НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

ДОКЛАДЫ АКАДЕМИИ НАУК ВЫСШЕЙ ШКОЛЫ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

2018 апрель–июнь № 2 (39)

Выходит четыре раза в год

ISSN 1727-2769

Учредители

Академия наук высшей школы России
Новосибирское отделение Академии наук высшей школы

Главный редактор

А.Г. Вострецов, д-р техн. наук, проф., засл. деятель науки РФ

Заместитель главного редактора

В.Н. Васюков, д-р техн. наук, проф.

Редакционный совет

М. Грайцар, PhD, проф. (Словакия)
Д.В. Винников, д-р техн. наук, проф. (Эстония)
А. Загоскин, PhD (Великобритания)
Е.В. Ильичев, д-р физ.-мат. наук, проф. (Германия)
М.Н. Клымаш, д-р техн. наук, проф. (Украина)
К.Ю. Арутюнов, д-р физ.-мат. наук, проф.
А.В. Бурдаков, д-р физ.-мат. наук, проф.
И.С. Грузман, д-р техн. наук, проф.
А.О. Давидов, д-р техн. наук
В.П. Драгунов, д-р техн. наук, доц.
С.Л. Елистратов, д-р техн. наук
А.И. Легалов, д-р техн. наук, проф.
Г.В. Майер, д-р физ.-мат. наук, проф., засл. деятель науки РФ
В.К. Макуха, д-р техн. наук, проф.
В.Ю. Нейман, д-р техн. наук, проф.
В.Я. Рудяк, д-р физ.-мат. наук, проф.
А.А. Спектор, д-р техн. наук, проф.
С.П. Халютин, д-р техн. наук, проф.
С.А. Харитонов, д-р техн. наук, проф.
В.Д. Юркевич, д-р техн. наук, проф.

Ответственный секретарь

Д.О. Соколова, канд. техн. наук

Журнал зарегистрирован в Министерстве РФ по делам печати, телерадиовещания и средств массовых коммуникаций в 2002 г. (свидетельство ПИ № 77-11517 от 04.01.2002 г.)

Адрес редакции: 630073, Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, НГТУ, корп. 4, ком. 415, телефон: (383) 346-15-37, факс: (383) 346-02-09. Email: danvshrf@corp.nstu.ru

© Новосибирское отделение АН ВШ, 2018 г.

S C I E N T I F I C J O U R N A L

PROCEEDINGS OF THE RUSSIAN HIGHER SCHOOL ACADEMY OF SCIENCES

2018 | April – June | № 2 (39)

Journal is published quarterly

ISSN 1727-2769

Journal was established by

Russian Higher Education Academy of Science
Novosibirsk Branch of Higher Education Academy of Science

Chief Editor

A.G. Vostretsov, D.Sc. (Eng.), Prof., Honoured Science Worker of Russian Federation

Deputy Chief Editor

V.N. Vasyukov, D.Sc. (Eng.), Prof.

Editorial Council

M. Grajcar, PhD, Prof. (Slovakia)
D.V. Vinnikov, D.Sc. (Eng.), Prof. (Estonia)
A.M. Zagoskin, PhD (United Kingdom)
E.V. Ilyichev, D.Sc. (Phys.&Math.), Prof. (Germany)
M.M. Klymash, D.Sc. (Eng.), Prof. (Ukraine)
K.Yu. Arutyunov, D.Sc. (Phys.&Math.), Prof.
A.V. Burdakov, D.Sc. (Phys.&Math.), Prof.
I.S. Gruzman, D.Sc. (Eng.), Prof.
A.O. Davidov, D.Sc. (Eng.)
V.P. Dragunov, D.Sc. (Eng.), Assoc. Prof.
S.L. Elistratov, D.Sc. (Eng.)
A.I. Legalov, D.Sc. (Eng.), Prof.
G.V. Mayer, D.Sc. (Phys.&Math.), Prof., Honoured Science Worker of Russian Federation
V.K. Makukha, D.Sc. (Eng.), Prof.
V.Yu. Neyman, D.Sc. (Eng.), Prof.
V.Ya. Rudyak, D.Sc. (Phys.&Math.), Prof.
A.A. Spector, D.Sc. (Eng.), Prof.
S.P. Khaljutin, D.Sc. (Eng.), Prof.
S.A. Haritonov, D.Sc. (Eng.), Prof.
V.D. Yurkevich, D.Sc. (Eng.), Prof.

Executive Secretary

D.O. Sokolova, C.Sc.(Eng.)

Editor Address: Office 415, 20 bld. 4, K. Marx Prospect, Novosibirsk, 630073, Russian Federation. Tel: +7 (383) 346-15-37. Fax: +7 (383) 346-02-09. Email: danvshrf@corp.nstu.ru

© Novosibirsk Branch of Higher Education Academy of Science, 2018

ДОКЛАДЫ АН ВШ РФ

2018 апрель–июнь № 2 (39)

СОДЕРЖАНИЕ

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ

Юдин В.А.
Физические особенности гидродинамического взаимодействия лопаточных венцов турбомашин 7

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

Вайман Д.А., Данилов В.С.
Исследование и разработка состава технологической связки для формирования гибких керамических лент аналогичных по свойствам современным LTCC материалам для создания электронных средств СВЧ диапазона 19

Величко А.А., Илюшин В.А., Филимонова Н.И., Крупин А.Ю., Кацюба А.В.
Тензорезисторы на структурах «кремний на сапфире» (КНС) и $Si/CaF_2/Si$ 30

Гриф М.Г., Аюуш Ю., Ястребова С.В.
Проектирование диагностической экспертной системы на основе диагностических методов европейской и восточной медицины 40

Зима Д.Н., Соколова Д.О., Спектор А.А.
Анализ нахождения объекта в заданной области в сейсмических системах охраны 52

Кучак С.В.
Моделирование режима импульсного разряда
литий-ионного аккумулятора.....62

Нейман Л.А., Нейман В.Ю.
Рабочий цикл двухкатушечной синхронной электромагнитной
машины со свободным выбегом бойка
в катушке прямого хода.....70

Суворов Д.А., Французова Г.А., Востриков А.С.
Синтез двухкаскадной системы автоматического
поиска экстремума со скользящими режимами 82

Удовиченко А.В., Сидоров А.В., Бештинов А.О.
Регулятор переменного напряжения с пофазными коммутато-
рами и цифровой системой управления.....93

Шевченко А.Ф., Шевченко Л.Г.
Снижение пульсаций электромагнитного момента синхронно-
го двигателя с модулированным магнитным потоком и глад-
ким гармоническим ротором.....106

PROCEEDINGS OF RUSSIAN HIGHER EDUCATION
ACADEMY OF SCIENCES

2018 April – June № 2 (39)

CONTENTS

PHYSICAL AND MATHEMATICAL SCIENCES

Yudin V.A.
Physical aspects of hydrodinamic interaction between blade gratings in turbomachines.....7

TECHNICAL SCIENCES

Vayman D.A., Danilov V.S.
Research and development of the LTCC composition of ceramic tape binder for fabrication high frecuency electronic devices.....19

Velichko A.A., Ilyushin V.A., Filimonova N.I., Krupin A.Yu., Katsyuba A.V.
Tenzoresistors based on silicon and Si/CaF_2/Si on sapphire structures.....30

Grif M.G., Ayush Yu., Yastrebova S.V.
Design of a diagnostic expert system based on diagnostic methods of european and eastern medicines.....40

Zima D.N., Sokolova D.Ol., Spector A.A.
Analysis of the object location in the specified area in seismic guard systems.....52

Kuchak S.V.
Simulation of the lithium-ion accumullator pulse discharge mode.....62

Neyman L.A., Neyman V.Yu.
An opetating cycle of the two-inductor syncronous
electromagnetic machine with a free head running-out
in the driving stroke inductor 70

Suvorov D.A., Frantsuzova G.A., Vostrikov A.S.
Synthesis of the two-cascade extremum-seeking system
with sliding modes 82

Udovichenko A.V., Sidorov A.V., Beshtinov A.O.
AC voltage regulator with phase switches
and a digital control system.....93

Shevchenko A.F., Shevchenko L.G.
Reduction in electromagnetic torque ripples in a synchronous mo-
tor with amodulated magnetic flux and a smooth harmonic rotor.....106

ДОКЛАДЫ АН ВШ РФ
2018 апрель–июнь № 2 (39)
ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ

УДК532.5.011:532.5.013

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЛОПАТОЧНЫХ ВЕНЦОВ ТУРБОМАШИН

В.А. Юдин
Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет

Задача о гидродинамическом взаимодействии лопаточных венцов рассматривается в плоской постановке на основе гипотезы цилиндрических сечений для осевых турбомашин. Учитывается как потенциальное взаимодействие, обусловленное взаимным перемещением решеток в потенциальном потоке, так и вихревое, вызванное сходом закромочных следов за профилями впередистоящей по потоку решетки, которые считаются заданными. Потенциальное возмущение является аналитической функцией всюду во внешности решеток. Расчет ее основан на представлении относительной скорости жидкости на профилях решеток в виде ряда по степеням малого параметра, характеризующего осевой зазор между решетками. Задача сводится к цепочке интегральных уравнений на исходных контурах профилей одиночных решеток для определения коэффициентов разложения этого ряда. Процедура их нахождения сводится к последовательному построению ряда потоков около одиночной решетки с заданными значениями неравномерности набегающего на нее потока. Погрешность расчета может быть оценена до решения задачи и определяется величиной осевого зазора между решетками. Суммарные гидродинамические характеристики, в силу квазистационарности постановки задачи, вычисляются с помощью интеграла Бернулли. На основе составленной программы расчета выявлены физические особенности поведения возбуждающих сил на лопатках от отношения чисел лопаток решеток, осевого зазора между ними и их взаимного расположения.

Ключевые слова: турбомашина, лопаточный венец, взаимодействие роторов и статоров, решетка профилей, вихревые следы, нестационарные силы.

DOI: 10.17212/1727-2769-2018-2-7-18

Введение

Статья посвящена одной из самых интересных и сложных прикладных задач физики жидкости – изучению гидродинамического взаимодействия лопаточных венцов турбомашин. Решение ее на основе прямого расчета трехмерных уравнений Эйлера или Навье–Стокса на сегодняшний день чрезвычайно проблематично [1, 2]. Поэтому для создания эффективных алгоритмов, позволяющих проводить серийные расчеты возбуждающих сил на лопатках решеток, используется модель обтекания двух взаимно движущихся решеток профилей потоком идеальной несжимаемой жидкости, равномерным на бесконечности перед решетками. В основе этой модели лежат предположение о достаточно малости скорости жидкости и гипотеза цилиндрических сечений, согласно которой поверхности тока течения являются цилиндрическими поверхностями, на каждой из которых течение рассматривается независимо.

В рамках такой модели уровень силового взаимодействия между решетками определяется в основном двумя факторами – потенциальным возмущением потока решетками вследствие их взаимного перемещения и вихревым возмущением следами, сходящими с профилей решеток из-за схода пограничных слоев. Причем в области реальных осевых зазоров между решетками оба указанных фактора

© 2018 В.А. Юдин

необходимо учитывать одновременно. Дальнейшее упрощение модели в данной работе связано с рассмотрением случая, когда вихревые следы за профилями впереди стоящей решетки считаются заданными [3]. Для определения потенциального возмущения потока обобщается метод [4], разработанный для чисто потенциального взаимодействия решеток. Основной целью работы является исследование физических особенностей возбуждающих сил на лопатках решеток на основе расчетов, полученных с использованием созданной программы расчета [6–9].

1. Постановка задачи. Рекуррентные соотношения

В плоскости комплексного переменного $z = x + iy$ рассмотрим двухрядную решетку профилей в потоке идеальной несжимаемой жидкости с заданной скоростью $V_{-\infty}$ на бесконечности перед решеткой. Пусть решетка 2 движется относительно решетки 1 с постоянной скоростью u вдоль оси y (рис. 1). Профили в решетках будем считать либо гладкими, либо имеющими острую выходную кромку. Комплексную скорость жидкости в точке z области течения представим в виде суммы двух слагаемых

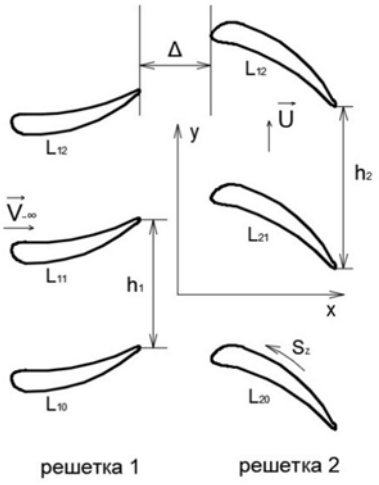


Рис. 1 – Две взаимно движущиеся решетки профилей

Fig. 1 – Two mutually moving profile gratings

$$V(z,t) = v(z,t) + J(z), \qquad (1)$$

где v – аналитическая по z функция всюду во внешности двухрядной решетки в каждый момент времени t, а J – непрерывная функция, определяющая комплексную скорость жидкости за решеткой 1 при условии отсутствия решетки 2. Функция $v(z,t)$ определяет потенциальное возмущение потока решетками 1 и 2 и обусловлена перемещением каждой из них в неравномерном потенциальном потоке вблизи соседней решетки. Функция $J(z)$ определяет поле скорости за первой решеткой, порожденное вихревыми следами, вызванными сходом пограничных слоев с ее профилей, которое мы будем считать известным. Нестационарными вихревыми следами, сходящими с профилей решеток вследствие изменения циркуляции на них, будем пренебрегать (квазистационарная постановка задачи).

В рамках указанных предположений аналитическая функция $v(z,t)$ удовлетворяет следующим граничным условиям:

1) непротеканию жидкости на профилях решеток

$$\begin{aligned} &\mathrm{Im}_i\left[v(z,t)e^{i\alpha_1(s)}\right] = 0, \ z \in L_{1k}, \\ &\mathrm{Im}_i\left[v(z,t)e^{i\alpha_2(s)}\right] = -u\cos\alpha_2(s) - \mathrm{Im}_i\left[J(z)e^{i\alpha_2(s)}\right], \ z \in L_{2k}. \end{aligned} \qquad (2)$$

Здесь $L_{\mu k}$ – контур k-го профиля μ-й решетки; μ – номер решетки; k – номер профиля в решетке; $\alpha_\mu(s)$ – угол, образуемой касательной к профилю $L_{\mu k}$ в точке $z = z(s)$ и положительным направлением оси x. Под s будем понимать дуго-

вую координату профиля, отсчитываемую от выходной кромки в положительном направлении обхода;

2) постоянства скорости на минус-бесконечности, $\lim\limits_{x\to-\infty} v(z,t) = V_{-\infty}$;

3) периодичности потока в направлении оси y, $v(z, t) = v(z + iL, t)$, где $L = N_1 h_1 = N_2 h_2$, h_1, h_2 – соответственно шаги; N_1, N_2 – число профилей решеток 1 и 2 в общем периоде L.

Для выбора единственного решения поставленной на функцию v задачи 1–3 потребуем выполнения условия равенства нулю относительной скорости жидкости в фиксированных точках выходных кромок гладких профилей или условия Жуковского–Чаплыгина о конечности скорости в острых выходных кромках.

Аналитическая функция v в точке z области течения в момент времени t в соответствии с условиями 2 и 3 может быть представлена обобщенной формулой Коши для периодических функций

$$v(z,t) = \frac{1}{i2L}\int\limits_{L_1}\sum_{m=0}^{N_1-1} v_{1m}(\zeta_1,t)\left[\operatorname{cth}\pi\left(\frac{z-\zeta_1+\frac{\Delta}{2}}{L}-i\frac{m}{N_1}\right)+1\right]d\zeta_1 +$$

$$+\frac{1}{i2L}\int\limits_{L_2}\sum_{m=0}^{N_2-1} v_{2m}(\zeta_2,t)\left[\operatorname{cth}\pi\left(\frac{z-\zeta_2-iut-\frac{\Delta}{2}}{L}-i\frac{m}{N_2}\right)+1\right]d\zeta_2 + V_{-\infty}. \qquad (3)$$

Здесь через L_1, L_2 обозначены соответственно сдвинутые вдоль оси x на $\Delta/2$ и $-\Delta/2$ (Δ – расстояние между решетками) исходные профили ($k = 0$) первой и второй решеток в момент времени $t = 0$, а $v_{\mu m}(\zeta_\mu, t)$ – значение скорости v на m-м профиле μ-й решетки.

Обозначим далее через $V_{\mu k}(s, t)$ относительную скорость жидкости в точке с дуговой координатой s_k -го профиля μ-й решетки в момент времени t. Используя условие (2) непротекания жидкости на профилях решеток, получим

$$V_{1k}(s, t) = v_{1k}\left(\zeta_1(s), t\right)e^{i\alpha_1(s)},$$
$$V_{2k}\left(s,t\right) = v_{2k}\left(\zeta_2(s), t\right)e^{i\alpha_2(s)} + J\left(z_2(s), t\right)e^{i\alpha_2(s)}. \qquad (4)$$

Следуя [2], представим ее рядом

$$V_{\mu k}(s, t) = \sum_{n=0}^{\infty}\sum_{r=0}^{n}\left[u_{\mu nr}(s)\cos r(\omega t + k\theta_\mu) + v_{\mu nr}(s)\sin r(\omega t + k\theta_\mu)\right]e^{-2\pi\Delta/L},$$
$$\theta_\mu = \frac{(-1)^\mu 2\pi}{N_\mu}. \qquad (5)$$

Разложим еще функцию $J_m(s, t)$, определенную в каждый момент времени в точках исходного профиля второй решетки, в ряд Фурье по переменной t:

$$J_m(s, t) = \sum_{r=0}^{\infty}\left[a_r(s)\cos r(\omega t + m\theta_\mu) + b_r(s)\sin r(\omega t + m\theta_\mu)\right] \qquad (6)$$

Устремим в равенстве (3) точку z из области течения к k-му профилю μ-й решетки. Используя предельные формулы Племели–Сохоцкого, равенство (5), а также разложения

$$\operatorname{cth}\pi z+1=\begin{cases}2\sum\limits_{n=0}^{\infty}e^{-2\pi nz}, & \operatorname{Re} z>0,\\ -2\sum\limits_{n=0}^{\infty}e^{2\pi nz}, & \operatorname{Re} z<0\end{cases}$$

и опуская промежуточные выкладки, получим окончательно

$$\sum_{n=0}^{\infty}\sum_{r=0}^{n}K_{\mu r}\left[U_{\mu nr}(\sigma)\right]e^{-jr\omega t}e^{-2\pi\Delta/L}=$$

$$=\sum_{n=0}^{\infty}\sum_{r=0}^{n}\Pi_{\mu r}(\sigma)e^{-ir\omega t}e^{-2\pi\Delta/L}.$$

Введенная здесь для удобства записи мнимая единица j не взаимодействует с мнимой единицей i. Интегральный оператор $K_{\mu r}$ при этом имеет вид

$$K_{\mu}\left[U_{\mu nr}(\sigma)\right]\equiv\frac{1}{2}U_{\mu nr}(\sigma)+$$

$$+\frac{e^{i\alpha_{\mu}(\sigma)}}{2Li}\int_{L_{\mu}}U_{\mu nr}(s)\sum_{m=0}^{N_{\mu}-1}e^{-j\mu r\theta_{\mu}}\left[\operatorname{cth}\pi\left(\frac{z_{\mu}(\sigma)-\zeta(s)}{\Delta}+i\frac{m}{N_{\mu}}\right)+1\right]ds, \qquad (7)$$

где $U_{\mu nr}=u_{\mu nr}+jv_{\mu nr}$, а правые части $\Pi_{\mu nr}(\sigma)$ определяются равенствами

$$\Pi_{100}(\sigma)=V_{-\infty}e^{i\alpha_1(\sigma)},$$

$$\Pi_{200}(\sigma)=\frac{e^{i\alpha_2(\sigma)}}{h_1 i}\int_{L_1}u_{100}(s)\,ds+$$

$$+(V_{-\infty}+iu)e^{i\alpha_2(\sigma)}+K_{20}\left[A_0(\sigma)\right],$$

$$\Pi_{\mu nr}(\sigma)=(-1)^{\mu}\delta_r\varepsilon_{\gamma r}e^{i\alpha_{\mu}(\sigma)}\left[(1-ij)\sum_{k=\varepsilon_1}^{n-E\left(\frac{\gamma}{2}\right)}P_{\gamma k}^{n-k}(k-n+r)\varphi_{\mu}(\sigma,n-k)+\right.$$

$$\left.+(1+ij)\sum_{k=\varepsilon_2}^{n-E\left(\frac{\gamma}{2}\right)}P_{\gamma k}^{n-k}(k-n-r)\varphi_{\mu}(\sigma,n-k)\right]+(2-\gamma)\delta_{nr}K_{nr}\left[A_r(\sigma)\right], \qquad (8)$$

где

$$\varphi_{\mu}(\sigma,k)=e^{\left[(-1)^{\gamma}2\pi k\left(\xi_{\mu}(s)+\varsigma_{\mu}(\sigma)\right)\right]},$$

$$P_{\mu n}^{k}(r)=\begin{cases}\dfrac{1}{2h_\mu j}\int\limits_{L_\mu}\left(\overline{U}_{\mu nr}(\sigma)+(2-\gamma)\delta_{nr}\overline{A}_{-r}(\sigma)\right)\varphi_\mu(\sigma,k)\,d\sigma & r<0,\\ \dfrac{1}{h_\mu j}\int\limits_{L_\mu}\left(U_{\mu n0}(\sigma)+(2-\gamma)\delta_{n0}A_0(\sigma)\right)\varphi_\mu(\sigma,\,k)\,d\sigma & r=0,\\ \dfrac{1}{2h_\mu j}\int\limits_{L_\mu}\left(U_{\mu nr}(\sigma)+(2-\gamma)\delta_{nr}A_r(\sigma)\right)\varphi_\mu(\sigma,\,k)\,d\sigma & r>0.\end{cases}$$

$$A_r(\sigma)=\left[a_r(\sigma)+jb_r(\sigma)\right]e^{\left(i\alpha_2(\sigma)+2\pi r\Delta/L\right)}.$$

$$\varepsilon_1=E\left(\frac{n-r+1}{2}\right),\ \varepsilon_2=E\left(\frac{n+r+1}{2}\right),\ \varepsilon_{\mu r}=\begin{cases}1, & r=r_1N_\mu,\\ 0, & r\neq r_1N_\mu,\end{cases}$$

$$\gamma=\begin{cases}2, & \mu=1,\\ 1, & \mu=2,\end{cases}\quad \delta_k=\begin{cases}0{,}5, & k=0,\\ 1, & k\neq 0,\end{cases}\quad \delta_{nr}=\begin{cases}0, & n\neq r,\\ 1, & n=r,\end{cases}$$

$E(x)$ – целая часть числа x, чертой сверху обозначены комплексно-сопряженные по j величины. В тех случаях, когда $\varepsilon_\mu > n-E\left(\dfrac{\gamma}{2}\right)$, соответствующие суммы предполагаются равными нулю. Соотношения (7)–(8) позволяют определить коэффициенты разложения (5) относительной скорости жидкости на профилях решеток при известной функции следов $J(z)$. Процедура нахождения величин $U_{\mu nr}(\sigma)$ сводится при этом к последовательному построению ряда потоков около одиночной решетки с заданными значениями $\Pi_{\mu nr}(\sigma)$. Погрешность расчета, связанная с отбрасыванием рядов по «*n*», определяется величиной $e^{-2\pi n\Delta/L}$ и может быть оценена при заданном осевом зазоре Δ до решения задачи.

2. Задание следов за первой решеткой

Структура потока за одиночной решеткой изучена достаточно полно [5] и может быть описана универсальной зависимостью скорости жидкости от геометрических параметров решетки и от коэффициента профильных потерь $\zeta_{\text{пр}}$:

$$J(z)=\begin{cases}V_2 & z\in D_{1k},\\ \dfrac{\zeta_{\text{пр}}h_1\cos\alpha}{h(\xi_k)}\cos^2\dfrac{\pi\varsigma_k}{h(\xi_k)} & z\in D_{2k},\end{cases}\qquad (9)$$

где

$$h(\xi_k)=1{,}52\sqrt{\xi_{\text{пр}}h_1\cos\alpha(\varsigma_k+b)},\ \ k=0,\pm1,\pm2,\ldots$$

$$\varsigma_k+i\xi_k=(z+ikh_1)e^{i\alpha},$$

$$\alpha=\arg V_2,$$

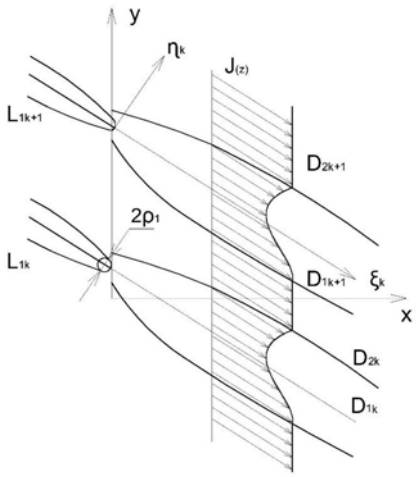


Рис. 2 – Следы за профилями одиночной решетки

Fig. 2 – Traces behind the profiles of a stand-alone grating

где V_2 – комплексная скорость жидкости на бесконечном удалении за первой решеткой (при условии отсутствия второй решетки); $h(\xi_k)$ – ширина следа; D_{1k}, D_{2k} – соответственно области течения за первой решеткой в следе и вне следа (рис. 2).

Постоянная b в равенстве (9) определяет ширину следа $h(0)$ в окрестности выходных кромок профилей и на режимах, близких к безотрывному обтеканию, может быть определена равенством $h(0) = 2,42\rho_1$, где ρ_1 – радиус кривизны выходной кромки профиля [5]. Коэффициент профильных потерь $\zeta_{\text{пр}}$ является эмпирической величиной и должен определяться из опыта. Коэффициенты a_r, b_r ряда Фурье (6) в общем случае вычисляются численно, а в предположении о постоянстве ширины следа $h(\Delta)$ в области второй решетки аналитически имеют вид

$$a_0 = V_2(1-\zeta_{\text{пр}}),$$

$$a_r + jb_r = \begin{cases} \dfrac{V_2\zeta_{np}(h_1\cos\alpha)^3 \sin\dfrac{\pi r h(\Delta)}{h_1\cos\alpha}}{\pi r h(\Delta)\left((h_1\cos\alpha)^2 - \left(rh(\Delta)\right)^2\right)} e^{-j\beta}, & h_1\cos\alpha \neq rh(\Delta), \\ \dfrac{V_2\zeta_{np}}{2} e^{-j\beta}, & h_1\cos\alpha \neq rh(\Delta), \end{cases} \tag{10}$$

$$\beta = \frac{2\pi r(y\cos\alpha + x\sin\alpha)}{h_1\cos\alpha}.$$

3. Суммарные гидродинамические характеристики

В силу предположения о квазистационарности модели обтекания решеток суммарные гидродинамические характеристики вычисляются с помощью интеграла Бернулли

$$X_\mu(t) - iY_\mu(t) = \rho \int_{L_\mu} V_{\mu 0}^2(s, t) e^{-\alpha_\mu(s)} ds. \tag{11}$$

Здесь $X_\mu(t)$, $Y_\mu(t)$ – проекции силы на оси x, y, действующие на исходный профиль μ-й решетки; ρ – плотность жидкости. В качестве обобщенного параметра, характеризующего уровень гидродинамического взаимодействием соседних решеток, введем величины относительного отклонения нестационарных реакций на профиле от их средних значений

$$\lambda_{\mu x} = \frac{\max X(t) - \min X(t)}{X^0},$$
$$\lambda_{\mu y} = \frac{\max Y(t) - \min Y(t)}{Y^0}. \qquad (12)$$

Соотношения (11)–(12) позволяют, таким образом, определить необходимые гидродинамические характеристики профилей решеток по найденным коэффициентам разложения относительной скорости жидкости в ряд (5).

4. Свойства возбуждающих сил

Описанный выше алгоритм реализован в виде эффективной программы, позволяющей проводить серийные расчеты возбуждающих сил на решетках [6]. Время расчета на персональной ЭВМ составляет при этом, в зависимости от точности расчета и параметров решеток, от 1 до 3 минут. Ниже мы остановимся на некоторых особенностях гидродинамического взаимодействия двух и трех решеток.

При взаимодействии двух взаимно движущихся венцов турбомашин помимо основных геометрических параметров каждого из венцов появляются еще два параметра: отношение чисел лопаток $Z = N_1/N_2$ каждой из решеток и осевой зазор Δ между ними. На рис. 3 в качестве примера изображены кривые зависимости величин $\lambda_{\mu p}$ на второй решетке $(\mu = 2)$ от отношения чисел лопаток венцов Z (формы профилей показаны на рисунке, густоты решеток 1 и 2 равнялись, соответственно $\tau_1 = 1{,}5$, $\tau_2 = 1$, $\Delta/h_1 = 0{,}15$, $u/V_{-\infty} = 1{,}4)$. Кроме этого примера, было проведено достаточно много расчетных вариантов и на всех графиках, что на первой решетке, что на второй, зависимость была немонотонной и наблюдались большие градиенты в окрестностях значений $Z = 0{,}5; 1; 2$. Причем расчеты проводились так, что при изменении Z вторая решетка оставалась неизменной, а хорда первой решетки изменялась, чтобы густота ее оставалась неизменной. При этом отношение осевого зазора к шагу первой решетки также сохранялось. Следовательно, при расчетах для различных Z безразмерные геометрические характеристики решеток, а также параметры относительного потока сохранялись. При указанных условиях изменение Z в расчетах меняет лишь частоту и сдвиг фаз $\theta_1 = -2\pi/Z$ и $\theta_2 = 2\pi/Z$ возбуждающих сил между соседними профилями 1-й и 2-й решетки соответственно. Отсюда значительные градиенты величин $\lambda_{\mu p}$ могут быть объяснены тем, что при сдвигах фаз θ_μ, близких к $\pi, 2\pi, 4\pi,$ возмущения, соответствующие основным гармоникам сил, близки к синфазным. Нестационарные возмущения потока, соответствующие этим гармоникам силы, действуют на все профили в μ-й решетке одновременно и равным образом. Это вызывает дополнительную циркуляцию скорости жидкости и тем самым дополнительный скос основного потока μ-й решеткой. Этот скос и является причиной возникновения добавочной нестационарной силы на профилях μ-й решетки. Чем большее число основных гармоник нестационарной силы будет соответствовать нулевому сдвигу фаз, тем большими окажутся добавки нестационарных реакций на лопатках решеток. Отсюда и следует, что наибольшие градиенты возбуждающих сил будут наблюдаться в окрестности значений $Z = 1$ (все гармоники синфазны), $Z = 0{,}5;\ 2$ (синфазны через одну).

