемы: отсутствуют научно обоснованные методы анализа и контроля эффективности автоматизированных технологических процессов; подлежат разработке критерии и показатели эффективности автоматизированных технологических процессов. Соответственно, возникает необходимость в разработке процедур оценки эффективности автоматизированных технологических процессов для принятия решений о целесообразности его использования или возможности/необходимости дальнейшей модернизации. Для принятия решений необходимо рассчитать изменения в состоянии ТП, которые могут быть вызваны теми или иными управляющими воздействиями со стороны субъекта управления на ТП [1]. При этом необходимо знать следующие характеристики технологического процесса: основные и частные показатели эффективности ТП, уровень автоматизации ТП.

Для решения анализа и контроля эффективности автоматизированных технологических процессов целесообразно рассмотреть автоматизацию типичных технологических процессов, состоящих из подпроцессов, провести их декомпозицию на подпроцессы и разработать методическую схему анализа и оценки эффективности отдельных подпроцессов технологического процесса по частным показателям эффективности, характеризующим техническую и технологическую сторону каждого подпроцесса, а также провести синтез частных показателей эффективности в комплексный показатель эффективности технологического процесса по технико-экономическим показателям.

Эффективность технологического процесса следует оценивать по основным технико-экономическим показателям, характеризующим степень достижения полученных результатов желаемым/планируемым.

Частные показатели эффективности подпроцессов следует оценивать по техническим показателям, определяющим качество технологического подпроцесса, и эксплуатационным показателям, характеризующим изменения, возникающие в технологическом подпроцессе во время эксплуатации оборудования при появлении отклонений от регламентированных условий и состояний.

Реализация декомпозиции технологических процессов, например в машиностроении, может быть осуществлена путём разделения процесса на подпроцессы, для которых не требуется последовательное исполнение и которые могут быть выполнены на разных процессах независимо друг от друга. Подпроцессы, в свою очередь, могут быть разбиты на составляющие их части с целью исследования эффективности этих частей независимо друг от друга по техническим и технико-экономическим показателям.

Рассмотрим анализ технологического процесса производства изделий и механизмов на примере стандартной модели ТП и системы управления ТП.

1. Основной ТП можно представить в виде совокупности отдельных подпроцессов, каждый из которых состоит из множества подподпроцессов. Эффективность каждого подпроцесса должна быть оценена по основным и частным техническим и технологическим показателям.

2. Кроме основного ТП должно быть выделено вспомогательное производство, необходимое для обеспечения основного ТП оборудованием, транспортом и т. д. Вспомогательное производство осуществляет ремонтное, строительное и другое производственное обслуживание ТП. Эффективность вспомогательного производства влияет на показатели эффективности ТП и также должна оцениваться по техническим и технико-экономическим показателям.

3. Для каждой подсистемы должен существовать соответствующий "жизненному циклу" конечный продукт, который одновременно может являться ресурсом для другого подпроцесса.

4. Декомпозицию ТП можно провести по подпроцессам, осуществляющим производство отдельных конечных продуктов. Данная декомпозиция предполагает, что каждому продукту соответствует определенный подпроцесс — производитель этого продукта. Синтез отдельных подпроцессов образует ТП.

Этот анализ наиболее точно можно осуществить путём построения математической модели с применением теории графов, которая предусматривает процесс формирования ТП с использованием необходимых операций и последовательности их выполнения.

Переход из одного состояния исходного продукта в другое можно представить в виде направленного графа, ребра которого будут обозначать процессы перехода одного состояния в другое, а вершины — соответствующие состояния. Такой

граф будет иметь одно ребро, соответствующее входному потоку исходного продукта X, и такое количество конечных рёбер, сколько конечных продуктов образуется при технологическом процессе, т. е. ТП можно характеризовать как многорёберный граф в соответствии с числом получаемых продуктов (рис. 1).

В графе ТП обработки деталей и сборки механизмов каждая технологическая операция располагается на определенном операционном уровне, обеспечивающем очередность выполнения операций ТП и исключения ошибок при его построении (001, 002 и т. д.). При условии параллельной обработки деталей сборочной единицы изделия на графе должны быть отражены параллельные цепочки работ. При последовательной обработке и сборке деталей на графе должна изображаться последовательная цепочка работ [2, 3].

Если ТП сборочных работ представлен в виде сетевой модели (графа), состоящей из вершин и дуг, соединяющих соответствующие вершины графа, тогда вершины графа будут отображать операции, а дуги графа — связи между соответствующими операциями. Модель такого графа будет представлена как "дуга — работа".

Перечень событий и основных работ для рассматриваемого примера приведены в табл. 1 и 2.

В итоге критические пути для изготовления машин на различных конвейерных линиях будут следующими: $a_1 — a_2 — a_7 — a_{13} — a_{16}$; $a_1 — a_3 — a_7 — a_{14} — a_{16}$; $a_1 — a_8 — a_{14} — a_{16}$; $a_1 — a_4 — a_6 — a_9 — a_{14} — a_{16}$ и т. д.

Так как при переходе исходного продукта из одного состояния в другое вершины графа будут обозначать соответствующие состояния продукта, а ребра — процессы перехода одного состояния продукта в другое, то при оценке эффективности ТП целесообразно оценивать ребра графа ТП, соответствующие конечным продуктам технологического процесса, по следующим параметрам

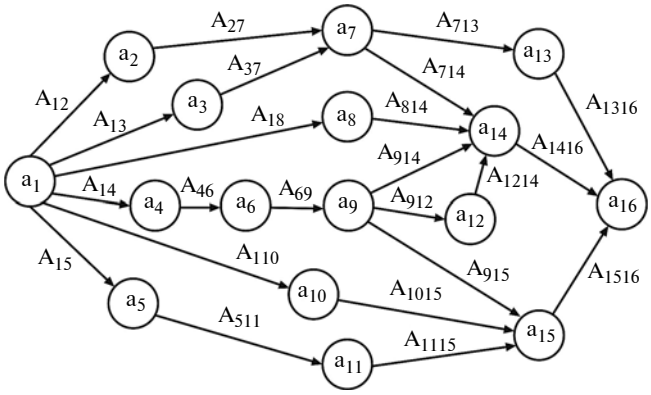


Рис. 1. Граф технологического процесса

и характеристикам: время выполнения и вероятность перехода между вершинами, технологические, технико-экономические и социально-экологические результаты, затраты, необходимые для реализации этого процесса.

В соответствии с задачей анализа и контроля эффективности ТП веса дуг данного графа будут

Таблица 1

Перечень событий

Обозначение событий	Наименование событий
a_1	Получение исходного материала и начало изготовления деталей
$a_2; a_3; a_4; a_5; a_8; a_{10}$	Изготовление деталей: начало изготовления сборочных единиц *n*-го порядка
a_6	Окончание изготовления сборочных единиц *n*-го порядка и начало изготовления сборочных единиц *m*-го порядка
$a_7; a_9; a_{11}$	Окончание изготовления сборочных единиц *m*-го порядка и начало изготовления сборочных единиц *j*-го порядка
a_{12}	Окончание изготовления сборочных единиц *j*-го порядка и начало изготовления сборочных единиц *i*-го порядка
$a_{13}; a_{14}; a_{15}$	Окончание изготовления сборочных единиц *i*-го порядка и начало изготовления сборочных единиц *k*-го порядка
a_{16}	Окончание сборки машины

Таблица 2

Перечень основных работ

Обозначение работ	Наименование работ	Предшествующие работы	Последующие работы
$A_{12}; A_{13}; A_{14}; A_{15}; A_{18}; A_{110}$	Изготовление заготовок в производствах	–	$A_{27}; A_{37}; A_{814}; A_{46}; A_{511}$
A_{46}	Изготовление сборочных единиц *m*-го порядка	A_{46}	A_{69}
$A_{27}; A_{37}; A_{69}; A_{511}$	Изготовление сборочных единиц *j*-го порядка	$A_{27}; A_{37}; A_{69}; A_{511}$	$A_{713}; A_{714}; A_{914}; A_{912}; A_{915}; A_{1115}$
A_{912}	Изготовление сборочных единиц *i*-го порядка	A_{912}	A_{1214}
$A_{713}; A_{714}; A_{814}; A_{914}; A_{915}; A_{1015}; A_{1214}; A_{1115}$	Изготовление сборочных единиц *k*-го порядка	$A_{713}; A_{714}; A_{814}; A_{914}; A_{1214}; A_{915}; A_{1015}; A_{1115}$	$A_{1316}; A_{1416} A_{1516}$
$A_{1316}; A_{1416}; A_{1516}$	Изготовление машин	$A_{1316}; A_{1416} A_{1516}$	–

соответствовать вероятностным либо нечетким вероятностным характеристикам процессов ТП. Соответственно, вершины (V) должны сопоставляться с вероятностными либо нечеткими вероятностными результатами технологических и технико-экономических мероприятий ТП. Следовательно, множество вершин графа моделирующего ТП можно представить следующим образом:

$$V = \alpha \cup \Theta \cup \Omega, \quad (1)$$

где α — начальная вершина графа, соответствующая началу ТП; Θ — множество промежуточных вершин графа, характеризующих реализацию технологических и технико-экономических мероприятий ТП; Ω — множество конечных вершин с различными результатами (завершение ТП) [4].

Предлагаемый алгоритм анализа и контроля эффективности подпроцессов ТП представлен на рис. 2.

Определение показателей эффективности ТП должно производиться на каждом этапе свертки графа по основным технико-экономическим показателям. По результатам сравнения рассчитанных показателей эффективности с заданными целевыми показателями должно производиться формирование управляющих воздействий в виде корректировки технологических мероприятий. При этом в качестве критерия при выборе группы мероприятий и технологий должны быть использованы мероприятия, имеющие максимальную эффективность.

Алгоритм формирования управляющих воздействий в виде технологических и технико-экономических мероприятий и оценки их эффективности представлен на рис. 3.

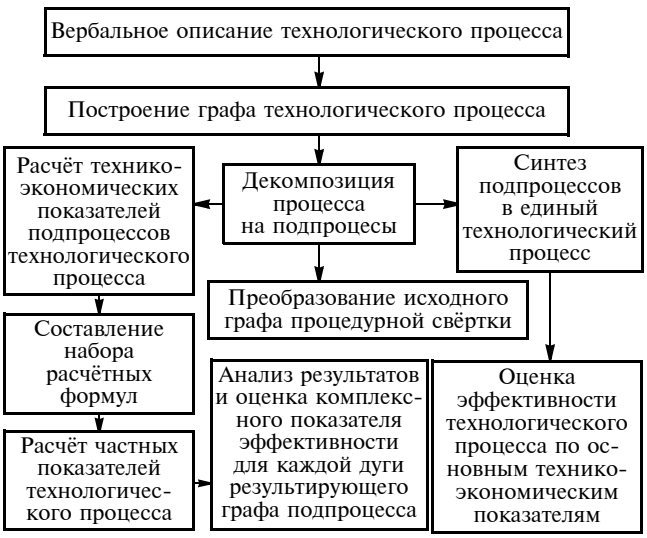


Рис. 2. Алгоритм оценки эффективности технологического процесса

Рис. 3. Алгоритм формирования управляющих воздействий на технологический процесс

Рис. 4. Методическая схема оценки технико-экономических показателей

С нашей точки зрения, анализ и контроль эффективности автоматизированных технологических процессов целесообразно проводить по методике, объединяющей частные методики оценки основных технико-экономических показателей (производительность, себестоимость, затраты) и, в частности, энергоэффективности, надёжности автоматизированных технологических процессов и технологичности выпускаемых изделий. С этой целью была разработана методическая схема оценки технико-экономических показателей (на примере, машиностроительной отрасли), представленная на рис. 4.

Следует отметить, что предлагаемые выше методическая схема и алгоритмы для анализа и контроля эффективности технологического процесса, основанные на построении графа, и анализа критических путей подпроцессов, позволяют не только оценивать, например, конвейерные линии сборки деталей и машин, с максимальными технико-экономическими показателями, но и дают возможность прогнозировать многовариантное развитие технологического процесса.

Библиографические ссылки

1. **Янг С.** Системное управление организацией. Пер. с англ. / Под ред. С.П. Никанорова, С.А. Батасова. М.: Советское радио, 1972. 456 с.

2. **Оре О.** Теория графов. Пер. с англ. Врублевской И.Н. / Под ред. Воробьева Н.Н. М.: Наука, 1968. 352 с.

3. **Кристофидес Н.** Теория графов. Алгоритмический подход. М.: Мир, 1978. 432 с.

4. **Ротштейн А.П., Штовба С.Д.** Оценка надёжности алгоритмических процессов при нечётких исходных данных // Вестник ВПИ, 1996. № 2. С. 30—37.

УДК 621.791.052

В.В. Яковлев, канд. техн. наук, **Г.И. Шишкин,** д-р физ.-мат. наук, **И.В. Першин**
(Уральское отделение Федерального экспертного Совета,
Институт математики и механики УрО РАН, г. Екатеринбург)
yakowlew.victor@ yandex.ru

ПРИМЕНЕНИЕ ЧИСЛЕННЫХ МЕТОДОВ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ СВАРОЧНЫХ ПРОЦЕССОВ

Процессы сварки и наплавки описываются дифференциальными уравнениями с малыми параметрами при старших производных. Решения таких уравнений содержат пограничные или переходные слои при достаточно малых значениях параметров. Такие задачи относятся к сингулярно возмущённым. Стандартные численные методы не пригодны для решения этих задач, так как при малых значениях параметра ошибки решения могут превосходить само решение. Для решения таких задач рассмотрено применение робастных конечно-разностных численных методов, т. е. методов, точность решений которых не зависит от особенностей конкретного физического процесса.

Ключевые слова: сварка, робастные численные методы.

Welding and padding processes are described by the differential equations with small parameters at the senior derivatives; solutions of such equations contain boundary or transitional layers at rather small values of parameters. Such tasks belong to singular disturbed. Standard numerical methods aren't suitable for these tasks decision since at small parameter values the decision errors can surpass the decision.

Application for solving such problems of finite difference numerical methods is discussed. Accuracy of the solutions of these methods does not depend on the particular physical process.

Key words: welding, robust numerical methods.

Сварка и наплавка — технологические процессы, которые характеризуются наличием мощных тепловых полей, потоков тепла и вещества. При этом одновременно существуют твёрдая и жидкая фазы, возникают гидродинамические течения, протекают различные химические реакции. Большую роль играет сложная геометрия изделий, разнородность свариваемых и наплавляемых деталей, наличие малых включений (пор). Определяющую роль в процессах сварки и наплавки играют теплообменные процессы, которые определяют протекание всех остальных процессов: химических, кинетических, диффузионных, гидродинамических.