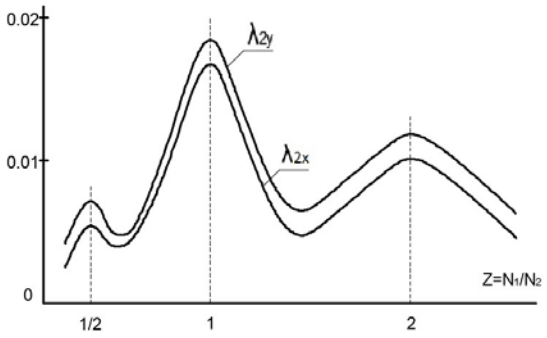


Рис. 3 – Зависимость возбуждающих сил от отношения чисел профилей

Fig. 3 – Dependence of the exciting forces on the ratio of profile numbers

Что касается зависимости уровня нестационарных сил $\lambda_{\mu p}$ от осевого зазора Δ, то казалось бы, он должен монотонно убывать с ростом Δ. Однако, как показывают данные экспериментов, это не всегда так [7, 8]. Причина этого кроется в том, что потенциальное возмущение потока за первой решеткой («потенциальный след») распространяется перпендикулярно фронту решетки, т.е. по линиям AB на рис. 4. Вихревые же следы располагаются вдоль линий тока основного течения, близких к линиям CD. Ясно, что в рассматриваемой модели наложения потенциального и вихревого течений окрестность точки O пересечения линий вида AB и CD являются окрестностью максимального возмущения потока. Если расстояние x^* точки O от фронта первой решетки таково, что потенциальное и вихревое возмущения течения оказываются величинами одного порядка, то возможна повышенная гидродинамическая реакция на лопатках второй решетки, расположенной с зазором Δ^* (рис. 4). В результате этого зависимость $\lambda_{\mu p}$ от осевого зазора Δ в этом случае будет носить немонотонный характер в окрестности значения Δ^*. Определяющими условиями здесь являются большой угол выхода потока и значительная динамическая нагрузка на первой решетке. Оба эксперимента [7, 8] соответствовали именно такой ситуации.

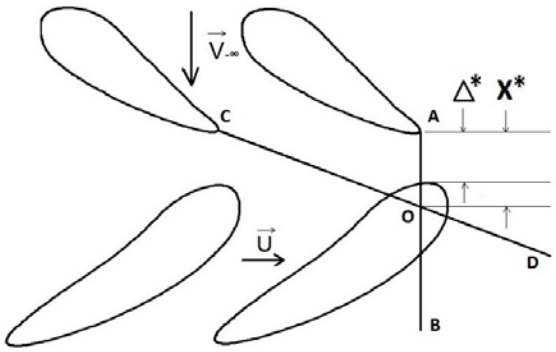


Рис. 4 – Схема потенциально-вихревого взаимодействия решеток

Fig. 4 – Scheme of a potential vortex interaction of lattices

В качестве численного эксперимента был проведен расчет двух решеток, имеющих равную густоту $\tau_1 = \tau_1 = 1{,}12$. Решетка 2 перемещалась с относительной скоростью $u/V_{-\infty} = 3{,}595$. Коэффициент профильных потерь для решетки 1 равнялся $\zeta_{\text{пр}} = 0{,}021$. Формы профилей показаны на рис. 5. Зависимость коэффициента λ_{2y} от осевого зазора Δ/h_1, рассчитанная по представленной здесь программе потенциально-вихревого взаимодействия, изображена кривой 1 (рис. 5).

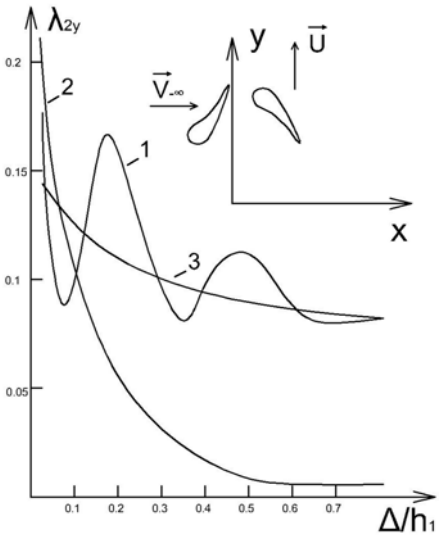


Рис. 5 – Расчет потенциально-вихревого взаимодействия решеток

Fig. 5 – Calculation of a potentially vortex interaction of gratings

Для сравнения кривая 2 соответствует расчету по программе, учитывающей только потенциальное взаимодействие, а кривая 3 – по программе, учитывающей только вихревое взаимодействие. Как видно из графиков, при монотонном убывании с ростом осевого зазора уровня переменной силы, вызванной только потенциальным и только вихревым взаимодействием решеток, учет обоих этих механизмов приводит к появлению локальных экстремумов, соответствующих точкам вида O на рис. 4.

При взаимодействии трех решеток (рис. 6) появляется еще один параметр δ, характеризующий взаимное расположение крайних решеток. На рис. 7 представлены зависимости уровня возбуждающих сил λ_{2y} на средней решетке, рассчитанных для 20 различных значений δ, соответствующих равномерному смещению решетки 3 относительно решетки 1. Формы исходных профилей решеток изображены на рис. 6, густоты решеток $\tau_1 = 0{,}94$, $\tau_2 = 1{,}5$, $\tau_3 = 1{,}59$, $\Delta_{12}/h_1 = 0{,}21$, $\Delta_{23}/h_3 = 0{,}21$, $u/V_{-\infty} = -2{,}09$, $\zeta_{\text{пр1}} = 0{,}023$, $\zeta_{\text{пр2}} = 0{,}033$. Кривая 1 соответствует значениям $N_1 = 21$, $N_2 = 32$, $N_3 = 36$, а кривая 2 – значениям $N_1 = 18$, $N_2 = 32$, $N_3 = 36$. Как видно из графика, влияние взаимного расположения решеток 1 и 3 на величину λ_{2x} существенно зависит от чисел N_1 и N_3.

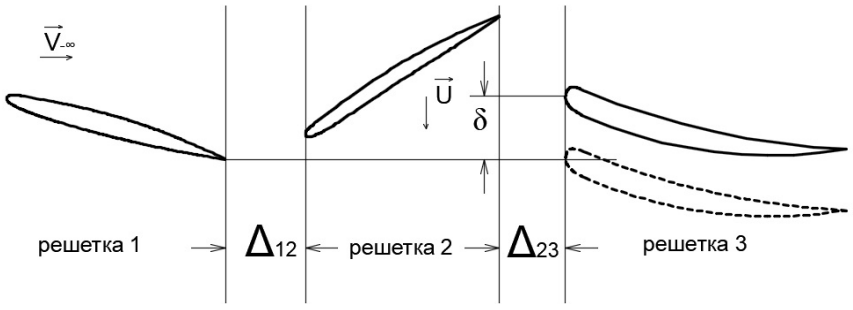


Рис. 6 – Трехрядная решетка профилей

Fig. 6 – Three-row grating of profiles

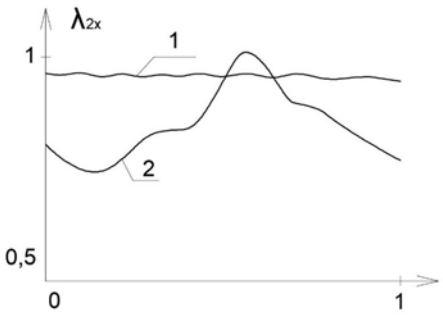


Рис. 7 – Зависимость уровня возбуждающих сил на роторе от взаимного расположения статоров

Fig. 7 – Dependence of the magnitude of the rotor exciting forces on the mutual arrangement of stators

Связано это с тем, что переменная осевая нагрузка $Y_2(t)$, действующая на профиль решетки 2, является суммой нагрузок $Y_{12}(t)$ и $Y_{32}(t)$ от решетки 1 и 3 соответственно. Изменение взаимного расположения решеток 1 и 3 соответствует, очевидно, взаимному смещению графиков функций $Y_{12}(t)$ и $Y_{23}(t)$, суммируемых на одном периоде. При этом разные размахи функции $Y_2(t)$ получаются при смещении этих графиков лишь на величину $|T_{23}-T_{12}|$ где T_{23}, T_{12} – периоды функций $Y_{32}(t)$ и $Y_{12}(t)$. Поэтому, чем меньше значение этой величины (т. е. чем меньше отличаются шаги решеток 1 и 3, или, что тоже самое, чем больше числа N_1 и N_3), тем будет и меньше влияние взаимного расположения решеток 1 и 3. Поэтому существенное влияние взаимного расположения решеток 1 и 3 следует ожидать лишь при малых значениях N_1 и N_3, например, $N_1/N_3 = 0,5; 1; 2$. Что и находится в соответствии с результатами расчета на рис. 7 ($N_1/N_3 = 7/12$ для кривой 1 и $N_1/N_3 = 0,5$ для кривой 2). Отметим, что до недавнего времени влияние взаимного расположения решеток специалистам-практикам просто не было известно и на него не обращали внимания. Основополагающие результаты в этом направлении принадлежат российским исследователям [9].

Заключение

На основе полуаналитического метода исследования гидродинамического взаимодействия лопаточных венцов турбомашин выявлены физические особенности в поведении возбуждающих сил на ее лопатках. Установлено существенное влияние отношения чисел лопаток в решетках на уровень их нестационарного взаимодействия. Дано объяснение появлению больших градиентов этого уровня вблизи значений отношения, равного 0,5; 1; 2. Показано, что при определенных параметрах решеток и потока уровень нестационарных сил на ее лопатках ведет себя немонотонно с увеличением осевого зазора между решетками. Объяснение этого феномена связано с характером потенциального и вихревого возмущений потока решетками. В случае взаимодействия трех решеток исследовано влияние взаимного расположения крайних решеток на уровень нестационарных сил на лопатках средней решетки. Показано, что вблизи отношений чисел лопаток крайних решеток, равных 0,5; 1; 2, это влияние может быть существенным.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Ernst M., Michel A., Jeschkel P.** Analysis of rotor-stator-interaction and blade-to-blade measurements in a two stage axial flow compressor // Journal of Turbomachinery. – 2010. – Vol. 133. – P. 122–133.
2. Effects of stator-rotor interaction on unsteady aerodynamic load of compressor rotor blades / H. Yuan, W. Yang, T. Zhao, M. Liang // Journal of Vibroengineering. – 2015. – Vol. 17, iss. 5. – P. 2591–2608.

3. **Степанов Г.Ю.** Гидродинамика решеток турбомашин. – М.: Физматгиз, 1962. – С. 368–402.
4. **Сарен В.Э.** О гидродинамическом взаимодействии решеток профилей в потенциальном потоке // Известия АН СССР. Механика жидкости и газа. – 1971. – № 4. – С. 75–84.
5. **Кочин Н.Е., Кибель И.А., Розе Н.В.** Теоретическая гидромеханика. Ч. 1. – М.: Физматгиз, 1963. – С. 225–228.
6. **Юдин В.А.** Расчет взаимодействия решеток с учетом закромочных следов в идеальной несжимаемой жидкости // Аэроупругость турбомашин. Аннотации программ и примеры расчета. – М.: ЦИАМ, 1985. – С. 245–248.
7. Study on the interference between moving and stationary blade rows in axial flow blower / T. Adachi, K. Fukusado, N. Takanashi, Y. Nakamoto // Bulletin of JSME. – 1974. – Vol. 17, N 109. – P. 904–911.
8. **Хейман Ф.Дж**. Вибрации турбинных лопаток, возникающие под влиянием закромочных следов соплового аппарата // Энергетические машины и установки. – 1969. – № 4. – С. 1–20.
9. Hydrodynamic interaction of axial turbomachines cascades / V.E. Saren, N.M. Savin, S.A. Smirnov, V.G. Krupa, V.A. Yudin // Journal of Engineering Mathematics. – 2006. – Vol. 55, N 1. – P. 9–39.

PHYSICAL ASPECTS OF HYDRODINAMIC INTERACTION BETWEEN BLADE GRATINGS IN TURBOMACHINES

Yudin V.A.
Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering, Novosibirsk, Russia

The problem of the hydrodynamic interaction of blade gratings is considered in a 2D formulation on the basis of the hypothesis of cylindrical cross sections for axial turbomachines. Both a potential interaction caused by the mutual movement of the gratings in a potential flow, and the vortex interaction caused by the trailing of traces (whose shape is determined independently) behind the profiles of the upstream grating are taken into account. A potential perturbation is an analytic function everywhere in the exterior of the gratings. Its calculation is based on the representation of the relative velocity of the liquid around the grating profiles in the form of a power series of a small parameter characterizing an axial gap between the gratings. The problem is reduced to a chain of integral equations on the initial contours of the profiles of stand-alone gratings to determine the coefficients of the expansion of this series. The procedure for finding them is reduced to a sequential construction of a series of flows around a stand-alone grating with the given values of the non-uniformity of the incident flow. An error in the calculation can be estimated prior to solving the problem and is determined by the value of the axial gap between the gratings. Combined hydrodynamic characteristics by virtue of the quasistationary statement of the problem are calculated using the Bernoulli integral. Based on the suggested program of calculation, physical dependence of the exciting force behavior on the blades n the ratio of the number of blades in the grating, an axial gap between them and their mutual arrangement are revealed.

Keywords: Turbomachine, blade ring, rotor-stator interaction, grating of profiles, vortex traces, non-stationary forces.

DOI: 10.17212/1727-2769-2018-2-7-18

REFERENCES

1. Ernst M., Michel A., Jeschkel P. Analysis of rotor-stator-interaction and blade-to-blade measurements in a two stage axial flow compressor. *Journal of Turbomachinery*, 2010, Vol. 133, pp. 122–133.
2. Yuan H., Yang W., Zhao T., Liang M. Effects of stator-rotor interaction on unsteady aerodynamic load of compressor rotor blades. *Journal of Vibroengineering*, 2015, vol. 17, iss. 5, pp. 2591–2608.

3. Stepanov G.Yu. *Gidrodinamika reshetok turbomashin* [Hydrodynamics of lattices of turbomachines]. Moscow, Fizmatgiz Publ., 1962, pp. 368–402.
4. Saren V.E. O gidrodinamicheskom vzaimodeistvii reshetok profilei v potentsial'nom potoke [Hydrodynamical interaction of cascades of profiles in potential flow]. *Izvestiya Akademii nauk SSSR. Mekhanika zhidkosti i gaza – Fluid Dynamics*, 1971, no. 4, pp. 75–84. (In Russian).
5. Kochin N.E., Kibel' I.A., Roze N.V. *Teoreticheskaya gidromekhanika*. Ch. 1 [Theoretical hydromechanics. Pt. 1]. Moscow, Fizmatgiz Publ., 1963, pp. 225–228.
6. Yudin V.A. Raschet vzaimodeistviya reshetok s uchetom zakromochnykh sledov v ideal'noi neszhimaemoi zhidkosti [Calculation of the lattice interaction taking into account after-profile traces in an ideal incompressible fluid]. *Aerouprugost' turbomashin. Annotatsii programm i primery rascheta* [Aeroelasticity of turbomachines. Annotations of programs and examples of calculation]. Moscow, TsIAM Publ., 1985, pp. 245–2485.
7. Adachi T., Fukusado K., Takanashi N., Nakamoto Y. Study on the interference between moving and stationary blade rows in axial flow blower. *Bulletin of JSME*, 1974, vol. 17, no. 109, pp. 904–911.
8. Heymann F.J. Turbine blade vibration due to nozzle wakes. *Energeticheskie mashiny i ustanovki – Journal of Engineering for Power. Transactions of the ASME. Series A*, 1969, no. 4, pp. 1–20. (In Russian).
9. Saren V., Savin N., Smirnov S., Krupa V., Yudin V. Hydrodynamic interaction of axial turbomachines cascades. *Journal of Engineering Mathematics*, 2006, vol. 55, no. 1, pp. 9–39.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

Юдин Владимир Алексеевич – родился в 1952 году, д-р физ.-мат. наук, профессор кафедры теоретической механики Новосибирского государственного архитектурно-строительного университета. Область научных интересов: гидродинамика решеток турбомашин. Опубликовано более 50 научных работ. (Адрес: 630008, Россия, Новосибирск, ул. Ленинградская 113. E-mail: areal-novosibirsk@ ngs.ru).

Yudin Vladimir Alekseevich (b. 1952) – Doctor of Sciences (Phys. &-Math), professor at the department of theoretical mechanics in Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering. His research interests are currently focused on hydrodynamics of blade gratings in turbomachines. He is the author of more than 50 scientific papers. (Address: 113, Leningradskaya St., Novosibirsk, 630008, Russia. E-mail: areal-novosibirsk@ ngs.ru) areal-novosibirsk@ ngs.ru.

Статья поступила 02 апреля 2018 г.
Received April 02, 2018

To Reference:

Yudin V.A. Fizicheskie osobennosti gidrodinamicheskogo vzaimodeistviya lopatochnykh ventsov turbomashin [Physical aspects of hydrodinamic interaction between blade gratings in turbomachines]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii – Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2018, no. 2 (39), pp. 7–18. doi: 10.17212/1727-2769-2018-2-7-18.

ДОКЛАДЫ АН ВШ РФ
2018 апрель–июнь № 2 (39)

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

УДК 666.3/7

ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА СОСТАВА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СВЯЗКИ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ ГИБКИХ КЕРАМИЧЕСКИХ ЛЕНТ АНАЛОГИЧНЫХ ПО СВОЙСТВАМ СОВРЕМЕННЫМ LTCC МАТЕРИАЛАМ ДЛЯ СОЗДАНИЯ ЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ СВЧ ДИАПАЗОНА

Д.А. Вайман, В.С. Данилов
Новосибирский государственный технический университет

Статья посвящена исследованию и выявлению различных ключевых аспектов для разработки технологической связки и формирования гибких керамических лент, отвечающих всем современным требованиям аналогичных зарубежных LTCC материалов для создания электронных средств. Low temperature co-fired ceramic (LTCC) – низкотемпературная совместно обжигаемая керамика обладает рядом свойств, которые необходимы для получения электронных изделий, в том числе работающих в СВЧ диапазоне [1–3]. В работе приведены результаты библиографического анализа как отечественной, так и зарубежной литературы в области разработки и изготовления технологических связок для керамики. Представлены базовая структура построения системы технологической связки, ее основные компоненты и оптимальные соотношения. Рассмотрены многие ключевые вопросы и режимы приготовления шликера для технологии литья тонких керамических пленок. В работе рассмотрены детали расчета керамического шликера, порядок загрузки компонентов, особенности перемешивания, технологические режимы и т. д. Для подтверждения результатов исследования произведены расчеты состава и режима приготовления технологической связки на примере керамики марки «ВК-96». На основании анализа термограмм было показано, что графики выделения энергии от температуры и массы от температуры полученных образцов идентичны с образцами LTCC керамики «А6М» фирмы «FERRO». Также «сырые» листы керамики ВК-96 имеют аналогичные механические свойства, хорошо подвергаются процессам обработки и позволяют сформировать сложные многослойные детали.

Ключевые слова: LTCC, технологическая связка, низкотемпературная керамика, керамическая пленка, шликер, пластификатор, диспергатор, мелющие тела.

DOI: 10.17212/1727-2769-2018-2-19-29

Введение

Хорошие диэлектрические характеристики и низкий температурный коэффициент линейного расширения керамических материалов делают их привлекательными для применения в СВЧ электронике. Если не так давно, многие керамические материалы служили только основой (подложкой) для нанесения токопроводящих дорожек и установки навесных компонентов, то уже сегодня требуются не просто многослойные керамические СВЧ платы, но и целые трехмерные интегральные системы. Эту задачу на современном этапе развития электроники эффективно решает технология LTCC керамики, которая активно применяется по всему миру. Основное преимущество LTCC технологии заключается в возможности обработки и формирования интегральных структур на самых ранних стадиях формирования керамических изделий – перед обжигом. Так как большинство применяемых для производства керамики исходных веществ является непластичным, например оксиды, некоторые силикаты, шпинели, стеклокомпоненты и т. д., то для того, чтобы сформировать из порошков непластичных материалов изделие сложной структуры, необходимо придать им связанность, т. е. ввести технологическую связку.

© 2018 Д.А. Вайман, В.С. Данилов

Такая связка должна быть впоследствии удаляемой и выполнять свою функцию только на стадии формирования изделия, выгорая полностью при обжиге и не оставляя вредных для свойств изделия остатков. Именно поэтому развитие керамических технологий в последнее время направлено не только на получение сырьевых материалов высокого качества, но и на разработку технологических связок, которые позволяют обеспечить максимально точную и эффективную обработку керамики на стадии формирования изделий с использованием металлизационных слоев и нанесения некоторых пассивных компонентов, тем самым существенно увеличивая интеграцию и миниатюризацию изделий в целом [12–15].

В России LTCC керамику активно применяют для создания электронных приборов как гражданского, так и военного назначения, при этом собственного производства «сырых» керамических листов нет [1–3]. К тому же данные технологии держатся в строжайшем секрете и какой либо детальной информации, раскрывающей те или иные секреты, найти крайне затруднительно. Поэтому основной целью данной работы является исследование и разработка собственного состава технологической связки для создания «сырых» гибких керамических листов, аналогичных по свойствам современным LTCC материалам. Для достижения этой цели были поставлены следующие задачи:

– провести теоретический обзор и определить основной состав компонентов технологической связки для литья тонких керамических пленок;

– произвести количественный расчет технологической связки для приготовления керамического шликера;

– на примере марки керамики ВК-96 получить «сырые» керамические листы и сравнить с образцами зарубежной LTCC керамики «Ferro A6M».

1. Методика эксперимента

Все современные технологии изготовления керамических изделий используют связующие вещества, чтобы удерживать частицы керамического порошка в подвешенном состоянии. Технология литья керамической пленки является единственным процессом, которому требуются связующие вещества для формирования гибкой пленки, даже после сушки листы керамики должны быть достаточно прочными и эластичными, чтобы в последующем выдержать различные виды обработки [15–18]. Чтобы осуществить процесс литья керамической пленки, необходимо придать керамическому порошку свойства жидкости, для этого добавляют целый комплекс различных компонентов. В литературном источнике [16] приводят следующие основные компоненты связки: растворитель, диспергатор, связка и пластификатор. Каждый компонент данной системы оказывает влияние на «сырую» керамическую ленту и обеспечивает такие характеристики как прочность, гибкость, пластичность, способность ламинироваться, жесткость, совместимость для трафаретной печати и т. д.

Для проведения исследования произведен расчет керамического шликера для LTCC керамики. В качестве емкости для перемешивания компонентов технологической связки использовалась банка фирмы «Vink Lisse» объемом 6,4 л. По данным производителей валковых мельниц для перемешивания шликера, рекомендуемый объем загрузки должен быть не более 2/3 от объема банки [6]. Следовательно, общий объем загрузки равен: $6,4\ л \cdot 2/3 = 4,27\ л$.

Мелющие тела выбраны цилиндрической формы, их диаметр 10 мм. Объем мелющих тел должен составлять не более 1/3 от объема общей загрузки [4, 5, 16, 18]. Так как объем общей загрузки равен 4,27 л, объем мелющих тел равен: $4,27\ л \cdot 1/3 = 1,42\ л$. Экспериментально установлено, что масса данных мелющих тел объемом 1,42 л составляет примерно 3400–3500 г.

Оставшийся объем для загрузки всех компонентов («сухих» компонентов, растворителей, диспергатора, связующего, пластификатора) равен: $4,27\ \text{л} - 1,42\ \text{л} = 2,85\ \text{л}$.

Так как в литературном источнике [17] сказано, что вес мелющих тел должен быть равен весу «сухих» компонентов, то в данной работе вес «сухих» компонентов равен 3400 г. Под «сухими» компонентами понимаются порошковые материалы (глинозем, порошок стекла и т. д.). Требования к сухим компонентам очень детально описываются как во многих советских литературных источниках, так и во многих зарубежных [5–11, 16–18]. В данной работе для эксперимента подобраны порошковые материалы, имеющие средний размер частиц от 0,6 до 1,1 мкм и соотношение размера частиц не более 6 : 1.

Чтобы увеличить эффективность перемешивания и обеспечить более контролируемый процесс литья керамической ленты, выбрана бинарная система растворителей: этанол и толуол. Расчет массы растворителей произведен по формуле [16]

$$m_{\%\text{загрузки}} = \left(\frac{m_{\text{порошка}}}{m_{\text{порошка}} + m_{\text{растворителей}}} \right) \cdot 100\ \%, \qquad (1)$$

где $m_{\text{порошка}}$ – масса «сухих» компонентов, г; $m_{\text{растворителей}}$ – масса растворителей, г; $m_{\%\text{загрузки}}$ – общий % загрузки компонентов.

При условии, что общий % загрузки компонентов не должен превышать 70–80 %, то масса растворителей рассчитывается по формуле (1) и равна

$$70\ \% = \left(\frac{3400}{3400 + m_{\text{растворителей}}} \right) \cdot 100\ \%;$$

$$m_{\text{растворителей}} = \frac{3400 \cdot 100\ \%}{70\ \%} - 3400 = 4857 - 3400 = 1457\ \text{г}.$$

В литературном источнике [17] указано, что наиболее оптимальным соотношением по массе растворителей является 68 % этанола и 32 % толуола, следовательно:

$$m_{\text{этанола}} = \frac{68\ \% \cdot m_{\text{растворителей}}}{100\ \%} = \frac{68\ \% \cdot 1457\ \text{г}}{100\ \%} = 990\ \text{г};$$

$$m_{\text{толуола}} = \frac{32\ \% \cdot m_{\text{растворителей}}}{100\%} = \frac{32\ \% \cdot 1457\ \text{г}}{100\ \%} = 466\ \text{г}.$$

В качестве диспергатора используется специально подготовленный рыбий жир трансатлантической сельди – «Menhaden Fishoil Defloc Z3». В источнике [16] представлен эксперимент по выявлению зависимости величины вязкости шликера от количества добавляемого в него диспергатора. Результаты данного эксперимента с рыбьим жиром можно представить в виде формулы

$$m_{\text{р.жира}} = \frac{\mu_{\text{шликера}} \cdot m_{\text{порошка}}}{500\,000}. \qquad (2)$$

Так как оптимальной вязкостью шликера для литья керамической пленки являются значения от 3000 до 3500 сП, следовательно, содержание рыбьего жира рассчитывается по формуле (2) и равно: $m_{\text{р.жира}} = \frac{3500 \cdot 3400}{500\ 000} = 23,8\ \text{г}.$

В работах [5, 6, 16] в качестве связующего компонента выделяют две основные группы: полиакрилы и поливинилы. Полиакрилы позволяют получить высокую прочность сырой керамической ленты, но удаляются в нейтральных или в восстановительных средах, что требует специальных условий спекания. Поливинилы хорошо используются во многих областях промышленности. Для керамики по технологии литья пленки часто используют поливинилбутираль (ПВБ), он также применяется для нанесения порошковых красок, позволяет придать литейные свойства шликера и хорошо удаляется после предварительного обжига.

В данной работе используется «Поливинилбутираль PVB 98» в соотношении 1:10 относительно массы «сухих» компонентов [16–18]: $m_{\text{ПВБ}} = \frac{m_{\text{порошка}}}{10} =$

$= \frac{3400\ \text{г}}{10} = 340\ \text{г}.$

Так как все органические вещества влияют на усадку после спекания, которая по данным литературных источников [16–18] находится в пределах от 16,5 до 20 % (средняя 18,25 %), а «сухие» компоненты остаются после обжига, то общая масса органических веществ равна

$$m_{\text{орг.веществ}} = \frac{m_{\text{порошка}} \cdot 18,25\ \%}{100\ \%} = \frac{3400\ \text{г} \cdot 18,25\ \%}{100\ \%} = 650,5\ \text{г}.$$

Следовательно, масса пластификатора будет равна:

$$m_{\text{пластификатора}} = m_{\text{орг.веществ}} - m_{\text{ПВБ}} - m_{\text{р.жира}},$$

$$m_{\text{пластификатора}} = 650,5\ \text{г} - 340\ \text{г} - 23,8\ \text{г}.$$

Результаты расчета основных материалов и количественного состава компонентов технологической связки представлены в таблице.

Основные материалы шликера /
Basic materials of slip

№ п/п	Компоненты / Component	Наименование / Denomination	Производитель / Manufacturer	Масса г / Weight g
«Сухие» компоненты				
1	Мелющие тела	Al_2O_3 93 %	NTEC, Китай	3400
2	«Сухие» компоненты	Глинозем	Almatis, Германия	3250
		Стекло	–	
3	Прочие добавки	Каолин, тальк	Китай	150
Компоненты технологической связки				
4	Система растворителей	Толуол 99,5 %	Россия	466
		Этанол 99,8 %	Россия	990
5	Связующее	Поливинилбутираль PVB 98	Германия	340
6	Пластификатор	Бутилбензилфталат BBF S 261	США	257
7	Диспергатор	Рыбий жир Menhaden Fishoil Defloc Z3	США	23,8

Приготовление шликера произведено в три этапа:

этап 1 – загрузка «сухих» компонентов, растворителей, диспергатора и мелющих шаров. Скорость вращения банки составляла 62 оборотов в минуту и была определена по формуле [16]

$$N = 76,6 \cdot \sqrt{0.033 \cdot D},$$

где N – скорость вращения банки, об/мин; D – диаметр банки, см;

этап 2 – после 24 часов перемешивания «сухих» компонентов были добавлены связующее и пластификатор. Скорость вращения и время перемешивания были установлены так же, как и на этапе 1;

этап 3 – дегазация. Целью данного этапа является удаление воздуха и пузырьков из шликера. В данном случае дегазация осуществлялась с помощью медленного вращения банки шликера на валковой мельнице (~10 об/мин) в течение 12 часов.

Для приготовления использовались валковые мельницы «KEKO BL-3». Литье керамической пленки произведено на установке «KEKO CAM-M3520H», максимальная температура в камере составляла 50 ºС. Резка пленки керамики осуществлялась на установке «KEKO SC-25MNC» в размер 8 × 8’(203 × 203 мм).

4. Результаты

Полученные «сырые» листы керамики «ВК-96» обладают эластичностью и прочностью аналогичной листам керамики «Ferro A6M». Хорошо подвергаются различным процессам механической обработки и перфорации (рис. 1).

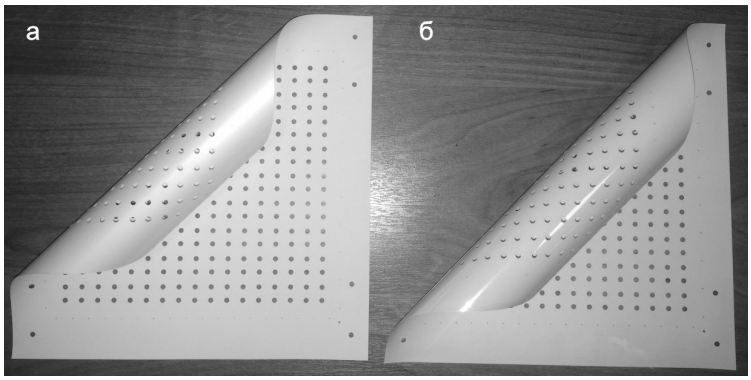


Рис. 1 – «Сырые» листы керамики после перфорации отверстий:
а – Ferro A6M; *б* – «ВК-96»

Fig. 1 – Green ceramic tapes after punching holes:
a – Ferro A6M; *b* – «VK-96»

С помощью прибора синхронного термического анализа «NETZSCH STA 449 F3 Jupiter» получены термографические диаграммы «сырых» листов керамики «Ferro A6M» и «ВК-96», результаты представлены на рис. 2 и 3.

Графики зависимости выделения энергии от температуры и изменения массы от температуры образцов «Ferro A6M» и «ВК-96» практически не отличаются, это свидетельствует о том, что данные на основе литературного анализа многих зарубежных источников позволили воспроизвести рецепт приготовления связки для керамического шликера аналогичного LTCC керамики фирмы «Ferro». По данным графикам можно сказать, что полное удаление органических компонентов технологической связки происходит при температуре ~500 ºС. Также можно сделать

вывод о том, что образцы LTCC керамики, изготовленные с применением данной технологической связки, могут быть спечены по тому же температурному профилю, как рекомендуют для LTCC керамики «Ferro A6M».

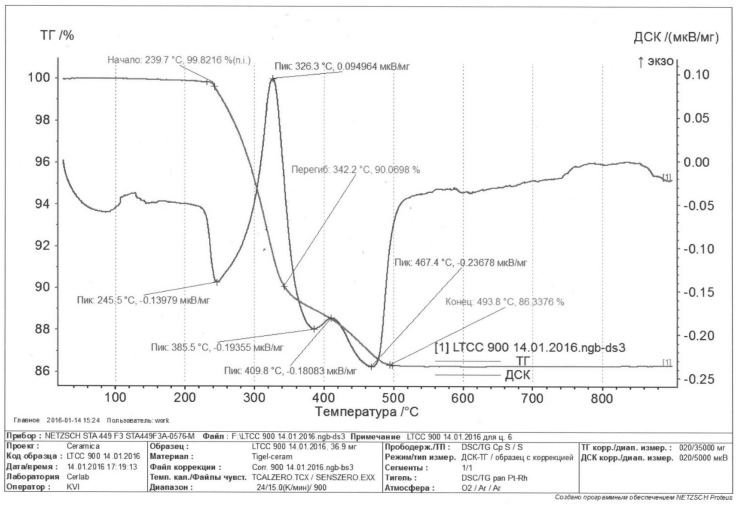


Рис. 2 – Термограмма «сырых» листов LTCC керамики «Ferro A6M»

Fig. 2 – A thermogram of LTCC ceramics green tapes from the «Ferro A6M» ceramics

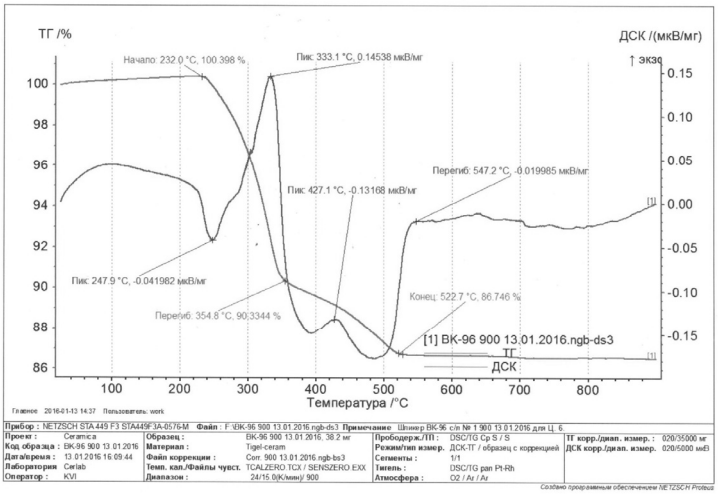


Рис. 3 – Термограмма «сырых» листов керамики «ВК-96»

Fig. 3 – A thermogram of green «VK-96» ceramics tapes

При формировании деталей сложной формы из полученных образцов «сырых» листов керамики «ВК-96» произведены сборка стеков, ламинирование и резка на заготовки (рис. 4). Отверстия и пазы на деталях после изостатического прессования сохранили свои форму практически без изменений, что свидетельствует о высокой способности данных «сырых» керамических листов к различным вариантам механической обработки и создания многослойных структур на ранних стадиях изготовления изделий.

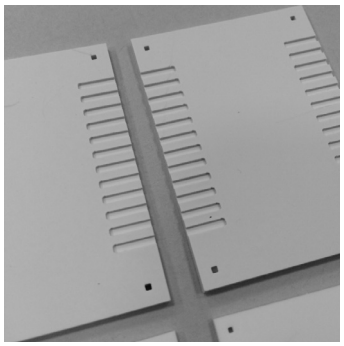


Рис. 4 – «Сырые» заготовки керамических деталей из «ВК-96»

Fig. 4 – Green samples from the «VK-96» ceramics

На заготовках произведены выгонка связки и спекание при температуре 1580 ºС. Изделия спеклись равномерно, деформации и дефекты поверхности на деталях отсутствуют. Средняя геометрическая усадка по *X* и *Y* составила 19,32 % (рис. 5).

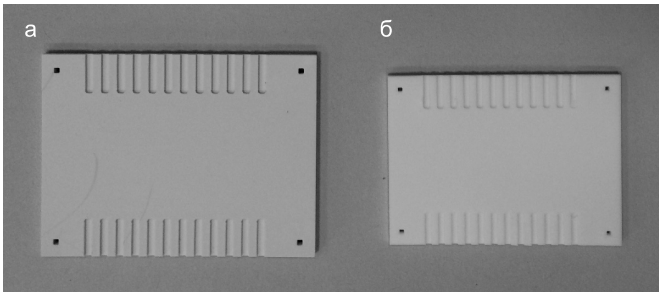


Рис. 5 – Детали из керамики «ВК-96»:
а – до спекания; *б* – после спекания

Fig. 5 – The «VK-96» ceramics samples:
a – before sintering; *b* – after sintering

Чтобы убедиться, что данный состав технологической связки является оптимальным, произведена оценка влияния количества пластификатора на геометрическую усадку керамических образцов. Было осуществлено приготовление керамических шликеров с добавлением разного количества пластификатора. Результаты эксперимента представлены в виде графика (рис. 6).

Рис. 6 – График зависимости геометрической усадки керамических деталей после спекания от количества пластификатора в шликере

Fig. 6 – The diagram of the plasticizer effect on the geometric size shrinkage.

Стоит отметить, что снижение количества пластификатора влечет за собой увеличение геометрической усадки и как следствие «сырые» керамические заготовки во время процесса спекания претерпевают значительные геометрические изменения, что негативно сказывается на готовых изделиях. Уменьшение доли пластификатора способствует нарушению процесса перемешивания технологической связки и «сухих» компонентов. Соответственно снижается плотность упаковки всей структуры при формировании «сырых» керамических лент и изделий на их основе.

Заключение

В данной работе представлены исследование и разработка состава технологической связки для приготовления керамического шликера низкотемпературной совместно обжигаемой керамики. Методика расчета и приведенные формулы могут служить основой для построения многих других керамических систем формирования гибких керамических лент. По результатам видно, что система технологической связки является очень сложной и имеет ряд особенностей, влияющих не только на взаимодействие компонентов, но и зависит от технических характеристик оборудования. Анализ полученных образцов «сырых» керамических лент и сложных деталей на ее основе свидетельствует о том, что удалось воспроизвести состав технологической связки, который используется при создании «сырых» листов LTCC керамики «Ferro A6M». Изменение количества пластификатора в составе шликера в большую или в меньшую степень к улучшению характеристик «сырых» керамических листов и деталей на ее основе не привело. Все это свидетельствует о том, что состав компонентов, методика расчета и технологические режимы приготовления шликера для получения прочных и эластичных «сырых» листов керамики подобраны правильно и соотношение компонентов в данной системе находится в нужных пропорциях.

Низкотемпературная совместно обжигаемая керамика является уникальным материалом на сегодняшний день для создания электронных устройств с высокой степенью интеграции. Для ее реализации разработка состава связующих компонентов, аналогичного по свойствам современным производителям, является существенным шагом на пути к освоению производства LTCC керамики в России.

ЛИТЕРАТУРА

1. Разработка отечественного керамического материала для изготовления изделий по технологии LTCC / Ю. Непочатов, С. Кумачева, Ю. Швецова, А. Дитц // Современная электроника. – 2014. – № 4. – С. 12–14.
2. **Черных В., Чигиринский С.** Направления развития изделий из специальной керамики для производства электронной техники в России // Электроника: наука, технология, бизнес. – 2012. – № 4. – С. 176–182.
3. **Пашков Д.А., Тютюнькова Д.О.** Особенности состава и структуры современных LTCC материалов // Перспективы развития фундаментальных наук: сборник научных трудов XII Международной конференция студентов и молодых ученых, г. Томск, 21–24 апреля 2015 г. – Томск, 2015. – С. 484–486.
4. **Грехова М.В.** Получение корундовых подложек для электроники методом пленочного литья // Материалы XII Всероссийской научно-практической конференции студентов и молодых ученых с международным участием «Химия и химическая технология в XXI веке». – Томск, 2011. – Т. 1. – С. 19–20.
5. Химическая технология керамики: учебное пособие для вузов / под ред. И.Я. Гузмана. – М.: Стройматериалы, 2003. – 496 с.
6. **Балкевич В.Л.** Техническая керамика: учебное пособие для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Стойиздат, 1984. – 256 с.

7. **Будников П.П., Гинстлинг А.М.** Реакции в смесях твердых веществ. – М.: Стройиздат, 1965. – 487 с.
8. **Дудеров Ю.Г., Дудеров И.Г.** Расчеты по технологии керамики: справочное пособие. – М.: Стройиздат, 1973. – 80 с.
9. **Гегузин Я.Е.** Почему и как исчезает пустота. – М.: Наука, 1983. – 192 с.
10. **Третьяков Ю.Д., Путляев В.И.** Введение в химию твердофазных материалов: учебное пособие. – М.: Наука, 2006. – 400 с.
11. **Хасанов О.Л., Бикбаева З.Г.** Наноструктурированная керамика. Порошковые технологии компактирования конструкционных материалов. – Томск: Изд-во ТПУ, 2009. – 41 с.
12. **Zhou J.** Towards rational design of low-temperature co-fired ceramic (LTCC) materials // Journal of Advanced Ceramic. – 2012. – Vol. 1 (2). – P. 89–99. – doi: 10.1007/s40145-012-0011-3.
13. **Dubey M., Suri N., Khanna P.K.** Optimization of shrinkage and surface-roughness of LTCC tape // International Journal of Research in Engineering and Technology. – 2013. – Vol. 2. – P. 441–444.
14. **Sebastian M.T., Jantunen H.** Low loss dielectric materials for LTCC applications: a review // International Materials Reviews. – 2008. – Vol. 53 (2). – P. 57–90.
15. **Kita J., Moos R.** Development of LTCC-materials and their applications – an overview // Proceedings 44th International Conference on Microelectronics, Devices and Materials. – At Fiesa, Slovenia, 2008. – P. 219–224.
16. **Mistler R.E., Twiname E.R.** Tape casting: theory and practice. – Westerville, OH: American Ceramic Society, 2000. – 298 p.
17. **Imanaka Y.** Multilayered low temperature cofired ceramics (LTCC) technology. – New York: Springer, 2005. – 229 p.
18. **King A.G.** Ceramic technology and processing. – Norwich, NY: William Andrew Publ., 2002. – 512 p.

RESEARCH AND DEVELOPMENT OF THE LTCC COMPOSITION OF CERAMIC TAPE BINDER FOR FABRICATION HIGH FRECUENCY ELECTRONIC DEVICES

Vayman D.A., Danilov V.S.
Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia

The article is devoted to research and identification of various key aspects for the development LTCC ceramic binder for the fabrication of flexible tapes. Low temperature co-fired ceramic (LTCC) has a number of properties that are necessary to manufacture electronic devices including those operating in a high frequency range [1-3]. The paper presents the results of a bibliographic review of Russian and foreign literature on the development and production of ceramic binders. The basic structure of the construction of a binder system, its main components and optimal relationships for "green" ceramic tapes are presented. The problems of interaction of various types of the binder system components with each other and their influence on the process of mixing as a whole are also considered. The paper presents the modes of preparation for the slip casting technology of thin ceramic tapes, the dependence of the binder recipe on the equipment, the order of components loading, mixing features, technological regimes, etc. The results of the study are confirmed experimentally by an example of theVK-96" ceramics manufacturing. The graph of the energy release depending on the temperature and the graph of the change in mass depending on the temperature of the obtained samples are similar to the LTCC sample of the A6M ceramics from the Ferro Company.

Keywords: LTCC, binder, low-temperature ceramics, ceramic tape, slip, plasticizer, dispersant, grinding bodies.

DOI: 10.17212/1727-2769-2018-2-19-29

REFERENCES

1. Nepochatov Yu., Kumacheva S., Shvetsova Yu., Ditts A. Razrabotka otechestvennogo keramicheskogo materiala dlya izgotovleniya izdelii po tekhnologii LTCC [The development of the domestic ceramic material for the manufacture of devices on LTCC technology]. *Sovremennaya elektronika*, 2014, no. 4, pp. 12–14.
2. Chernykh V., Chigirinskii S. Napravleniya razvitiya izdelii iz spetsial'noi keramiki dlya proizvodstva elektronnoi tekhniki v Rossii [Directions of developing products on the basis of special ceramics for electronic technique in Russia]. *Electronika: nauka, tekhnologiya, biznes – Electronics: Science, Technology, Business*, 2012, no. 4, pp. 176–182.
3. Pashkov D.A., Tyutyunkova D.O. [Features of the composition and structure of modern LTCC materials]. *Perspektivy razvitiya fundamental'nykh nauk*: sbornik nauchnykh trudov XII Mezhdunarodnoi konferentsiya studentov i molodykh uchenykh [Prospects of fundamental sciences development: XII International Conference of students and young scientists], Tomsk, 21–24 April, 2015, pp. 484–486. (In Russian).
4. Grekhova M.V. [Getting corundum substrates for electronics by tape casting]. *Materialy XII Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii studentov i molodykh uchenykh s mezhdunarodnym uchastiem "Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya v XXI veke"* [Materials XII All-Russian scientific-practical conference of students and young scientists with international participation "Chemistry and chemical technology in the XXI century"]. Tomsk, 2011, pp. 19–20. (In Russian).
5. Guzman I.Ya., ed. *Khimicheskaya tekhnologiya keramiki* [Chemical technology of ceramics]. Moscow, Stroimaterialy Publ., 2003. 496 p.
6. Balkevich V.L. *Tekhnicheskaya keramika* [Technical ceramics]. 2nd ed. Moscow, Stoiizdat Publ., 1984. 256 p.
7. Budnikov P.P., Ginstling A.M. *Reaktsii v smesyakh tverdykh veshchestv* [Reactions in mixtures of solids]. Moscow, Stoiizdat Publ., 1965. 487 p.
8. Duderov Yu.G., Duderov I.G. *Raschety po tekhnologii keramiki* [Calculations of ceramic technology]. Moscow, Stoiizdat Publ., 1973. 80 p.
9. Geguzin Ya.E. *Pochemu i kak ischezaet pustota* [Why and how emptiness disappears]. Moscow, Nauka Publ., 1983. 192 p.
10. Tret'yakov Yu.D., Putlyaev V.I. *Vvedenie v khimiyu tverdofaznykh materialov* [Introduction to solid phase materials chemistry]. Moscow, Nauka Publ., 2006. 400 p.
11. Khasanov O.L., Bikbaeva Z.G. *Nanostrukturirovannaya keramika. Poroshkovye tekhnologii kompaktirovaniya konstruktsionnykh materialov* [Nanostructured ceramics. Powder technology of compacting structural materials]. Tomsk, TSU Publ., 2009. 41 p.
12. Zhou J. Towards rational design of low-temperature co-fired ceramic (LTCC) materials. *Journal of Advanced Ceramic*, 2012, vol. 1 (2), pp. 89–99. doi: 10.1007/s40145-012-0011-3.
13. Dubey M., Suri N., Khanna P.K. Optimization of shrinkage and surface-roughness of LTCC tape. *International Journal of Research in Engineering and Technology*, 2013, vol. 2, pp. 441–444.
14. Sebastian M.T., Jantunen H. Low loss dielectric materials for LTCC applications: a review. *International Materials Reviews*, 2008, vol. 53 (2), pp. 57–90.
15. Kita J., Moos R. Development of LTCC-materials an-d their applications – an overview. *Proceedings 44th International Conference on Microelectronics, Devices and Materials*, At Fiesa, Slovenia, 2008, pp. 219–224.
16. Mistler R.E., Twiname E.R. *Tape casting: theory and practice.* Westerville, OH, American ceramic society, 2000. 298 p.
17. Imanaka Y. *Multilayered low temperature cofired ceramics (LTCC) technology.* New York, Springer, 2005. 229 p.
18. King A.G. *Ceramic technology and processing.* Norwich, NY, William Andrew Publ., 2002. 512 p.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Вайман Дмитрий Александрович – аспирант кафедры конструирования и технологии радиоэлектронных средств, Новосибирский государственный технический университет. Область научных интересов: разработка трехмерных структур на основе LTCC керамики для электронных устройств. Опубликовано 4 научные работы. (Адрес: 630073, Россия, Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20. E-mail: dima-1nsk@mail.ru).

Vayman Dmitry Alexandrovich – graduate student at the department of design and technology of radio electronic devices in Novosibirsk State Technical University. His research interests are currently focused on the development of three-dimensional structures based on LTCC ceramics for electronic devices. He is the author of 3 scientific papers. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: dima-1nsk@mail.ru).

Данилов Вячеслав Семенович – канд. техн. наук, доцент кафедры конструирования и технологии радиоэлектронных средств, Новосибирский государственный технический университет. Область научных интересов: приборы СВЧ оптического диапазона. Опубликовано свыше 50 научных работ. (Адрес: 630073, Россия, Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20. E-mail: danilov_vc@ngs.ru).

Danilov Vyacheslav Semyonovich – Candidate of Sciences (Eng.), associate professor at the department of design and technology of radio electronic devices in Novosibirsk State Technical University. His research interests are currently focused on high frequency devices of an optical range. He has published over 50 scientific papers. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: danilov_vc@ngs.ru).

Статья поступила 11 апреля 2017 г.
Received April 11, 2017

To Reference:

Vayman D.A., Danilov V.S. Issledovanie i razrabotka sostava tekhnologicheskoi svyazki dlya formirova-niya gibkikh keramicheskikh lent analogichnykh po svoistvam sovremennym LTCC materialam dlya sozdaniya elektronnykh sredstv SVCh diapazona [Research and development of the LTCC composition of ceramic tape binder for fabrication high frecuency electronic devices]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii – Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2014, no. 2 (39), pp. 19–29. doi: 10.17212/1727-2769-2018-2-19-29.

ДОКЛАДЫ АН ВШ РФ
2018 апрель–июнь № 2 (39)

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

УДК 681.5

ТЕНЗОРЕЗИСТОРЫ НА СТРУКТУРАХ «КРЕМНИЙ НА САПФИРЕ» (КНС) И Si/CaF_2/Si

А.А. Величко[1], В.А. Илюшин[1], Н.И. Филимонова[1], А.Ю. Крупин[1], А.В. Кацюба[2]

[1]Новосибирский государственный технический университет
[2]Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова

В работе представлены результаты исследования параметров тензорезисторов, изготовленных на структурах «кремний на изоляторе» (КНИ): Si/CaF_2/Si и «кремний на сапфире» (КНС). Структуры КНС были промышленного производства, а слои Si/CaF_2 выращены на подложках Si(100) методом молекулярно-лучевой эпитаксии в замкнутом технологическом цикле. Тензорезисторы в обоих случаях имели одинаковую толщину и топологию, а их легирование проводилось методом ионной имплантации бором с одинаковыми дозами и энергией. Для активации атомов примеси и устранения радиационных дефектов в эпитаксиальном слое кремния обеих структур был применен быстрый термический отжиг. Впервые показана возможность изготовления кремниевых тензорезисторов на нанометровых структурах Si/CaF_2. Экспериментальные зависимости сопротивления от приложенной нагрузки носят линейный характер и качественно совпадают с расчетными зависимостями. При одинаковых параметрах тензорезисторов качество слоев Si на CaF_2/Si и их стоимость существенно ниже, чем КНС.

Ключевые слова: тензорезистор, датчики давления, молекулярно-лучевая эпитаксия, CaF_2, кремний на сапфире, кремний на изоляторе.

DOI: 10.17212/1727-2769-2018-2-30-39

Введение

Современные технические системы отличаются широким использованием различных датчиков, применение которых позволяет управлять свойствами и поведением систем методами автоматизированного регулирования.

Одним из наиболее распространенных типов датчиков являются датчики давления. В большинстве из них используется тензорезистивный принцип преобразования благодаря его высокой точности и относительно простой технической реализации. Принцип работы интегральных тензопреобразователей основан на зависимости сопротивления тензорезистора от приложенной нагрузки. При этом важным является проблема электрической изоляции схемных элементов, отсутствие токов утечки и механических напряжений в исходной структуре.

Важнейшими характеристиками тензорезисторов являются высокие радиационная стойкость и рабочие температуры. Использование структур «кремний на изоляторе» (КНИ) позволяет решить эти проблемы. Преобразователи, основанные на КНИ структурах, отличаются существенно более высокой стойкостью к внешним воздействиям, большей надежностью, меньшей потребляемой мощностью по сравнению с преобразователями, выполненными в монолитном кремнии, также на их основе можно реализовать схему обработки с максимально возможной плот-

Исследование выполнено в рамках государственного задания № 16.4643.2017/7.8.

© 2018 А.А. Величко, В.А. Илюшин, Н.И. Филимонова, А.Ю. Крупин, А.В. Кацюба

ностью размещения элементов при объединении в едином изделии собственно датчика и схемы управления (интеллектуальные датчики).

Известны три основных способа получения КНИ структур: «кремний на сапфире» (КНС), SIMOX и SmartCut [1, 2]. В нашей стране коммерческий выпуск тензорезистивных датчиков КНИ-типа осуществлялся только на структурах КНС [3].

К недостаткам структур КНС следует отнести:

– высокую стоимость, определяющуюся применением дорогих сапфировых подложек;

– различие коэффициентов термического расширения (КТР) Si и Al_2O_3 [4];

– сложность профилирования сапфировых подложек для получения мембран, на которых располагаются тензорезисторы, а также сложность применения групповой технологии изготовления чувствительных элементов [5];

– значительную плотность дефектов на интерфейсе кремний-диэлектрик в связи с несоответствием типов кристаллических решеток кремния и сапфира, рассогласованием параметров их решеток [6], которые приводят к деградации параметров тензорезисторов с течением времени.

Несмотря на вышеперечисленные недостатки, такие параметры, как высокие рабочие температуры и радиационная стойкость, побуждают осуществлять промышленное производство тензорезисторов на КНС.

Ранее мы показали возможность получения методом МЛЭ слоев $Si/CaF_2/Si$ в замкнутом технологическом цикле и создание КМОП ИС на их основе [7–9]. В данной работе предлагается технология создания тензорезисторов с использованием нанометровых структур $Si/CaF_2/Si$, полученных разработанным в [7–9] методом. Такие структуры в сравнении со структурами КНС имеют существенно более высокую радиационную стойкость [9], на порядок меньшую стоимость, меньшую дефектность кремниевых слоев. Кроме того при производстве тензорезисторов на таких структурах возможно использование стандартных технологических процессов получения мембран и изготовления чувствительных элементов.

Ниже представлены результаты исследования параметров тензорезисторов на $Si/CaF_2/Si$ и КНС структурах.

1. Методика эксперимента

Для изготовления тензорезисторов использовались промышленные КНС структуры с толщиной Si слоя 0,1 мкм и ориентацией поверхности (100). Исходные слои кремния в структурах имели концентрацию доноров $1\cdot10^{15}$ см$^{-3}$.

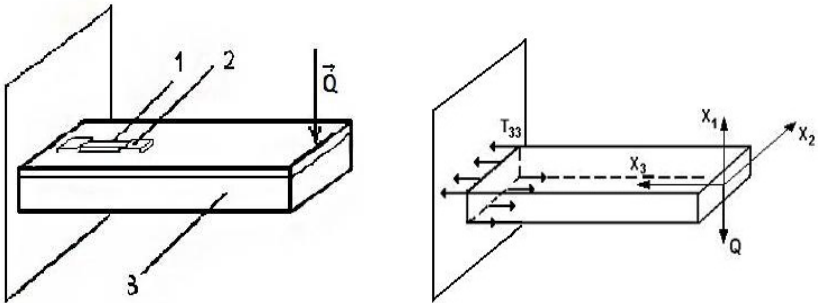
Структуры $Si/CaF_2/Si(100)$ были получены методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) в замкнутом цикле: на очищенную подложку Si(100) осаждался эпитаксиальный слой диэлектрика CaF_2, а затем тонкий слой кремния. Толщина диэлектрика в структуре $Si/CaF_2/Si$ составляла 0,3 мкм, толщина эпитаксиального слоя кремния – 0,1 мкм.

Для создания тензорезисторов использовались слои кремния *p*-типа, которые в обеих структурах получались методом ионной имплантации ионов бора с одинаковой объемной концентрацией $5\cdot10^{18}$ см$^{-3}$ и энергией 30 кэВ.

После имплантации для активации внедренных атомов и устранения радиационных дефектов в эпитаксиальном слое проводился быстрый термический отжиг слоев Si галогенными лампами в атмосфере инертного газа. Длительность импульса варьировалась от 1 до 20 с, а температура отжига от ~900 до ~1200 °С. Измерение температуры проводилось с помощью оптического пирометра. Для оптимизации режимов отжига после каждого из них проводился контроль сопротивления эпитаксиального слоя кремния четырехзондовым методом.

Из отожженных структур вырезались балки длиной 30 мм, шириной 5 мм и толщиной 0,45 мм. Топология тензорезисторов и латеральные размеры были одинаковы. Исследуемая конструкция представляла собой балку (3) из структур КНС или $Si/CaF_2/Si(100)$ соответственно, в эпитаксиальном слое кремния которых сформированы тензорезисторы (1) с алюминиевыми контактами (2) (рис. 1, *а*). Длинная сторона балок ориентировалась вдоль направления [10]. На данных структурах были изготовлены тензорезисторы в виде мезаструктур, ориентированных вдоль [10] направлений кремниевого слоя и расположенных между защемленным концом и серединой балки. Таким образом, изготовленные тензорезисторы были полоскового типа.

Система координат для консольно защемленной балки приведена на рис. 1, *б*, оси $x_1x_2x_3$ совпадают с главными кристаллографическими осями Si(100). Линия действия сосредоточенной силы лежит в плоскости x_1ox_3.



а *б*

Рис. 1– Конструкция датчика давления балочного типа (*а*); система координат и распределение компоненты T_{33} напряжений в плоскости балки (*б*)

Fig. 1 – The design of the pressure sensor of the baulk type (*a*); the coordinate system and the distribution of the component T_{33} of stresses in the plane of the baulk (*b*)

Для проведения эксперимента по исследованию изменения сопротивления полупроводника под действием прилагаемой нагрузки была разработана установка, состоящая из устройства защемления и нагружения исследуемых балок посредством точечного приложения силы к консоли балки.

Измерения производились следующим образом: один из концов балки жестко защемлялся. Затем образец нагружался посредством механического устройства точечного приложения силы. Нагружение производилось равными ступенями. На каждой ступени нагружения с помощью микроскопа регистрировалось отклонение конца балки от горизонтали. Текущее значение сопротивления исследуемого тензорезистора определялось с помощью цифрового вольтметра.

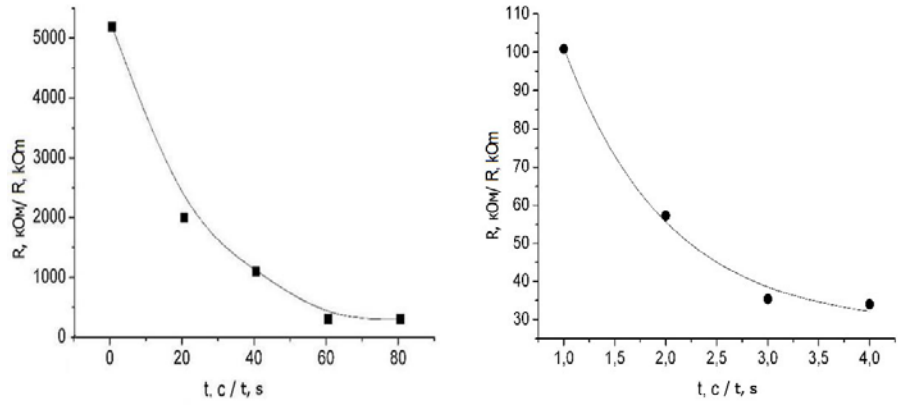
2. Результаты эксперимента и их обсуждение

На рис. 2 приведены зависимости величины сопротивления эпитаксиальных слоев кремния структур КНС и $Si/CaF_2/Si$ от времени отжига.

Видно, что значение сопротивления кремния в структуре $Si/CaF_2/Si$ стабилизируется на 3–5 секунде отжига, а в КНС структуре – на 80 с. Такое различие во времени отжига может быть обусловлено различием коэффициентов поглощения теплового излучения кремниевой и сапфировой подложками.

Несмотря на одинаковые дозы ионов бора, минимальные значения сопротивлений, получаемые после отжига, составляли 105 и 34 кОм для структур КНС и

$Si/CaF_2/Si$ соответственно. Различие в сопротивлениях предположительно связано со значительно меньшей плотностью дефектов в эпитаксиальном слое кремния в структурах $Si/CaF_2/Si$ по сравнению с эпитаксиальным слоем кремния на сапфире. Сопротивление кремния в структуре $Si/CaF_2/Si$ меньше в 3 раза, следовательно, подвижность носителей при одинаковых концентрациях должна быть в 3 раза выше. Это было обнаружено еще в работе [10]. Эпитаксия Si на поверхности CaF_2/Si позволяет получить структуру, в которой, несмотря на различие коэффициентов температурного расширения в слоях кремния и CaF_2, отсутствуют напряжения. Это делает структуры $Si/CaF_2/Si$ значительно более привлекательными для изготовления чувствительных элементов датчиков [11].



а *б*

Рис. 2 – Зависимость сопротивления эпитаксиального слоя кремния от времени отжига для структур:
а – КНС; *б* – $Si/CaF_2/Si$

Fig. 2 – The dependence of the silicon epitaxial layer resistance on the annealing time for structures:
a –SOI; *b* – $Si/CaF_2/Si$

В случае отжига структур на сапфировых подложках можно предположить также частичную релаксацию механических напряжений в слое кремния. Напряжения возникают в процессе охлаждения структуры от температуры роста до комнатной, посредством пластической деформации.

Система координат для консольно защемленной балки соответствует приведенной в [12]. Расчет тензосопротивления от приложенного напряжения проводился в соответствии с выражением [12].

$$R(u_0) = R_0(1 + \pi T_{\text{уср}}),$$

где u_0 – отклонение конца балки; $T_{\text{уср}}$ – усредненное по длине значение компоненты $T_{33} = \frac{12Q}{a^3 b} x_1 x_3$ тензора напряжений; Q – сосредоточенная сила, x_1 и x_3 – координаты точки, в которой рассчитываются механические напряжения; a и b – толщина и ширина балки; π_l – коэффициент пьезосопротивления. $\pi_l = \frac{\pi_{44}}{2}$, так как известно, что для кремния *p*-типа доминирующий вклад вносит коэффициент π_{44}.

При этом учитывалось, что при ионном легировании концентрация бора N_{B} распределяется по толщине пленки по гауссовому закону.

Так как исследуемые тензорезисторы были сформированы методом ионной имплантации, то концентрация легирующей примеси является функцией координаты относительно поверхности полупроводникового слоя. Зависимость от концентрации и координаты удельного сопротивления кремниевого тензорезистора, легированного бором при комнатной температуре, можно аппроксимировать следующим выражением [11]:

$$\rho(X_1) = \frac{1{,}305 \cdot 10^{16}}{N_{\text{B}}(X_1)} + \frac{1{,}133 \cdot 10^{17}}{N_{\text{B}}(X_1)\left[1 + \left(2{,}58 \cdot 10^{-19} N_{\text{B}}(X_1)\right)^{-0{,}737}\right]},$$

где ρ – удельное сопротивление; $N_{\text{B}}(X_1)$ – концентрация атомов бора.

Профиль распределения примеси при ионном легировании $N_{\text{B}}(X_1)$ можно оценить с помощью выражения [12]

$$N_{\text{B}}(X_1) = \frac{N_s}{\sqrt{2\pi}\Delta R_p} \exp\left[-\frac{(X_1 - R_p)^2}{2\Delta R \frac{2}{p}}\right],$$

где N_S – поверхностная концентрация, определяемая дозой ионной имплантации; R_p – средний проекционный пробег ионов бора; ΔR_p – среднеквадратичное отклонение пробега ионов [12].