Актуальным условием дальнейшего совершенствования процессов сварки и наплавки является разработка высокоэффективных методов моделирования сварочных процессов.

Физические, химические и другие процессы в металле, определяющие производительность сварки и качество сварных соединений, протекают под действием тепла в условиях быстро меняющейся температуры. Пределы изменения температуры могут изменяться от нуля до нескольких тысяч градусов. В этом интервале температур одновременно происходят плавление основного и присадочного металлов, металлургические и химические реакции в жидкой ванне, кристаллизация расплавленного металла, структурные и объёмные изменения в основном и наплавленном металлах, появление сварочных напряжений и деформаций и т. д. Чтобы управлять этими процессами, необходимо знать, как влияют на них основные параметры, среди которых определяющим является воздействие источников тепла: сварочная дуга, плазма, лазерный луч и т. д.

Особую трудность в исследовании большинства технологических процессов сварки и наплавки представляет наличие особенности: изучаемая физическая величина может резко менять своё значение на малом пространственном и временном промежутке. Такими величинами являются температура и потоки тепла от сварочной дуги, значения которых резко меняют вблизи источника тепла или границы; в диффузионных процессах величина концентрации вещества может значительно меняться на границе двух сред; при исследовании гидродинамических процессов скорости движения расплавленного металла в ванне значительно меняются у границы ванны.

Подобные физические эффекты необходимо исследовать особенно тщательно, так как они непосредственно связаны с возникновением остаточных напряжений, деформаций и дефектов (зашлаковок, трещин, пор).

Эти процессы называются процессами с пограничными слоями, если подобного рода эффекты возникают на границах изучаемых областей из-за соответствующих граничных условий; или же с внутренними переходными слоями, если эффекты возникают внутри области (например, при использовании многокомпонентных материалов с различными теплофизическими характеристиками).

Ряд теоретических подходов к разработке специальных численных методов, пригодных для решения задач с переходными слоями (называемых сингулярно возмущёнными задачами), рассматривается в работе [1].

В силу развития и популярности компьютерных технологий широко распространены иллюзии: если задача решена на компьютере при использовании пакетов прикладных программ, то полученный результат полностью соответствует действительности.

Необходимо указать, что большинство современных технологических задач сварки и наплавки не может быть решено с *требуемой* точностью при использовании классических аналитических, конечно-элементных и конечно-разностных методов, которые применяются в большинстве прикладных программ, так как имеется неконтролируемая погрешность решения и особенно его производных, которые соизмеримы по величине, а нередко значительно превосходят искомое решение. В этом случае невозможно заранее сказать, при каких значениях параметров процесса резко возрастёт величина погрешности [2].

Скорость охлаждения в процессе сварки является решающим фактором в формировании конечных структур и свойств сварных соединений. При этом необходимо выполнение ряда условий: разность температур на различных участках не должна превышать технологически необходимой, температура не должна быть больше указанной, регламентируется время пребывания материала при заданной температуре и т. д. Проведение численных расчётов с точностью ниже требуемой, не позволят получить результаты, соответствующие условиям практического использования [3].

При применении численных методов крайне актуальной и сложной остаётся проблема оценки точности получаемого приближённого решения. Актуальность этой проблемы заключается в том, что полученное приближённое решение может отличаться от истинного в 2—3 раза, а для некоторых задач — в десятки тысяч раз [4]. Сложность проблемы состоит в том, что получить явное аналитическое решение такой задачи даже при существенном упрощении физической и математической моделей процесса сварки часто не представляется возможным; точно так же нередко невозможно проведение натурных экспериментов на изучаемом объекте. Следовательно, сравнить приближённое численное решение с каким-либо другим независимым результатом крайне трудно.

Точность приближённого решения задачи при использовании классических разностных схем зависит от выбранного численного метода, параметров дифференциальной задачи и параметров численного метода.

Параметры дифференциальной задачи — это коэффициенты дифференциальных уравнений, входящих в математическую модель процесса сварки, параметры численного метода — количество узлов или шаг разностной сетки. Нередки случаи, когда точность полученного приближённого решения не зависит от количества узлов разностной сетки, а только от параметров исходной физической задачи. Другими словами, погрешность приближённого решения не уменьшается с ростом количества узлов конечно-разностной сетки N, покрывающей область решения задачи.

Классические разностные схемы имеют ограниченную область применения, размеры и границы которой зависят от соотношения параметров дифференциальной задачи, выбранного численного метода и требуемой точности решения. Вне пределов этой области классические разностные схемы не дают необходимой точности, поэтому необходимо применение специальных методов. Для задач сварки и наплавки такие случаи являются достаточно характерными [3]. Подобные проблемы возникают при использовании классических аналитических методов для исследования поведения тепловых полей и потоков тепла в непосредственной близости от источника нагрева [5].

В последнее время разрабатываются конечно-разностные методы, точность решений которых не зависит от особенностей конкретного физического процесса сварки и наплавки и, кроме того, они являются устойчивыми к изменению исходных параметров задачи. Техника исследования таких методов рассматривается в монографии [6]. Эти методы позволяют решать задачи сварки и наплавки с необходимой заранее заданной точностью.

Большинство процессов сварки и наплавки при построении математической модели приводят к классу дифференциальных задач с переходными или пограничными слоями, называемых также сингулярно возмущёнными задачами. Наиболее часто подобные задачи преобразованием исходных дифференциальных уравнений сводятся к системе уравнений, содержащих параметр при старших производных, который может принимать произвольные значения, в том числе, стремиться к нулю [3].

Рассмотрим две задачи. Первая применялась для анализа технологии ЭШС колонн пресса усилием 30 000 тс, вторая при разработке технологии автоматической сварки в узкую разделку [7].

Первая задача о нагреве параллелепипеда полосовым источником тепла большой мощности в силу симметрии сводится к двумерному уравнению теплопроводности в декартовой системе координат:

$$a\left(\frac{\partial^2 \tilde{T}}{\partial \tilde{x}^2} + \frac{\partial^2 \tilde{T}}{\partial \tilde{y}^2}\right) - \frac{\partial \tilde{T}}{\partial \tilde{t}} = 0,$$

$$\left.\frac{\partial \tilde{T}}{\partial \tilde{x}}\right|_{\tilde{x}=0} = 0, \left.\frac{\partial \tilde{T}}{\partial \tilde{x}}\right|_{\tilde{x}=\tilde{X}} = 0,$$

$$\left.\frac{\partial \tilde{T}}{\partial \tilde{y}}\right|_{\tilde{y}=0} = 0, \lambda\left.\frac{\partial \tilde{T}}{\partial \tilde{y}}\right|_{\tilde{y}=\tilde{Y}} = \psi(\tilde{x}, \tilde{y}, \tilde{t}).$$

Перейдём к безразмерным переменным, при этом характерными параметрами процесса будут время τ и размер L, который определяется по формуле $L = \tilde{X}/l_i$, где $\tilde{X}$ — длина параллелепипеда, l_i — линейный размер источника тепла.

После приведения к безразмерному виду получим следующее уравнение:

$$\varepsilon\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2}\right) - \frac{\partial T}{\partial t} = 0,$$

где $\varepsilon = \dfrac{a\tau}{L^2}$ — критерий Фурье.

В этих задачах параметр ε при старших производных (критерий Фурье) может принимать произвольные значения в зависимости от параметров исходной физической задачи, когда величина этого параметра становится малой (близкой к нулю) — возникают задачи с особенностями решения. В данной задаче критерий Фурье (параметр ε) может принимать значения от 10 до 10^{-10}. Здесь хорошо видно влияние критерия Фурье: при наплавке на металл зона прогрева металла намного больше (глубже и шире), чем при наплавке на керамику (так как коэффициент температуропроводности у металлов намного больше). При наплавке на изделия из сплавов с низким коэффициентом температуропроводности глубина прогрева намного меньше, но перепад температур (температурные градиенты) намного больше.

Вторая задача с быстродвижущимся тепловым источником. Процесс теплообмена в среде с движущимся тепловым источником в двумерном случае описывается уравнением теплопроводности [2]:

$$a\left(\frac{\partial^2 \tilde{T}}{\partial \tilde{x}^2} + \frac{\partial^2 \tilde{T}}{\partial \tilde{y}^2}\right) - \frac{\partial \tilde{T}}{\partial \tilde{t}} = F(\tilde{x}, \tilde{y} - \tilde{v}\,\tilde{t}),$$

где $F(x, y)$ — функция, характеризующая плотность распределения тепловых источников; v — скорость их движения; знак "~" означает, что переменные являются размерными.

Перейдем в подвижную систему координат, связанную с источниками тепла. Для этого сделаем замену переменных $\tilde{z} = \tilde{y} - \tilde{v}\,\tilde{t}$. Введём безразмерные переменные: характерные скорость v и размер L, который определяется по формуле: $L = \sqrt{\frac{S}{S_i}}$, где S_i — площадь поверхности источника тепла; S — площадь поверхности тела. После приведения к безразмерному виду получим уравнение:

$$\varepsilon\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}\right) + v\frac{\partial T}{\partial z} - \frac{\partial T}{\partial t} = f(x, z),$$

где $\varepsilon = \frac{a}{Lv}$; $f(x, z) = LF(x, z)$.

Параметр ε при старших производных (величина, обратная критерию Пекле) принимает произвольные значения в зависимости от параметров исходной задачи.

При приведении дифференциальных уравнений к каноническому виду в безразмерных переменных возникают уравнения с параметром ε при старшей производной. Физический смысл параметра ε в разных задачах определяется исходными данными: в тепловых задачах этот параметр наиболее часто соответствует критерию Фурье или 3-й величине, обратно пропорциональной критерию Пекле. Проблемы, возникающие при численном методе решения этих задач

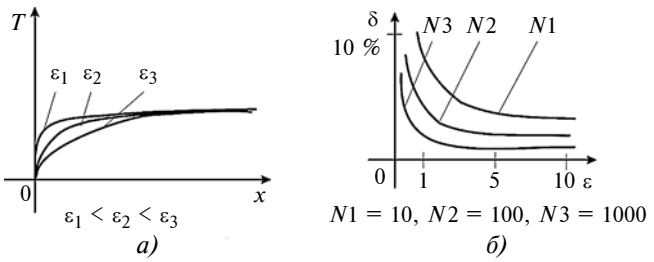


Рис. 1. Поведение точного (*а*) и погрешности приближённого решения (*б*)

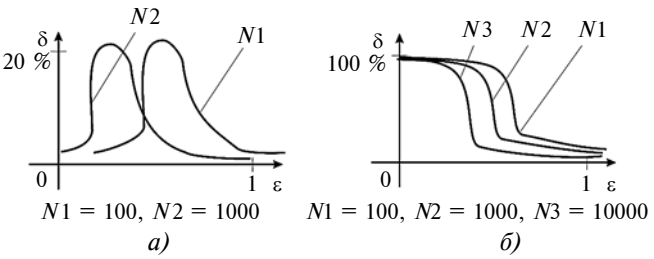


Рис. 2. Поведение точного (*а*) и погрешности приближённого решения (*б*) при малом или стремящимся к нулю ε

связаны с тем, что этот параметр может принимать произвольные значения от 10^3 до 10^{-15} [2].

На примере одномерного стационарного уравнения теплопроводности с подвижным источником тепла:

$$\begin{cases} \varepsilon u''(x) + u'(x) = 0, \ 0 < x < 1, \ \varepsilon \in (0, 1], \\ u(0) = 0, \ u(1) = 1, \end{cases}$$

исследованы основные проблемы и трудности использования классических конечно-разностных методов, особенности поведения приближённого решения. Для этой задачи было найдено точное аналитическое решение:

$$u(x, \varepsilon) = \frac{1 - \exp(-x/\varepsilon)}{1 - \exp(-1/\varepsilon)},$$

которое использовалось для сравнения с полученными приближёнными численными решениями.

Когда параметр ε по величине близок к единице, численное решение и его производные приближают явное решения с хорошей точностью. Поведение точного решения при различных значениях ε и погрешности приближённого решения, полученного с использованием классических разностных схем, при значениях $\varepsilon \geqslant 1$ представлены на рис. 1. Когда же параметр ε является малым или стремится к нулю, численное решение отличается от точного решения на конечную величину, а его производные стремятся к бесконечности, погрешность приближённого решения и его производных представлена на рис. 2.

Процессы сварки и наплавки охватывают весь спектр таких задач. Разработана методика определения точности численного решения и производных в зависимости от применяемых конечно-разностных методов и исходных параметров задачи. Показано, что классические разностные схемы не позволяют получить приближённое решение и производные с заданной точностью, при этом ошибки могут неконтролируемо возрастать. Определены и исследованы области применения классических разностных схем в зависимости от параметров численного метода и параметров физической задачи (рис. 3). Исследовано поведение ошибок приближённого решения и его производных, как для классических, так и для специальных разностных схем. Проведённые исследования по определению областей применимости классических разностных схем позволяют решить две проблемы.

Проблема I. При выбранном численном методе решения системы дифференциальных уравнений и заданных параметрах этого метода (количестве узлов разностной сетки N) указать те

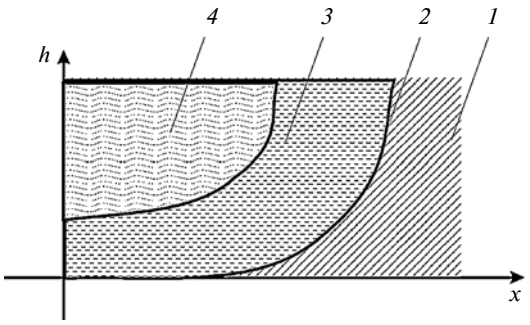


Рис. 3. Области применения классических разностных схем: *1* — зона регулярных решений прикладной задачи; *2* — граница раздела (это не чёткая линия, а размытая); *3* — зона сингулярных решений; *4* — это область, в которой ширина пограничного слоя много меньше шага разностной сетки, но решение в ней тоже сингулярно

значения (области изменения) параметров исходного физического процесса, при которых приближённое решение будет рассчитано с заданной точностью.

Проблема II. При выбранном численном методе решения и заданном значении параметров физической задачи указать те значения параметров численного метода, которые гарантируют заданную точность приближённого решения. Проведёнными исследованиями доказано, что только применение специальных разностных схем позволяет определить приближённое решение и производные с точностью, не зависящей от параметров задач сварки, а только от количества узлов сетки.