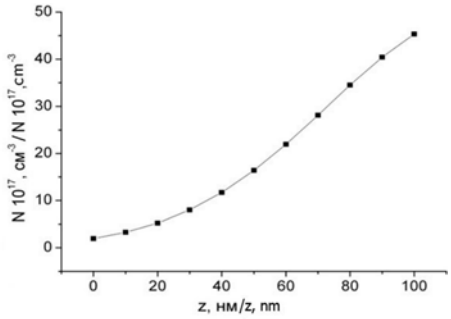


Рис. 3 – Распределение концентрации примеси в эпитаксиальном слое кремния тензорезисторов

Fig. 3 – The distribution of the impurity concentration in the silicon epitaxial layer of the strain gages

На рис. 3 приведено распределение концентрации примеси в структуре при имплантации ионов бора с энергией 30 кэВ и дозой, обеспечивающей максимальную объемную концентрацию атомов $5 \cdot 10^{18}$ см$^{-3}$. Тогда интегральную удельную проводимость всего интегрального кремниевого слоя можно определить по формуле

$$\sigma = \frac{1}{X} \int_0^X \sigma(X_1)\, dX_1,$$

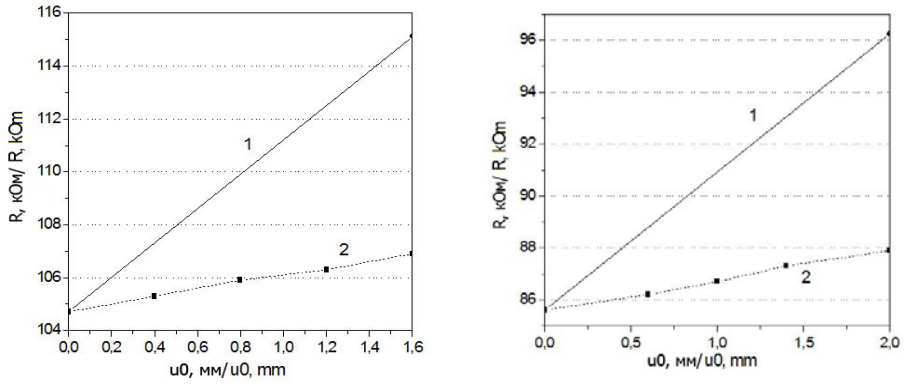
где X – толщина эпитаксиального слоя кремния; $\sigma(X_1)$ – удельная проводимость слоя интегрального резистора на глубине X_1.

В [11] было показано, что для тензорезистивных слоев *p*-типа с уровнем легирования $N_{\text{B}} \sim 3 \cdot 10^{18}$ см$^{-3}$ коэффициент пьезосопротивления интегрального слоя с гауссовым распределением примеси принимает вид

$$\pi_{44} = C(T) - D(T) \ln\left(N_S \exp\left(-\frac{1}{2}\right)\right).$$

Подстановка соответствующих численных значений дает значение компоненты π_{44} тензора пьезосопротивления $\sim 96.7 \cdot 10^{-11}$ Па$^{-1}$.

Интегральная удельная расчетная проводимость кремниевого слоя составила ~ 33 (Ом$\cdot$см)$^{-1}$. С использованием усредненных по толщине проводящего слоя значений проводимости и концентрации была сделана оценка подвижности дырок в слое кремния в структуре Si/CaF_2/Si, которая при комнатной температуре составила $\sim 200 \frac{\text{см}^2}{\text{В} \cdot \text{с}}$. Общее сопротивление и коэффициент пьезосопротивления всего тензорезистора находят путем усреднения по толщине проводящего слоя. Расчетные 1 и экспериментальные 2 зависимости сопротивления R тензорезистора от смещения консоли балки для КНС и Si/CaF_2/Si структур представлены на рис.4.



а *б*

Рис. 4 – Зависимость сопротивления тензорезистора от величины отклонения конца балки U_0:

а – КНС и *б* – Si/CaF_2/Si; *1* – расчетные; *2* – экспериментальные зависимости

Fig. 4 – The dependence of the resistance of the strain gage on the deviation value of the end of the baulk U_0:

а – SOI; *б* – Si/CaF_2/Si. The graph *1* is obtained as a result of the calculations, the graph *2* is experimental

Из рисунков видно, что экспериментальные зависимости R носят линейный характер и качественно совпадают с расчетными. Однако расчетное изменение сопротивления R кремниевых тензорезисторов в Si/CaF_2/Si структурах составило около 10 %, в то время как экспериментальные изменения R – всего ~3 % в диапазоне изменения смещения 2 мм.

Заключение

На основе полученных результатов можно сделать следующие выводы:

– впервые показана возможность изготовления Si тензорезисторов на нанометровых структурах Si/CaF_2/Si;

– обнаружено, что при заданной дозе легирования сопротивление слоев кремния на структурах Si/CaF_2/Si меньше, чем на структурах КНС. Поскольку отжиг структур Si/CaF_2/Si проводился менее интенсивно, качество слоев Si/CaF_2/Si является более высоким;

– показано, что зависимость сопротивления тензорезистора от изгиба балки практически одинакова для обеих структур.

Поскольку стоимость кремниевых пластин существенно ниже стоимости пластин сапфира, структуры $Si/CaF_2/Si$ являются перспективными для коммерческого производства датчиков давления.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Кольцов Б.Б.** Разработка технологии КМОП ИС на структурах КНД: дис. … канд. техн. наук: 05.27.01. – Новосибирск, 2001. – 243 с.
2. Patent US 5374564. Process for the production of thin semiconductor material films / M. Bruel. – Appl. date 20.12.1994.
3. **Мордкович В.Н.** Структуры «кремний на изоляторе» – перспективный материал микроэлектроники // Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники. – 1998. – № 2. – С. 4–7.
4. Совершенствование структур и улучшение технических характеристик датчиков давления на основе микроэлектромеханических систем / В.А. Васильев, С.А. Москалев, И.А. Ползунов, В.А. Шокоров // Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения. – 2014. – Т. 14, № 4. – С. 191–194.
5. **Баринов И.Н.** Полупроводниковые тензорезистивные датчики давления на основе КНД-структуры // Компоненты и технологии. – 2009. – № 5. – С. 12–15.
6. **Kuo J.B., Lin S.** Low-voltage SOI CMOS VLSI devices and circuits. – New York: Wiley, 2001. – 401 p.
7. Features of the surface morphology of $CaF_2/Si(100)$ films obtained by solid-phase epitaxy / V.A. Ilyushin, A.A. Velichko, A.Y. Krupin, V.A. Gavrilenko, A.N. Savinov, A.V. Katsuba // Journal of Surface Investigation. X-Ray, Synchrotron and Neutron Techniques. – 2016. – Vol. 10, iss. 6. – P. 1192–1196.
8. Особенности статических радиационных воздействий на КМОП ИС $Si/CaF_2/Si$ / А.А. Величко, В.А. Илюшин, Б.Б. Кольцов, Н.И. Филимонова // Сборник научных трудов НГТУ. – 2011. – № 2. – С. 95–104.
9. **Величко А.А., Кольцов Б.Б.** Электрофизические параметры КМОП транзисторов на основе эпитаксиальной структуры $Si/CaF_2/Si$ // Микроэлектроника. – 1997. – Т. 2, № 3. – С. 98–105.
10. Use of rapid anneal to improve $CaF_2/Si(100)$ epitaxy / J. Preffer, J.M. Phillips, T.P. Smith, W.M. Augustuniak, K.W. West // Applied Physics Letters. – 1985. – Vol. 46, N 10. – P. 947–949.
11. **Гридчин В.А., Драгунов В.П.** Физика микросистем. Ч. 1. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2004. – С. 314–322.
12. **Курносов А.И., Юдин В.В.** Технология производства полупроводниковых приборов и интегральных микросхем. – М.: Высшая школа, 1986. – 207 с.

TENZORESISTORS BASED ON SILICON AND $SI/CAF_2/SI$ ON SAPPHIRE STRUCTURES

VelichkoA.A.[1], Ilyushin V.A.[1], Filimonova N.I.[1], Krupin A. Yu[1]., Katsyuba A.V.[2]

[1]Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia

[2]Institute of Semiconductor Physics them. A.V. Rzhanova, Novosibirsk, Russia

The paper presents the results of an investigation of the parameters of the tensoresistores on the $Si/CaF_2/Si$ and silicon on sapphire (SOS) structures. The $Si/CaF_2/Si(100)$ structures were obtained by molecular beam epitaxyin a closed technological cycle. The SOS structures were of industrial production. The tensoresistores were formed in an epitaxial Si layer on the SOS structures and on the $Si/CaF_2/Si$ structures by implantation of the boron ions. The doping of both structures was carried out with boron with the same doses. In both cases the tensoresistores had the same thickness and topology

The rapid thermal annealing was applied to activate the impurity atoms and to remove the radiation defects in epitaxial silicon layer of both structures. For the first time, the possibility of

fabricating the Si tensoresistores on a CaF_2/Si(100) substrate with the same sensitivity as the tensoresistores on the SOS structures was shown. The experimental dependences of the resistance on the applied load are linear and qualitatively coincide with the calculated dependences. The quality of the Si layers on CaF_2/Si and their cost is much lower than the Si layers on sapphire (SOS) for the same parameters of tensoresistores.

Keywords: tensoresistor (strain gauge), pressure sensors, molecular-beam epitaxy, calcium fluoride, silicon on sapphire, silicon on insulator.

DOI: 10.17212/1727-2769-2018-2-30-39

REFERENCES

1. Kol'tsov B.B. *Razrabotka tekhnologii KMOP IS na strukturakh KND*. Diss. kand. tekhn. nauk [Development of CMOS integrated circuit technology on silicon-on-insulator structures. PhD in eng. sci. diss.]. Novosibirsk, 2001. 243 p.
2. Bruel M. *Process for the production of thin semiconductor material films.* Patent US, no. 5374564, 1994.
3. Mordkovich V.N. Struktury "kremnii na izolyatore" – perspektivnyi material mikroelektroniki [The structures "silicon on insulator" is a promising material of microelectronics]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Materialy elektronnoi tekhniki – Materials of Electronics Engineering*, 1998, no. 2, pp. 4–7.
4. Vasil'ev V.A., Moskalev S.A., Polzunov I.A., Shokorov V.A. Sovershenstvovanie struktur i uluchshenie tekhnicheskikh kharakteristik datchikov davleniya na osnove mikroelektromekhanicheskikh sistem [The perfecting of structures and improvement of technical characteristics of the pressure sensors based on microelectromechanical systems]. *Fundamental'nye problemy radioelektronnogo priborostroeniya – Fundamental Problems of Radioelectronics*, 2014, vol. 14, no. 4, pp. 191–194.
5. Barinov I.N. Poluprovodnikovye tenzorezistivnye datchiki davleniya na osnove KND-struktury [The semiconductor tensoresistive pressure sensors based on the SOI structure]. *Komponenty i tekhnologiii – Components & Technologies*, 2009, no. 5, pp. 12–15.
6. Kuo J.B., Lin S. *Low-voltage SOI CMOS VLSI devices and circuits*. NewYork, Wiley, 2001. 401 p.
7. Ilyushin V.A., Velichko A.A., Krupin A.Y., Gavrilenko V.A., Savinov A.N., Katsuba A.V. Features of the surface morphology of CaF_2/Si(100) films obtained by solid-phase epitaxy. *Journal of Surface Investigation. X-Ray, Synchrotron and Neutron Techniques*, 2016, vol. 10, iss. 6, pp. 1192–1196.
8. Velichko A.A., Ilyushin V.A., Kol'tsov B.B., Filimonova N.I. Osobennosti staticheskikh radiatsionnykh vozdeistvii na KMOP IS Si/CaF2/Si [Features of static radiation effects on CMOS IC on Si/CaF2/Si]. *Sbornik nauchnykh trudov Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Transaction of scientific papers of the Novosibirsk state technical university*, 2011, no. 2, pp. 95–104.
9. Velichko A.A., Kol'tsov B.B. Elektrofizicheskie parametry KMOP tranzistorov na osnove epitaksial'noi struktury Si/CaF2/Si [The electrophysical parameters of CMOS transistors based on the Si/CaF_2/Si epitaxial structure]. *Mikroelektronika – Russian Microelectronics*, 1997, vol. 2, no. 3, pp. 98–105. (In Russian).
10. Preffer J., Phillips J.M., Smith T.P., Augustuniak W.M., West K.W. Use of rapid anneal to improve CaF_2/Si(100) epitaxy. *Applied Physics Letters*, 1985, vol. 46, no. 10, pp. 947–949.
11. Gridchin V.A., Dragunov V.P. *Fizika mikrosistem*. Ch. 1 [Physics of microsystems. Pt. 1]. Novosibirsk, NSTU Publ., 2004, pp. 314–322.
12. Kurnosov A.I., Yudin V.V. *Tekhnologiya proizvodstva poluprovodnikovykh priborov i integral'nykh mikroskhem* [Production technology of semiconductor devices and integrated circuits]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1986. 207 p.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Величко Александр Андреевич – родился в 1949 году, д-р техн. наук, профессор кафедры полупроводниковых приборов и микроэлектроники Новосибирского государственного технического университета. Область научных интересов: нанотехнологии в электронике и оптоэлектронике. Опубликовано более 70 научных работ.(Адрес: 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, E-mail: velichko@corp.nstu.ru).

Velichko Aleksandr Andreevich – Doctor of Sciences (Eng.), professor at Semiconductors and Microelectronics department, Novosibirsk State Technical University. His research interests are currently focused on nanotechnology in electronics and optoelectronics. Author of 70 scientific papers. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, Russia, 630073. E-mail:velichko@corp.nstu.ru).

Илюшин Владимир Александрович – родился в 1956 году, канд. техн. наук, доцент кафедры полупроводниковых приборов и микроэлектроники Новосибирского государственного технического университета. Область научных интересов: теоретические и экспериментальные исследования процессов роста при молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) полупроводниковых пленок, многослойных гетероэпитаксиальных систем, наноструктур. Опубликовано более 50 научных работ. (Адрес: 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20. E-mail: ilval@ngs.ru).

Ilyushin Vladimir Aleksandrovich – Candidate of Sciences (Eng.), associate professor at Semiconductors and Microelectronics department, Novosibirsk State Technical University. His research interests are currently focused on theoretical and experimental investigation of molecular beam epitaxy (MBE) growth processes of semiconductor films, multilayer heteroepitaxial systems, nanostructures. Author of 50 papers. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, Russia, 630073. E-mail: ilval@ngs.ru).

Филимонова Нина Ивановна – родилась в 1963 году, канд. техн. наук, доцент кафедры полупроводниковых приборов и микроэлектроники Новосибирского государственного технического университета. Область научных интересов: теоретические и экспериментальные исследования процессов роста при молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) полупроводниковых пленок, многослойных гетероэпитаксиальных систем, наноструктур. Опубликовано более 50 научных работ. (Адрес: 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20. E-mail: filimonova@corp.nstu.ru).

Filimonova Nina Ivanovna – Candidate of Sciences (Eng.), associate professor at Semiconductors and Microelectronics department, Novosibirsk State Technical University. Her research interests are currently focused on theoretical and experimental investigation of molecular beam epitaxy (MBE) growth processes of semiconductor films, multilayer heteroepitaxial systems, nanostructures. He is author of 50 scientific papers. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, Russia, 630073. E-mail: filimonova@corp.nstu.ru).

Крупин Алексей Юрьевич – родился в 1986 году, инженер кафедры полупроводниковых приборов и микроэлектроники Новосибирского государственного технического университета. Область научных интересов: нанотехнологии в электронике и оптоэлектронике. Опубликовано 10 научных работ. (Адрес: 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20. E-mail: krupin@corp.nstu.ru).

Krupin Aleksey Yurievich – engineer at the Semiconductors and Microelectronics department, Novosibirsk State Technical University. His research interests are currently focused on nanotechnology in electronics and optoelectronics. He is author of 10 scientific papers. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, Russia, 630073. E-mail: krupin@corp.nstu.ru).

Кацюба Алексей Владимирович – родился в 1986 году, младший научный сотрудник Института физики полупроводников им. Ржанова. Область научных интересов: теоретические и экспериментальные исследования процессов роста при молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) полупроводниковых пленок, многослойных гетероэпитаксиальных систем, наноструктур. Опубликовано 15 научных работ. (630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Лаврентьева, 13. E-mail: kacuba@ngs.ru).

Katsyuba Aleksey Vladimirovich – Junior researcher at the Rzhanov Institute of Semiconductor Physics. His research interests are currently focused on theoretical and experimental investigation of molecular beam epitaxy (MBE) growth processes of semiconductor films, multilayer heteroepitaxial systems, nanostructures. He is author of 15 scientific papers. (Address: pr. Lavrentieva 13, Novosibirsk, Russia, 630090. E-mail: kacuba@ngs.ru).

Статья поступила 17 февраля 2018 г.
Received February 17, 2018

To Reference:

Velichko A.A., Ilyushin V.A., Filimonova N.I., Krupin A.Yu., Katsyuba A.V. Tenzorezistory na strukturakh kremnii na sapfire (KNS) i Si/CaF2/Si [Tenzoresistors based on silicon and Si/CaF_2/Si on sapphire structures]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii – Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2018, no. 2 (39), pp. 30–39. doi: 10.17212/1727-2769-2018-2-30-39.

ДОКЛАДЫ АН ВШ РФ
2018 апрель–июнь № 2 (39)

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

УДК 004.82

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ДИАГНОСТИЧЕСКОЙ ЭКСПЕРТНОЙ СИСТЕМЫ НА ОСНОВЕ ДИАГНОСТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ЕВРОПЕЙСКОЙ И ВОСТОЧНОЙ МЕДИЦИНЫ

М.Г. Гриф, Ю. Аюуш, С.В. Ястребова
Новосибирский государственный технический университет

В статье рассмотрен подход к проектированию медицинской экспертной системы (МЭС) на основе интеграции европейской и восточной медицины. Для выбора наиболее вероятного заболевания применяются байесовская процедура и условная энтропия. При определении реально присутствующего заболевания встает актуальная задача выбора наиболее предпочтительного атомарного диагностического теста (АДТ) на каждом шаге диагностического процесса. АДТ представляет собой неделимую диагностическую процедуру, в результате которой оценивается один или более показателей состояния организма. К рассмотрению предлагается модель выбора источников информации на очередном шаге диагностического процесса. Критерием выбора АДТ является его диагностичность, допускающая ряд формализаций. Одним из направлений предлагаемой работы является исследование информативности опросника пациента, где в качестве АДТ выступают вопросы диагноста с бинарными ответами «ДА-НЕТ». Важной особенностью модели является попытка объединить диагноз традиционной европейской медицины с представлениями об организме и его терапии, используемыми в восточной рефлексотерапии. С этой целью формируются различные морфизмы, отражающие предпочтительные диагностические связи между семью основными конституциональными типами организма человека (терминология традиционного) и множеством «европейских» диагнозов (терминология современной медицины).

Ключевые слова: медицинская экспертная система, байесовская сеть, условная энтропия, априорная и апостериорная вероятность, европейская и восточная медицина.

DOI: 10.17212/1727-2769-2018-2-40-51

Введение

В классическом трактате тибетской медицины «Чжуд-Ши» написано, что когда ребенок появится в матке, питание и образ жизни матери приводят к увеличению вредящих начал и формированию одного из семи типов людей. Эта концепция имеет в основе рассмотрение человека с точки зрения основных трех элементов, которые называются Ветер, Желчь и Слизь. Типы конституции отличаются по собственной способности: ветра – плохой, желчи – лучше, слизи – хороший. Сочетание всех трех – самый лучший, а три типа по два – будут средними [1]. А также лекари считают, что имеется возможность заранее определить вероятность порожденных болезней в соответствии с конституциональными типами [2].

Для приобретения информации о связи симптомов и болезни необходимо решить проблему распознавания методов диагностики. Процесс установления диагноза, который применяется в медицинской практике, делится на следующие этапы: распрос, физические методы исследования и дополнительные методы обследования в зависимости от болезни и т. п. Первый способ установления диагноза является типичным методом, который определит наиболее яркие субъективные ощущения пациента.

© 2018 М.Г. Гриф, Ю. Аюуш, С.В. Ястребова

В диагностической системе для определения ощущений пациента используется удобный интерфейс пользователя с тематическими вопросами. Современные медицинские экспертные системы представляют собой компьютерные программы, которые могут диагностировать и выдать список наиболее вероятных заболеваний, основываясь на научных исследованиях в медицинской области и результатах клинической практики. Также системы содержат разнообразную справочную информацию, помогающую врачам в назначении планов обследования и лечения. Для постановки диагноза системы используют широкий набор данных о пациенте (половозрастные данные; субъективные симптомы (жалобы пациента); результаты объективного осмотра; результаты лабораторных и инструментальных методов исследования; факторы риска (данные анамнеза жизни) и т. п.).

На текущий момент ни одна из систем в полной мере не может решить проблему распознавания болезни. Для достижения более точного распознавания болезни необходимо использовать интеграцию европейского и восточного диагностического методов: один распознает основные причины болезней, другой определяет более сложные симптомы, в результате чего можно добиться более точного диагноза и соответственно эффективного способа лечения. Поэтому интеграция современной и традиционной медицины имеет большое значение для профилактики населения от болезней. В дальнейшем это позволит создать новую методологию и упорядоченную концепцию о состоянии здоровья.

Целью данной статьи является описание проектирования медицинской экспертной системы с учетом традиционного диагностического метода на основе определения конституциональных типов человека.

1. Постановка задачи

Основная сложность при проектировании медицинской экспертной системы заключается в этапе определения совмещенности и точности результатов из диагностик европейской и восточной медицины.

Под результатом совместных диагностик будем рассматривать внутренний и внешний фактор симптомов болезни. На первый взгляд можно ограничиться использованием данных симптомов болезней, но при более подробном изучении можно сделать вывод, что использование данных о симптомах болезни не дает полного результата из-за того, что некоторые симптомы, проявляющиеся в разных заболеваниях, могут не проявиться на начальном этапе болезни. Но благодаря определению конституциональных типов человека можно получить информацию о причине болезни в соответствии с внутренними факторами, структурой телосложения и его особенностей. Таким образом, восточный диагностический метод представляет собой более субъективное понятие. Поэтому возникает необходимость в разработке медицинской экспертной системы, которая обеспечит более вероятный результат, зависимый от конституционального типа пациента.

В качестве исходных данных используется опросник, включающий определенные вопросы, сформулированные специально для определения конституциональных типов человека, и список вероятных болезней. Для повышения точности диагноза разработаны программный модуль критерия диагностичности (информативности) и модуль анализа на основе условных энтропий. Условные вероятности, отражающие правдоподобие получения у пациента ответа на вопрос о наличии (отсутствии) симптома, при условии наличия (отсутствия) диа-

гноза, определяется только для тех симптомов, которые информативны при пересчете вероятности диагноза в смысле Байеса. Оценка априорных вероятностей происходит:

- на основе статистической вероятности диагноза (можно взять из публикуемой медицинской статистики);
- с использованием базы знаний, открытой для свободного доступа.

Значения правдоподобия симптоматической информации для расчета апостериорных вероятностей диагнозов заданы следующей четвёркой:

$$\left\{P(S_j / D_i)\right\}; \left\{P\left(\overline{S_j}/D_i\right)\right\}; \left\{P\left(S_j/\overline{D_i}\right)\right\}; \left\{P\left(\overline{S_j}/\overline{D_i}\right)\right\}.$$

Апостериорные вероятности для всех пар «диагноз-симптом» при любом ответе на вопрос оцениваются по правилу Байеса. Если использовать в качестве критерия диагностичности симптома при первом вопросе шенноновское количество информации, заключенное в ответе, то имеем две частные условные энтропии (остаточные); чтобы найти среднюю условную энтропию, надо знать $P(S_j)$ и $P\left(\overline{S_j}\right)$.

2. Обзор существующих медицинских экспертных систем

В середине 1970-х годов ученые Стэнфордского университета создали первую медицинскую экспертную систему MYCIN для диагностики и лечения инфекционных заболеваний, которая была написана на программном языке LISP [3].

Первый бесплатный общедоступный сайт для самостоятельной диагностики заболеваний (Electronic Medical Solutions) был создан в 1999 году. В настоящее время в медицинских компьютерных продуктах имеется около 250 систем, представленных как в специальных каталогах, так и в интернете [4]. Примеры из них.

- Домашний доктор – простая медицинская экспертная система. Она определяет характер заболевания, основываясь на ответах пользователя, полученных в результате диалога. База знаний включает порядка 100 распространенных заболеваний. К сожалению, полноценный эксперимент провести не смог, так как не болею. Программа для определения диагноза задает вопросы, где ответами могут быть «нет», «не совсем», «не знаю», «наверное, да» и «да». В зависимости от вариантов ответа программа ставит вам диагноз [5].
- EasyDiagnosis – экспертная система, разработана с США. Предоставляет список и клиническое описание наиболее вероятных условий, основанных на анализе ваших конкретных симптомов. Данная система фокусируется на наиболее распространенных заболеваниях [6]. Сайт последний раз обновлялся в мае 2016 года.
- MEDAI – это интернет-приложение, которое позволяет с высокой достоверностью судить о том, что происходит с больным, как его дальше диагностировать и лечить, на основании жалоб, анамнеза и клинических анализов. Данная система включает: симптом-чекер, интерпретатор анализов, персональную медицинскую карту и консультанта. Программа не просто предполагает наличие заболеваний с какой-то вероятностью, она создает порядок посещения врачей, список необходимых анализов, лечебных процедур и определяет опасность состояния [7]. В систему введено уже более 12 000 симптомов, клинических анализов, болезней и соотношений.
- Система Aimedica является интеллектуальной справочной системой помощи врачам, включающая данные о заболеваниях и соответствующих симптомах.

По указанным симптомам система выдает список наиболее вероятных заболеваний, основываясь на данных более 22 млн научных статей по медицинской тематике и результатам клинической практики. Также система содержит разнообразную справочную информацию, помогающую врачам в назначении планов обследования и лечения. Ближайшим аналогом СППВР Аймедика является проект IBM Watson. СППВР Аймедика содержит ряд принципиально новых научно-технологических решений, отличных от подхода IBM Watson. В 2013 году система Аймедика была отмечена корпорацией IBM [8]. IBMWatson – суперкомпьютер фирмы IBM, способный понимать вопросы, сформулированные на естественном языке, и находить на них ответы в базе данных [9].

- Онлайн тест для определения конституциональных типов человека разработан специалистами поликлиники «Наран» России, дающей рекомендации по правильному питанию и здоровому образу жизни из примера тибетской медицины [10].
- Двухрежимная экспертная система по тибетской медицине «ЭМЧИ», как один из методов диагностики «опрос и осмотр», реализованная в рамках программной оболочки ДИЕС, может использоваться для начальной подготовки специалистов в области тибетской медицины, заменяя выучивание наизусть текста «Чжуд-ши» и медитацию. Система может также использоваться в качестве информационной базы для поиска новых лекарственных препаратов на основе компонентов природного происхождения, а также новых лекарств. Знания, содержащиеся в экспертной системе, практически представляют собой главный перевод Третьей Тантры «Чжуд-ши» и повторяют ее структуру [11].
- Экспертная система «Чжуд-ши» в составах автоматизированной системы пульсовой диагностики, основанная на знаниях, заложенных в каноническом трактате «Чжуд-ши» и представляющая собой два из принятых в тибетской медицине методов постановки диагноза – опрос и осмотр. Экспертная система по опросу имитирует мышление тибетского врача и позволяет определять причины и условия заболевания, симптоматику заболевания, тип и класс заболевания, конкретную нозологическую форму и рекомендуемые питание и образ жизни, конкретные лекарства и методы нелекарственной терапии. К настоящему времени создана экспертная система по опросу на основе новой редакции перевода III части «Чжуд-ши». Предложена балльная оценка состояния трех начал (ветра, желчи, слизи) [12].

Практически все рассмотренные системы основаны на методах западной медицины, болезнь диагностируется в соответствии с общепринятыми стандартными показателями. Методологическую основу остальных систем составляют методы диагностики заболеваний по восточной медицине (осмотр, опрос, пальпация), человек больше узнает о своих психотипе и физиологическом здоровье.

Важной особенностью разрабатываемой модели является попытка объединить методы диагностики традиционной европейской медицины с представлениями об организме, используемыми в восточной рефлексотерапии. С этой целью формируются различные морфизмы, отражающие предпочтительные диагностические связи между семью основными конституциональными типами организма человека (терминология Востока) и множеством «европейских» диагнозов (терминология современной медицины).

3. Технология медицинской экспертной системы для диагностики на основе диагнозов западной и восточной медицины

Модель медицинской экспертной системы состоит из следующих этапов: формулировка вопросов для диагноза, содержание конкретных баз данных симптомов и болезней, оценки диагностичности, определение семи конституциональных типов

человека с целью распознования основной причины болезни, назначение конкретных заболеваний в соответствии с классификацией МКБ-10 (рис. 1) [13].

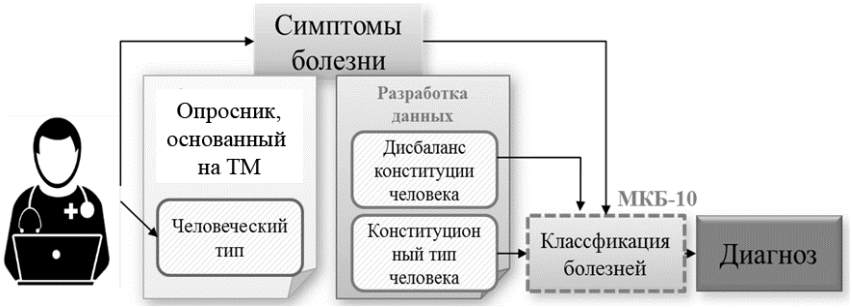


Рис. 1 – Основные рабочие этапы медицинской экспертной системы

Fig. 1 – Basic working principles of a medical expert system

Результатом работы системы является постановка диагноза в зависимости от результата двух тестов. Подготовительным этапом к формулировке вопросов является этап выбор методики эпидемиологических исследований, информацию о результатах которых можно использовать для решения практических задач в медицине. Работа на данном этапе основана на алгоритме выбора вопроса по диагностичности симптома:

- $\forall D_i$ – усредняем сумму частных остаточных энтропий для ответов «да» и «нет», это и будет оценкой диагностичности симптома (ответа) при первом вопросе для диагноза;
- на следующем шаге берем среднее по строке – это оценка ответа (информативность) по всей совокупности диагнозов;
- выбираем вопрос с максимальной информативностью;
- начиная с первого пункта, повторяем до критерия останова, но теперь в качестве априорных вероятностей выступают апостериорные предыдущего шага.

Эффективность теста зависит от двух критериев: быстроты и точности определения диагноза. В связи с этим вопросы необходимо генерировать в соответствии с критерием диагностичности. Стратегии будут различаться по тому, как использовать энтропию, для этого были разработаны следующие стратегии:

- критерий останова или выше, либо, если более 80 % ответов соблюдали одну и ту же тенденцию к росту (падению);
- останавливаемся на группе самых вероятных заболеваний, у которых $P_{apost}(D_i) = 0,6$;
- исследовав конституцию человека, используя тест по восточной медицине, выделяем среди прочих диагнозов группу болезней и увеличиваем коэффициент начальных вероятностей.

4. Математическая модель для постановки диагноза медицинской экспертной системы

Имеется множество диагнозов D и симптомов S, на основе которых специалист может получить необходимую информацию о диагностике заболеваний. Каждый диагноз со своим отрицанием составляет ансамбль гипотез, где $\{S_j\}$,

$j=\overline{1,m}$ – множество симптомов. Для любого S_j будем считать, что симптом есть, либо его нет – $\overline{S_j}$.