Поведение погрешностей приближённого решения и его производных, полученные при использовании специальных разностных схем, приведено на рис. 4.

Также разработана методика, позволяющая определить пригодность (применимость) конкретной разностной схемы для решения конкретной исследуемой задачи или класса задач сварки и наплавки.

При определении погрешности приближённого решения и его производных для задач сварки и области применимости выбранного численного метода необходимо иметь эталон, с которым и сравнивается полученное приближённое решение. Обычно таким эталоном является точное аналитическое решение либо результаты натурных экспериментов. Однако для задач сварки и наплавки найти аналитическое решение практически невозможно либо оно имеет достаточно сложный вид и неэффективно для исследования; проведение натурных экспериментов часто затруднительно или невозможно.

Экспериментальный вычислительный метод создан для определения пригодности конечно-разностного метода и его параметров при решении конкретной задачи или класса задач сварки, а также областей применимости этого метода. Основа метода заключается в определении (вычислении) порядка равномерной сходимости конечно-разностных схем проведением цикла численных экспериментов с использованием полученных величин и характера поведения погрешностей приближённого решения на вложенных сетках [6]. Если при проведении такого цикла численных экспериментов с использованием конкретной конечно-разностной схемы, найденная величина порядка равномерной сходимости становится много меньше единицы или отрицательной, то схема не пригодна для решения либо применима только в небольшом диапазоне изменения параметров исходной задачи сварки. Исследуя области изменения параметров исходного физического процесса сварки и параметров разностной схемы, можно определить области применения этой разностной схемы для решения конкретных задач сварки и наплавки.

Графики поведения величины порядка равномерной сходимости, полученных с использованием специальной и классической разностных схем, приведены на рис. 5.

Таким образом, разработана методика проведения вычислительного эксперимента применительно к задачам сварки и наплавки, основанная на робастных численных методах и исследовании областей применимости разностных схем, позволяющая получать приближённое численное решение этих задач с необходимой, заранее задан-

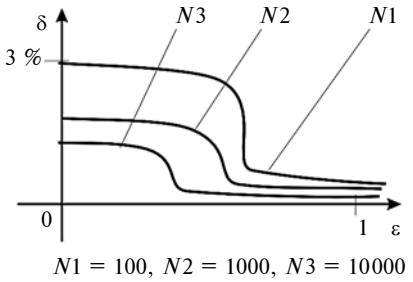


Рис. 4. Поведение погрешностей приближённого решения и его производных, полученные при использовании специальных разностных схем

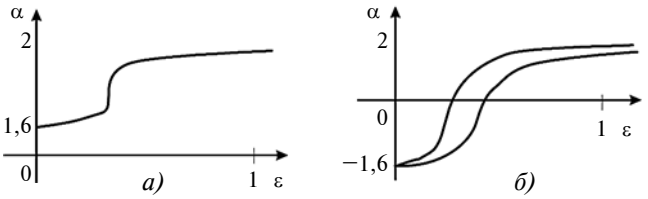


Рис. 5. Порядок равномерной сходимости специальной (*а*) и классической (*б*) разностных схем

ной точностью. При математическом моделировании физических (в том числе и сварочных) процессов предпочтительнее использовать *консервативные разностные схемы*, так как такие схемы обладают повышенной скоростью сходимости и для них выполняется закон сохранения. В работе [8] построены консервативные разностные схемы на стандартных и потоковых сетках, позволяющие аппроксимировать как решение краевой задачи, так и его нормированные производные до второго порядка включительно. Достоинство консервативных схем в случае задач с пограничными слоями состоит в том, что эти схемы позволяют проводить аккуратные вычисления для длительно протекающих процессов Использование консервативных численных методов для сингулярно возмущённых задач является перспективным.

Работа выполнена в рамках фонда фундаментальных исследований — проекты (гранты)) № 13-01-00618 и № 14-01-00322.

Библиографические ссылки

1. **Shishkin G.I., Shishkina L.P.** Difference Methods for Singular Perturbation Problems. Boca Raton: Chapman & Hall / CRC, 2009. P. 393.

2. **Яковлев В.В., Титов В.А., Шишкин Г.И., Першин И.В.** К проблеме численного решения тепловых задач сварки. Сб. трудов НИИТяжмаша ПО Уралмаш. Екатеринбург, 1991. С. 25—48.

3. **Yakovlev V.V., Shishkin G.I., Pershin I.V., Shanchurov S.M.** The Features Arising at the Numerical Modelling of Thermal Problems of Welding and Cladding. // 3rd International conference on Mathematical Modeling and Computer Simulation of Metal Technologies, MMT-2004, September 06—10, 2004, Ariel, Israel. P. 3-134—3-144.

4. **Першин И.В., Титов В.А., Шишкин Г.И. Хрипунов А.П., Яковлев В.В.** Математическое моделирование процесса диффузии водорода в сварных швах при наличии включения // Математическое моделирование. 1991. Т. 3, № 3. С. 27—35.

5. **Першин И.В., Титов В.А., Шишкин Г.И.** Экспериментальное определение порядка равномерной сходимости специальных разностных схем // Математическое моделирование. 1995. Т. 7, № 6. С. 85—94.

6. **Farrell P.A., Hegarty A.F., Miller J.J.H., O'Riordan E., Shishkin G.I.** Robust computational techniques for boundary layers. Boca Raton: Chapman & Hall / CRC, 2000. P. 250.

7. **Яковлев В.В., Шанчуров С.А., Бороненков В.Н., Шишкин Г.И.** Вычислительные эксперименты для электрошлаковых технологий // Автоматическая сварка, 1999, № 9. С. 23—27.

8. **Шишкин Г.И., Шишкина Л.П.** Консервативная разностная схема для сингулярно возмущённого эллиптического уравнения реакции-диффузии; аппроксимация решений и производных // Журнал вычислительной математики и математической физики. 2010. Т. 50, № 4. С. 665—678.

УДК 621.039.53

П.В. Алексеев, канд. техн. наук, **О.Д. Лоскутов,** канд. техн. наук, **А.А. Тутнов,** д-р техн. наук
(НИЦ "Курчатовский Институт", г. Москва)
Snegok1604@yandex.ru

МЕТОДИКА РАСЧЁТА ВРЕМЕНИ ПАДЕНИЯ СТЕРЖНЕЙ СУЗ В ИСКРИВЛЁННЫХ НАПРАВЛЯЮЩИХ КАНАЛАХ РЕАКТОРНЫХ УСТАНОВОК

Описана модель кинетики падения стержней органов регулирования системы управления и защиты (ОР СУЗ) реакторов при аварийном сбросе, основанная на уравнении энергетического баланса.

Оценка скорости и времени падения стержня проведена с учётом гидравлических и механических составляющих расхода потенциальной энергии стержня при его падении.

На примере тепловыделяющих сборок типа ТВСА-Т и ТВСА-КВАДРАТ проведено сопоставление расчётной скорости и времени падения стержня с результатами стендовых испытаний.

Ключевые слова: ОР СУЗ, направляющий канал, расчёт времени падения, методика.

Kinetic model falling rods of control and protection system regulatory of control and protection system (R C & PS) reactors if the alarm reset, based on the equation of energy balance is described.

The valuation of the rod falling speed and time is carried out taking into account hydraulic and mechanical components of a rod potential energy expense at its falling. On the example of heat-generating assemblies like TBCA-T and TBCA- SQUARE (modification of the fuel assembly) comparison of rated speed and rod falling time with bench tests results is carried out.

Key words: R C & PS, guide channel, falling time calculation, methodology.

Одним из условий безопасной эксплуатации атомных реакторных установок (РУ) является надёжность работы системы управления и защиты (СУЗ). Деформация (искривление) каналов СУЗ может стать причиной замедления ввода и даже зависания органов регулирования СУЗ при аварийных ситуациях (АС).

Кинетика стержней СУЗ при их аварийном сбросе зависит от многих факторов. Влияние некоторых из них может быть учтено аналитически с использованием заданных параметров (геометрия, масса стержня, плотность теплоносителя и др.). Оценки некоторых факторов реально могут быть получены только при натурных или стендовых экспериментах по кинетике стержней (коэффициенты гидравлического сопротивления конкретных конструкций).

Ниже рассмотрена модель кинетики падения стержня СУЗ при аварийном сбросе, основанная на уравнении энергетического баланса. При расчёте скорости и времени падения стержня органов регулирования СУЗ рассматриваются гидравлические и механические составляющие расхода потенциальной энергии стержня при его падении. В частности, учитывается энергия упругого деформирования стержня в искривлённом канале по мере его продвижения. Принято, что изгиб канала является плоским.

На рис. 1 и 2 приведены схемы положения стержня в прямом и в искривлённом направляющих каналах (НК).

При падении стержня СУЗ в аварийной ситуации единственным источником энергии является потенциальная энергия стержня, которая преобразуется в кинетическую энергию самого стержня и кинетическую энергию части теплоносителя, выталкиваемого в кольцевой зазор под напором падающего стержня. Кроме этого, потенциальная энергия расходуется на преодоление

вязкого трения теплоносителя о поверхность стержня;

лобового сопротивления теплоносителя в области переднего торца стержня;

трения скольжения между наружной поверхностью стержня и внутренней поверхностью канала при искривлении канала;

сопротивления формоизменению стержня в искривлённом канале.

Допускаем, что первые два фактора в искривлённом канале действуют так же, как и в прямом. Это допущение увеличивает запас при оценке времени падения стержня, так как гидравлическое сопротивление зависит от скорости падения, которая в изогнутом канале меньше, чем в прямом.

Таким образом, скорость падающего стержня СУЗ можно определить, используя уравнение энергетического баланса:

$$mgz - P_A = \frac{m}{2} v_C^2(z) + \frac{\rho V}{2}(v_1^2 - v_0^2) + \\ + E_T(z) + E_G(z) + E_P(z) + E_S(z) + E_D(z), \quad (1)$$

где m — масса стержня; g — ускорение свободного падения; z — путь, пройденный стержнем при падении; P_A — выталкивающая сила (Архимеда); $v_C = dz/dt$ — скорость падения стержня; ρ — плотность теплоносителя; V — объём теплоносителя, вытесняемого падающим стержнем в кольцевой канал; v_1 — скорость теплоносителя в кольцевом зазоре при падающем стержне; v_0 — скорость теплоносителя в кольцевом зазоре при неподвижном стержне.

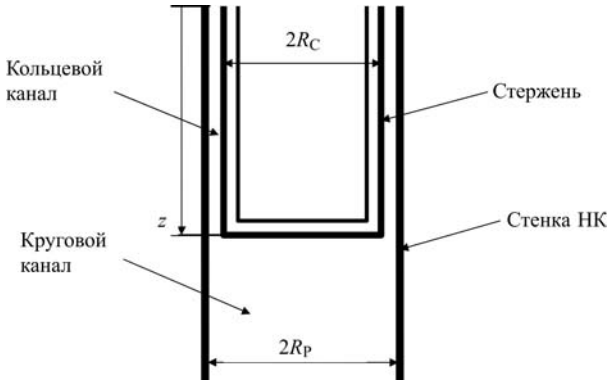


Рис. 1. Схема обозначений и расположения стержня СУЗ в НК

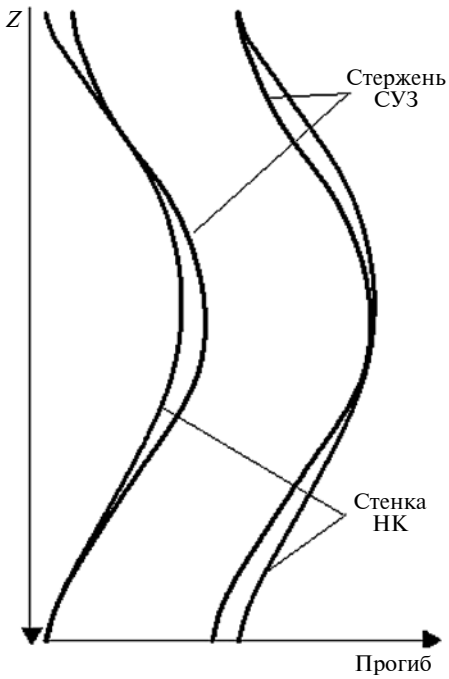


Рис. 2. Схема, иллюстрирующая взаимодействие стержня СУЗ и стенок НК при его искривлении

В свою очередь

$E_T(z) = \int_0^z f_T(z)dz$ — энергия, затраченная на преодоление сил вязкого трения f_T;

$E_G(z) = \int_0^z f_G(z)dz$ — энергия, затраченная на преодоление сил лобового гидравлического сопротивления в области переднего торца стержня f_G;

$E_P(z)$ — энергия, затрачиваемая на проталкивание теплоносителя падающим стержнем;

$E_S(z) = \int_0^z f_S(z)dz$ — энергия, затраченная на преодоление сил трения стержня о стенки искривлённого канала f_S;

$E_D(z)$ — энергия упругой деформации изгиба стержня в искривлённом канале.

Отметим, что первые четыре слагаемых в правой части выражения (1) зависят от скоростей движения стержня и жидкости, а два последних только от глубины погружения стержня в НК. Выразив указанные энергии через геометрические, физико-механические и другие характеристики стержня, канала и теплоносителя, из уравнения (1) можно определить скорость стержня $v_C(z)$ при аварийном сбросе. Соответственно, время прохождения стержня через канал определяется по формуле:

$$t_f = \int_0^L \frac{dz}{v_C(z)}, \qquad (2)$$

где L — ход стержня в активной зоне.

Начальные условия решения задачи ($t = 0$): $z = 0$, $v_C = 0$. Здесь z — расстояние, пройденное падающим стержнем от его верхнего положения.

Рассмотрим подробнее перечисленные компоненты уравнения (1).

Вязкое трение. Движение восходящего потока жидкости в кольцевом пространстве в квазистационарном приближении описывается уравнением Навье-Стокса в цилиндрических координатах [1]:

$$\frac{1}{r}\frac{d}{dr}\left(r\frac{dv}{dr}\right) = \frac{1}{\eta}\frac{dP}{dz},$$

где v — скорость жидкости; r — радиальная координата; η — динамическая вязкость жидкости; $\frac{dP}{dz}$ — градиент давления вдоль оси трубы z.

Для расчёта энергии, затрачиваемой на преодоление вязкого сопротивления движению стержня в канале использована формула для силы трения, действующей на единицу длины цилиндра, движущегося параллельно своей оси в коаксиальном цилиндрическом канале, заполненном жидкостью [1]:

$$f_T = \frac{2\pi\eta v_C}{\ln R_P - \ln R_C},$$

где f_T — сила трения, приходящаяся на единицу длины; η — динамическая вязкость жидкости; v_C — скорость цилиндра относительно жидкости в кольцевом канале; R_P — внутренний радиус канала; R_C — наружный радиус стержня.

Энергия, затраченная на преодоление силы вязкого трения при перемещении стержня на величину z:

$$E_T(z) = \frac{2\pi\eta z}{\ln(R_P/R_C)}\int_0^z (v_C + v_1)d\xi + E(L_C - z), \qquad (3)$$

где v_1 — скорость жидкости в кольцевом канале при неподвижном стержне, определяемая по формуле

$$v_1 = \frac{Q(z)}{\pi(R_P^2 - R_C^2)},$$

где $Q(z)$ — расход жидкости через кольцевой канал, который зависит от перепада давления в НК и скорости падения стержня; $E(L_C - z)$ — энергия, затрачиваемая на преодоление сил вязкого трения на той части стержня, которая находится вне НК; L_C — длина стержня.

Учитывая необходимость запаса по скорости падения стержня, энергию E_T определяем по формуле:

$$E_T(z) = \frac{2\pi\eta L_C}{\ln(R_P/R_C)}\int_0^z (v_C + v_1)d\xi. \qquad (4)$$

Трение при обтекании головки стержня. Сила лобового трения при обтекании переднего торца стержня рассчитывается по формуле:

$$f_G = k_g(v_C + v_2)^2,$$

где k_g — коэффициент сопротивления обтеканию головки стержня; v_2 — скорость жидкости в круговом канале перед стержнем; $v_2 = Q(z)/(\pi R_P^2)$.

В свою очередь

$$k_g = \frac{1}{2} c_g \pi R_C^2 \rho,$$

где c_g — коэффициент лобового сопротивления, определяемый экспериментально.

Соответственно, энергия на преодоление лобового сопротивления определяется по формуле:

$$E_G(z) = \frac{c_g \pi R_C^2 \rho}{2} \int_0^z \left(v_C(\xi) + \frac{Q(\xi)}{\pi R_P^2} \right)^2 d\xi. \qquad (5)$$

Гидравлическое сопротивление движению стержня. Двигаясь вниз, стержень в единицу времени вытесняет объём жидкости

$$V = \pi R_C^2 v_C.$$

Предполагаем, что вся эта жидкость направляется вверх по кольцевому каналу. Тогда общий объём жидкости, проталкиваемый через кольцевой канал в единицу времени, т. е. расход через кольцевой канал составит:

$$Q(z) = \pi R_C^2 v_C + \pi v_1 (R_P^2 - R_C^2).$$

Скорость жидкости в кольцевом канале при падающем стержне имеет вид

$$v_1 = \frac{Q(z) + \pi R_C^2 v_C}{\pi (R_P^2 - R_C^2)}.$$

Сила гидравлического сопротивления движению стержня:

$$f_P = \pi P(z) R_C^2,$$

где $P(z)$ — давление воды перед стержнем.

Соответственно, энергия, затрачиваемая на преодоление этих сил, запишется в виде

$$E_P(z) = \pi R_C^2 \int_0^z \left(\Delta P \frac{z}{L} + \rho g (z + L_C) \right) d\xi, \qquad (6)$$

где $\Delta P = P_0 - P_L$ — перепад давления между верхним (P_0) и нижним (P_L) положением стержня, зависящий от расхода воды через канал.

Предполагается, что давление в НК меняется линейно по высоте НК. При нулевом расходе перепад давления в НК обуславливается высотой столба воды, который на уровне входа стержня в НК приблизительно равен длине стержня.

Перепад давлений зависит, в частности, от расхода воды через канал и может быть определён экспериментально для каналов конкретных конструкций (размеры, наличие и параметры гидротормоза, отверстия в стенке канала и т. д.).

Расчёт энергии трения стержня о стенки канала. Примем следующие допущения:

коэффициент трения постоянен по всей длине стержня;

стержень соприкасается со стенкой канала по всей длине погрузившейся в канал части стержня.

Последнее допущение повышает консерватизм оценки времени падения стержня. Примем, что при прохождении стержня через канал его вес распределяется по площади контакта стержня со стенкой канала равномерно. Тогда сила трения стержня по мере продвижения его в искривлённом канале на глубину ψ может быть рассчитана по формуле:

$$f_S(\psi) = (P_C - P_A)\mu \frac{1}{\psi} \int_0^\psi \frac{\Phi(\xi) d\xi}{\sqrt{1 + \Phi(\xi)^2}},$$

где P_C — вес стержня; $P_A = \rho g \pi R_0^2 L_C$ — выталкивающая сила Архимеда; μ — коэффициент трения между поверхностью стержня и стенкой канала; $\Phi(\xi)$ — тангенс угла между касательной к стенке канала в точке ξ и осью z.

Энергия, затраченная на преодоление силы трения при перемещении стержня на величину z:

$$E_S(z) = (P_C - P_A)\mu \int_0^z \frac{1}{\psi} \int_0^\psi \frac{\Phi(\xi) d\xi}{\sqrt{1 + \Phi(\xi)^2}} d\psi. \qquad (7)$$

Расчёт энергии деформации стержня. Примем допущение, что форма изогнутого стержня и форма канала идентичны. Расчётные и натурные исследования прогибов каналов показывают, что отношение максимального прогиба к длине канала обычно не превышает одного процента. Деформации растяжения на выгнутой поверхности стержня при этом не будут превышать одну сотую процента, т. е. можно считать, что по мере погружения в канал стержень деформируется линейно-упруго.

Ввиду этого энергию деформации стержня можно записать в виде [2]:

$$E_D(z) = \frac{EJ}{2} \int_0^z \frac{|x''_\xi|}{\left[\sqrt{1 + (x'_\xi)^2}\right]^3} d\xi, \qquad (8)$$

где E — модуль упругости; x — прогиб стержня; J — момент инерции стержня.

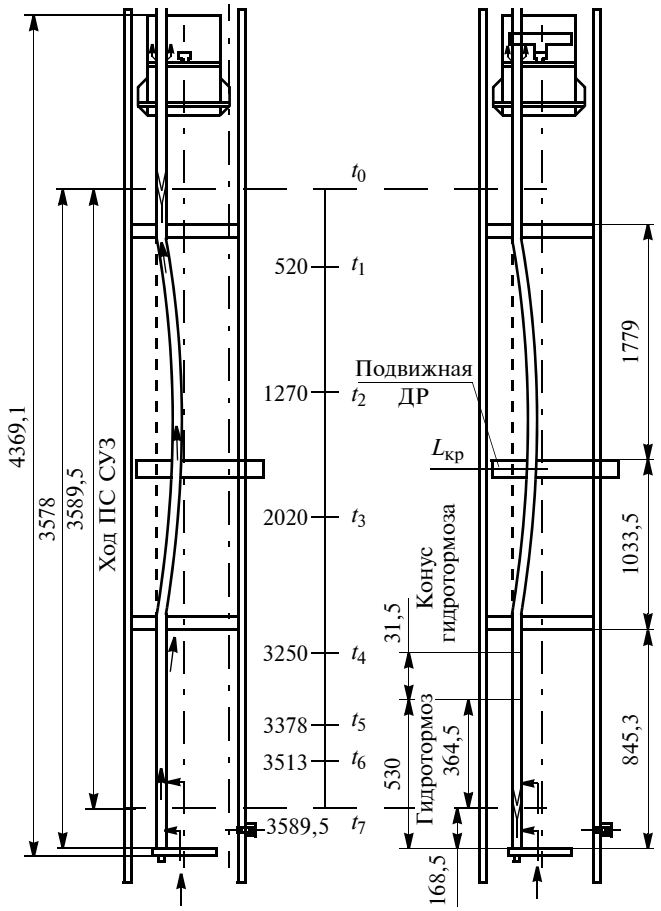


Рис. 3. Макет ТВСА-Т с имитатором ПС СУЗ в реторте стенда испытаний гидротормоза ТВСА-Т

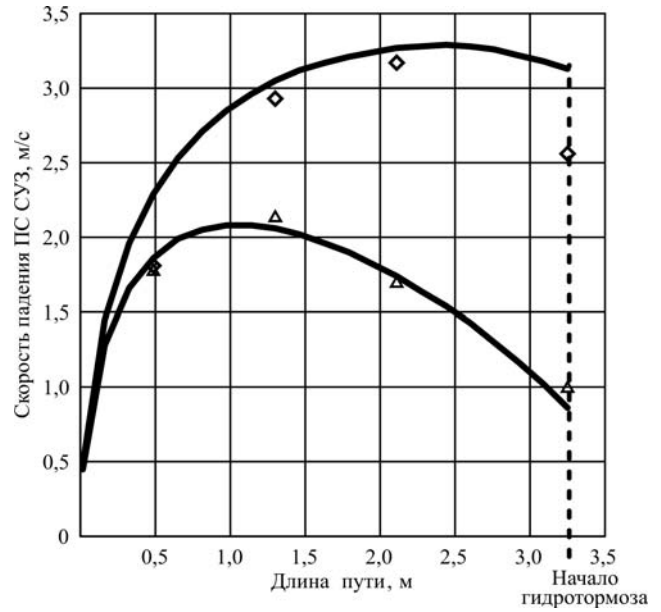


Рис. 4. Расчётные зависимости (сплошные линии) и экспериментальные значения (символы) скорости падения стержня ОР СУЗ:

◇ — отсутствие расхода воды; △ — расход воды 5,2 м^3/ч

В частности, для полого круглого стержня

$$J = \frac{\pi}{4}\,[R_0^4 - (R_0 - \Delta R_C)^4],$$

где ΔR_C — толщина стенки стержня.

Таким образом, используя выражения (3—8), из уравнений (1) и (2) можно рассчитать скорость стержня СУЗ и время прохождения через канал при его аварийном сбросе.

Расчётное время падения стержней СУЗ сравнивалось с экспериментальными результатами, полученными в ОКБМ им. И.И. Африкантова (г. Нижний Новгород) при испытании гидротормоза тепловыделяющей сборки ТВСА-Т на стенде. При экспериментах измерялось время падения ОР СУЗ (полное и по участкам), расход воды через НК и перепад давлений между верхней и нижней камерами. Расход воды через НК варьировался от 0 до 5,2 м^3/ч, прогиб имитатора от 0 до 20 мм. Схема стенда приведена на рис. 3.

Сравнение расчётных и экспериментальных результатов показало, что характер и соотношения между расчётными и стендовыми результатами в указанном диапазоне изменения максимального прогиба практически одинаковы. На рис. 4 приведены расчётные зависимости скорости падения стержня на разных участках НК (сплошные линии) при максимальном прогибе 20 мм. Там же приведены средние скорости падения стержня, определённые при стендовых испытаниях по участкам движения ПС СУЗ при указанном прогибе.

Следует отметить, что при нулевом расходе воды через НК расчётная скорость падения стержня ОР СУЗ на участке перед гидротормозом оказалась заметно выше средней экспериментальной скорости падения макета кластера ТВСА-Т на этом участке. Указанное расхождение в скоростях связано с наличием гидротормоза, не учитывавшимся в расчётах. Влияние гидротормоза на скорость падения стержня увеличивается по мере приближения стержня к гидротормозу. Влияние гидротормоза на скорость падения стержня вне участка гидротормоза тем сильнее, чем меньше напор встречного потока, т. е. чем меньше расход воды.

В табл. 1 приведено расчётное и экспериментальное время падения ОР СУЗ на участке НК до начала гидротормоза при разных максимальных прогибах и расходах воды.

Аналогичные расчёты скорости и времени падения стержня ОР СУЗ были проведены для кластера ТВС-КВАДРАТ. В табл. 2 представлены ре-

Таблица 1

Сравнительные данные экспериментальных и расчётных времён прохождения стержня ПЭЛ через имитатор НК до участка гидротормоза

Прогиб канала, мм	Расход воды, $м^3/ч$	Время падения СУЗ, с		Относительная ошибка, %
		эксперимент	расчёт	
0	5,2	2,17	2,13	–1,9
	4,1	1,86	1,72	–7,5
	3,0	1,41	1,52	7,8
	2,0	1,31	1,41	7,6
	0	1,24	1,28	3,3
10	5,2	2,27	2,14	–5,7
	4,5	2,01	1,84	–8,5
	4,0	1,86	1,71	–8,1
	3,5	1,63	1,60	–1,9
	3,0	1,45	1,52	4,9
	2,0	1,32	1,41	6,8
	0	1,25	1,29	3,2
20	5,2	2,36	2,16	–8,5
	4,0	1,92	1,71	–11
	3,0	1,52	1,52	0
	2,0	1,36	1,41	3,7
	0	1,27	1,29	1,6

Таблица 2

Сравнение экспериментальных и расчётных характеристик падения ПС СУЗ на участке НК до гидротормоза

Расход воды через НК, $м^3/ч$	Среднее время падения, с	Расчётное время падения, с	Средняя скорость, м/с	Расчётная средняя скорость, м/с
5,9	1,20	1,14	3,05	3,20
0	1,06	1,05	3,45	3,48

зультаты расчётов кинетики падения стержня и экспериментальные значения среднего времени и средней скорости падения полномасштабного макета кластера ТВС-КВАДРАТ для участка НК до гидротормоза при максимальном расходе теплоносителя 5,9 $м^3/ч$ и при нулевом расходе воды.

Расчётная скорость падения ОР СУЗ на участке перед гидротормозом оказалась выше средней экспериментальной скорости падения макета кластера ТВС-КВАДРАТ на этом участке. По-видимому, указанное расхождение в скоростях, так же, как и в случае с ТВС-Т, связано с влиянием гидротормоза на кинетику падения стержня.

С учётом погрешности задания ряда исходных данных, соответствие расчётных и экспериментальных результатов, приведённых в таблицах, следует считать удовлетворительным. Поскольку кинетику подвижных регулирующих элементов реакторов типа ВВЭР и РБМК определяют одни и те же факторы, а именно, гидравлическое сопротивление теплоносителя и механическое сопротивление в искривлённом канале, изложенная методика может использоваться для оценки предельно допустимых стрел прогиба каналов СУЗ РУ ВВЭР и РБМК.