Введем следующие обозначения.

$P(D_i)$, $i=\overline{1,n}$ – априорная вероятность диагноза, установленная до получения каких-либо симптомов, где $P(\overline{D_i})=1-P(D_i)$.

$P(S_j / D_i)$ – условная вероятность проявления симптома, если у пациента наблюдается множество симптомов.

$P_{apost}(S_j / D_i)$ – апостериорная вероятность диагноза.

Будут рассмотрены два варианта, когда диагнозы:

- взаимоисключающие;
- совместные.

Определим условные вероятности, отражающие правдоподобие получения у пациента ответа на вопрос о наличии (отсутствии) симптома, при условии наличия (отсутствия) диагноза. Определяется только для тех симптомов, которые информативны при пересчете вероятности диагноза в смысле Байеса. Например: S_j = «ушная боль», D_i = «геморрой» – неинформативный симптом для диагноза.

Определим априорные вероятности:

- на основе статистической вероятности диагноза (можно взять из публикуемой медицинской статистики);
- используя базу знаний, открытую для свободного доступа.

Каждый диагноз со своим отрицанием составляет ансамбль гипотез о $\{S_j\}$, $j=\{1, ..., m\}$ – множество симптомов. $\forall_j$ или S_j – пациент считает, что S_j есть, либо нет – $\overline{S_j}$.

Обозначения вероятностей представлены:

$$\left\{P\left(S_j/D_i\right)\right\};\ \left\{P\left(\overline{S_j}/D_i\right)\right\};\ \left\{P\left(S_j/\overline{D_i}\right)\right\};\ \left\{P\left(\overline{S_j}/\overline{D_i}\right)\right\}.$$

Оцениваем апостериорные вероятности:

$P_{apost}(D_i)$ и $P_{apost}\left(\overline{D_i}\right)$, при получении как положительные, так и отрицательные ответы о симптоме.

1. $P_{apost}(D_i / S_j)=\dfrac{P(D_i)P(S_j / D_i)}{P(S_i)}$,

где $P(S_j)=P(D_i)P(S_j / D_i)+P\left(\overline{D_i}\right)P\left(S_j/\overline{D_i}\right)$.

2. $P_{apost}(D_i / S_j)=\dfrac{P(D_i)P\left(\overline{S_j}/D_i\right)}{P\left(\overline{S_i}\right)}$,

где $P_{apost}\left(\overline{S_j}\right)=P(D_i)P\left(\overline{S_j}/D_i\right)+P\left(\overline{D_i}\right)P\left(\overline{S_j}/D_i\right)$.

$P_{apost}\left(\overline{D_i}/S_j\right)=1-P_{apost}(D_i / S_j)$, $P_{apost}\left(\overline{D_i}/\overline{S_j}\right)=1-P_{apost}\left(D_i/\overline{S_j}\right)$.

Если использовать в качестве критерия диагностичности симптом при первом вопросе, шенноновское количество информации, заключенное в ответе, то имеем две частные условные энтропии (остаточные):

$$H(D_i / S_j) = -\left[P_{apost}(D_i / S_j) \log P_{apost}(D_i / S_j) + \right.$$
$$\left. + P_{apost}\left(\overline{D_i}/S_j\right) \log P_{apost}\left(\overline{D_i}/S_j\right). \right.$$

Аналогично для $H\left(D_i/\overline{S_j}\right)$, чтобы найти среднюю условную энтропию, надо знать $P(S_j)$ и $P(\overline{S_j})$.

Тогда

$$\overline{H}(D_i / S_j) = P(S_j) H(D_i / S_j) + P\left(\overline{S_j}\right) H\left(D_i/\overline{S_j}\right).$$

5. Результаты прохождения тестирования медицинской экспертной системы

МЭС разработана на платформе VisualStudio 2013 Professional, с использованием стека технологий ASP.NET, Net.Framework 4.5, SQLExpress 2014.

На рис. 2–4 представлен результат прохождения тестирования на определение диагноза без коэффициентов. Как можно заметить, в данном случае доминирует диагноз Пневмокониоз, на протяжении всего теста были некоторые изменения энтропии, но в итоге она свелась к нулю, а вероятности некоторых болезней возросли.

#	Код	Диагноз	Вероятность
1	18	Пневмокониоз	0.500250125062531
2	3	Синусит	0.476190476190476
3	25	Язва желудка	0.476190476190476
4	46	Ишемическая болезнь сердца	0.444691495275153
5	45	Припадок	0.444691495275153

Рис. 2 – Результат прохождения основного теста без коэффициентов

Fig. 2 – The result of the basic test without coefficinets

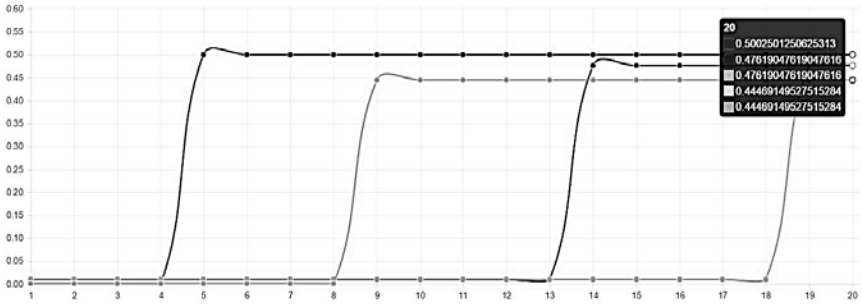


Рис. 3 – График изменения апостериорных вероятностей

Fig. 3 – The diagram of an a priori probabilities change

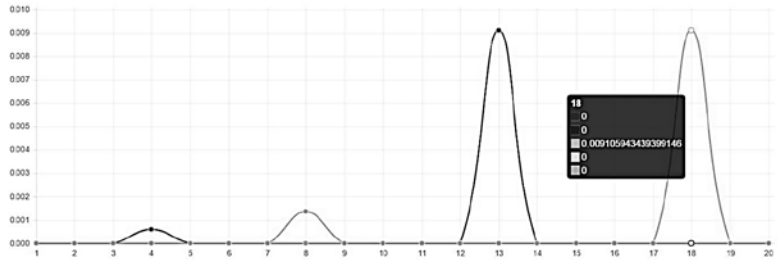


Рис. 4 – График изменения средней энтропии

Fig. 4 – A diagram of an average entropy change

После прохождения основного теста без коэффициентов можно пройти тестирование заново. Выбрав пункт «пройти тестирование по ТМ», пользователь попадает на страницу определения типа конституции. У данного пользователя был определен тип смешанный, в котором преобладают типы Ветер и Желчь (рис. 5).

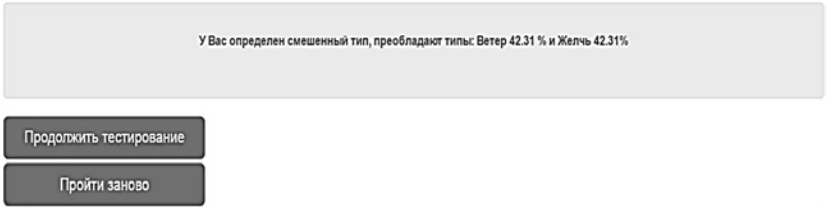


Рис. 5 – Результат прохождения теста по восточной медицине

Fig. 5 – The result of the Eastern medicine test

При данном типе повышается вероятность следующих диагнозов: хиатальная грыжа, язва двенадцатиперстной кишки, язва желудка, дивертикулярная болезнь, болезнь Крона, расстройство кишечника, аппендицит, пищевое отравление, гастроэнтерит, каменнопочечная болезнь, острый пиелонефрит, желчный конкремент, холецистит, простуда, синусит, фарингит, тонзиллит, грипп, ларингит, опухоль гортани, желчный конкремент, слизистый колит, рак толстой кишки, язвенный колит, гипертония.

На рис. 6–8 представлены результаты прохождения основного теста с увеличенными первоначальными вероятностями, в соответствии с коэффициентом.

Данные представлены в таблице:

#	Код	Диагноз	Вероятность
1	3	Синусит	0.500252652854977
2	25	Язва желудка	0.500252652854977
3	18	Пневмокониоз	0.500250125062531
4	46	Ишемическая болезнь сердца	0.444691495275153
5	45	Припадок	0.444691495275153

Рис. 6 – Результат прохождения основного теста с коэффициентами

Fig. 6 – The result of the basic test with coefficients

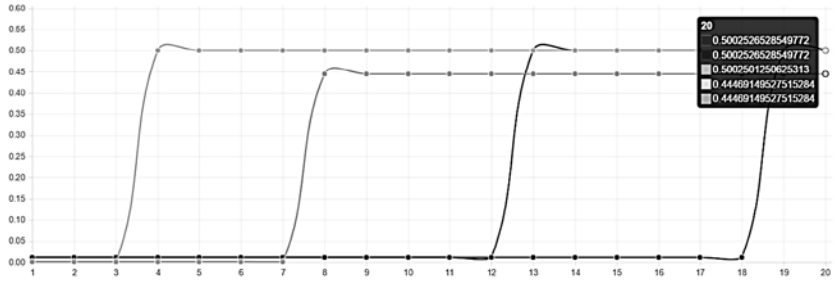


Рис. 7 – График изменения апостериорных вероятностей

Fig. 7 – A diagram of an average entropy change

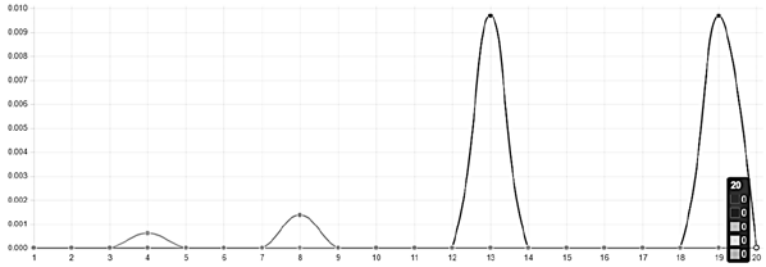


Рис. 8 – График изменения средней энтропии

Fig. 8 – Change of average entropy chart

Заключение

В работе рассмотрен подход к проектированию медицинской экспертной системы на основе интеграции европейской и восточной медицины. Для выбора наиболее вероятного заболевания применяются байесовская процедура и условная энтропия. При определении реально присутствующего заболевания встает актуальная задача выбора наиболее предпочтительного атомарного диагностического теста на каждом шаге диагностического процесса. АДТ представляет собой неделимую диагностическую процедуру, в результате которой оценивается один или более показателей состояния организма. Одним из направлений предлагаемой работы является исследование информативности опросника пациента, где в качестве АДТ выступают вопросы диагноста с бинарными ответами «ДА-НЕТ». Важной особенностью модели является попытка объединить диагноз традиционной европейской медицины с представлениями об организме и его терапии, используемыми в восточной рефлексотерапии. С этой целью формируются различные морфизмы, отражающие предпочтительные диагностические связи между семью основными конституциональными типами организма человека (терминология традиционного) и множеством «европейских» диагнозов (терминология современной медицины). Разработан макет медицинской экспертной диагностической системы, включающей 88 заболеваний.

ЛИТЕРАТУРА

1. Чжуд-Ши. Основы тибетской медицины [Электронный ресурс]. – СПб.: Невский проспект, 1999. – 156 с. – URL: http://www.rulit.me/books/chzhud-shi-osnovy-tibetskoj-mediciny-read-415656-1.html (дата обращения: 05.06.2018).
2. **Баавгай Ч., Болдсайхан Б.** Монгольская традиционная медицина. – Улан-Батор: Государственное издательство, 1990. – 380 с.
3. **Bryan S.T.** An introduction to expert systems. – Oxford: Oxford University Press, 1992. – 101 p.
4. **Резе А.** Медицинские экспертные системы для пациентов. Самолечение – неизбежное будущее медицины [Электронный ресурс] // Вестник Московского городского научного общества терапевтов. – URL: http://www.mgnot.ru/index.php?mod1=art&gde=ID&f=12501&m=1 (дата обращения: 05.06.2018).
5. Домашний доктор 2.2 [Электронный ресурс]. – URL: http://www.aiportal.ru/downloads/expert- systems/home_doctor_2_2.html (дата обращения: 05.06.2018).
6. EasyDiagnosis [Electronic resource]. – URL: http://www.easydiagnosis.com/about.html (accessed: 05.06.2018).
7. MEDAI [Электронный ресурс]. – URL: http://www.medai.ru/ (дата обращения: 06.06.2018).
8. Aimedica [Электронный ресурс]. – URL: http://www.i20.biz/project/aimedica (дата обращения: 06.06.2018).
9. **Дошина А.Д.** Экспертная система. Классификация. Обзор существующих экспертных систем // Молодой ученый. – 2016. – № 21 (125). – С. 756–758.
10. Тест для определения типа конституции человека по Тибетской медицине [Электронный ресурс]. – URL: http://tibet-medicine.ru/konstitucii/tipy-konstitutcij (дата обращения: 06.06.2018).
11. **Жамбалдагбаев Н.Ц., Занданова Г.И.** Двухрежимная экспертная система по тибетской медицине «ЭМЧИ-1» // Российская научно-техническая конференция по дифракции и распространению волн. – Улан-Удэ, 1996. – С. 234–236.
12. **Бороноев В.В.** Практическая реализация метода диагностики по пульсу инструментальными средствами // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2015. – № 12-1. – С. 188–192.
13. **Ayush Yu., Grif M.G.** The computational method for self-diagnostical system // IBS Scientific Workshop Proceedings. – 2017. – N 4. – P. 67–70.

DESIGN OF A DIAGNOSTIC EXPERT SYSTEM BASED ON DIAGNOSTIC METHODS OF EUROPEAN AND EASTERN MEDICINES

Grif M.G., Ayush Yu., Yastrebova S.V.
Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia

This paper describes an approach to the design of a medical expert system (MES) which is based on the integration of European and eastern medicines. The Bayesian network and conditional entropy are used to choose the most probable disease. While identifying an actual disease we are faced with an urgent task of choosing the most preferable atomic diagnostic test (ADT) at every step of the diagnostic process. ADT is an indivisible diagnostic procedure which helps to estimate one or more indicators of a patient's state. A model of choosing information sources at every step of the diagnostic process is proposed in the paper. The criterion of choosing ADT is its diagnosticity permitting a number of formalizations. The study of the information density of a patient's questionnaire where "Yes-No" answers are used as an atomic diagnostic test is one of the aspects of this approach. An important peculiarity of the proposed model is an attempt to combine diagnoses of traditional European medicine with ideas of a human organism and its treatment used in eastern medicine. To do this various morphisms are formed which reflect preferable diagnostic relations among seven main human constitution types (a term used in traditional medicine) and a set of the European diagnoses (a term used in modern medicine).

*Keywords M*edical expert system, Bayesian network, conditional entropy, a priori and a posteriori probabilities, European and eastern medicine.

DOI: 10.17212/1727-2769-2018-2-40-51

REFERENCES

1. *Chzhud-Shi. Osnovy tibetskoi meditsiny* [Chzhud-Shi. The fundamentals of Tibetan medicine]. St. Petersburg, Nevskii prospect Publ., 1999. Available at: http://www.rulit.me/books/chzhud-shi-osnovy-tibetskoj-mediciny-read-415656-1.html (accessed 05.06.2018).
2. Baavgai Ch., Boldsaikhan B. *Mongol'skaya traditsionnaya meditsina* [Mongolian traditional medicine]. Ulaanbaatar, State Publishing House, 1990. 380 p.
3. Bryan S.T. *An introduction to expert systems*. Oxford, Oxford University Press, 1992. 101 p.
4. Reze A. Meditsinskie ekspertnye sistemy dlya patsientov. Samolechenie – neizbezhnoe budushchee meditsiny [Medical expert systems for patients. Self-treatment – the inevitable future medicine]. *Vestnik Moskovskogo gorodskogo nauchnogo obshchestva terapevtov* [Bulletin of Moscow scientific society of doctors]. Available at: http://www.mgnot.ru/index.php?mod1=art&gde=ID&f=12501&m=1 (accessed 05.06.2018).
5. *Domashnii doctor 2.2* [Home doctor]. Available at: http://www.aiportal.ru/downloads/expert-systems/home_doctor_2_2.html (accessed 05.06.2018).
6. *EasyDiagnosis*. Available at: http://www.easydiagnosis.com/about.html (accessed 05.06.2018).
7. *MEDAI*. (In Russian). Available at: http://www.medai.ru/ (accessed 06.06.2018).
8. *AiMedica*. (In Russian). Available at: http://www.i20.biz/project/aimedica (accessed 06.06.2018).
9. Doshina A.D. Ekspertnaya sistema. Klassifikatsiya. Obzor sushchestvuyushchikh ekspertnykh sistem [Expert system. Classification. The review of existing expert systems]. *Molodoi uchenyi – The young scientist*, 2016, no. 21 (125), pp. 756–758.
10. *Test dlya opredeleniya tipa konstitutsii cheloveka po Tibetskoi meditsine* [Test for determination of human constitutional types by Tibetan medicine]. http://tibet-medicine.ru/konstitucii/tipy-konstitutcij (accessed 06.06.2018).
11. Zhambaldagbaev N.Ts., Zandanova G.I. [Two-mode expert system by Tibetan medicine "EMCHI-1"]. *Rossiiskaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya po difraktsii i rasprostraneniyu voln* [*Proceedings of Russian scientific-technical conference by diffraction and common waves*]. Ulan-Ude, 1996, pp. 234–236. (In Russian).
12. Boronoev V.V. Prakticheskaya realizatsiya metoda diagnostiki po pul'su instrumental'nymi sredstvami [Practical realization method of pulse diagnostic by instruments]. *Mezhdunarodnyi zhurnal prikladnykh i fundamental'nykh issledovanii – International journal of applied and fundamental research*, 2015, no. 12-1, pp. 188–192.
13. Ayush Yu., Grif M.G. The computational method for self-diagnostical system. *IBS Scientific Workshop Proceedings*, 2017, no. 4, pp. 67–70.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Гриф Михаил Геннадьевич – родился в 1959 году, д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры автоматизированных систем управления, факультет автоматики и вычислительной техники, Новосибирский государственный технический университет. Область научных интересов: проектирование и оптимизация процесса функционирования человеко-машинных систем, системы искусственного интеллекта, лингвистические и технологические аспекты разработки компьютерного сурдопереводчика. Опубликовано более 250 научных работ. (Адрес: 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20. E-mail: grifmg@mail.ru).

Grif Mikhail Gennadievich (b. 1959) – Doctor of Sciences (Eng.), professor at the department of automation control systems, Novosibirsk State Technical University. His research interests are currently focused on computer sign language translation systems for the deaf, designing and optimization of man-machine systems, AI systems. He is the author of more than 250 scientific papers. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: grifmg@mail.ru).

Аюуш Юмчмаа – родилась в 1982 году, аспирант кафедры автоматизированных систем управления, Новосибирский государственный технический университет. Область научных интересов: медицинская экспертная система. Опубликовано 10 научных работ. (Адрес: 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20. E-mail: yumchmaa@must.edu.mn).

Ayush Yumchmaa (b. 1982), post-graduate student at the department of automated control systems, Novosibirsk State Technical University. Her research interests are currently focused on esigning medical expert system. She is the author of 10 scientific papers. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: yumchmaa@must.edu.mn).

Ястребова Светлана Викторовна – родилась в 1992 году, магистр кафедры автоматизированных систем управления, Новосибирский государственный технический университет. Область научных интересов: медицинская экспертная система, ИИ. Опубликовано 5 научных работ. (Адрес: 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20. E-mail: sibiria007@gmail.com).

Yastrebova Svetlana Victorovna (b.1992), master student of department of automated control systems, Novosibirsk State Technical University. Her research interests include designing medical expert systems and artificial intelligence. She has published 5 research papers. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: sibiria007@gmail.com).

Статья поступила 01декабря 2017 г.
Received December 01, 2017

To references:

Grif M.G., Ayush Yu., Yastrebova S.V. Proektirovanie diagnosticheskoi ekspertnoi sistemy na osnove diagnosticheskikh metodov evropeiskoi i vostochnoi meditsiny [Design of a diagnostic expert system based on diagnostic methods of euro-pean and eastern medicines]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii – Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2018, no. 2 (39), pp. 40–51. doi: 10.17212/1727-2769-2018-2-40-51.

ДОКЛАДЫ АН ВШ РФ
2018 апрель–июнь № 2 (39)

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

УДК519.213, 519.254, 621.391

АНАЛИЗ НАХОЖДЕНИЯ ОБЪЕКТА В ЗАДАННОЙ ОБЛАСТИ В СЕЙСМИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ ОХРАНЫ

Д.Н. Зима, Д.О. Соколова, А.А. Спектор
Новосибирский государственный технический университет

Одними из перспективных средств охраны периметров большой протяженности являются системы пассивной локации, основанные на регистрации сейсмического сигнала нарушителя. Такие системы обладают рядом преимуществ: пассивный принцип работы и высокая степень маскировки. Для неподготовленного нарушителя они делают невозможным обнаружение точного места установки и, следовательно, препятствуют его незаметному проникновению на охраняемую территорию. Среди задач, решаемых такими системами, не последнее место отводится задаче избирательного обнаружения объекта в определенной части зоны обнаружения – зоне контроля. Одним из основных требований, предъявляемых к алгоритмам, решающим эту задачу, является работа в режиме реального времени, с минимальной задержкой. Предлагаемый в работе алгоритм строится на основе методов статистического анализа сигналов сейсмических систем. Полученные результаты исследований показывают достаточно простую практическую реализацию и соответствие требованиям, предъявляемым к подобным системам.

Ключевые слова: сейсмические системы охраны, обнаружение объекта, зона контроля, зона обнаружения, энергетический параметр среды, апостериорная вероятность.

DOI: 10.17212/1727-2769-2018-2-52-61

Введение

Сейсмические системы охраны активно развиваются на протяжении последних 15 лет. Актуальность разработки и использования сейсмических систем охраны высока ввиду ряда особенностей таких систем, одной из которых является их скрытность (пассивность и установка непосредственно в грунт) [1]. В ходе обработки сигналов обычно ставятся задачи обнаружения объекта, его классификация, определение траектории движения объекта [2–6, 9]. Вместе с тем, развитие сейсмических систем охраны характеризуется появлением новых задач. К их числу относится избирательное обнаружение объекта в определенной зоне, называемой зоной контроля, из общей зоны – зоны обнаружения, в пределах которой чувствительными элементами системы могут регистрироваться сигналы из неинтересующей с точки зрения охраны области. Объекты, находящиеся в зоне обнаружения, не должны обнаруживаться системой до тех пор, пока они не войдут в зону контроля. При этом необходимо, чтобы эта задача была решена в реальном времени (с минимальной задержкой).

Данная задача может быть решена путем определения координат объекта по совокупности измерений задержек сигналов или по совокупности их интенсивностей [5]. В свою очередь алгоритм, основанный на измерении энергетических параметров сигнала, можно реализовать путем решения задачи параметрической оптимизации [7, 8]. Но в виду того, что для решения этой задачи необходима достаточно большая база реальных сигналов, в данной работе оценка координат объекта выполнена путем табличной реализации метода максимального правдоподобия.

© 2018 Д.Н. Зима, Д.О. Соколова, А.А. Спектор

1. Оценка координат на основе измерения интенсивностей сигналов

Рассмотрим фрагмент сейсмической системы охраны (ССО), состоящий из n-датчиков, на которых произошло обнаружение объекта [9]. Полагаем, что объект (человек, группа людей и др.) производит импульсное воздействие на грунт. Данное воздействие имеет ярко выраженный случайный характер, поэтому обработка таких сигналов должна осуществляется на основе статистических методов.

Сигналы в пределах импульсов являются гауссовскими случайными процессами [3] и образуют первичные (энергетические) статистики:

$$u_1,\ u_2, ..., u_i, ..., u_n, \tag{1}$$

где u_i – средняя мощность одного импульса на i-м датчике, определяемая выражением

$$u_i = \frac{1}{\tau}\sum_{j=1}^{\tau}\zeta_{ij}^2, \tag{2}$$

где ζ_{ij} – j-й отсчет наблюдаемого (выбеленного) сигнала на i-м датчике.

Если имеется K импульсных воздействий (шагов), то наблюдение представляет собой совокупность векторов шага вида (1):

$$\begin{cases} U_1 = \left\| u_{11}, u_{12}, ..., u_{1n} \right\|^T, \\ U_2 = \left\| u_{21}, u_{22}, ..., u_{2n} \right\|^T, \\ ... \\ U_K = \left\| u_{K1}, u_{K2}, ..., u_{Kn} \right\|^T, \end{cases} \tag{3}$$

где u_{Ki} – результат наблюдения K-го импульса (шага) на i-м датчике. Символ T в системе (3) обозначает транспонирование.

Полагаем, что перемещение объекта за время наблюдения пренебрежимо мало, т. е. координаты объекта не изменяются за время наблюдения.

В силу принятого условия о неизменности координат за время наблюдения статистики u_{Ki} подчиняются гауссовскому распределению $p_i(u)$, не зависящему от номера шага K, со средним значением $\overline{u_i}$ и дисперсией D_i [3].

Согласно [8] была исследована зависимость вида (4)

$$\overline{u_i} = \frac{\mu}{R_i}, \tag{4}$$

где R_i – расстояние от объекта до i-го датчика, а μ – энергетический параметр среды (характеризует сейсмическую проводимость среды распространения сейсмических колебаний), который неизменен по времени и по пространству (т. е. среда в пределах выбранных n-датчиков стационарная и однородная).

Пусть координаты всех датчиков (x_i, y_i) декартовы и известны, а (x, y) – координаты объекта, создающего импульсное воздействие. Тогда

$$R_i = \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2}. \tag{5}$$

При точно известной величине $\overline{u_i}$ для трех датчиков для совместного определения x, y и μ достаточно одного наблюдения

$$U_1 = \left\| u_{11}, u_{12}, u_{13} \right\|^T \tag{6}$$

так как компоненты вектора (6) позволяют построить систему:

В действительности средние интенсивности $\overline{u_{1i}}$ неизвестны, а имеются лишь случайные векторы $U_1, U_2, ..., U_K$, по которым можно построить статистическую оценку указанных параметров x, y, μ.

2. Статистическая оценка параметров x, y, μ

Оценки x^*, y^*, μ^* определяются по критерию максимума правдоподобия. Плотность распределения вероятностей $P(U|x, y, \mu)$ для вектора

$$U^T = \left\| U_1{}^T, U_2{}^T, ..., U_K{}^T \right\|^T \tag{8}$$

– это расширенный вектор из $n \cdot K$ элементов, для K-шагов и n-датчиков, который можно определить следующим выражением:

$$P(U|x, y, \mu) = \prod_{j=1}^{K} \prod_{i=1}^{n} p(u_{ji}|x, y, \mu) . \tag{9}$$

Отсчеты являются независимыми, поскольку регистрируются на разных датчиках. С учетом того, что все сомножители в выражении (9) являются гауссовскими случайными величинами [3] с математическим ожиданием $\overline{u_{ji}}$ и одинаковыми дисперсиями D, искомая плотность примет вид

$$P(U|x, y, \mu) = (2\pi D)^{\frac{nK}{2}} \exp\left\{ -\frac{1}{2D} \sum_{j=1}^{K} \sum_{i=1}^{n} \left(u_{ji} - \frac{\mu}{R_i(x, y)} \right)^2 \right\} . \tag{10}$$

Оценка максимального правдоподобия минимизирует функцию

$$\Psi(x, y, \mu) = \sum_{j=1}^{K} \sum_{i=1}^{n} \left(u_{ji} - \frac{\mu}{R_i(x, y)} \right)^2 \to \min_{x, y, \mu} , \tag{11}$$

где $R_i(x, y)$ определяется выражением (5).

Для решения используется табличный метод: трехмерная таблица в пространстве переменных x, y, μ. Решение ищется в узлах рабочей области пространства. В рабочей области пространства образуется сетка (например, прямоугольная или квадратная) с узлами в точках $x = \xi_m$, $y = \eta_l$, $(m, l) = \overline{1, L}$. Для каждого датчика составляется таблица расстояний от него до каждого узла сетки:

$$R_i(\xi_m, \eta_l) = \sqrt{(\xi_m - x_i)^2 + (\eta_l - y_i)^2} \ . \tag{12}$$

Располагая вектором наблюдений U вида (8), при помощи критерия (11), можно определить оптимальную оценку энергетического параметра среды μ^* из условия вида

$$\left.\frac{\delta\Psi(x, y, \mu)}{\delta\mu}\right|_{x=\xi_m, y=\eta_l} = 0. \tag{13}$$

Оценка μ^*, полученная в результате решения уравнения (13), минимизирует критерий (11) при выполнении равенств $x = \xi_m$, $y = \eta_l$:

$$\mu^* = f_\mu(\xi_m, \eta_l, U) \, , \tag{14}$$

т. е., если координаты объекта совпадают с координатами узлов сетки $x = \xi_m$, $y = \eta_l$, то при данном наблюдении U параметр μ может иметь только значение μ^*.

Таким образом, выражение (14) ставит в соответствие каждой точке пространства (ξ_m, η_l) и вектору U значение μ, минимизирующее критерий (11). В результате каждому узлу (m,l) сетки ставится в соответствие скаляр $\mu^*(\xi_m, \eta_l)$, т. е. функция критерия (11) принимает вид

$$\Psi(\xi_m, \eta_l, \mu^*(\xi_m, \eta_l)) = \sum_{j=1}^{K} \sum_{i=1}^{n} \left(u_{ji} - \frac{\mu^*(\xi_m, \eta_l)}{R_i(\xi_m, \eta_l)} \right)^2 \to \min_{\xi_m, \eta_l} . \tag{15}$$

Таким образом функция Ψ в выражении (15) представляет собой функцию двух переменных ξ_m, η_l. Проходя по всем узлам сетки, определяется пара координат ξ_m^* и η_l^*, которые минимизируют функцию критерия максимального правдоподобия (15).

Оценка энергетического параметра среды, полученная в результате решения (13), имеет вид

$$\mu^*(\xi_m, \eta_l, U) = \frac{\sum_{j=1}^{K} \sum_{i=1}^{n} \frac{u_{ji}}{R_i(\xi_m, \eta_l)}}{\sum_{j=1}^{K} \sum_{i=1}^{n} \frac{1}{R_i^2(\xi_m, \eta_l)}} . \tag{16}$$

3. Обнаружение в зоне контроля

Процедура обнаружения в зоне контроля представляет собой статистическую задачу анализа гипотез. Пусть $\Omega = \{m, l\}$ – множество узлов на охраняемой площадке (рис. 1), которые участвуют в образовании решения присутствия объекта в зоне контроля (ЗК) или зоне обнаружения (ЗО):

$\Omega_{ЗК} \in \Omega$, $\Omega_{ЗК}$ – множество тех узлов $\{m,l\}$, которые входят в ЗК;

$\Omega_{ЗО} \in \Omega$, $\Omega_{ЗО}$ – множество узлов, не входящих в ЗК (т. е. входящих в ЗО);

$\Omega_{ЗК} \cup \Omega_{ЗО} = \Omega$.