С использованием описанной методики проведены исследования влияния величины и формы искривления НК на время падения стержня. На кинетику падения стержня в искривлённом канале влияет не только величина максимального прогиба, но и расположение максимального прогиба по высоте канала. Это связано с тем, что при одинаковой величине максимального прогиба значения энергии механического сопротивления (трение и деформация стержня) могут различаться в несколько раз в зависимости от местоположения максимального прогиба по высоте канала. Согласно расчётам, чем выше (т. е. ближе к началу движения) расположен максимум изгиба канала, тем более вероятна возможность зависания стержня СУЗ.

Библиографические ссылки

1. **Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М.** Гидродинамика. (Теоретическая физика, т. VI.) 3-е изд., испр. М.: Наука. 1986. 736 с.

2. **Биргер И.А., Мавлютов Р.Р.** Сопротивление материалов: учеб. пособие. М.: Наука. 1986. 560 с.

УДК 681.5:624

А.К. Порожняков, Ю.Б. Томашевский, д-р техн. наук, проф., **Н.П. Митяшин**, д-р техн. наук, проф.
(Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования "Саратовский государственный
технический университет им. Ю.А. Гагарина ", г. Саратов),
Е.Я. Кац, канд. техн. наук (ООО "Центргазсервис", г. Москва)
yurytomash@mail.ru

ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ПОСТРОЕНИЯ РЕСУРСНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ СЛОЖНОЙ СИСТЕМЫ

Рассмотрена задача многокритериального выбора связей между материально-техническими ресурсами и элементно-сметными нормами. Для её решения предложена методика, заключающаяся в присвоении критериям весовых коэффициентов ценности с последующим ранжированием их возможных значений.

Ключевые слова: ресурсно-технологическая модель, оптимизация, проектная документация, сметное производство.

Task of multicriteria choice of links between material and technical resources and the element-estimate standards is considered. The technique is proposed to solve it. This technique is to assign the criteria weighting coefficients values followed by the ranking of their possible values.

Key words: resource and technological model, optimization, project documentation, the estimated production.

Введение. На различных этапах составления проектно-сметной документации [1] часто возникает потребность обеспечить оптимальность выбора того или иного решения одновременно по нескольким критериям. Зачастую эти критерии противоречивы и оптимизация по каждому из них дает различные результаты, что, в свою очередь, делает необходимым постановку и решение задачи многокритериальной оптимизации. Как показывает практика автоматизации проектно-сметной документации, наряду с числовыми критериями часто приходится иметь дело с нечисловыми. Актуальной задачей в этом случае является разработка методики на базе хорошо зарекомендовавшего себя для числовых критериев способа сведения многокритериального выбора к однокритериальному.

Предлагаемая методика. Пусть имеется несколько критериев $\varphi_k(X)$, $k \in [1, n]$, где X — множество допустимых решений; $n = n_1 + n_2$ — общее число критериев, при этом n_1 — количество числовых, а n_2 — нечисловых критериев.

Предлагаемая методика состоит из следующих этапов:

1. Возможные значения каждого критерия ранжируются по их ценности следующим образом:

область изменения каждого числового критерия φ_i ($i = 1, ..., n_1$) разбивается на интервалы, точки каждого из которых можно считать равноценными с точки зрения оценки решения. Пусть число интервалов числового критерия φ_i равно m_i. Тогда каждому значению j-го интервала ($j = 1, ..., m_i$) экспертно присваивается ранг $\overline{r_{ij}}$ так, чтобы он отражал ценность значений этого интервала относительно ценности остальных;

для каждого нечислового критерия φ_p ($p = n1 + 1, ..., n$) соответствующему лингвистическому значению присваивается ранг $\overline{r_{pc}}$ ($s = 1, ..., m_p$) так, чтобы он отражал его ценность по отношению к ценности остальных значений. Здесь m_p — число возможных лингвистических значений критерия φ_p.

2. Каждый критерий $\varphi_k(X)$ ($k = 1, ..., n$) независимо от его природы экспертно оценивается весовым коэффициентом ρ_k так, чтобы выполнялось условие нормировки $\Sigma\rho_k = 1$.

Отметим, что значения рангов целесообразно выбирать из интервала [0, 1], причём значение наиболее ценного ранга будет равно 1, наименее ценного — 0.

3. Пусть x — некоторое решение из множества допустимых решений X. Это решение по каждому из критериев φ_k однозначно получает некоторый ранг $\overline{r_k}(x)$, равный $\overline{r_{ij}}$ или $\overline{r_{ps}}$ соответственно для числового i-го или нечислового p-го критерия. Тогда значение следующей функции

$\Phi(x) = \sum_{k=1}^{n} (\rho_k \overline{r_k}(x))$ может служить скалярным критерием вышеописанной задачи выбора.

Ресурсно-технологическая модель объекта строительства. Задачей подготовки исходных данных для сметного производства является формирование начальной поэлементной модели проектируемого объекта, которая автоматически преобразуется в модель объекта строительства — специализированную сметно-нормативную базу данных локальных смет. Начальная поэлементная модель проектируемого объекта представляет совокупность документов, входящих в задания инженерных подразделений сметным отделам, а также сопровождающей эти документы информации [2]. Сопровождающая информация формируется таким образом, чтобы:

обеспечить последующее структурирование локальных смет по элементам объектов строительства (площадкам, сооружениям, очередям, пусковым комплексам);

обеспечить автоматическую передачу информации для последующей обработки;

обеспечить автоматический расчёт локальных смет.

Документы и информация при этом должны быть помещены в единое информационное пространство с обеспечением версионности и признаков использования. Каждый документ кроме файла для печати его стандартного вида сопровождается файлом (или файлами) для использования смежными программами. Документы, выпускаемые проектными подразделениями, являющиеся частью заданий на составление смет, должны сопровождаться набором исходных данных в электронном виде. Этот набор представляет собой xml-файл с заданной структурой, в котором содержится информация, достаточная для разработки локальной сметы. Такой файл содержит несколько сериализованных связанных сущностей: перечень разделов, работ и связанных с ними материально-технических ресурсов (МТР). А также заголовочную информацию, достаточную для отнесения задания к конкретному узлу дерева объекта в информационном хранилище. Впоследствии смета должна быть помещена в этот же узел.

Процедуру формирования набора исходных данных (НИД), в общем виде, можно разбить на следующие этапы:

формирование общей структуры НИД.

определение в рамках существующего раздела видов работ и относящихся к ним ресурсов. Выбор осуществляется в соответствии с данными справочника элементно-сметных норм (ЭСН).

разбор информации о МТР.

редактирование (при необходимости) данных о МТР.

установка соответствия между МТР и работами из справочника ЭСН.

формирование задания на проведение сметного расчёта.

Совокупность всех наборов исходных данных по одному объекту, входящих в состав задания на составление смет, можно считать электронной поэлементной моделью объекта строительства.

Использование многокритериальной оптимизации для процессов формирования модели. При формировании электронной поэлементной модели объекта строительства одним из основных действий специалиста-проектировщика является соотнесение материально-технического ресурса с некой работой, связанной с этим ресурсом, представленной в виде элементно-сметной нормы. Для корректного соотнесения используется справочная информация и личный опыт экспертов. В качестве оптимизации данного бизнес-процесса предлагается следующее: при каждом "ручном" соотнесении экспертами МТР с ЭСН в таблице базы данных формируется запись, содержащая уникальный идентификатор МТР, уникальный идентификатор ЭСН, уникальный идентификатор отдела, дату использования и счётчик количества использований данной связи (табл. 1).

Таблица 1

Структура таблицы связей МТР-ЭСН

ID МТР	ID ЭСН	ID отдела	Дата	Счётчик

В дальнейшем при работе с МТР проектировщику будут предлагаться для использования ЭСН из таблицы связей МТР-ЭСН, выбранные по ключу ID МТР и отсортированные по убыванию значений $\Phi(x)$, рассчитанных по формуле $\Phi(x) = \sum_{k=1}^{n} (\rho_k \overline{r_k}(x))$. Записи с равными значениями $\Phi(x)$ сортируются по убыванию значения "счётчик использования связи". Данные для расчёта получены экспертно при помощи метода анализа иерархий [3]. В качестве примера приводятся данные, используемые в проектном

Таблица 2

Пример расстановки весовых коэффициентов критериев

Наименование вида критерия	Весовые коэффициенты критериев
Отдел	0,68
Дата создания	0,32

подразделении ОАСУ ТП (табл. 2—4). Для разных проектных подразделений коэффициенты различны. Если при соотнесении МТР и ЭСН в таблице связей уже содержится запись с соответствующими значениями ID МТР, ID ЭСН и ID отдела — в текущей записи обновляется значение даты использования (устанавливается текущая дата) и инкрементируется значение счётчика количества использований.

Пример работы вышеописанного алгоритма для МТР "Компрессионный блок Wedge 120 galv", используемого специалистом-проектировщиком ОАСУ ТП, представлен в табл. 5.

Заключение. В результате была сформулирована задача многокритериального выбора связи МТР-ЭСН. Для её решения предложена методика, основанная на сведении задачи к однокритериальной и заключающаяся в присвоении критериям весовых коэффициентов ценности с последующим ранжированием их возможных значений. Применение ранжирования определяется необходимостью решения задачи в предметных областях, характеризующихся использованием критериев нечисловой природы. Приведены результаты использования разработанной методики при формировании электронной поэлементной модели объекта строительства на примере конкретного МТР, используемого спе-

Таблица 3

Пример расстановки весовых коэффициентов значений для критерия "Отдел"

Отделы	Весовые коэффициенты значений
Отдел автоматизированных систем управления технологическими процессами (ОАСУ ТП) Отдел связи и автоматизированных систем управления пожарной безопасностью (ОС и АСУ ПБ)	0,4
Отдел электрохимзащиты (ОЭХЗ) Электротехнический отдел (ЭТО)	0,3
Строительный отдел (СО) Дорожный отдел (ДО) Отдел охраны окружающей среды (ОООС) Отдел геотехнических исследований (ОГИ)	0,2
Отдел водоснабжения и канализации (ОВК) Отдел магистральных газопроводов и компрессорных станций (ОМГ и КС) Отдел технологических и инженерных коммуникаций (ОТИК) Технологический отдел (ОТ) Отдел теплогазоснабжения, вентиляции и ремонтных баз (ОТГВ и РБ)	0,1

Таблица 4

Пример расстановки весовых коэффициентов значений для критерия "Дата создания"

Разница между текущей датой и датой создания связки	Весовые коэффициенты значений
Менее 1 года	0,4
От 1 года до 2 лет	0,3
От 2 лет до 3 лет	0,2
Более 3 лет	0,1

Таблица 5

Результаты для МТР "Компрессионный блок Wedge 120 galv"

ЭСН	Отдел	Разница между текущей датой и датой создания связки	Счётчик	Скалярный критерий выбора
Короб (кожух) для герметизации проходов кабелей через стены во взрывоопасных помещениях неразъемный	ОАСУ ТП	Менее 1 года	41	0,4
Кассета герметизирующая разборного типа для герметизации проходов кабелей через стены во взрывоопасных помещениях, периметр кассеты до 2 м	ОС и АСУ ПБ	От 1 года до 2 лет	67	0,368
Кассета герметизирующая разборного типа для герметизации проходов кабелей через стены во взрывоопасных помещениях, периметр кассеты до 0,75 м	ОС и АСУ ПБ	От 1 года до 2 лет	19	0,368
Металлические конструкции	ЭТО	Менее 1 года	46	0,332

циалистом-проектировщиком ОАСУ ТП для построения общей ресурсно-технологической модели будущей сметы. Разработанный подход существенно повышает эффективность процесса создания проектной документации.

Библиографические ссылки

1. **Порожняков А.К.** Алгоритм формирования ведомости объёмов строительных и монтажных работ в задачах автоматизации составления проектной документации / А.К. Порожняков, Ю.Б. Томашевский // Вестник СГТУ. 2013. № 3 (72). С. 92—95.

2. **Милованов В.И.** Компьютерная технология информационного конвейера проектирования / В.И. Милованов, Ю.А. Кривогузов, О.Е. Кузнечиков, Е.Я. Кац, Л.А. Тепер, А.К. Порожняков // Газовая промышленность. 2012. № 11. С. 75—78.

3. **Саати Т.** Метод анализа иерархий / Саати Т. / Перевод с англ. М.: Радио и связь, 1993. 278 с.

УДК 621.791

В.А. Фролов, канд. техн. наук, доц.
(Южно-Российский государственный политехнический университет, г. Волгодонск)
blasters@yandex.ru

СТАТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И СИНЕРГЕТИКА СВАРОЧНОЙ ДУГИ

Рассмотрены сварочные источники питания с различным типом вольт-амперных характеристик. Приведены графики зависимости мощности от тока. Определена методика вывода энергосберегающего функционала. Предложен новый тип вольт-амперных характеристик на основе дробно-рациональной функции, способ получения дробно-рациональных характеристик.

Ключевые слова: синергетика дуги, вольт-амперная характеристика, дробно-рациональная функция.

Welding power supplies with various type of volt-ampere characteristics are considered. Dependence diagrams of power from current are adduced. The methodology of energy saving functionality conclusion is defined. The new type of volt-ampere characteristics on a basis of fractionally-rational function and a receipt method of the fractional- rational characteristics are proposed.

Key words: arc synergy, volt-ampere characteristic, fractionally-rational function.

В настоящее время основным критерием оценки сварочно-технологических свойств источников питания является вид вольт-амперной характеристики (ВАХ). Существующие источники питания имеют жёсткую, крутопадающую, возрастающую и штыковую ВАХ. В результате анализа ВАХ дуги и источника питания (источник питания сварочный трансформатор) разработан [1] критерий устойчивого горения дуги $k_у$:

$$i = i_0 e^{-\frac{k_у}{L}t};$$

$$k_у = \frac{\partial U_д}{\partial I} - \frac{\partial U_{ип}}{\partial I} > 0,$$

где i — изменение тока; i_0 — начальное значение тока; L — индуктивность сварочной цепи; $\frac{\partial U_д}{\partial I}$ — дифференциальное сопротивление дуги; $\frac{\partial U_{ип}}{\partial I}$ — дифференциальное сопротивление источника питания.

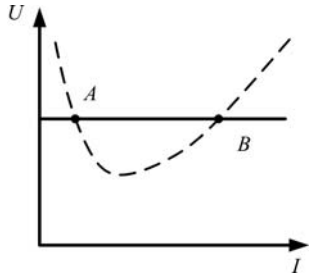


Рис. 1. Вольт-амперная характеристика источника питания и дуги:
U — напряжение дуги, источника питания; I — ток дуги, нагрузки источника питания

Рассмотрим процесс сварки неплавящимся электродом. На рис. 1 изображена одна линия семейства ВАХ дуги при длине дуги l = const и жёсткая ВАХ источника питания. Процесс возбуждения дуги осуществляется контактным или

бесконтактным способами с использованием высоковольтного источника питания, но всегда ток возрастает от нуля до конкретного значения. На участке *AB* $k_у$ имеет три значения: $k_у \leqslant 0$ — неустойчивый переходной процесс; $k_у = 0$ — на границе устойчивости; $k_у \geqslant 0$ — устойчивый переходной процесс, так как $k_у = \frac{\partial U_д}{\partial I}, \frac{\partial U_{ип}}{\partial I} = 0$. Причём, изменяя форму сечения электрода между точками *A* и *B*, можно получить практически любой наклон ВАХ дуги. Потеря устойчивости является важным фактором, сопровождающим процесс самоорганизации [2]. В результате самоорганизации дуга проходит все фазы устойчивости и занимает устойчивое положение в точке *B*, аналогичные результаты будут у источников питания с постоянным наклоном ВАХ. Поэтому можно сказать, что критерий $k_у$ характеризует стремление дуги к синергетике дугового процесса. Инверторные источники питания имеют силовую схему, содержащую диоды, которые работают как ключевые элементы в зависимости от напряжений и токов на реактивных элементах. Такая схема имеет переменные во времени параметры, поэтому использовать $k_у$ в этом случае некорректно. При питании дуги от аккумуляторов источник питания не содержит индуктивности, а дуга горит устойчиво. Дуга подключена параллельно источнику питания, поэтому напряжение дуги должно быть равно напряжению источника питания. Если, согласно ВАХ дуги, напряжение меньше, то в дуге происходят сложные физико-химические процессы, приводящие к выравниванию напряжений.

В связи с тем, что дуга — синергетический процесс, стремящийся к самоорганизации перемещением рабочей точки в устойчивое положение, при условии физической возможности существования дуги, актуальны другие критерии оптимального хода сварочного процесса, например низкое энергопотребление, которое повышает надёжность работы сварочного оборудования, КПД процесса сварки, уменьшает сварочные деформации и остаточные напряжения. Для определения оптимальных статических характеристик сварочных источников питания используем метод аналитического конструирования агрегированных регуляторов (АКАР) [3].

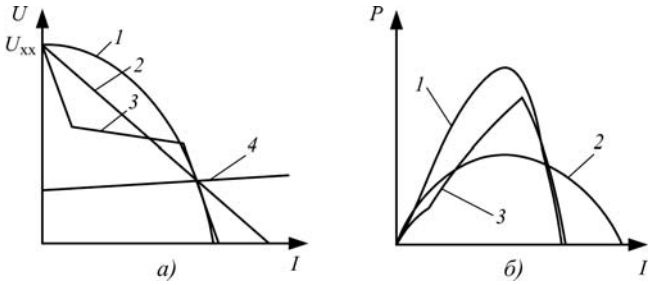


Рис. 2. Графики изменения напряжения и мощности от тока: *а* — вольт-амперные характеристики источников питания и линия нагрузки; *б* — изменение мощности

ВАХ для ручной дуговой сварки плавящимся электродом может быть крутопадающей, линейной, ломаной. На рис. 2, *а* представлены различные типы ВАХ источников питания: *1* — крутопадающая ВАХ; *2* — линейная ВАХ; *3* — ломаная ВАХ; *4* — характеристика условной рабочей нагрузки при ручной дуговой сварке ($U_д = 20 + 0{,}04I_д$ согласно ГОСТ Р МЭК 60974-1—2004). ВАХ состоит из двух участков: выход на рабочую область и рабочий участок, определяемый по условной рабочей нагрузке с учётом возмущений: для жёсткой характеристики весь диапазон изменения тока, для падающей и ломаной ВАХ спадающий участок параболы, для штыковой выходной характеристики вертикальный участок. Крутопадающая ВАХ применяется в большинстве существующих сварочных источниках питания, линейную ВАХ получают с использованием балластных реостатов, ломаная ВАХ состоит из трёх участков и получить такую форму ВАХ можно только с использованием электронных регуляторов.

На рис. 2, *б* представлены графики зависимости мощности дуги от тока сварки при различных типах ВАХ сварочных источников питания: *1* — ВАХ источника питания крутопадающая; *2* — ВАХ линейная; *3* — ВАХ ломаная.

Для построения изменения мощности крутопадающей ВАХ внешняя характеристика источника питания заменена четвертью эллипса

$$P = UI = IU_{xx}\sqrt{1 - \frac{I^2}{I_{max}^2}},$$

где U_{xx} — напряжение холостого хода; I_{max} — ток короткого замыкания.

График изменения мощности в нагрузке линейной ВАХ определяется выражением

$$P = UI = (U_{xx} - R_{вн}I)I =$$
$$= \left(U_{xx} - \frac{U_{xx}}{I_{max}}I\right)I = U_{xx}\left(I - \frac{I^2}{I_{max}}\right),$$

где $R_{вн}$ — внутреннее сопротивление источника питания.

Определим рабочий участок падающей характеристики, взяв первую производную изменения мощности по току. При $\frac{d(IU_{\text{хх}} - R_{\text{вн}}I^2)}{dt} > 0$ парабола возрастает, если $\frac{d(IU_{\text{хх}} - R_{\text{вн}}I^2)}{dt} = 0$, то имеем экстремум, а при $\frac{d(IU_{\text{хх}} - R_{\text{вн}}I^2)}{dt} < 0$ парабола падает. Проделав вычисления, получим $I > \frac{U_{\text{хх}}}{2R_{\text{вн}}}$. Изменение мощности в нагрузке ломаной ВАХ имеет три участка:

$$U = U_{\text{хх}} - \frac{\Delta U}{\Delta I} I = U_{\text{хх}} - R_{\text{вн}1} I;$$

$$P = (U_{\text{хх}} - R_{\text{вн}1} I) I;$$

$$U = U_{\text{хх}1} - \frac{\Delta U}{\Delta I} I = U_{\text{хх}1} - R_{\text{вн}2} I;$$

$$P = (U_{\text{хх}1} - R_{\text{вн}2} I) I;$$

$$U = U_{\text{хх}2} - \frac{\Delta U}{\Delta I} I = U_{\text{хх}2} - R_{\text{вн}3} I;$$

$$P = (U_{\text{хх}2} - R_{\text{вн}3} I) I.$$

Использование энергосберегающих технологий — одно из приоритетных направлений науки. Для решения задач энергосберегающего управления в сварке используем энергосберегающий функционал, учитывающий количество потребляемой электроэнергии. Как видно из представленных графиков, минимальной потребляемой мощности соответствует ломаная ВАХ. Анализируя графики на рис. 2, можно разработать оптимизирующий энергосберегающий функционал, соответствующий минимальной длине линии возрастания, спада мощности при изменении тока вычисляемой из площади прямоугольных треугольников. На рис. 3 представлен график изменения мощности от тока. Минимальная площадь фигур изменения мощности от тока соответствует минимуму энергопотребления. Наклон графика изменения мощности соответствует определённому напряжению холостого хода, меньше наклон — меньше напряжение холостого хода. Для нерабочего участка минимальная площадь соответствует прямоугольному треугольнику, меньше этой площади может быть фигура, изображенная на рис. 3 пунктиром. Однако в этом случае $U_{\text{хх}}$ будет меньше рабочего напряжения, и дуга горит нестабильно. Оптимизирующий функционал J состоит из площадей S_1 и S_2. Площадь S_2 представляет собой рабочий участок ВАХ. На графике площади S_1 и S_2 изменяются по линейному закону $P = kI$, где $k = \frac{\Delta P}{\Delta I}$:

$$J = S_1 + S_2 = \int_0^{I_1} \frac{\Delta P}{\Delta I} i di + \int_{I_1}^{I_2} \left(P_2 - \frac{\Delta P}{\Delta I} i \right) di. \quad (1)$$

Определим форму ВАХ источника питания с учётом оптимизирующего функционала (1).

Для треугольника S_1 изменение мощности равно $\frac{dp}{\Delta I} I$, при линейной ВАХ источника питания происходит согласно выражению $\left(U_{\text{хх}} - \frac{dU}{dI} I \right) I$.

Приравняв изменение мощностей, упростив и разделив переменные, получим $\frac{dU}{U_{\text{хх}} - U} = \frac{dI}{2I}$. Решением дифференциального уравнения будет выражение

$$U = \frac{1}{\sqrt{I}} + U_{\text{хх}}. \quad (2)$$

Первое слагаемое выражения (2) характеризует особенности интегрального исчисления и обеспечивает плавность перехода от нуля до конкретного значения мощности, поэтому им можно пренебречь.

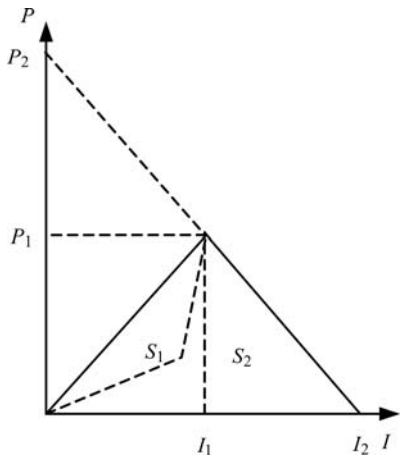


Рис. 3. График изменения мощности для определения оптимизирующего функционала

Для треугольника S_2 (см. рис. 3) получим

$$\frac{dp}{dI} - \frac{dp}{dI} I = \left(U_{\text{хх}} - \frac{dU}{dI} I \right) I.$$

Выразив $U_{\text{хх}} = \frac{dU}{dI} I_2$, получим:

$$\frac{(I_2 - I)(IdU + UdI)}{dI} = \left(\frac{dU}{dI} I_2 - \frac{dU}{dI} I \right) I.$$

Упростив полученное выражение, найдём

$$I_2 = I. \quad (3)$$

Согласно выражениям (2) и (3) ВАХ источника питания для нерабочей области будет жёсткой, а для рабочей области штыковой.

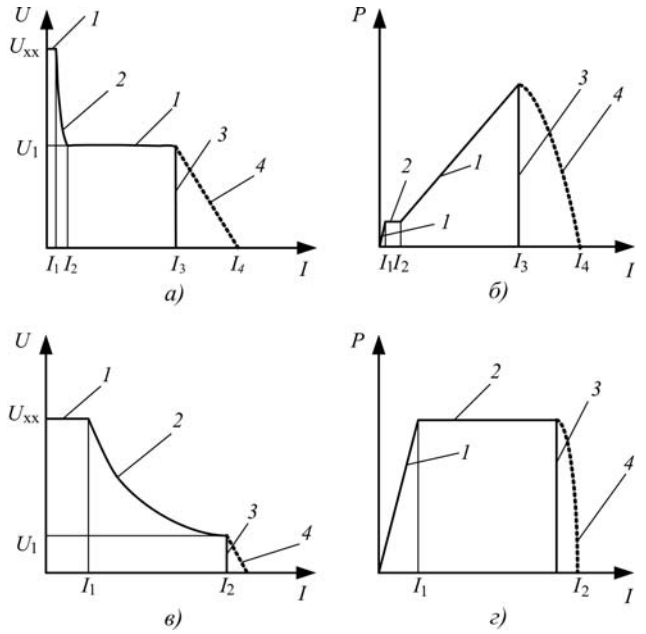


Рис. 4. Графики изменения напряжения, мощности от тока для дробно-рациональной ВАХ:
а — дробно-рациональная функция в начале сварки; *б* — изменение мощности при дробно-рациональной функции в начале сварки; *в* — дробно-рациональная функция на рабочем участке; *г* — изменение мощности, дробно-рациональная ВАХ на рабочем участке

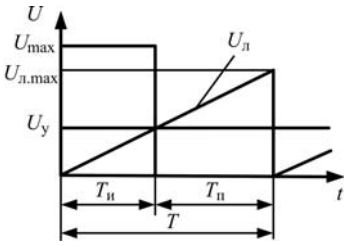


Рис. 5. Схема регулирования выходного напряжения с помощью широтно-импульсной модуляции

Анализируя графики изменения напряжения, мощности и технологические особенности сварки, можно предложить еще один вид ВАХ для формирования внешней характеристики источника питания — дробно-рациональную функцию. При изменении напряжения $U = \frac{K}{I}$ получим горизонтальный участок изменения мощности $P = K$. На рис. 4 представлены следующие графики: *1*, *2*, *3*, *4* — жёсткая, дробно-рациональная, штыковая, падающая ВАХ соответственно. Для надёжного возбуждения дуги необходимо высокое напряжение холостого хода, которое ограничивает величину дробно-рациональной функции и имеет жёсткую ВАХ, участок *1* рис. 4, *а*. Дробно-рациональная функция (участок *2*, рис. 4, *б*) формирует горизонтальную линию изменения мощности, что способствует лёгкому возбуждению дуги, обеспечивает надёжное горение дуги без обрывов при действии возмущений. Наличие дробно-рационального участка в начале сварки позволяет регулировать функцию горячего старта. Минимальное энергопотребление рабочего участка соответствует штыковой ВАХ. Однако при сварке плавящимся электродом саморегулирование дуги минимально, для повышения саморегулирования ВАХ должна иметь наклон $U = U_{\text{хх}} - R_{\text{вн}} I_{\text{д}}$, при $R_{\text{вн}} \to \infty$, получим штыковую ВАХ. Дробно-рациональный участок в рабочей области стабилизирует мощность и, соответственно, тепловложение в сварной шов, что уменьшает сварочные деформации, улучшает условия протекания металлургических реакций, повышая качество сварки. Для ограничения тока при коротком замыкании, конечный участок ВАХ имеет падающий или штыковой участок.

Рассмотрим методику получения дробно-рациональной ВАХ. В импульсных источниках питания регулирование тока осуществляется с помощью системы импульсно-фазового управления в тиристорных источниках питания [4] и широтно-импульсной модуляции (ШИМ) в транзисторных инверторных источниках питания. Среднее значение напряжения $U_{\text{ср}}$ для ШИМ (рис. 5) определяется выражением (4)

$$U_{\text{ср}} = \frac{U_{\max} T_{\text{и}}}{T_{\text{и}} - T_{\text{п}}} = \frac{U_{\max} T_{\text{и}}}{T}, \quad (4)$$

где $U_{\max}$ — амплитуда напряжения; T — период рабочей частоты инверторного источника питания; $T_{\text{и}}$ — длительность импульса; $T_{\text{п}}$ — длительность паузы.