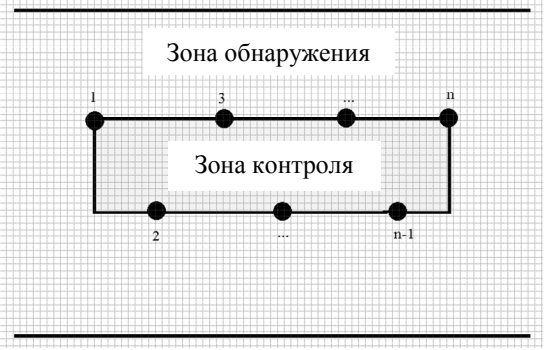


Рис. 1 – Разбиение сетки на области зоны контроля и зоны обнаружения

Fig. 1 – Splitting the grid into control zone areas and detection zones

Согласно выражению (10) в узловых точках с координатами (ξ_m, η_l) условная вероятность (функция правдоподобия) $P(U|\xi_m, \eta_l, \mu)$. Полагая ξ_m, η_l, μ случайными величинами с равномерными распределениями в своих областях существования, можно определить апостериорное распределение вероятностей по формуле Байеса:

$$P(\xi_m, \eta_l, \mu|U) = \frac{P(U|\xi_m, \eta_l, \mu) \cdot P(\xi_m, \eta_l, \mu)}{P(U)},$$

$$P(\xi_m, \eta_l, \mu|U) = C \cdot P(U|\xi_m, \eta_l, \mu), \quad (17)$$

где c – нормирующий коэффициент вида

$$C = \frac{1}{\sum\limits_{\xi_m} \sum\limits_{\eta_l} \sum\limits_{\mu} P(U|\xi_m, \eta_l, \mu)}. \quad (18)$$

Суммирование в выражении (18) ведется по всем значениям ξ_m, η_l, μ.

Апостериорные вероятности нахождения объекта в зоне контроля $P_{ЗК}$ и зоне обнаружения $P_{ЗО}$ из выражения (17):

$$P_{ЗК} = P\{(\xi_m, \eta_l) \in \Omega_{ЗК}\} = C \cdot \sum_{\Omega_{ЗК}} P(U|\xi_m, \eta_l, \mu), \quad (19)$$

$$P_{ЗО} = P\{(\xi_m, \eta_l) \in \Omega_{ЗО}\} = C \cdot \sum_{\Omega_{ЗО}} P(U|\xi_m, \eta_l, \mu). \quad (20)$$

Их сравнение приводит к финальному решению:

$P_{ЗК} > P_{ЗО}$ – объект находится в ЗК,

$P_{ЗК} < P_{ЗО}$ – объект находится в ЗО.

4. Исследование алгоритма обнаружения

Оценка эффективности работы алгоритма выполнена экспериментально с использованием записей сейсмических сигналов, полученных при помощи сейсмических приемных устройств с полосой частот 120 Гц, и оцифрованных с частотой дискретизации 600 Гц. Длительность локального интервала анализа составляла 1000 отсчетов, что соответствует 1,67 с реального времени. Записи были зарегистрированы при появлении в охраняемой зоне человека.

Исследование проводилось для двух типов объекта – статического и динамического. Под статическим понимается объект совершающий периодические импульсные сейсмические воздействия в фиксированной точке. Расстояние от места воздействия до датчиков постоянное, поэтому регистрируемые датчиками импульсы имеют одинаковую амплитуду. Объект считается динамическим, если он осуществляет проход по охраняемой зоне. В этом случае расстояние от точки воздействия объекта до датчика изменяется от большего значения к меньшему, а затем опять увеличивается. Это приводит к изменению амплитуд импульсов соответствующих шагам. Максимальное значение средней мощности импульса будет соответствовать точке наименьшего удаления объекта от датчика.

Для наглядного представления формирования в соответствии с выражениями (19), (20) апостериорных вероятностей $P_{\text{ЗК}}$ и $P_{\text{ЗО}}$ на рис. 2 представлены распределения вероятности нахождения статического объекта в каждой точке зоны наблюдения $P(U|\xi_m, \eta_l, \mu)$ в зависимости от числа импульсов (шагов) K сигнала. При этом число активных сейсмических датчиков не менялось. Здесь градациями серого цвета представлены вероятности нахождения объекта в каждой точке зоны наблюдения. Вероятность принадлежности к заданной области контроля определяется суммированием всех значений вероятности в каждой точке заданной области и сравнение ее со значением суммы вероятностей в зоне обнаружения.

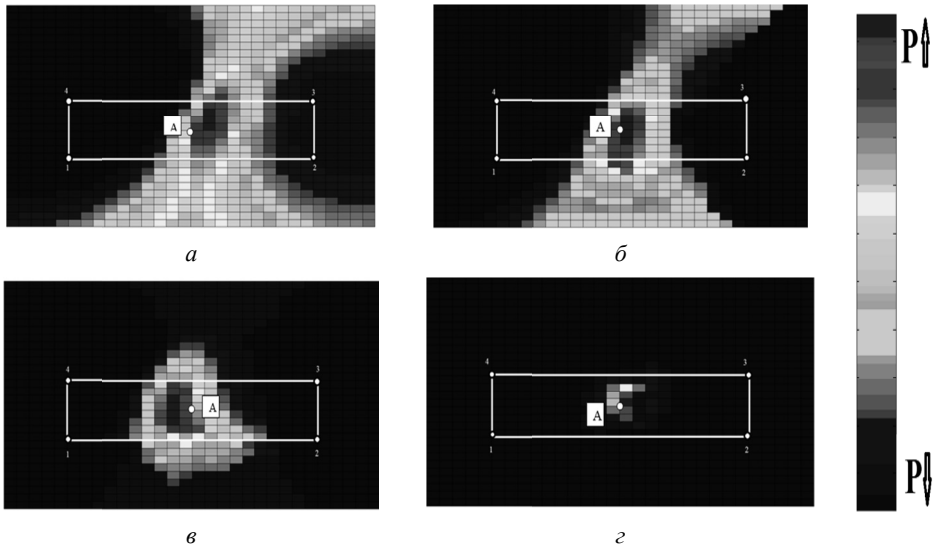


Рис. 2 – Распределение вероятности нахождения статического объекта в каждой точке зоны наблюдения при:

a – K = 4; *б* – K = 6; *в* – K = 8; *г* – K = 10

Fig. 2 – The distribution of the probability of static object location at each point of the observation zone for:

a – K = 4; b – K = 6; c – K = 8; d – K = 10

Из рис. 2 видно, что при увеличении числа шагов определение местоположения объекта сводится к небольшой области, в которой действительно находится объект. Для случая динамического объекта распределения вероятности нахождения в каждой точке зоны наблюдения имеют аналогичный характер, поэтому отдельно не приводятся.

На рис. 3 приведена зависимость вероятности ошибки принятия решения от числа шагов при фиксированном числе сейсмических датчиков $n = 5$, которые в совокупности образуют рабочую группу [1, 4]. На рис. 4 показана зависимость времени работы алгоритма от количества шагов K.

Анализируя совместно данные рис. 3 и 4, можно сделать вывод, что для получения оптимального результата необходимо выбирать значение $6 \le K \le 8$, поскольку при значениях K меньше шести частота принятия неправильных решений резко возрастает, а при значениях K больше восьми наблюдается значительное увеличение времени, затраченного алгоритмом на принятие решения, при этом вероятность ошибки существенно не меняется.

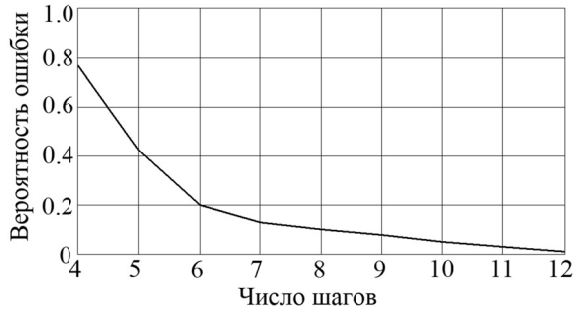


Рис. 3 – Вероятность ошибки принятия решения при воздействии объекта внутри зоны контроля

Fig. 3 – The probability of making an error when an object is exposed within the control zone

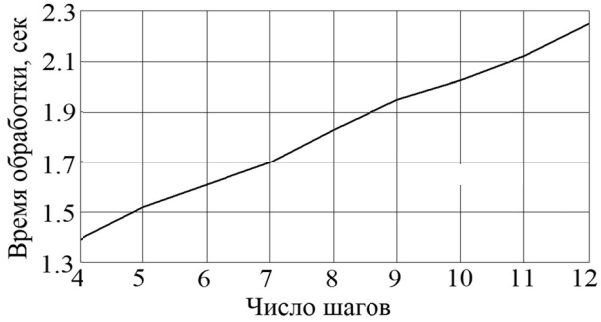


Рис. 4 – Зависимость времени принятия решения от числа анализируемых шагов

Fig. 4 – Dependence of decision-making time on the number of steps under analysis

Заключение

Данная публикация представляет собой один из подходов, дающих возможность решения задачи при анализе сейсмической обстановки в реальном масштабе времени. Полученные результаты показывают, что алгоритм обнаружения объекта

в заданной области на основе энергетических статистик сигналов при достаточно простой практической реализации удовлетворяет требованиям, предъявляемым к подобным системам.

ЛИТЕРАТУРА

1. Задачи и методы обработки сигналов в сейсмических системах наблюдения / К.Д. Гребенщиков, В.В. Коробов, А.Л. Мархакшинов, М.А. Райфельд, Д.О. Соколова, А.А. Спектор, Е.А. Тонконогов, С.Г. Филатова // Материалы X Международной конференции «Актуальные проблемы электронного приборостроения»: АПЭП-2010, 22–24 сентября 2010 г.: в 7 т. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2010. – Т. 4. – С. 46–49.
2. **Филатова С.Г.** Точность оценки параметров движения неподготовленного нарушителя в сейсмической системе охраны // Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации. – 2015. – № 4 (29). – С. 128–138. – doi: 10.17212/1727-2769-2015-4-128-138.
3. **Филатова С.Г.** Оценка длительностей импульсов в сейсмическом сигнале от шагов человека // Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации. – 2015. – № 2 (27). – С. 128–136. – doi: 10.17212/1727-2769-2015-2-128-136.
4. **Соколова Д.О., Спектор А.А.** Непараметрическое обнаружение сейсмоактивных объектов с импульсным воздействием на грунт // Вопросы радиоэлектроники. Серия: Радиолокационная техника (РЛТ). – 2014. – № 2. – С. 164–173.
5. **Спектор А.А., Филатова С.Г.** Оценка временного положения импульсов в сейсмических системах наблюдения на основе марковской фильтрации // Автометрия. – 2008. – Т. 44, № 4. – С. 68–74.
6. **Райфельд М.А., Спектор А.А.** Обнаружение сигналов движущегося человека в сейсмической системе наблюдения // Автометрия. – 2005. – Т. 41, № 6. – С. 88–97.
7. **Спектор А.А., Морозов Ю.В.** Оценка параметров движения автомобиля в пассивной сейсмической локации // Вопросы радиоэлектроники. – 2017. – № 4. – С. 99–101.
8. **Спектор А.А., Ларионова С.М.** Сейсмическое обнаружение объектов в выделенной части зоны действия на основе энергетических характеристик сигналов // Вопросы радиоэлектроники. – 2016. – № 4. – С. 105–108.
9. Краткая характеристика сейсмической системы охраны с цифровой обработкой сигналов / Д.О. Соколова, К.Д. Гребенщиков, М.А. Райфельд, А.А. Спектор, Е.А. Тонконогов // Электронные средства и системы управления. – 2007. – № 1. – С. 274–277.

ANALYSIS OF THE OBJECT LOCATION IN THE SPECIFIED AREA IN SEISMIC GUARD SYSTEMS

Zima D.N., Sokolova D.Ol., Spector A.A.
Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia

One of the promising means of protecting long-range perimeters are passive location systems. These systems are based on recording a seismic signal of the offender. The main advantages of these systems are a passive operating principle and a high rate of masking. For an unprepared intruder, they make it impossible to detect an exact location of the installation and, therefore, prevent its insensible penetration into the protected area. Among the tasks tackled by such systems of great importance is the task of selective detection of an object in a certain part of the detection (control) zone. One of the basic requirements for the algorithms that solves this problem is to work in real time with a minimum delay. The proposed algorithm is based on the methods of statistical analysis of signals from seismic systems. The obtained research results show a fairly simple practical implementation and compliance with the requirements for such systems.

Keywords: seismic security systems, object detection, control area, detection area, the environment's energy parameter, posteriori probability.

DOI: 10.17212/1727-2769-2018-2-52-61

REFERENCES

1. Grebenshchikov K.D., Korobov V.V., Markhakshinov A.L., Raifel'd M.A., Sokolova D.O., Spektor A.A., Tonkonogov E.A., Filatova S.G. [Problems and methods of signal processing in seismic surveillance systems]. *Materialy X Mezhdunarodnoi konferentsii Aktual'nye problemy elektronnogo priborostroeniya, APEP-2010*. V 7 t. [Proceedings of 10th International Scientific-Technical Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering (APEIE-2010). In 7 vol.], Novosibirsk, 22–24 September 2010, vol. 4, pp. 46–49. (In Russian).
2. Filatova S.G. Tochnost' otsenki parametrov dvizheniya nepodgotovlennogo narushitelya v seismicheskoi sisteme okhrany [The precision of the estimation of trespasser movement parameters in the seismic guard system]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii – Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2015, no. 4 (29), pp. 128–138. doi: 10.17212/1727-2769-2015-4-128-138.
3. Filatova S.G. Otsenka dlitel'nostei impul'sov v seismicheskom signale ot shagov cheloveka [Pulse length estimation of seismic signal of human steps]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii – Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2015, no. 2 (27), pp. 128–136. doi: 10.17212/1727-2769-2015-2-128-136.
4. Sokolova D.O., Spektor A.A. Neparametricheskoe obnaruzhenie seismoaktivnykh ob"ektov s impul'snym vozdeistviem na grunt [Non-parametric detection of seismic objects with pulse influence on soil]. *Voprosy radioelektroniki. Seriya: Radiolokatsionnaya tekhnika (RLT) – Questions of radio electronics. Radar engineering*, 2014, no. 2, pp. 164–173.
5. Spector A.A., Filatova S.G. Estimating the time position of pulses in seismic observation systems based on Markovian filtering. *Avtometriya – Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*, 2008, vol. 44, iss. 4, pp. 337–341. doi: 10.3103/S8756699008040080. Translated from *Avtometriya*, 2008, vol. 44, no. 4, pp. 68–74.
6. Raifel'd M.A., Spektor A.A. Obnaruzhenie signalov dvizhushchegosya cheloveka v seismicheskoi sisteme nablyudeniya [Detection of signals of a moving person in a seismic surveillance system]. *Avtometriya – Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*, 2005, vol. 41, no. 6, pp. 88–97. (In Russian).
7. Spektor A.A., Morozov Yu.V. Otsenka parametrov dvizheniya avtomobilya v passivnoi seismicheskoi lokatsii [Estimation of the vehicle motion parameters in the passive seismic location]. *Voprosy radioelektroniki – Questions of radio electronics*, 2017, no. 4, pp. 99–101.
8. Spektor A.A., Larionova S.M. Seismicheskoe obnaruzhenie ob"ektov v vydelennoi chasti zony deistviya na osnove energeticheskikh kharakteristik signalov [Seismic detection of objects in the selected part of the coverage zone based on the energy characteristics of the signals]. *Voprosy radioelektroniki – Questions of radio electronics*, 2016, no. 4, pp. 105–108.
9. Sokolova D.O., Grebenshchikov K.D., Raifel'd M.A., Spektor A.A., Tonkonogov E.A. Kratkaya kharakteristika seismicheskoi sistemy okhrany s tsifrovoi obrabotkoi signalov [Brief description of the seismic system of protection by digital signal processing]. *Elektronnye sredstva i sistemy upravleniya – Electronic Devices and Control Systems*, 2007, no. 1, pp. 274–277.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Зима Дарья Николаевна – родилась в 1994 году, аспирант кафедры теоретических основ радиотехники Новосибирского государственного технического университета. Область научных интересов: статистическая обработка сигналов. Опубликовано 5 научных работ. (Адрес: 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20. E-mail: d.zima@corp.nstu.ru).

Zima Daria Nikolaevna (b. 1994) – a postgraduate student at the department of radio engineering fundamentals in the Novosibirsk State Technical University. Her research interests are currently focused on statistical signal processing. She is the author of 5 scientific papers. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: d.zima@corp.nstu.ru).

Соколова Дарья Олеговна – родилась в 1984 году, канд. техн. наук, доцент кафедры теоретических основ радиотехники Новосибирского государственного технического университета. Область научных интересов: статистическая обработка сигналов. Опубликовано 30 научных работ. (Адрес: 630073, России, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20. E-mail: d.sokolova@corp.nstu.ru).

Sokolova Darya Olegovna (b. 1984) – Candidate of Sciences (Eng.), associate professor at the department of radio engineering fundamentals in the Novosibirsk State Technical University. Her research interests are currently focused on statistical signal processing. She is the author of 30 scientific papers. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: d.sokolova@corp.nstu.ru).

Спектор Александр Аншелевич – д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой теоретических основ радиотехники Новосибирского государственного технического университета. Область научных интересов: локационные, навигационные и инфокоммуникационные технологии, цифровые статистические методы обработки сигналов и изображений. Опубликовано около 200 научных работ. (Адрес: 630073, Россия, Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20. E-mail: spectoraa@mail.ru).

Spector Alexander Anshelevich – Doctor of Sciences (Eng.), professor, head of the department of radio engineering fundamentals in the Novosibirsk State Technical University. His research interests are currently focused on location, navigation, and information communication technologies, digital statistical methods of signal and image processing. He is the author of about 200 scientific papers (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russian Federation. E-mail: spectoraa@mail.ru).

Статья поступила 10 мая 2018 г.
Received May 10, 2018

To Reference:

Zima D.N., Sokolova D.O., Spector A.A. Analiz nakhozhdeniya ob"ekta v zadannoi oblasti v seismicheskikh sistemakh okhrany [Analysis of the object location in the specified area in seismic guard systems]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii – Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2018, no. 2 (39), pp. 52–61. doi: 10.17212/1727-2769-2018-2-52-61.

ДОКЛАДЫ АН ВШ РФ
2018 апрель–июнь № 2 (39)

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

УДК 621.3

МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЖИМА ИМПУЛЬСНОГО РАЗРЯДА ЛИТИЙ-ИОННОГО АККУМУЛЯТОРА

С.В. Кучак
Новосибирский государственный технический университет

Для разработки устройств силовой электроники, функционирующих в системах накопления электрической энергии, необходимо знать свойства и поведение применяемого накопительного элемента. Наиболее применяемым типом накопителей являются электрохимические накопители – аккумуляторные батареи. В данном ряду перспективностью выделяются литий-ионные аккумуляторы. В статье рассматриваются временные диаграммы напряжения $LiFePO_4$ аккумуляторов, отражающих реакцию на импульсы тока разряда. В результате анализа зависимостей получены параметры схемы замещения аккумулятора, представляющей последовательное соединение источника напряжения, внутреннего сопротивления и двух резистивно-емкостных звеньев. Установлено, что величина внутреннего сопротивления и параметры RC-звена с меньшей постоянной времени практически не зависят от силы разрядного тока. В свою очередь, более инерционное звено обладает варьирующимися значениями сопротивления и емкости. На основе полученных результатов сформирована модель аккумулятора в режиме импульсного разряда. Результаты моделирования с допустимой погрешностью соответствуют экспериментальным зависимостям реального аккумулятора, что подтверждает достоверность проведенных расчетов.

Ключевые слова: импульсный разряд, литий-железо-фосфат, литий-ионный аккумулятор, моделирование, разрядные характеристики.

DOI: 10.17212/1727-2769-2018-2-62-69

Введение

В последние годы многие разработчики устройств в сфере энергетики нацелены на конструирование систем накопления энергии (СНЭ) [1–3]. За исключением преобразователя, основной частью СНЭ являются накопительные устройства, такие как суперконденсаторы, маховики, топливные элементы и т.д. Наиболее широкое применение получили электрохимические накопители энергии – аккумуляторные батареи.

Среди большого количества типов аккумуляторов свинцово-кислотные и литий-ионные батареи являются наиболее применяемыми. В настоящее время, будучи наиболее изученными, свинцово-кислотные аккумуляторы остаются классическим решением для большинства приложений. Но поскольку специалисты постоянно улучшают литий-ионную технологию, тем самым уменьшая массу и стоимость батарей, в будущем литий-ионные аккумуляторы (далее – ЛИА) могут существенно потеснить свинцово-кислотные батареи на рынке энергетики.

Для увеличения срока эксплуатации батареи, включенной в состав системы накопления энергии, необходимо знать ее свойства и поведение в основных режимах эксплуатации. Целью данной работы является исследование характеристик литий-ионного аккумулятора в режиме импульсного разряда.

Рассматриваемые литий-ионные аккумуляторы содержат в качестве катодного материала литий-железо-фосфат ($LiFePO_4$). Наноструктурированный графит используется в качестве анодного материала. Номинальные характеристики $LiFePO_4$ аккумуляторов производства Лиотех представлены в таблице [4].

© 2018 С.В. Кучак

Рекомендованные режимы эксплуатации аккумуляторов типа $LiFePO_4$
Recommended $LiFePO_4$ accumulators operating modes

Параметр / Parameter	**Значение / Value**
Номинальное напряжение, В / Nominal voltage, V	3.2
Предельное напряжение заряда, В / Limiting charge voltage, V	3.7
Предельное напряжение разряда, В / Limiting discharge voltage, V	2.5
Удельная энергоемкость, Вт·ч/кг / Storage density, W·h/kg	80.5 – 93.0
Максимальный непрерывный ток заряда/разряда / Maximum continuous charge/discharge current	$3C^*$
Предельные температуры заряда, °С / Limiting charge temperatures, °С	от 0 до +30 / from 0 to +30
Предельные температуры разряда, °С / Limiting discharge temperatures, °С	от –30 до +50 / from –30 to +50
Количество циклов** / Number of cycles**	3000

* C – сила тока, численно равная номинальной емкости аккумулятора Сн.
** При глубине разрядки до 80 %.

Одна из наиболее зарекомендовавших себя схем замещения аккумуляторного элемента [5–7] представлена на рис. 1, где U_{ocv} – напряжение разомкнутой цепи (НРЦ); R_{int} – внутреннее омическое сопротивление; C_{PA}, R_{PA} – емкость и сопротивление активационной поляризации, соответственно; C_{PC}, R_{PC} – емкость и сопротивление концентрационной поляризации соответственно; U_T – напряжение на выводах батареи.

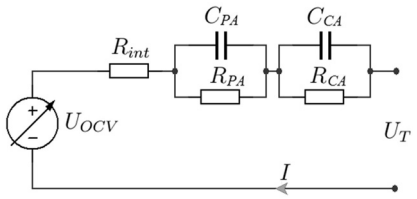


Рис. 1 – Схема замещения аккумулятора
Fig. 1 – Equivalent circuit of accumulator

Параметры активационной поляризации отражают процессы перетекания носителей заряда между электродами и имеют существенное влияние в процессах импульсного характера (десятки – сотни миллисекунд). В свою очередь, параметры концентрационной поляризации относятся к изменению концентрации носителей в приэлектродном слое вещества электролита и соответствуют более длительным процессам.

1. Экспериментальные результаты

1.1. Методика испытания

Целью исследования является получение характеристик $LiFePO_4$ аккумуляторов при импульсном разряде различными токами. Для испытаний были отобраны по три аккумулятора с номинальной емкостью 380 А·ч. Разброс по величине разрядной емкости менее 0,05C, где C – номинальная емкость аккумуляторов.

Перед разрядом аккумуляторы были заряжены двухстадийным методом, рекомендованным производителем. Первая стадия – заряд постоянным током 0,2C до напряжения 3,7 В. На второй стадии заряд постоянным напряжением проводился до снижения тока до 0,02C. После заряда выдерживалась 30-минутная пауза.

В ходе исследования, при нормальных климатических условиях аккумуляторы подвергались импульсному разряду током с амплитудой 0,2C, 1,0C 1,5C и 2,5C, отражающих практически весь диапазон характерных для ЛИА разрядных токов.

Ограничение на уровне 2,5*C* вызвано предельным током испытательной установки (до 1000 А). Длительность каждого импульса составляла 8 с, что отражает существенную часть переходного процесса.

1.2. Внутреннее сопротивление

На рис. 2 представлены типовые временные диаграммы напряжения разрядного импульса аккумулятора емкостью 380 А·ч, представляющие собой усредненные данные по исследуемым аккумуляторам. Начальное значение напряжения равнялось 3,36 В. Как можно увидеть из диаграммы, основная часть падения напряжения происходит мгновенно в начале переходного процесса, что говорит о чисто активном характере падения напряжения. Далее происходит плавное, близкое к экспоненциальному, снижение напряжения. Исходя из формы напряжения, можно определить величину R_{int} как отношение разности падения напряжения в момент скачка для различных токов к разности этих токов:

$$R_{int}\big|_{380\text{A·h}} = \frac{\Delta U_{2,5C} - \Delta U_{0,2C}}{2,5C - 0,2C} = \frac{U_{0,2C}\big|_{t=0} - U_{2,5C}\big|_{t=0}}{2,5C - 0,2C} = \frac{3,338 - 3,06}{950 - 76} = 0,3181 \text{ мОм}.$$

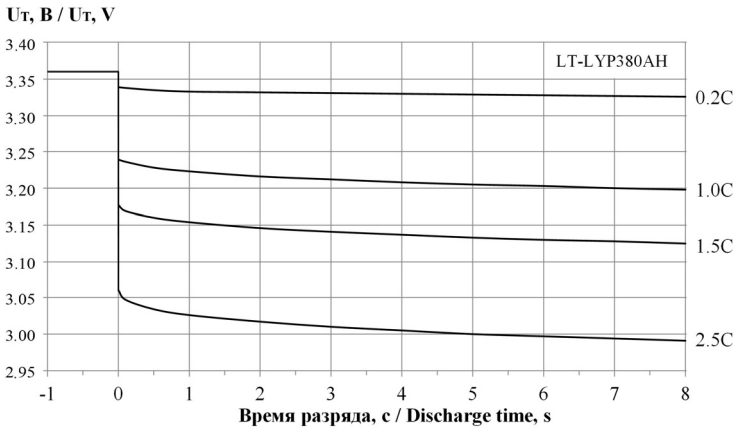


Рис. 2 – Временные диаграммы напряжения аккумулятора
Fig. 2 – Time diagrams of accumulator voltage

1.3. Параметры поляризации

Для анализа параметров поляризации рассмотрим зависимость для тока разряда 2,5*C*. Как можно увидеть, больше половины спада напряжения происходит за первые две секунды переходного процесса. На основании рис. 1 переходный процесс является суммой двух экспонент и может быть описан следующим выражением:

$$U(t) = U_0 - \Delta U_{int} - \Delta U_{PA}\left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_{PA}}}\right) - \Delta U_{PC}\left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_{PC}}}\right),$$

где U_0 – напряжение до подачи импульса (НРЦ); $\Delta U_{int} = IR_{int}$ – падение напряжения на внутреннем сопротивлении; $\Delta U_{PA} = IR_{PA}$ и $\Delta U_{PC} = IR_{PC}$ – падение напряжения на звене активационной и концентрационной поляризации соответ-

ственно; $\tau_{PA} = R_{PA}C_{PA}$ и $\tau_{PC} = R_{PC}C_{PC}$ – постоянные времени звена активационной и концентрационной поляризации соответственно.

При известных U_0, ΔU_{int} и значении результирующего напряжения в моменты времени t_1 = 0,5, 1, 4, 8 с была решена система уравнений относительно τ_{PA}, U_{PA} и U_{PC}. Было получено, что постоянная времени процессов активационной поляризации τ_{PA} слабо зависит от протекающего тока и составляет в среднем 0,294 с. При этом, учитывая величину падения напряжения, было получено, что сопротивление R_{PA} имеет значение 26,14 мкОм ± 6 % для режимов 1,0*C*, 1,5*C* и 2,5*C*.

На основании полученного значения R_{PA} и постоянной времени τ_{PA} получим величину емкости C_{PA}:

$$C_{PA} = \frac{\tau_{PA}}{R_{PA}} = \frac{0,294}{26,14 \cdot 10^{-6}} = 11,25 \text{ кФ}.$$

Также, из решения системы уравнений было получено, что постоянная времени звена концентрационной поляризации τ_{PC} практически не зависит от протекающего тока и составила 5,35 с ± 6,5 %. При этом разброс по величине сопротивления R_{PC} и емкости C_{PC} данного звена составил ±29 %. На рис. 3 представлены зависимости данных параметров от силы тока разряда. На диаграмме расчетные значения R_{PC} и C_{PC} для соответствующих режимов изображены в виде маркеров. Сплошными линиями представлена аппроксимация результатов.

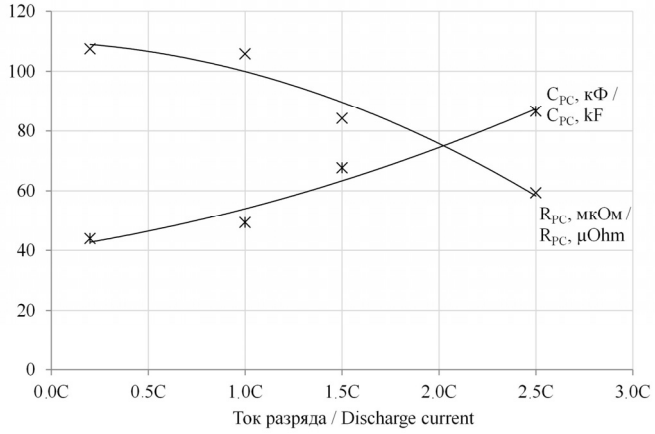


Рис. 3 – Зависимости параметров схемы замещения для концентрационной поляризации от силы тока разряда

Fig. 3 – Dependences of concentration polarization equivalent scheme on discharge current

2. Моделирование импульсных разрядов

Для подтверждения актуальности полученных параметров схемы замещения для импульсных разрядов было проведено имитационное моделирование электротехнических процессов.

Модель, сформированная в среде схемотехнического моделирования PSIM, представлена на рис. 4. Величина напряжения разомкнутой цепи U_{ocv} установлена на уровне 3,36 В, что соответствует состоянию полного заряда аккумулятора.

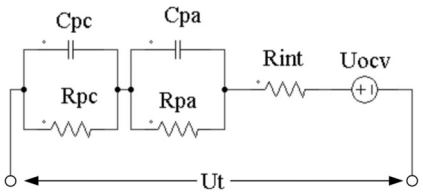


Рис. 4 – Имитационная модель аккумулятора

Fig. 4 – Accumulator simulation model

Параметры R_{int}, R_{PA}, C_{PA} соответствуют результатам пп. 1.2–1.3. Значения R_{PC} и C_{PC} устанавливаются предварительно в соответствии с рис. 3.

На рис. 5 представлены совмещенные диаграммы экспериментальных данных (маркеры) и результатов моделирования (сплошные линии) для токов 0,2C, 1C, 1,5C и 2,5C соответственно.

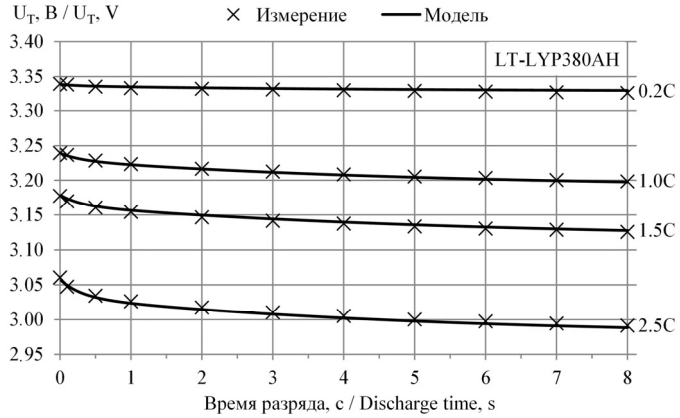


Рис. 5 – Совмещенная временная диаграмма результатов измерения и моделирования

Fig. 5 – Combined time diagram of measurement and simulation

Как можно увидеть, результаты моделирования с минимальной погрешностью соответствуют результатам реального эксперимента, что подтверждает правильность проведенных расчетов. Недостатком же данной реализации является отсутствие универсальности модели, поскольку для каждой силы тока необходимо предварительно устанавливать конкретные значения R_{PC} и C_{PC}.