Длительность импульса найдём из выражения $T_и = \frac{U_у}{k}$, где k — коэффициент пропорциональности; $U_у$ — напряжение управления; $k = \frac{U_{л\,max}}{T}$.

После подстановки в уравнение (4) $T_и$ и k получим $U_{ср} = \frac{U_{max}}{U_{л\,max}} U_у = k' U_у$, где k' — коэффициент усиления ключа. Жёсткая ВАХ формируется с помощью отрицательной обратной связи по напряжению, для получения падающей ВАХ используется отрицательная обратная связь по току. Для создания дробно-рациональной функции в разомкнутых системах, при регулировании по возмущению, достаточно иметь зависимость среднего значения напряжения от обратной величины тока дуги:

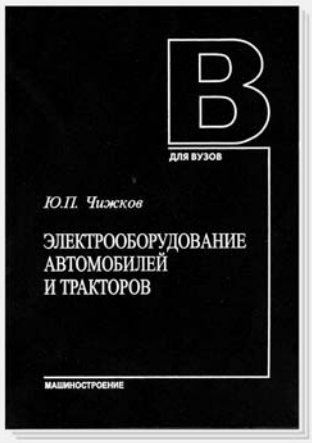
$$U_{ср} = k' U_у = k' \frac{1}{I}.$$

Схемотехнически обратную функцию получают с помощью схем логарифмирования и антилогарифмирования, экспоненциального преобразования. Ряд фирм выпускают интегральные схемы логарифмических и экспоненциальных преобразователей, например ICL8048, ICL8049, SSM-2100 [5]. При использовании микросхемы SSM-2100 необходимы две микросхемы: первая выполняет функцию логарифматора отношения $U_{вых} = k\log\frac{U_2}{U_1}$, U_2 принимаем равным единице, U_1 — напряжение пропорциональное току дуги. Вторая микросхема выполняет функцию антилогарифмического усилителя для формирования напряжения управления $U_у = 1/I$.

Таким образом, использование оптимизирующего функционала для формирования определённого вида ВАХ способствует повышению КПД сварочного процесса, увеличению надёжности работы сварочных источников питания; дробно-рациональная форма ВАХ стабилизирует мощность процесса сварки, что повышает качество сварного соединения. Для получения необходимого качества регулирования нужно использовать замкнутые системы автоматического регулирования; рассматривая дугу как синергетический процесс, можно создать алгоритмы управления на основе метода аналитического конструирования агрегированных регуляторов (АКАР) в результате оптимизации переноса электродного металла, колебательных металлургических реакций и процессов в сварочной ванне и при кристаллизации сварного шва.

Библиографические ссылки

1. **Лесков И.Г.** Электрическая дуга. М.: Машиностроение, 1970. 335 с.
2. **Николис Г., Пригожин И.** Самоорганизация в неравновесных структурах. М.: Мир, 1979. 512 с.
3. **Колесников А.А.** Синергетическая теория управления. М.: Энергоатомиздат, 1994. 344 с.
4. **Фролов В.А.** Разработка и анализ структурных схем тиристорных источников питания // Практическая силовая электроника. № 3 (51), 2013. С. 34—37.
5. **Волович Г.И.** Схемотехника аналоговых и аналого-цифровых электронных устройств. М.: Додека — XXI, 2005. 528 с.



Чижков Ю.П. **Электрооборудование автомобилей и тракторов**: учебник. 2007. – 656 с., тв. пер., 60×88 1/16

ISBN 5-217-03358-4

Цена с НДС 495 руб.

Приведено описание конструкций, принципа работы и технических данных устройств и приборов электрического и электронного оборудования автомобилей и тракторов.

Отличительными особенностями учебника являются полнота охвата дисциплины и простота изложения, учет требований новых ГОСТов. Для лучшего усвоения материала учебник хорошо иллюстрирован.

Для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению подготовки "Транспортные машины и транспортно-технологические комплексы". может быть полезен для студентов средних профессиональных учебных заведений, обучающихся по автотракторным специальностям, а также работникам автотранспортных предприятий и сервиса, лицам, интересующимся устройством электрооборудования автомобиля и трактора.

Приобрести книгу можно непосредственно в издательстве "Машиностроение", прислав заявку в отдел реализации по факсу: (495) 269-48-97; по e-mail: realiz@mashin.ru; по почте: 107076, Москва, Стромынский пер., 4. ООО "Издательство Машиностроение". Справки по тел. (495) 269-66-00. http://www.mashin.ru

ПО СТРАНИЦАМ ЖУРНАЛОВ

Регулируемая внутренняя автоматичность механического бесступенчатого трансформатора. *Вестник машиностроения*. 2014. № 2.

Предложен расчет нагруженности ведущего кривошипа бесступенчатого трансформатора. Определены величина нагрузки и её направление относительно кривошипа с конкретным рабочим радиусом.

Многомерная структурно-параметрическая модель многослойного электромагнитоупругого актюатора нано- и микроперемещений. *Вестник машиностроения*. 2014. № 2.

Определены многомерные структурно-параметрическая модель и параметрическая структурная схема многослойного электромагнитоупругого актюатора для привода нано- и микроперемещений. Исследовано влияние геометрических и физических параметров этого актюатора и внешней нагрузки на его статические и динамические характеристики, получены его передаточные функции для привода нано- и микроперемещений.

Определение максимальной высоты вертикального препятствия, преодолеваемого полноприводным автомобилем. *Вестник машиностроения*. 2014. № 2.

Впервые получена точная формула для определения максимальной высоты препятствия, преодолеваемого полноприводным автомобилем.

Моделирование тормозной системы многозвенного автомобильного поезда. *Вестник машиностроения*. 2014. № 2.

Предложена высокоточная математическая модель пневматической тормозной системы многозвенного автомобильного или тракторного поезда.

Обобщённые массы механических конструкций. *Вестник машиностроения*. 2014. № 2.

Рассматривается определение обобщенной подвижной массы и частоты собственных колебаний пространственной конструкции по её реакции в точке приложения гармонической силы при одноточечном резонансном возбуждении.

Экспериментальное исследование проточной части модели осевого главного циркуляционного насоса реакторной установки с тяжёлым жидкометаллическим теплоносителем. *Вестник машиностроения*. 2014. № 2.

Представлены результаты экспериментальных и расчетно-теоретических работ, направленных на создание обоснованных конструкций проточной части и гидростатических опор скольжения главных циркуляционных насосов реакторов на быстрых нейтронах, охлаждаемых свинцовым теплоносителем.

Исследование динамики формирования термодеструкционных оксидных покрытий методом отражательной спектрофотометрии. *Наноинженерия*. 2014. № 2.

Методом зондовой волоконно-оптической отражательной спектрофотометрии исследована динамика формирования наноразмерных оксидных покрытий, полученных по термодеструкционной технологии химико-структурной модификации. Для процессов моно- и полинаслаивания проведен анализ быстропротекающих неравновесных процессов при термолизе ВИК-карбоксилатов циркония, иттрия в условиях кондуктивного и индукционного нагрева. Предложен метод контроля гетерофазного перехода от жидкой фазы пленкообразующего раствора к наноразмерной оксидной фазе покрытия в форматах первичного термодеструкционного процесса и повторного наслаивания.

Исследование изменения наноструктуры твёрдых сплавов после объёмного импульсного лазерного упрочнения. *Наноинженерия*. 2014. № 2.

Представлен метод объёмного импульсного лазерного упрочнения (ОИЛУ) и определена его волновая природа. Установлено с помощью рентгеноструктурного анализа, что вследствие ОИЛУ происходит изменение наноструктуры твёрдых сплавов, которое "тесно" коррелируется с повышением механических свойств образцов, прошедших упрочнение.

Разработка и исследование мемристоров на основе металлических плёнок наноразмерной толщины. *Наноинженерия*. 2014. № 2.

С целью поиска новых материалов, в которых наблюдается мемристорный эффект и обеспечиваются лучшие характеристики элементов, созданных на их основе, исследованы мемристоры на основе плёнок Ti, Ta, Ni и их окислов, а также плёнок Cu и Cr и их хлоридов.

Информационные технологии в наноинженерии. *Наноинженерия*. 2014. № 2.

В статье обсуждаются особенности применения информационных технологий при решении различных задач наноинженерии. Показано, что использование высокопроизводительных вычислений позволяет значительно упростить решение задач наноинженерии. Обсуждаются вопросы обработки результатов моделирования и анализа полученных данных. Показано, что применение методов искусственного интеллекта позволяет формализовать извлечение и представление знаний в области наноинженерии.

Определение твёрдости и модуля упругости методом DSI. *Наноинженерия*. 2014. № 2.

Приведён обзор работ российских и зарубежных учёных, посвящённых определению твёрдости и модуля упругости, проанализированы возможные погрешности при использовании различных методик.

Роль связующего агента в усилении нанокомпозитов полимер/органоглина с аморфно-кристаллической матрицей. *Наукоёмкие технологии в машиностроении*. 2014. № 2.

Показано, что уровень межфазной адгезии в нанокомпозитах полимер/органоглина с аморфно-кристаллической матрицей определяется двумя компонентами — натяжением аморфных цепей и взаимодействием на межфазной границе полимер—нанонаполнитель. Введение связующего агента не изменяет первой компоненты, но увеличивает вторую.

Разработка режущих пластин с повышенными эксплуатационными свойствами для контурного точения железнодорожных колесных пар. *Наукоёмкие технологии в машиностроении*. 2014. № 2.

Изложены подходы к проектированию сложнопрофильных тангенциальных пластин для контурного точения железнодорожных колесных пар. Представлены результаты испытаний новых конструкций тангенциальных режущих пластин.

Оптимизация процесса скоростной электроэрозионной обработки отверстий малых диаметров в деталях из жаропрочных сплавов. *Наукоёмкие технологии в машиностроении*. 2014. № 2.

Приводится сравнительный анализ режимов электроэрозионной обработки отверстий малых диаметров с использованием трубчатого вращающегося электрода-инструмента и традиционной схемы с использованием стержневого сплошного электрода-инструмента. Рассматриваются параметры выбора оптимальных режимов и условия практического применения прогрессивной схемы электроэрозионного сверления.

Методика расчёта координат опорных точек при сложном пространственном движении предварительного формообразования круговых зубьев шеверов-прикатников на обрабатывающих центрах. *Наукоёмкие технологии в машиностроении*. 2014. № 2.

Рассмотрены основные особенности построения расчётной методики определения координат опорных точек при сложном пространственном движении по ломаной линии, осуществляемом в процессе предварительного формообразования круговых зубьев шеверов-прикатников на обрабатывающих центрах.

Оценка влияния конструктивной преемственности на технологичность электронных приборов. *Сборка в машиностроении, приборостроении*. 2014. № 2.

На основе анализа влияния унификации конструкции электронных приборов на их технологичность предложен универсальный метод обоснования уровня технологичности по трудоёмкости на ранних стадиях проектирования. Рассмотрена реализация метода на примере оценки влияния конструктивной преемственности на технологичность осциллографа.

Установка для исследования и измерения аберрационных характеристик отражательной оптической системы. *Сборка в машиностроении, приборостроении*. 2014. № 2.

Рассмотрены задачи светотехнического расчёта световых приборов, светоперераспределяющих оптических устройств. Описаны характеристики и свойства элементарных отображений оптической системы прожектора с зеркальным отражателем. Приведены описание и математические зависимости для расчёта характеристик с помощью установки для исследования элементарных отображений и аберрации.

Автоматизация сборки печатных плат. *Сборка в машиностроении, приборостроении*. 2014. № 2.

В крупносерийном производстве экономически целесообразной является организация сборки печатных плат на основе поточного метода, реализуемого в форме модульной сборочной линии, включая прогрессивную технологию поверхностного монтажа. В этом случае на каждом модуле линии на определенное место печатной платы устанавливается радиоэлемент какого-либо одного типа: резистор, конденсатор, диод, транзистор, микросхема. Различные радиоэлементы могут подаваться на позицию монтажа из рулона с лентой, пенала, кассеты, магазинного или бункерного загрузочного устройства.

Автоматизированная сборка компактных люминесцентных ламп. *Сборка в машиностроении, приборостроении*. 2014. № 2.

Описан технологический процесс и операции изготовления компактной люминесцентной лампы. Предложен автоматизированный процесс сборки компактных люминесцентных ламп типа КЛ/ТБЦ. Приведены и описаны устройства для проведения технологических операций. Получены положительные результаты механических, фотометрических, колориметрических и электрических испытаний ламп с выбранным фторполимерным материалом Ф-32Л для использования его в качестве защитного плёночного покрытия разрядных источников света низкого давления.

Экспериментальная оценка нагрузочной способности поликонтактных неравножёстких соединений с натягом. *Сборка в машиностроении, приборостроении*. 2014. № 2.

Экспериментально определена нагрузочная способность поликонтактных неравножестких соединений с натягом. Рассмотрены факторы, влияющие на величину нагрузочной способности этих соединений. Получена графическая зависимость величины нагрузочной способности от относительного положения деталей соединения.

УКАЗАТЕЛЬ СТАТЕЙ, ОПУБЛИКОВАННЫХ В ЖУРНАЛЕ "АВТОМАТИЗАЦИЯ И СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ" В 2014 Г.

	№ журнала	Стр.
АВТОМАТИЗАЦИЯ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ		
Антипин А.Ф. Системы управления технологическими процессами на базе многомерных логических регуляторов	1	12
Атаманов Ю.Л., Крутиков Г.А., Стрижак М.Г. Влияние структуры и параметров ударного пневмоагрегата на его кинематические и динамические характеристики	12	3
Байнева И.И., Байнев В.В. Автоматизация процесса проектирования световых приборов	2	3
Бальзамов А.Ю., Байнева И.И., Пильщиков В.Г. Устройство контроля параметров и сортировки радиоэлементов	2	15
Бржозовский Б.М., Мартынов В.В., Зинина Е.П., Плешакова Е.С. Оценивание состояния модифицированного режущего инструмента по параметрам дефектов рабочей части	4	12
Бурцев А.Г., Капля В.И., Носенко В.А. Управление моментами включения печных установок циклического действия	12	13
Вартанов М.В., Савин Н.О., Смолов Ю.А., Шкурко Л.С. Автоматизированные испытания герметичности изделий с применением термоэлектронного преобразователя	8	3
Воробьев Е.И., Хатунцев Д.И. Прямая и обратная задача кинематической точности промышленных роботов	9	7
Горячев О.В., Чадаев А.В. Анализ характеристик привода стабилизации и наведения оптико-электронного модуля с различными алгоритмами управления	1	6
Демиденков К.А., Мельников И.И., Евсеенко И.А. Автоматизированная система определения плотности транспортного потока и его состава на базе систем видеонаблюдения с использованием параллельных вычислений	11	3
Демидов А.А., Савиных А.Б., Стешина Л.А. Управление позиционированием груза на гибкой подвеске	3	11
Дьяков И.Ф., Моисеев Ю.В. Активное измерение диаметров деталей при механической обработке	4	17
Жигалов К.Ю. Основные сложности, возникающие при реализации задач автоматизированного управления строительной техникой и варианты их решения	8	7
Захаров О.В. Погрешности обработки конических поверхностей на круглошлифованном станке	7	7
Иванов А.А. Робототехника в механообработке	1	3
Иванов В.А., Халтурин О.А., Абляз Т.Р. Метод контроля конических резьб для элементов бурильных колонн на координатно-измерительной машине	10	6
Корчак Е.С., Ковалёва О.А. Современные технологии проектирования станин промышленных газостат	6	7
Крылов Е.Г., Сердобинцев Ю.П. Рациональный выбор режущего инструмента в автоматизированном производстве	10	3
Кычкин В.И., Кычкин А.В. Управление мобильным комплексом для автоматизации технологических процессов дорожных измерений	12	8
Марковцева В.В., Филимонов В.И., Илюшкин М.В., Баранов А.С. Об особенностях формовки в роликах Т-образного профиля с покрытием	4	3
Микаева С.А., Микаева А.С. Обеззараживание воды ультрафиолетовым излучением	11	8
Мишин А.В., Сорокин П.А. Исследование устойчивости башенных кранов на основе спектрального анализа ветрового воздействия	6	3
Мишин А.В., Сорокин П.А. Нейросетевой алгоритм системы автоматического контроля устойчивости башенных кранов	4	7
Муравьёв И.В., Петухов И.А. Метод замещения сложного изделия множеством модулей	2	13
Нестеров А.В., Мусолин А.К., Хориков С.М. Автоматизация процессов измерения размеров и контроля формы поковок при свободной механической ковке	5	3
Нигметзянов Р.И., Фатюхин Д.С., Юдаков Е.Г. Автоматизированная координатная ультразвуковая обработка деталей машин	7	3
Никифоров С.О., Мархадаев Б.Е., Михайлов В.Н., Никифоров Б.С. Безреверсные мехатронные манипуляционные устройства в составе гибких автоматизированных производств	3	3
Пегушин С.Л., Шумихин А.Г. Управление процессами технического обслуживания систем автоматической противоаварийной защиты пожаровзрывоопасных нефтеперерабатывающих производств на основе анализа их надёжности и критичности отказов	8	9
Редькин А.В., Сорокин П.А. Управление стреловым краном с учётом дополнительных динамических нагрузок	1	19
Сагдатуллин А.М. Разработка схемы комплексной автоматизации электропривода насосной станции	9	3
Чернов С.А. Конечный элемент стержня коробчатого сечения с узлами по контуру сечения	2	9
Чернов С.А. Эксцентриситеты осей стержней в узле соединения	7	10
Чикунов Ю.М. Особенности расчёта мощности группового преобразователя и её оценка	3	14
СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ		
Алексеев П.В., Лоскутов О.Д., Тутнов А.А. Методика расчёта времени падения стержней СУЗ в искривлённых направляющих каналах реакторных установок	12	30
Антипин А.Ф. Особенности программной реализации многомерных логических регуляторов с переменными в виде совокупности аргументов двузначной логики	2	30
Гамзаев Х.М. О методе моделирования лазерного сверления отверстий	8	30

Головешкин В.А., Пономарёв А.В., Ульянов М.В., Жукова Г.Н. Аналитическая функция трудоёмкости в среднем алгоритма сортировки индексами на основе распределения размаха варьирования . . . 6 11

Гольцов А.С., Браганец С.А., Савчиц А.В. Самообучающая модель для адаптивной системы управления открытием направляющего аппарата гидроагрегата . . . 3 28

Горячев О.В., Борисов В.В., Панарин А.А. Особенности синтеза алгоритмов управления приводов оптико-электронных систем с инерциальными датчиками . . . 2 26

Дегтярёв Ю.И., Дегтярёв К.Ю. Проектирование процессов как возможная рабочая функция САПР . . . 12 17

Дьяков И.Ф., Кокорин М.В. Использование технологии литья по газифицируемым моделям . . . 2 37

Евсеенко И.А. Модель представления данных для компоновки планетарных механизмов . . . 10 22

Елисеев А.В., Калашников Р.М., Тюрин Д.А. Алгоритм дискретной фильтрации в условиях динамических помех наблюдения 5 26

Еременко Ю.И., Мельникова И.В., Шаталов А.А. Построение интеллектуальной системы извлечения знания из электронного архива проектной документации на базе иммунного алгоритма мультимодальной оптимизации CLONAG . . . 3 17

Ерохин В.В., Елисеева Е.В. CAD/CAM/CAE-технологии в моделировании технических объектов . . . 11 40

Звонов А.О., Янишевская А.Г. Расчёт процессов объёмного сжатия композиционных материалов с полимерной матрицей в современных CAE-системах . . . 7 24

Иванов А.А. Моделирование системы массового обслуживания с использованием метода статистических испытаний . . . 2 23

Ивашов Е.Н., Князева М.П. Алгоритмы последовательных и параллельных вычислений на основе квантовых точек с изомерными ядрами . . . 1 26

Игамбердиев Х.З., Зарипов О.О. Регуляризированные алгоритмы восстановления входного воздействия в системах управления . . 7 31

Иноземцев А.Н., Троицкий Д.И. Оценка технологичности проектного решения на этапе конструкторского проектирования . . . 5 21

Ирзаев Г.Х., Адамова А.А. Автоматизация процесса формирования системы показателей для оценки технологичности конструкций изделия . . . 11 27

Капитанов А.В. Методика проектирования автоматизированных станочных систем многономенклатурного производства . . . 2 21

Капитанов А.В. Технологическое проектирование автоматизированных станочных систем многономенклатурного производства . . . 3 34

Клячкин В.Н., Кувайскова Ю.Е., Алёшина А.А. Моделирование вибраций гидроагрегата на основе адаптивных динамических регрессий . . . 1 30

Коржев В.С. Анализ методов и средств контроля логических элементов и комбинационных цифровых схем . . . 11 15

Корнеев Н.В., Корнеева Ю.В. Система дистанционного управления рекламным стендом на базе современных программных платформ . . . 9 29

Корчак Е.С., Середа А.В. Современные технологии проектирования корпусов рабочих цилиндров мощных гидравлических прессов . . . 1 22

Кривошеев С.В., Орманов Д.Р. Управление моделью многозвенного манипулятора с помощью значения электрических токов, снятых с поверхности руки . . . 2 41

Курнасов Е.В. Метод ситуативного изменения поведения объектов АСУТП в пользовательских интерфейсах SCADA-систем . . . 4 20

Курнасов Е.В., Тэн В.Э. Алгоритмы анализа и контроля эффективности автоматизированных технологических процессов . . 12 21

Кутин А.А., Долгов В.А., Милькин В.А. Метод оценки производственного потенциала многономенклатурного машиностроительного производства . . . 6 27

Кучеренко П.А., Соколов С.В. Нелинейная стохастическая идентификация дискретных многоструктурных динамических объектов на основе алгоритмов оптимального оценивания . . . 11 21

Лебедев В.А. Энергосбережение при электродуговой механизированной и автоматической сварке с импульсной подачей электродной проволоки . . . 1 34

Либерман Я.Л., Волкова Н.А., Куликова Т.Ю. Система автоматизированного проектирования роботизированных модулей механообработки . . . 10 11

Микаева С.А., Микаева А.С. Мальцев Е.Г., Волков А.В. Математическая модель изучения разрядной лампы низкого давления . . 7 27

Микаева С.А., Микаева А.С., Железникова О.Е., Прытков С.В. Устройство для измерения пространственных характеристик источников света . . . 4 29

Мирошникова В.Д., Шугалов А.В., Мирошникова Т.Д. Модульные конструкции подложкодержателей с позиционно-трансформируемыми подложконесущими поверхностями . . . 8 13

Митяшин Н.П., Томашевский Ю.Б., Денисов А.В., Дмитриев А.А. Использование нечёткой меры ценности критериев при многокритериальном выборе . . . 9 38

Неусыпин К.А., Кочешков М.А. Метод регенерации навигационного комплекса летательного аппарата . . . 6 22

Неусыпин К.А., Шень Кай. Модификация нелинейного фильтра Калмана с использованием генетического алгоритма . . . 5 9

Норсеев С.А., Багаев Д.В. Алгоритм распределённого исследования неизвестной местности . . . 7 13

Норсеев С.А., Багаев Д.В. Математические зависимости группового управления роботами в условиях неизвестной области . . 10 18

Омаров М.А., Сухомлинов А.И. Моделирование программного обеспечения автоматизированной системы управления производственной логистикой . . . 6 18

Петриченко Г.С. Метод диагностирования основных узлов компьютерной сети на основе построения логической функции . . . 10 27

Петроченков А.Б., Кычкин А.В., Темичев А.А. Интегрированная диагностическая поддержка распределённой системы мониторинга энергоданных . . . 9 10

Писаренко А.В., Кормильцев К.Д. Современные подходы к разработке, моделированию и тестированию управляющих устройств систем управления . . . 10 25

Помазанов А.В., Остроух А.В. Создание и тестирование распределённой системы работы с удалёнными узлами . . . 7 17

Порожняков А.К., Томашевский Ю.Б., Митяшин Н.П., Кац Е.Я. Оптимизация процесса построения ресурсно-технологической модели сложной системы . . . 12 36

Прокофьев Г.И., Щемелёв М.В. Синтез траекторий армирования анизотропных конструкций из композитов . . . 8 22

Пролетарский А.В., Неусыпин К.А. Оценка точности алгоритма построения моделей по данным лабораторного эксперимента с навигационными системами . . . 6 40

Силич М.П., Грибков Е.И., Силич В.А., Аксёнов С.В. Метод генерирования наименований кластеров территориальных образований при оценке уровня их развития . . . 11 34

Соколов А.В. Подход к оценке релевантности и результативности поиска нечёткой и различно структурированной фактографической информации . . . 4 33

Тарасов Е.М. Разработка математических моделей инвариантного классификатора состояний рельсовых линий . . . 8 19

Терёхин А.В. Алгоритм классификации выпуклых плоских фигур с помощью диагональных коэффициентов формы объекта . . . 5 35

Ульянов М.В., Сметанин Ю.Г. Псевдоединицы в расширении мультипликативной группы по модулю криптосистемы RSA . . . 9 34

Уразбахтин Ф.А., Уразбахтина А.Ю., Чебкасов М.С. Технология поиска экспертным методом способа преодоления критических ситуаций в технических объектах . . . 9 22

Ухов В.И., Ковцова И.О. Разработка и реализация алгоритмов сбора и обеспечения полноты данных в распределённой системе учёта энергоресурсов . . . 5 12

Фролов В.А. Статические характеристики и синергетика сварочной дуги . . . 12 39

Цуканова О.А., Мальцева С.В. Моделирование распространения влияния в сетевом сообществе . . . 3 24

Чернов С.А. Комбинация плоских и стержневых элементов в динамике стержневой системы, образованной стержнями коробчатого сечения . . . 11 12

Чернов С.А. Моделирование недеформируемых узловых соединений в стержневых системах . . . 1 39

Чернышев А.Б., Кравцова А.Л., Соха Е.Ю. Анализ устойчивости процесса стабилизации температурного поля нелинейной распределённой системы . . . 9 16

Щербатов И.А. Коррекция глобальной цели в интеллектуальных системах управления сложными слабоформализуемыми системами . . . 6 34

Яковлев В.В., Шишкин Г.И., Першин И.В. Применение численных методов для изучения сварочных процессов . . . 12 25

ЭКОНОМИКА И ОРГАНИЗАЦИЯ НАУЧНОЙ И ХОЗЯЙСТВЕННОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ

Белоусов В.Л., Голубятникова О.И. О механизме регулирования введения в хозяйственный оборот результатов научно-технической деятельности высшей школы . . . 10 45

Голосовский М.С. Модель жизненного цикла разработки программного обеспечения в рамках научно-исследовательских работ . . . 1 43

Гусакова Е.Н., Терещенко А.Г. Электронный документооборот в лабораторных информационных системах . . . 8 37

Гуськов М.В., Силаев А.А. Автоматизированная система управления доступом сотрудников к приложениям банка . . . 3 38

Долгов В.А., Луцюк С.В., Подкидышев А.А. Организация сбора и верификации информации при проведении обследования машиностроительного предприятия . . . 9 43

Иванов А.П., Михалёв А.С. Формирование достаточного капитала кредитных организаций . . . 8 33

Иванов А.П., Пыченкова О.С. Деловая репутация и социальная ответственность организации-согласование оценок . . . 5 42

Иноземцев А.Н., Троицкий Д.И. Исследование конфликтов профессиональных интересов в ходе подготовки производства . . . 4 40

Мухин В.И., Иноземцева Е.А., Воронов Д.Г. Математическая модель принятия решений по идентификации инновационной деятельности на основе когнитивного подхода . . . 10 32

Сербулов Ю.С., Глухов Д.А., Сысоев Д.В. Модель оценки состояния и прогнозирования развития ресурсного взаимодействия конкурирующих систем в рыночных отношениях . . . 10 38

Чеканина Е.А. Задача иерархического управления производственным комплексом с непрерывной технологией в классе линейных моделей . . . 6 35

ВЫСТАВКИ И ПРЕЗЕНТАЦИИ

Cisco расширяет локальное производство . . . 6 44

Cisco стала первопроходцем по доставке приложений в реальном времени через ЦОДы и "облака" . . . 3 42

Intel: Большие решения . . . 2 45

Компания 3M расширяет локализацию научно-исследовательской базы в России . . . 1 47

Компания Cisco и ЗАО "СИТРОНИКС КАСУ" подписали Соглашение о намерениях по стратегическому сотрудничеству . . . 5 48

Открыт тест-драйв коммуникационных решений от CTI в Центре технологий Cisco в Сколково . . . 8 44

СВЯЗЬ-ЭКСПОКОММ-2014: курс на инновационное развитие . . . 8 42

ОБЗОР ПЕРИОДИЧЕСКОЙ ПЕЧАТИ

По страницам журналов . . . 1—4, 6—12

Указатель статей, опубликованных в журнале "Автоматизация и современные технологии" в 2014 г. . . . 12 46