2.1. Модель с обратной связью по току

Для получения модели, не требующей предустановки параметров R_{PC} и C_{PC}, зависимости данных параметров от силы тока разряда (см. рис. 3) были усреднены полиномами второй степени. В результате получены следующие выражения:

$$R_{PC}(I_{\text{разр}}) = A_R I_{\text{разр}}^2 + B_R I_{\text{раз}} + C_R;$$

$$C_{PC}(I_{\text{разр}}) = A_C I_{\text{разр}}^2 + B_C I_{\text{раз}} + C_C,$$

где $A_R = -49{,}5 \cdot 10^{-12}$, $B_R = -7{,}17 \cdot 10^{-9}$, $C_R = 110 \cdot 10^{-6}$, $A_C = 24{,}7 \cdot 10^{-3}$, $B_C = 25{,}8$, $C_C = 40{,}6 \cdot 10^{3}$.

Данные выражения дают погрешность не более 10 % относительно рассчитанных ранее значений, что говорит о достаточной точности описания характеристик. На основе значений, полученных в п. 2, и представленных выше соотношений сформирована математическая модель ЛИА, изображение которой представлено на рис. 6. В данной модели аккумулятор представлен в виде регулируемого источника напряжения U_T, система управления которого представляет собой математическое описание работы ЛИА при импульсном разряде.

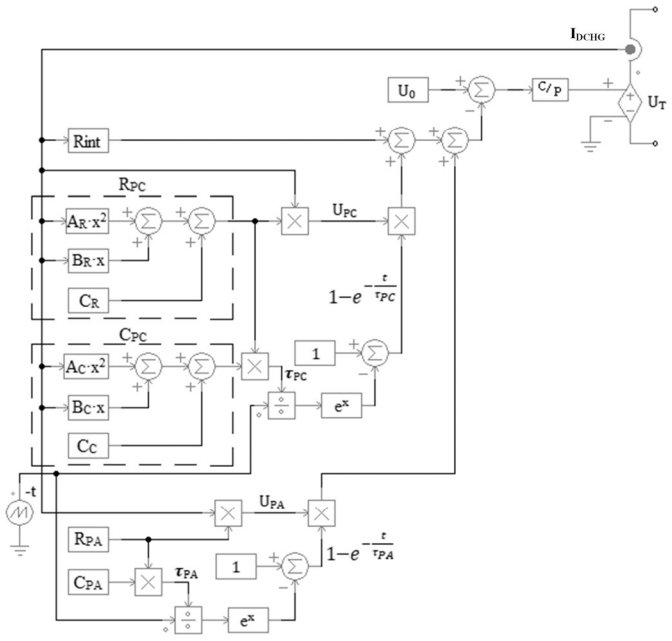


Рис. 6 – Имитационная модель ЛИА с обратной связью по току

Fig. 6 – Accumulator simulation model with current feedback

Временные диаграммы, полученные при помощи данной модели, совмещенные с зависимостями реального ЛИА, представлены на рис. 7. Из диаграммы видно, что усреднение зависимостей R_{PC} и C_{PC} не привело к ухудшению численных показателей, отражающих переходный процесс импульсного разряда ЛИА. Данная модель лишена недостатка, присущего ранее рассмотренной. В данном случае значения R_{PC} и C_{PC} не требуют предустановки, что позволяет производить моделирование режимов работы на всем диапазоне токов разряда.

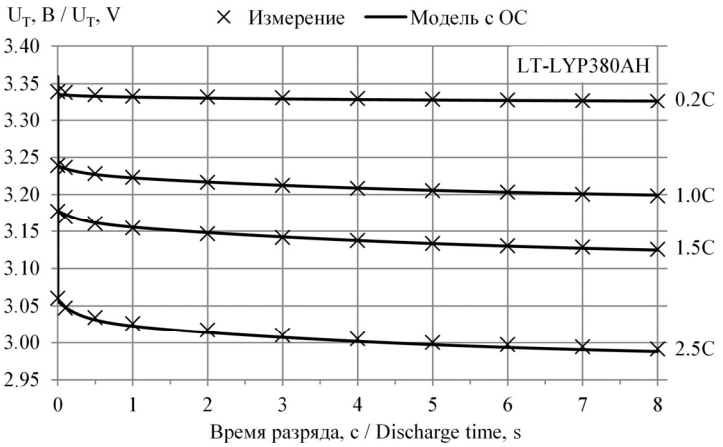


Рис. 7 – Совмещенная временная диаграмма результатов измерения и моделирования с обратной связью по току

Fig. 7 – Combined time diagram of measurement and simulation with current feedback

Заключение

В работе рассмотрены временные диаграммы для литий-ионного аккумулятора с катодным материалом типа $LiFePO_4$ емкостью 380 А·ч при импульсном разряде токами 0,2*C*, 1,0*C*, 1,5*C* и 2,5*C*. В результате анализа диаграмм было получено:

– изменение напряжения аккумулятора при импульсном разряде может быть описано суммой двух экспонент и постоянной составляющей;

– величина постоянной составляющей зависит от внутреннего сопротивления;

– величина внутреннего сопротивления и параметры звена активационной поляризации, а также постоянная времени звена концентрационной поляризации не зависят от силы разрядного тока;

– величина сопротивления и емкости звена концентрационной поляризации имеют зависимость от силы разрядного тока в виде полинома второй степени.

На основании полученных параметров построена модель аккумулятора, характеристики которой с минимальной погрешностью соответствуют зависимостям, полученным при разряде реального аккумулятора.

ЛИТЕРАТУРА

1. Optimal sizing of a lithium battery energy storage system for grid-connected photovoltaic systems / J. Dulout, B. Jammes, C. Alonso, A. Anvari-Moghaddam, A. Luna, J.M. Guerrero // 2017 IEEE Second International Conference on DC Microgrids (ICDCM). – Nürnberg, Germany, 2017. – P. 582–587.
2. Model predictive control for distributed microgrid battery energy storage systems / T. Morstyn, B. Hredzak, R.P. Aguilera, V.G. Agelidis // IEEE Transactions on Control Systems Technology. – 2018. – Vol. 26, iss. 3. – P. 1107–1114.
3. **Dybko M.A., Brovanov S.V.** Hybrid multilevel modular converter for energy storage applications // 17th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices EDM 2016: Conference Proceedings. – Erlagol, Altai, Russia, 2016. – P. 441–447.
4. ООО «Лиотех». Литий-ионные аккумуляторы [Электронный ресурс]. – Новосибирск, 2018. – URL: http://liotech.ru/newsection7159 (дата обращения: 06.06.2018).
5. **Safwat I.M., Li W., Wu X.** A novel methodology for estimating state-of-charge of Li-Ion batteries using advanced parameters estimation // Energies. – 2017. – Vol. 10 (11). – P. 1751.
6. **Rahmoun A., Biechl H.** Modelling of Li-Ion batteries using equivalent circuit diagrams // Przeglad Elektrotechniczny. – 2012. – Vol. 88. – P. 152–156.
7. **He H., Xiong R., Fan J.** Evaluation of lithium-ion battery equivalent circuit models for state of charge estimation by an experimental approach // Energies. – 2011. – Vol. 4, N 4. – P. 582–598.

SIMULATION OF THE LITHIUM-ION ACCUMULLATOR PULSE DISCHARGE MODE

Kuchak S.V.
Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia

To develop power electronic devices working in energy storage systems, it is necessary to know the properties and behavior of the used storage element. Electro-chemical storages referred to as accumulator batteries are the most spread type of storage devices. Lithium-ion batteries are most promising among them. Time diagrams of $LiFePO_4$ accumulator voltages which reflect responses to discharge current pulses are presented in the paper. By analyzing the diagrams parameters of the accumulator equivalent scheme are obtained. The accumulator equivalent circuit consists of the series connection of a voltage source, an internal resistance and two resistive-

capacitive units. It is found, that values of the internal resistance and the RC-unit parameters with a lower time constant are practically independent of the discharge current. At same time, a more inertial RC-unit has varying values of resistance and capacitance. Using the obtained results, a pulsed discharge accumulator model is built. The simulation results with a permissible error correspond to the experimental results of an actual accumulator, which confirms the reliability of the calculations.

Keywords: pulse discharge, lithium-iron-phosphate, lithium-ion battery, simulation, discharge characteristics.

DOI: 10.17212/1727-2769-2018-2-62-69

REFERENCES

1. Dulout J., Jammes B., Alonso C., Anvari-Moghaddam A., Luna A., Guerrero J.M. Optimal sizing of a lithium battery energy storage system for grid-connected photovoltaic systems. *2017 IEEE Second International Conference on DC Microgrids (ICDCM)*, Nürnberg, Germany, 2017, pp. 582–587.
2. Morstyn T., Hredzak B., Aguilera R.P., Agelidis V.G. Model predictive control for distributed microgrid battery energy storage systems. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2018, Vol. 26, iss. 3, pp. 1107–1114.
3. Dybko M.A., Brovanov S.V. Hybrid multilevel modular converter for energy storage applications. *17th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices EDM 2016*: Conference Proceedings, Erlagol, Altai, Russia, 2016, pp. 441–447.
4. *OOO "Liotekh". Litii-ionnye akkumulyatory* [Liotech, Ltd. Lithium-ion batteries]. Novosibisk, 2018. Available at: http://liotech.ru/newsection7159 (accessed 06.06.2018).
5. Safwat I.M., Li W., Wu X. A novel methodology for estimating state-of-charge of Li-Ion batteries using advanced parameters estimation. *Energies*, 2017, vol. 10 (11), p. 1751.
6. Rahmoun A., Biechl H. Modelling of Li-Ion batteries using equivalent circuit diagrams. *Przeglad Elektrotechniczny*, 2012, vol. 88, pp. 152–156.
7. He H., Xiong R., Fan J. Evaluation of lithium-ion battery equivalent circuit models for state of charge estimation by an experimental approach. *Energies*, 2011, vol. 4, no. 4, pp. 582–598.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Кучак Сергей Викторович – родился в 1991 году, аспирант, ассистент, кафедра электроники и электротехники НГТУ. Область научных интересов: системы автономного электроснабжения. Опубликовано более 10 научных работ. (Адрес: 630073, Россия, Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20. E-mail: kuchak.2012@corp.nstu.ru).

Kuchak Sergey Viktorovich (b. 1991) – postgraduate student, assistant lecturer at the electronics and electrical engineering department, NSTU. His research interests are currently focused on autonomous power supply systems. He has published 10 scientific papers. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: kuchak.2012@corp.nstu.ru).

Статья поступила 22 декабря 2017 г.
Received December 22, 2017

To Reference:

Kuchak S.V. Modelirovanie rezhima impul'snogo razryada litii-ionnogo akkumulyatora [Simulation of the lithium-ion accumullator pulse discharge mode]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii – Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2018, no. 2 (39), pp. 62–69. doi: 10.17212/1727-2769-2018-2-62-69.

ДОКЛАДЫ АН ВШ РФ
2018 апрель–июнь № 2 (39)

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

УДК 621.313.282.2

РАБОЧИЙ ЦИКЛ ДВУХКАТУШЕЧНОЙ СИНХРОННОЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ МАШИНЫ СО СВОБОДНЫМ ВЫБЕГОМ БОЙКА В КАТУШКЕ ПРЯМОГО ХОДА

Л.А. Нейман, В.Ю. Нейман
Новосибирский государственный технический университет

Механизмы и устройства, использующие импульсный электромагнитный привод возвратно-поступательного движения, широко используются в промышленности для обеспечения многих технологических процессов при пластической деформации и разрушении материалов. Учитывая современные требования в вопросах энергосбережения, особый интерес представляют низкочастотные синхронные электромагнитные машины ударного действия, для которых частота ударных импульсов сил равна или кратна частоте питающего однофазного источника. Актуальность проводимых исследований обусловлена необходимостью улучшения электромагнитной совместимости работы электропривода при питании от промышленного однофазного источника электроэнергии, что в первую очередь связано с изучением механизма процесса электромеханического преобразования энергии за время рабочего цикла машины. В качестве объекта исследований рассматривается вариант двухкатушечной синхронной электромагнитной машины со свободным выбегом бойка в катушке прямого хода, получающей питание от однофазного источника напряжения частотой 50 Гц. На основе баланса энергий электромеханической системы рассмотрен процесс энергопреобразования за полный рабочий цикл, учитывающий взаимодействие между всеми элементами конструкции ударного узла при ускорении ударной массы бойка в магнитном поле, создаваемом системой из двух катушек. Реализация рабочего цикла в двухкатушечной синхронной электромагнитной машине со свободным выбегом бойка, в сравнении с известным рабочим циклом, позволяет обеспечить снижение амплитуды тока и уменьшение влияния работы импульсной электромагнитной машины на питающую сеть. Применение рабочего цикла машины улучшает электромагнитную совместимость при питании от однофазного промышленного источника электроэнергии. Улучшение достигается за счет подачи на катушки трех полуволн напряжения в течение времени рабочего цикла.

Ключевые слова: синхронная электромагнитная машина, ударный узел, электропривод, энергия удара, рабочий цикл машины, электромагнитная совместимость, баланс энергии электромеханической системы.

DOI: 10.17212/1727-2769-2018-2-70-81

Введение

Механизмы и устройства, использующие импульсный электромагнитный привод возвратно-поступательного движения, широко используются в промышленности для обеспечения технологических процессов и производств при пластической деформации и разрушении материалов ударом [1–5]. Также широкое применение получил электромагнитный привод в вибрационных и виброударных машинах и устройствах различного технологического назначения [6–11].

Методы расчета механизмов и устройств с электромагнитным приводом постоянно развиваются и совершенствуются [12–21].

При разработке новых виброударных технологий различного назначения практическое применение получили синхронные электромагнитные машины ударного действия (СЭМУД), в которых синхронная частота механических колебаний ударной массы бойка равна или кратна частоте питающей сети [22–25].

© 2018 Л.А. Нейман, В.Ю. Нейман

Анализ результатов теоретических и экспериментальных исследований показывает, что применение синхронных электромагнитным машин в некоторых случаях обеспечивает не только экономические выгоды (они просты в устройстве, обладают высокой надежностью и большим рабочим ресурсом, имеют малые габариты и массу), но и обладают возможностью снижения энергопотребления при работе в резонансных и околорезонансных режимах [22].

Тенденция преимущественного применения вариантов схем электромагнитных машин ударного действия подробно рассмотрена в [26, 27].

Среди вариантов схем известность получили двухкатушечные синхронные электромагнитные машины, реализующие рабочий цикл со свободным выбегом бока в катушке прямого хода [28].

Несмотря на то что данный вариант схемы электромагнитной машины давно известен, практического применения он не получил. Прежде всего это связано с недостаточной изученностью рабочих процессов двухкатушечных электромагнитных машин со свободным выбегом бойка, а также вопросов электромеханического преобразования энергии.

Целью настоящей работы является анализ процессов энергопреобразования в двухкатушечной синхронной электромагнитной машине со свободным выбегом бойка в катушке прямого хода.

1. Ударный узел двухкатушечной СЭМУД со свободным выбегом бойка в катушке прямого хода

Один из возможных вариантов исполнения электромагнитного ударного узла, объединяющего элементы магнитной и механической подсистемы, двухкатушечной синхронной электромагнитной машины со свободным выбегом бойка в катушке прямого хода, приведен на рис. 1.

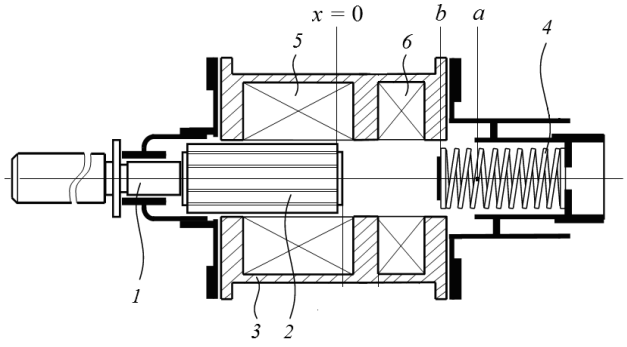


Рис. 1 – Вариант исполнения двухкатушечной СЭМУД со свободным выбегом бойка в катушке прямого хода

Fig. 1 – A version of the two-inductor SESM with a free head running-out in the driving stroke inductor

В соответствии с реализованным способом управления на рис. 2 приведен рабочий цикл СЭМУД в виде диаграммы перемещения бойка x, напряжения $u_{\text{рх}}$, $u_{\text{ох}}$ и тока $i_{\text{рх}}$, $i_{\text{ох}}$ катушек прямого (рабочего) и обратного хода, получающих питание от полуволн напряжения переменного однофазного источника промышленной частоты согласно с заданным алгоритмом управления.

Ударный узел (рис. 1) содержит: рабочий инструмент *1*; ударную массу – боек *2*; магнитопровод *3*; выполненное в виде упругого звена (пружины) ревер-

сирующее устройство *4*; размещенные внутри магнитопровода *3* катушки прямого *5* и обратного *6* хода. Наличие упругого звена *4* обеспечивает гарантированную остановку бойка *2* и его ускорение при движении в направлении рабочего инструмента.

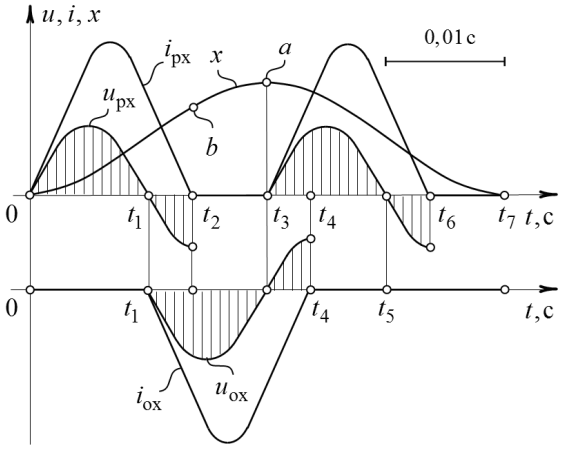


Рис. 2 – Рабочий цикл двухкатушечной СЭМУД со свободным выбегом бойка в катушке прямого хода

Fig. 2 – The operating cycle of the two-inductor SEMSA with a free running-out in the working stroke inductor

Для реализации рабочего цикла со свободным выбегом бойка применяется система из двух катушек [25, 29]. Катушка прямого хода обеспечивает разгон ударной массы бойка в двух направлениях, а катушка обратного хода – только в одном направлении.

Свободный выбег бойка осуществляется за счет создания паузы в подаче импульсов напряжения на катушку прямого хода. Боек приобретает необходимую кинетическую энергию за счет подачи трех электрических импульсов напряжения за время рабочего цикла, равного по длительности двум периодам напряжения источника электроэнергии.

Работа ударного узла осуществляется в следующем порядке. При подаче импульса напряжения на катушку *5* прямого хода боек *2* под действием электромагнитных сил разворачивающегося магнитного поля катушки *5* прямого хода разгоняется в направлении упругого звена *4*. При выходе бойка *2* из положения магнитного равновесия относительно полюсной системы катушки 5 прямого хода подается импульс напряжения на катушку *6* обратного хода, под действием электромагнитных сил которой боек *2* ускоренно движется в направлении упругого звена *4* и сжимает пружину. После остановки боек *2* под действием усилия сжатой пружины выполняет реверс. Одновременно на катушку *5* прямого хода вновь подается импульс напряжения. Боек *2* под действием упругих сил сжатой пружины *4* и электромагнитных сил катушки *5* прямого хода разгоняется в направлении рабочего инструмента *1* и наносит по нему удар. Далее цикл повторяется.

Работа ударного узла осуществляется при полной синхронизации по времени работы электрической, магнитной и механической подсистем электропривода с помощью заданного алгоритма управления.

Полный рабочий цикл ударного узла при заданном способе управления будет превышать время одного периода напряжения питающего источника и при частоте

$f = 50\,\text{Гц}$ будет обеспечивать синхронную частоту ударов бойка $n_{\text{уд}} = 60 f / 2p = 2000\,\text{уд/мин}$ и длительность времени рабочего цикла $t_{\text{ц}} = 2p/f = 0,03\,\text{с}$, где $2p = 1,5$ – число периодов напряжения за время цикла.

2. Рабочий цикл СЭМУД со свободным выбегом бойка в катушке прямого хода

В соответствии с цикличностью повторяющихся процессов энергопреобразование рассмотрим только за время одного рабочего цикла на идентичных процессу интервалах времени в указанной на диаграмме рис. 2 последовательности.

Для упрощения анализа силами сопротивления движению бойка пренебрегаем. Также полагаем, что на момент времени $t = 0$ механическая система обладает определенным начальным запасом кинетической энергии, приобретенной в предыдущем цикле в результате отскока бойка от рабочего инструмента. При анализе процессов энергопреобразования используем следующие условные обозначения v – скорость движения бойка; $r_{\text{рх}}$, $r_{\text{ох}}$ – сопротивление катушек прямого и обратного хода; $f_{\text{эм.рх}}$, $f_{\text{эм.ох}}$ – электромагнитная сила созданная катушками прямого (рабочего) и обратного хода; $\Delta w_{\text{м.рх}}(x, t)$, $\Delta w_{\text{м.ох}}(x, t)$ – энергия магнитного поля катушек прямого и обратного хода; $\Delta w_{\text{эл.рх}}(x, t)$, $\Delta w_{\text{эл.ох}}(x, t)$ – электрическая энергия, генерируемая в сеть катушками прямого и обратного хода.

Первый этап энергопреобразования совместим со временем возврата бойка после нанесения удара по рабочему инструменту. Данный этап начинается с момента времени $t = 0$ (рис. 2) и совпадает со временем подачи импульса напряжения на катушку прямого хода.

На интервале $0 \ldots t_1$ после отскока бойка от рабочего инструмента его движение в направлении безынерционного упругого звена осуществляется под действием электромагнитных сил катушки прямого хода. Электрическая энергия, поступающая из сети, расходуется на изменение кинетической энергии бойка при его ускорении, компенсацию энергии тепловых потерь и приращение энергии магнитного поля катушки прямого (рабочего) хода:

$$\int_0^{t_1} \left(u_{\text{рх}} i_{\text{рх}} - i_{\text{рх}}^2 r_{\text{рх}} \right) dt = \int_{t_0}^{t_1} f_{\text{эм.рх}} v \, dt + \Delta w_{\text{м.рх}}(x, t), \tag{1}$$

где $\int_{t_0}^{t_1} f_{\text{эм.рх}} = \int_{v_0}^{v_1} mv \, dv$ – механическая работа по изменению кинетической энергии бойка за время движения.

Кинетическая энергия бойка к моменту времени t_1 (рис. 2) составит

$$\frac{mv_0^2}{2} + \int_{v_0}^{v_1} mv dv = \frac{mv_1^2}{2}, \tag{2}$$

где $\frac{mv_0^2}{2}$ – кинетическая энергия бойка при отскоке от рабочего инструмента; v_0 – начальная скорость отскока бойка.

На интервале времени $t_1 \dots t_2$ при выходе бойка из положения магнитного равновесия относительно полюсной системы катушки прямого хода процесс энергопреобразования изменится на обратный. Внешние силы движущегося бойка, обладающего запасом кинетической энергии, и электромагнитное усилие разворачивающегося магнитного поля катушки обратного хода будут превышать усилие в катушке прямого хода, обладающей на данном интервале времени некоторым запасом магнитной энергии и оказывающей тормозное воздействие. Механическая работа, затраченная на преодоление электромагнитного торможения бойка, преобразуется в магнитную энергию, пополняя существующий запас магнитной энергии катушки, которая преобразуется в электрическую энергию и рекуперируется обратно в сеть, компенсируя энергию тепловых потерь катушки прямого хода:

$$\Delta w_{\text{м.рх}}(x,\ t) + \int_{t_1}^{t_2} f_{\text{эм.рх}} v\, dt = \int_{t_1}^{t_2} i_{\text{рх}}^2 r_{\text{рх}}\, dt + \Delta w_{\text{эл.рх}}(x,\ t). \qquad (3)$$

В этот же период времени на интервале $t_1 \dots t_3$ электрическая энергия поступает в катушку обратного хода и боек, получая дополнительное ускорение, продолжает ускоренное движение в направлении упругого звена. Электрическая энергия, поступающая из сети, расходуется на изменение кинетической энергии бойка, компенсацию энергии тепловых потерь катушки, приращение энергии магнитного поля и компенсацию на интервале $t_1 \dots t_2$ внешних сил при электромагнитном торможении бойка катушкой прямого хода:

$$\int_{t_1}^{t_3} \left(u_{\text{ох}} i_{\text{ох}} - i_{\text{ох}}^2 r_{\text{ох}} \right) dt = \int_{v_1}^{v_3} mv\, dv + \int_{t_1}^{t_2} f_{\text{эм.рх}} v\, dt + \Delta w_{\text{м.ох}}(x,\ t)\,. \qquad (4)$$

В период времени $t_2 \dots t_3$ движение бойка под действием электромагнитных сил катушки обратного хода сопровождается действием внешней силы упругого звена, направление которой противоположно движению бойка. При этом кинетическая энергия бойка полностью переходит в потенциальную энергию упругого звена при сжатии пружины:

$$\frac{mv_0^2}{2} + \int_{v_0}^{v_1} mv\, dv + \int_{v_1}^{v_3} mv\, dv = \int_{x_2=b}^{x_3=a} kx\, dx, \qquad (5)$$

где k – коэффициент жесткости; kx – усилие сжатия упругого звена (пружины).

В точке a на кривой хода (рис. 2) выполняется остановка бойка и изменение знака скорости его движения на противоположную.

Период времени $t_3 \dots t_5$ характеризуется ускоренным перемещением бойка в сторону рабочего инструмента под действием внешних упругих сил безынерционного упругого звена, обладающего запасом потенциальной энергии, и электромагнитных сил катушки прямого хода. Электрическая энергия, поступающая из сети, расходуется на устранение электромагнитного торможения бойка катушкой обратного хода, изменение кинетической энергии бойка, компенсацию энергии тепловых потерь и приращение энергии магнитного поля катушки прямого хода:

$$\int_{t_3}^{t_5} \left(u_{\text{рх}} i_{\text{рх}} - i_{\text{рх}}^2 r_{\text{рх}} \right) dt + \int_{x_2=b}^{x_3=a} kx\, dx = \int_{v_3}^{v_5} mv\, dv + \int_{t_3}^{t_5} f_{\text{эм.ох}} v\, dt + \Delta w_{\text{м.рх}}(x,\ t)\,, \qquad (6)$$

где $v_3 = 0$ – начальная скорость бойка в точке a (рис. 2).

Составляющая $\int\limits_{v_3=0}^{v_5} mv\,dv$ правой части уравнения баланса определяет кинетическую энергию бойка за время его движения на интервале $t_3 \ldots t_5$:

$$\int\limits_{v_3=0}^{v_5} mv\,dv = \int\limits_{x_2=b}^{x_3=a} kx\,dx + \int\limits_{t_3}^{t_5} f_{\text{эм.рх}} v\,dt - \int\limits_{t_3}^{t_4} f_{\text{эм.ох}} v\,dt\,. \qquad (7)$$

На интервале времени $t_3 \ldots t_4$ электрическая энергия катушкой обратного хода из сети не потребляется, и при выводе бойка внешними силами из положения магнитного равновесия режим будет характеризоваться электромагнитным торможением бойка катушкой обратного хода, обладающей некоторым запасом магнитной энергии. Механическая работа, затраченная по преодолению электромагнитного торможения бойка, преобразуется в магнитную энергию, увеличивая ее запас при одновременном преобразовании магнитной энергии в электрическую энергию, которая за вычетом энергии тепловых потерь в катушке обратного хода рекуперируется обратно в сеть:

$$\Delta w_{\text{м.ох}}(x,\,t) + \int\limits_{t_3}^{t_4} f_{\text{эм.ох}} v\,dt = \int\limits_{t_3}^{t_4} i_{\text{ох}}^2 r_{\text{ох}}\,dt + \Delta w_{\text{эл.ох}}(x,\,t)\,, \qquad (8)$$

где $\int\limits_{t_3}^{t_4} f_{\text{эм.ох}} v\,dt = \int\limits_{v_3}^{v_4} mv\,dv$ – механическая работа, затраченная на преодоление на интервале $t_3 \ldots t_4$ электромагнитного торможения бойка.

На интервале времени $t_5 \ldots t_6$ электрическая энергия из сети катушкой прямого хода не потребляется. Механическая работа совершается за счет запасенной магнитной энергии, которая частично расходуется на увеличение кинетической энергии движущегося бойка и частично в виде электрической энергии рекуперируется обратно в сеть, компенсируя энергию тепловых потерь в катушке:

$$\Delta w_{\text{м.рх}}(x,\,t) = \int\limits_{t_5}^{t_6} f_{\text{эм.рх}} v\,dt + \int\limits_{t_5}^{t_6} i_{\text{рх}}^2 r_{\text{рх}}\,dt + \Delta w_{\text{эл.рх}}(x,\,t)\,, \qquad (9)$$

где $\int\limits_{t_5}^{t_6} f_{\text{эм.рх}} v\,dt = \int\limits_{v_5}^{v_6} mv\,dv$ – механическая работа по увеличению кинетической энергии бойка.

В период бестоковой паузы $t_6 \ldots t_7$ осуществляется свободный выбег бойка в сторону рабочего инструмента. В момент времени t_7 боек, двигаясь по инерции, наносит удар по рабочему инструменту. Далее цикл повторяется.

Кинетическая энергия бойка за полный рабочий цикл энергопреобразования будет определяться запасом потенциальной энергии упругого звена и работой электромагнитных сил катушки прямого хода по увеличению кинетической энергии бойка при его ускорении в направлении рабочего инструмента:

$$\int\limits_{x_2=b}^{x_3=a} kx\,dx + \int\limits_{v_3=0}^{v_5} mv\,dv + \int\limits_{v_5}^{v_6} mv\,dv = \frac{mv_{\text{уд}}^2}{2}\,, \qquad (10)$$

где $v_{уд} = v_6$ – предударная скорость бойка; $\frac{mv_{уд}^2}{2}$ – кинетическая энергия бойка по завершению рабочего цикла.

В момент удара по рабочему инструменту передается только часть кинетической энергии

$$A_{уд} = \left(1 - k_{от}^2\right)\frac{mv_{уд}^2}{2},$$

где $k_{от}$ – коэффициент отскока бойка от рабочего инструмента.

Другая часть кинетической энергии в виде энергии отскока бойка от рабочего инструмента используется в следующем рабочем цикле синхронной машины. Таким образом, ударная масса бойка двухкатушечной синхронной электромагнитной машины со свободным выбегом бойка в катушке прямого хода приобретает необходимую кинетическую энергию за счет подачи трех электрических импульсов напряжения на систему катушек в течение времени рабочего цикла.

Следует также отметить, что любое отклонение от заданного алгоритма работы двухкатушечной СЭМУД может повлиять на режимы работы электромеханической системы, что может потребовать внесения дополнительных корректировок в уравнения энергетического баланса (1) – (10).

Заключение

На основе баланса энергий электромеханической системы рассмотрен процесс энергопреобразования СЭМУД со свободным выбегом бойка в катушке прямого хода, учитывающий взаимодействие между всеми элементами конструкции ударного узла при ускорении ударной массы бойка в магнитном поле, создаваемом системой из двух катушек.

Рассмотренные процессы взаимного преобразования электрической, магнитной, кинетической, потенциальной энергии в электромеханической системе дополняют базовые знания фундаментальных положений теории импульсных электромагнитных машин, составляющие научные основы их создания и совершенствования.

Реализация рабочего цикла в двухкатушечной СЭМУД со свободным выбегом бойка, в сравнении с известными рабочими циклами, позволяет обеспечить снижение амплитуды тока и уменьшение влияния работы импульсной электромагнитной машины на питающую сеть, что улучшает электромагнитную совместимость при питании от однофазного источника промышленной частоты 50 Гц за счет подачи на катушки трех полуволн напряжения в течение времени рабочего цикла.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Ряшенцев Н.П., Угаров Г.Г., Львицин А.В.** Электромагнитные прессы. – Новосибирск: Наука, 1989. – 216 с.
2. Электропривод с линейными электромагнитными двигателями / Н.П. Ряшенцев, Г.Г. Угаров, В.Н. Федонин, А.Т. Малов. – Новосибирск: Наука, 1981. – 150 с.
3. **Нейман Л.А., Нейман В.Ю.** Низкочастотные ударные электромагнитные машины и технологии // Актуальные проблемы в машиностроении. – 2014. – № 1. – С. 256–259.
4. Прессовое оборудование с линейным электромагнитным приводом для механизации технологических процессов ударной сборки и штамповки мелких изделий / В.А. Аксютин, Л.А. Нейман, В.Ю. Нейман, А.А. Скотников // Актуальные проблемы в машиностроении. – 2015. – № 2. – С. 220–224.

5. **Малинин Л.И., Нейман В.Ю.** Предельные силовые характеристики электромагнитных двигателей постоянного тока // Электротехника. – 2009. – № 12. – С. 61–67.
6. **Ивашин В.В., Кудинов А.К., Певчев В.П.** Электромагнитные привода для импульсных и виброимпульсных технологий // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2012. – № 1. – С. 72–75.
7. **Усанов К.М., Угаров Г.Г., Мошкин В.И.** Линейный импульсный электромагнитный привод машин с автономным питанием. – Курган: Изд-во Курган. гос. ун-та, 2006. – 284 с.
8. **Павленко А.В., Гильмияров К.Р., Большенко И.А.** Управление электромагнитным приводом клапана газораспределительного механизма двигателя внутреннего сгорания // Электротехника. – 2014. – № 5. – С. 40–46.
9. **Певчев В.П., Ивашин В.В.** Проектирование мощных короткоходовых импульсных электромагнитных двигателей. – Тольятти: Изд-во ТГУ, 2012. – 142 с.
10. **Саттаров Р.Р., Исмагилов Ф.Р.** Периодические режимы в электромагнитных вибрационных преобразователях // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. – 2010. – Т. 14, № 1 (36). – С. 50–55.
11. **Саттаров Р.Р., Исмагилов Ф.Р.** Исследование виброударного режима в электромеханических реактивных преобразователях // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2010. – № 2. – С. 23–27.
12. **Татевосян А.А., Татевосян А.С.** Расчет оптимальных параметров электромагнитного привода колебательного движения // Известия Томского политехнического университета. – 2014. – Т. 325, № 4. – С. 121–132.
13. **Малинин Л.И., Нейман В.Ю.** Определение напряжения преобразования энергии и электромагнитных сил в электромеханических системах // Электричество. – 2008. – № 6. – С. 57–62.
14. **Нейман Л.А., Нейман В.Ю.** Математическая модель электромеханической системы колебательного движения с упругими связями // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. – 2015. – № 6. – С. 35–40.
15. **Нейман Л.А., Нейман В.Ю.** Расчет динамики электромагнитного привода колебательного движения с однополупериодным выпрямителем // Вестник МЭИ. – 2016. – № 6. – С. 64–71.
16. **Нейман Л.А., Нейман В.Ю.** Математическая модель динамики электромагнитного ударного узла с упругими связями // Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации. – 2016. – № 2 (31). – С. 94–107.
17. **Нейман Л.А., Нейман В.Ю.** Моделирование динамических процессов в электромагнитных преобразователях энергии для систем генерирования силовых воздействий и низкочастотных вибраций // Известия Томского политехнического университета. – 2015. – Т. 326, № 4. – С. 154–162.
18. **Нейман Л.А., Нейман В.Ю.** Моделирование процессов в электромагнитном вибрационном преобразователе с потерями энергии в магнитопроводе // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2016. – Т. 19, № 1. – С. 73–78.
19. Способы повышения энергетических показателей однообмоточных импульсных устройств с электромагнитным возбуждением / В.Ю. Нейман, Д.М. Евреинов, Л.А. Нейман, А.А. Скотников, Ю.Б. Смирнова // Транспорт: наука, техника, управление. – 2010. – № 8. – С. 29–31.
20. **Нейман Л.А., Нейман В.Ю., Шабанов А.С.** Упрощенный расчет электромагнитного ударного привода в повторно-кратковременном режиме работы // Электротехника. – 2014. – № 12. – С. 50–53.
21. **Нейман В.Ю.** Анализ процессов энергопреобразования линейных электромагнитных машин с предварительным аккумулированием магнитной энергии в динамических режимах // Электротехника. – 2003. – № 2. – С. 30–36.
22. **Ряшенцев Н.П., Тимошенко Е.М., Фролов А.В.** Теория, расчет и конструирование электромагнитных машин ударного действия. – Новосибирск: Наука, 1970. – 260 с.
23. **Нейман Л.А., Нейман В.Ю.** Математическая модель динамики однокатушечной синхронной электромагнитной машины ударного действия с двухсторонним выбегом бойка // Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации. – 2016. – № 3 (32). – С. 98–114.

24. **Нейман Л.А., Нейман В.Ю.** Математическая модель динамики двухкатушечной синхронной электромагнитной машины ударного действия со свободным выбегом бойка // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. – 2016. – № 5. – С. 32–40.
25. **Нейман Л.А., Нейман В.Ю.** Математическая модель динамики двухкатушечной синхронной электромагнитной машины ударного действия с инерционным реверсом бойка // Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации. – 2016. – № 4 (33). – С. 61–79.
26. **Нейман В.Ю., Скотников А.А., Нейман Л.А.** Тенденции в развитии конструкций синхронных двухобмоточных электромагнитых машин для импульсных технологий // Актуальные проблемы энергетики АПК: материалы II Международной научно-практической конференции. – Саратов, 2011. – С. 271–277.
27. **Угаров Г.Г., Мошкин В.И.** Перспективы развития силовых электромагнитных импульсных систем // Вестник Курганского государственного университета. Серия: Технические науки. – 2013. – № 29. – С. 88–90.
28. **Перьев А.А.** Обоснование технических характеристик ручных электромагнитных машин с повышенной энергией ударов // Импульсные линейные электрические машины: сборник научных трудов / отв. ред. Н.П. Ряшенцев. – Новосибирск: ИГД СО АН СССР, 1991. – С. 71–81.
29. **Нейман Л.А., Нейман В.Ю.** Исследование двухкатушечной синхронной электромагнитной машины с инерционным реверсом бойка // Современные проблемы теории машин. – 2014. – № 2. – С. 109–110.

AN OPETATING CYCLE OF THE TWO-INDUCTOR SYNCRONOUS ELECTROMAGNETIC MACHINE WITH A FREE HEAD RUNNING-OUT IN THE DRIVING STROKE INDUCTOR

Neyman L.A., Neyman V.Yu.
Novosibirsk State Technical University Novosibirsk, Russia

Mechanisms and units with reciprocated impulse electromagnetic drives are widely used in many industrial technological processes of material plastic deformation and disruption. Taking into account modern requirements to energy-saving, low-frequency impact synchronous electromagnetic machines attract attention as their impact pulse frequency is equal to or multiple of single-phase source frequency. The relevance of the research is explained by the need to improve electromagnetic compatibility of the electric drive powered by an industrial single-phase source. It is necessary to study electromechanical energy conversion process during the machine operating cycle.

A two-inductor synchronous electromagnetic machine with a free head running-out in the driving stroke inductor powered by a 50 Hz single-phase voltage source is considered. The research methods are based on the energy balance of the electromechanical system and its components during the impact unit total operating cycle.

With due regard to the interaction between all impact unit elements when the head impact mass is accelerated by the magnetic field generated by the system of two inductors, the energy conversion process based on the electromechanical system energy balance is considered for the total operating cycle. The implementation of the operating cycle in the two-inductor synchronous electromagnetic machine with a free running-out makes it possible to reduce the current amplitude and to suppress an electromagnetic machine effect on the mains in comparison with the known operating cycle.

The operating cycle with free head running-out in the driving stroke inductor of the synchronous two-inductor impact electromagnetic machine improves electromagnetic compatibility if the machine is powered by a single-phase voltage source and three voltage half-waves are applied during the operating cycle.

Keywords: Synchronous electromagnetic machine, impact unit, electric drive, impact energy, machine operating cycle, electromagnetic compatibility, electromechanical system energy balance.

DOI: 10.17212/1727-2769-2018-2-70-81

REFERENCES

1. Ryashentsev N.P., Ugarov G.G., L'vitsin A.V. *Elektromagnitnye pressy* [Electromagnetic press]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1989. 216 p.
2. Ryashentsev N.P., Ugarov G.G., Fedonin V.N., Malov A.T. *Elektroprivod s lineinymi elektromagnitnymi dvigatelyami* [Electric linear electromagnetic motors]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1981. 150 p.
3. Neyman L.A., Neyman V.Yu. Nizkochastotnye udarnye elektromagnitnye mashiny i tekhnologii [Low-frequency impact electromagnetic machines and technology]. *Aktual'nye problemy v mashinostroenii – Actual problems in machine building*, 2014, no. 1, pp. 256–259.
4. Aksyutin V.A., Neyman L.A., Neyman V.Yu., Skotnikov A.A. Pressovoe oborudovanie s lineinym elektromagnitnym privodom dlya mekhanizatsii tekhnologicheskikh protsessov udarnoi sborki i shtampovki melkikh izdelii [Forging equipment with a linear electromagnetic motor for the mechanization of processes of impact assembly and stamping small parts]. *Aktual'nye problemy v mashinostroenii – Actual problems in machine building*, 2015, no. 2, pp. 220–224.
5. Malinin L.I., Neyman V.Yu. Predel'nye silovye kharakteristiki elektromagnitnykh dvigatelei postoyannogo toka [Limiting power characteristics of electromagnetic direct-current motors]. *Elektrotekhnika – Russian Electrical Engineering*, 2009, no. 12, pp. 61–67. (In Russian).
6. Ivashin V.V., Kudinov A.K., Pevchev V.P. Elektromagnitnye privoda dlya impul'snykh i vibroimpul'snykh tekhnologii [Electromagnetic drives for impulse and vibroimpulse technologies]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Elektromekhanika – Russian Electromechanics*, 2012, no. 1, pp. 72–75.
7. Usanov K.M., Ugarov G.G., Moshkin V.I. *Lineinyi impul'snyi elektromagnitnyi privod mashin s avtonomnym pitaniem* [Linear pulse electromagnetic drive the machine with autonomous-powered]. Kurgan, Kurgan State University Publ., 2006. 284 p.
8. Pavlenko A.V., Gil'miyarov K.R., Bol'shenko I.A. Upravlenie elektromagnitnym privodom klapana gazoraspredelitel'nogo mekhanizma dvigatelya vnutrennego sgoraniya [Control of the electromagnetic drive of the valve of the gas-distributing mechanism of the internal combustion engine]. *Elektrotekhnika – Russian Electrical Engineering*, 2014, no. 5, pp. 40–46. (In Russian).
9. Pevchev V.P., Ivashin V.V. *Proektirovanie moshchnykh korotkokhodovykh impul'snykh elektromagnitnykh dvigatelei* [Powerful short-pulse pulsed electromagnetic motors]. Tol'yatti, TSU Publ., 2012. 142 p.
10. Sattarov R.R., Ismagilov F.R. Periodicheskie rezhimy v elektromagnitnykh vibratsionnykh preobrazovatelyakh [Periodic modes in the electromagnetic vibration converters]. *Vestnik Ufimskogo gosudarstvennogo aviatsionnogo tekhnicheskogo universiteta – Bulletin of the Ufa State Aviation Technical University*, 2010, vol. 14, no. 1 (36), pp. 50–55.
11. Sattarov R.R., Ismagilov F.R. Issledovanie vibroudarnogo rezhima v elektromekhanicheskikh reaktivnykh preobrazovatelyakh [Investigation of the vibro-impact regime in electromechanical reactive converters]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Elektromekhanika – Russian Electromechanics*, 2010, no. 2, pp. 23–27.
12. Tatevosyan A.A., Tatevosyan A.S. Raschet optimal'nykh parametrov elektromagnitnogo privoda kolebatel'nogo dvizheniya [The calculation of the optimal parameters of the vibrational motion of the electromagnetic actuator]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta – Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2014, vol. 325, no. 4, pp. 121–132. (In Russian).
13. Malinin L.I., Neiman V.Yu. Opredelenie napryazheniya preobrazovaniya energii i elektromagnitnykh sil v elektromekhanicheskikh sistemakh [Determination of the voltage of energy conversion and electromagnetic forces in electromechanical systems]. *Elektrichestvo – Electrical Technology Russia*, 2008, no. 6, pp. 57–62.
14. Neyman L.A., Neyman V.Yu. Matematicheskaya model' elektromekhanicheskoi sistemy kolebatel'nogo dvizheniya s uprugimi svyazyami [Mathematical model of electromechanical system with vibrational motion of elastic connections]. *Vestnik Ivanovskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta – Vestnik of Ivanovo State Power Engineering University*, 2015, no. 6, pp. 35–40.

15. Neyman L.A., Neyman V.Yu. Raschet dinamiki elektromagnitnogo privoda kolebatel'nogo dvizheniya s odnopoluperiodnym vypryamitelem [The calculation of the dynamics of the magnetic drive of oscillatory motion with half-wave rectifier]. *Vestnik MEI – MPEI Vestnik*, 2016, no. 6, pp. 64–71.
16. Neyman L.A., Neyman V.Yu. Matematicheskaya model' dinamiki elektromagnitnogo udarnogo uzla s uprugimi svyazyami [A dynamic mathematical model of the electromagnetic impact unit with spring linkages]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii – Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2016, no. 2 (31), pp. 94–107.
17. Neyman L.A., Neyman V.Yu. Modelirovanie dinamicheskikh protsessov v elektromagnitnykh preobrazovatelyakh energii dlya sistem generirovaniya silovykh vozdeistvii i nizkochastotnykh vibratsii [Simulation of dynamic processes in the electromagnetic energy converters for generating the force effects systems and low-frequency vibrations]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta – Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2015, vol. 326, no. 4, pp. 154–162.
18. Neyman L.A., Neyman V.Yu. Modelirovanie protsessov v elektromagnitnom vibratsionnom preobrazovatele s poteryami energii v magnitoprovode [Simulation of processes in an electromagnetic vibration converter with power loss in the steel magnetic core]. *Doklady Tomskogo gosudarstvennogo universiteta sistem upravleniya i radioelektroniki – Proceedings of Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics*, 2016, vol. 19, no. 1, pp. 73–78.
19. Neyman V.Yu., Evreinov D.M., Neyman L.A., Skotnikov A.A., Smirnova Yu.B. Sposoby povysheniya energeticheskikh pokazatelei odnoobmotochnykh impul'snykh ustroistv s elektromagnitnym vozbuzhdeniem [Methods for improving the energy performance of single-winding pulse devices with electromagnetic excitation]. *Transport: nauka, tekhnika, upravlenie – Transportation: science, technology, management*, 2010, no. 8, pp. 29–31.
20. Neyman L.A., Neyman V.Yu., Shabanov A.S. Uproshchennyi raschet elektromagnitnogo udarnogo privoda v povtorno-kratkovremennom rezhime raboty [A simplified calculation of the intermittent periodic operating regime of an electromagnetic impact drive]. *Elektrotekhnika – Russian Electrical Engineering*, 2014, no. 12, pp. 50–53. (In Russian).
21. Neyman V.Yu. Analiz protsessov energopreobrazovaniya lineinykh elektromagnitnykh mashin s predvaritel'nym akkumulirovaniem magnitnoi energii v dinamicheskikh rezhimakh [Analysis of the processes of energy transformation of linear electromagnetic machines with preliminary accumulation of magnetic energy in dynamic modes]. *Elektrotekhnika – Russian Electrical Engineering*, 2003, no. 2, pp. 30–36. (In Russian).
22. Ryashentsev N.P., Timoshenko E.M., Frolov A.V. *Teoriya, raschet i konstruirovanie elektromagnitnykh mashin udarnogo deistviya* [Theory, calculation and design of electromagnetic percussion machines]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1970. 260 p.
23. Neyman L.A., Neyman V.Yu. Matematicheskaya model' dinamiki odnokatushechnoi sinkhronnoi elektromagnitnoi mashiny udarnogo deistviya s dvukhstoronnim vybegom boika [A dynamic model of the impact single-inductor synchronous electromagnetic machine with two-side head running-out]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii – Proceedings of the Russian higher school Academy of science*, 2016, no. 3 (32), pp. 98–114.
24. Neyman L.A., Neyman V.Yu. Matematicheskaya model' dinamiki dvukhkatushechnoi sinkhronnoi elektromagnitnoi mashiny udarnogo deistviya so svobodnym vybegom boika [Mathematical model of dynamics of two-inductor synchronous impact electromagnetic machines with free head running with free head running-out]. *Vestnik Ivanovskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta – Vestnik of Ivanovo State Power Engineering University*, 2016, no. 5, pp. 32–40.
25. Neyman L.A., Neyman V.Yu. Matematicheskaya model' dinamiki dvukhkatushechnoi sinkhronnoi elektromagnitnoi mashiny udarnogo deistviya s inertsionnym reversom boika [A dynamic model of a two-inductor synchronous impact electromagnetic machine with an inertial head reverse]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii – Proceedings of the Russian higher school Academy of science*, 2016, no. 4 (33), pp. 61–79.
26. Neyman V.Yu., Skotnikov A.A., Neyman L.A. [Trends in the development of synchronous two-winding electromagnetic machines for impulse technologies]. *Aktual'nye problemy energetiki APK*: materialy II mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii [Actual problems of power engineering of the agroindustrial complex: materials II international scientific-practical conference]. Saratov, 2011, pp. 271–277. (In Russian).

27. Ugarov G.G., Moshkin V.I. Perspektivy razvitiya silovykh elektromagnitnykh impul'snykh sistem [Perspectives of development of power electromagnetic pulse systems]. *Vestnik Kurganskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnicheskie nauki – Bulletin of the Kurgan State University. Series: Technical Sciences*, 2013, no. 29, pp. 88–90.
28. Per'ev A.A. Obosnovanie tekhnicheskikh kharakteristik ruchnykh elektromagnitnykh mashin s povyshennoi energiei udarov [Justification of specifications manual electromagnetic machines with high energy shocks]. *Impul'snye lineinye elektromagnitnye mashiny* [Pulsed electric linear machine]. Ed. by N.P. Ryashentsev. Novosibirsk, IGD SO AN SSSR Publ., 1991, pp. 71–81.
29. Neyman L.A., Neyman V.Yu. Issledovanie dvukhkatushechnoi sinkhronnoi elektromagnitnoi mashiny s inertsionnym reversom boika [Research two-coil synchronous electromagnetic machine with inertial reversal the firing pin]. *Sovremennye problemy teorii mashin – Modern Problems of Theory of Machines*, 2014, no. 2, pp. 109–110.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Нейман Людмила Андреевна – родилась в 1966 году, канд. техн. наук, доцент кафедры электротехнических комплексов Новосибирского государственного технического университета. Область научных интересов: линейные синхронные электромагнитные машины и технологии. Опубликовано более 120 научных работ. (Адрес: 630073, Россия, Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20. E-mail: neyman31@gmail.com).

Neyman Lyudmila Andreevna (b. 1966) – Candidate of Sciences (Eng.), associate professor at the department of electrotecnical units in the Novosibirsk State Technical University. Her research interests include linear synchronous electromagnetic machines and technology. She is the author of 120 scientific papers. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: neyman31@gmail.com).

Нейман Владимир Юрьевич – родился в 1960 году, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой теоретических основ электротехники Новосибирского государственного технического университета. Область научных интересов – силовые электромагнитные импульсные системы. Автор и соавтор более 200 научных и учебно-методических работ. (Адрес: 630073, Россия, Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20. E-mail: nv.nstu@ngs.ru).

Neyman Vladimir Yurievich (b. 1960), Doctor of Sciences (Eng.), professor, head of the Department of Electrical Engineering Foundations, Novosibirsk State Technical University. His research interests are foused on power electromagnetic pulse systems. He is the author and co-author of over 200 scientific and educational works. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: nv.nstu@ngs.ru).

Статья поступила 25 февраля 2018 г.
Received February 25, 2018

To Reference:

Neyman L.A., Neyman V.Yu. Rabochii tsikl dvukhkatushechnoi sinkhronnoi elektromagnitnoi mashiny so svobodnym vybegom boika v katushke pryamogo khoda [An opetating cycle of the two-inductor syncronous electromagnetic machine with a free head running-out in the driving stroke inductor]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii – Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2018, no. 2 (39), pp. 70–81. doi: 10.17212/1727-2769-2018-2-70-81.

ДОКЛАДЫ АН ВШ РФ
2018 апрель–июнь № 2 (39)

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

УДК 681.5.013

СИНТЕЗ ДВУХКАСКАДНОЙ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО ПОИСКА ЭКСТРЕМУМА СО СКОЛЬЗЯЩИМИ РЕЖИМАМИ

Д.А. Суворов, Г.А.Французова, А.С.Востриков
Новосибирский государственный технический университет

В работе обсуждается процедура синтеза двухкаскадной системы автоматического поиска экстремума для динамического объекта. Его особенностью является наличие двух составляющих: динамической части и статической функции качества, имеющей экстремальный характер. В соответствии с особенностями объекта предлагается формировать двухконтурное управление, где внутренний контур содержит динамическую часть, а внешний – экстремальную характеристику. С целью подавления влияний внешних возмущений предлагается во внутреннем контуре организовать скользящий режим. Показано, что возникающие при этом автоколебания являются управляемыми, и их можно использовать в качестве поисковых колебаний для оценки градиента функции качества аналогично методу синхронного детектирования. Для обеспечения поиска экстремума с заданным качеством во внешнем контуре формируется интегральный регулятор, использующий полученную оценку градиента. Предлагается искусственно ускорить стабилизацию динамических свойств внутреннего контура, что порождает разнотемповые процессы. В этом случае исследование свойств системы осуществляется с использованием метода разделения движений. Описана процедура синтеза, которая включает в себя рекомендации по выбору значений параметров регуляторов и поисковых колебаний, а также соответствующих автоколебаний во внутреннем контуре. Представлены результаты имитационного моделирования двухкаскадной экстремальной системы в среде MatLab, иллюстрирующие процесс поиска экстремума.

Ключевые слова: поиск экстремума, каскадное управление, скользящий режим, метод локализации, дифференцирующие устройства, разнотемповые процессы.

DOI: 10.17212/1727-2769-2018-2-82-92

Введение

Системы автоматического поиска экстремума составляют отдельный класс систем автоматического регулирования. Их отличительной особенностью является наличие в объекте двух разнородных составляющих. Одна из них представляет собой обычный динамический объект, а вторая составляющая – это статическая функция качества с явно выраженным экстремумом. Задача заключается в определении положения экстремума и стабилизации системы в найденном состоянии методами теории управления при действии на объект внешних возмущений. Впервые задача такого рода была сформулирована в работах [1, 2], а возможности систем с регулятором на основе информации о градиенте экстремальной характеристики показаны в [3]. В настоящее время наиболее интересные результаты для объектов с нелинейной динамической частью представлены в [4].

Примерами динамических объектов с экстремальной характеристикой качества могут служить различные виды топок, паровых котлов и химических агрегатов, система максимизации давления в авиационном компрессоре, шлифовальные процессы, фотогальванический элемент, регулировка антенны радиотелескопа для максимизирования принимаемого сигнала и ряд других [4, 5].

Различные регуляторы могут быть использованы с целью организации движения и стабилизации системы в точке экстремума. Их выбор зависит прежде всего

© 2018 Д.А. Суворов, Г.А.Французова, А.С.Востриков

от типа динамической части. В случае ее линейного описания целесообразно применять типовые регуляторы. Адекватными методами синтеза для нелинейных объектов являются метод локализации [6–8] и метод скользящих режимов [9].

Цель данной работы – показать особенности синтеза системы автоматического поиска экстремума с организацией скользящего режима во внутренней части системы. Оригинальность подхода заключается в организации двухконтурного управления с разными темпами движений в каждом из них [10–12]. Это позволяет каждый контур управления рассчитывать независимо от другого. Техническая реализация подобных систем предполагает, в первую очередь, возможность адекватной оценки градиента функции качества. С этой целью используются возникающие во внутреннем контуре автоколебания и организуется оценка градиента аналогично методу синхронного детектирования.

Для иллюстрации особенностей расчета и свойств исследуемых систем представлен класс одноканальных объектов с нелинейной динамической частью второго порядка. При этом объект подвержен влиянию неконтролируемых внешних возмущений. Полученные результаты могут быть распространены на общий класс одноканальных объектов регулирования.

1. Постановка задачи

Обсуждается задача поиска экстремума для нелинейного объекта управления второго порядка. Его модель представляет собой последовательное соединение динамической части и статической экстремальной характеристики вида

$$\begin{cases} \dot{x} = f(t,x) + b(t,x)u, \\ y = x_1, \\ Y = Y(y). \end{cases} \tag{1}$$

Здесь $x \in R^2$ – вектор состояния объекта; $u \in R^1$ – управляющее воздействие; $y \in R^1$ – выходная переменная динамической части; для функций $f(t,x)$ и $b(t, x) > 0$ известен только диапазон их изменения ($f_{\min}$, $f_{\max}$ и $b_{\min}$, $b_{\max}$), причем явная зависимость от времени отражает действие неконтролируемых внешних возмущений; $Y(y) \in R^1$ – однозначная экстремальная характеристика. В малой окрестности экстремума эта характеристика с достаточной точностью аппроксимируется параболой вида

$$Y = q\left(y - y_0\right)^2 + Y_0. \tag{2}$$

Необходимо с помощью регулятора организовать автоматический поиск экстремума $(y_0; Y_0)$ с требуемым качеством $\left(t_n^*$ – заданное время процесса; δ^* – относительная статическая ошибка$\right)$ и стабилизацию системы в точке экстремума. Специфика проектирования экстремальной системы предполагает наличие информация о градиенте выходной характеристики $G = \partial Y / \partial y$.

2. Двухконтурная система поиска экстремума

Характерной особенностью объекта управления (1) является наличие двух относительно самостоятельных компонентов – нелинейной динамической части и статической экстремальной характеристики. В связи с этим для него возможно

организовать каскадное управление (рис. 1), где P_1 и P_2 – регуляторы разных контуров управления; УОГ – устройство оценки градиента [11–14].

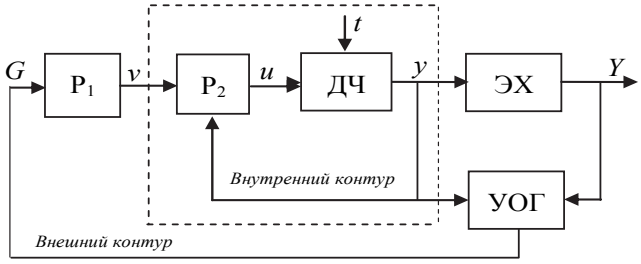


Рис. 1 – Схема двухконтурной системы управления
Fig. 1 – Diagram of a two-cascade control system

Внешние неконтролируемые возмущения влияют на динамическую часть, поэтому целесообразно предварительно стабилизировать процессы во внутреннем контуре. При этом будем формировать регулятор P_1 на основе метода скользящих режимов [9]. Потребуем, чтобы процессы во внутреннем контуре протекали существенно быстрее, чем во внешнем [13, 14], т. е. свяжем их соотношением

$$t_{\text{внутр}} \approx D t_{\text{внешн}}, \tag{3}$$

где D – степень «разнесения» процессов; $t_{\text{внешн}} = t_n^*$. На практике достаточно обеспечить $D \approx 10$, что позволяет при расчете внешнего контура не учитывать динамику внутреннего, а рассматривать только его равновесный режим, т. е. $y = v$. В этом случае регулятор внешнего контура P_2 может рассчитываться независимо от внутреннего.

Таким образом, основная идея каскадного регулирования заключается в искусственном разделении системы на две относительно независимые подсистемы. В результате синтез системы экстремального регулирования осуществляется в два этапа. На одном этапе рассчитывается регулятор для стабилизации процессов в динамической части. На другом этапе обеспечивается поиск экстремума во внешнем контуре управления.

3. Внешний контур регулирования

Рассмотрим сначала, как при условии (3) и стабилизации процессов во внутреннем контуре осуществляется поиск экстремума. С этой целью во внешнем контуре используем интегральный регулятор P_1 [12–14] в функции градиента, полагая на этапе расчета, что градиент можно оценить точно,

$$v(t) = v(0) - \alpha \int_0^t G(\tau)\, d\tau. \tag{4}$$

В этом случае с учетом (2) градиент имеет вид $G = 2q(y - y_0)$, а дифференциальное уравнение регулятора (4) принимает форму

$$\dot{v} = -2\alpha q(y - y_0).$$

Поскольку процессы во внутреннем контуре закончились и $y = v$, то отсюда следует, что процессы во внешнем контуре соответствуют линейному дифференциальному уравнению

$$\dot{y} + 2\alpha q y = 2\alpha q y_0 . \tag{5}$$

Из (5) видно, что в статике $y = y_0$. Следовательно, поиск экстремума осуществляется автоматически, ему соответствует положение равновесия внешнего контура. Причем соответствующим выбором параметра α можно обеспечить требуемую длительность процесса выхода на экстремум t_n^*.

4. Внутренний контур регулирования

Во внутреннем каскаде, где действуют внешние возмущения, а параметры модели ДЧ известны неточно, для стабилизации процессов используем метод скользящих режимов [9] и сформируем релейный закон управления P_2 в виде

$$u = u_m \operatorname{sign} S(x_1, x_2, v) , \tag{6}$$

где u_m – размах реле; $S(x_1, x_2, v) = cv - cx_1 - x_2 = 0$ – поверхность переключений; коэффициент c – выбирается на основе требований к быстродействию процессов во внутреннем контуре. Поскольку $x_1 = y$ согласно (1), то закон управления (6) удобно представить в форме

$$u = u_m \operatorname{sign} S(y, \dot{y}, v). \tag{7}$$

Как известно, в режиме скольжения процессы внутреннего контура будут соответствовать линейному уравнению поверхности $S(y, \dot{y}, v) = cv - cy - \dot{y} = 0$, т. е. будут инвариантны по отношению к внешним возмущениям и нестационарным параметрам ДЧ объекта.

Практическая реализация регулятора (7) предполагает оценку производной выходной переменной динамической части $\dot{y}$, которую можно получить с помощью следующего дифференцирующего устройства [7, 8] с малой постоянной времени μ и коэффициентом демпфирования d:

$$W_f(p) = \frac{y_1}{y} = \frac{1}{\mu^2 p^2 + 2d\mu p + 1} , \tag{8}$$

где y_1 и $\dot{y}_1$ – оценки выходной переменной динамической части и ее первой производной соответственно. Данное устройство порождает во внутреннем контуре регулирования дополнительные быстрые процессы [12, 13], которые локализованы в замкнутой подсистеме (рис. 2).

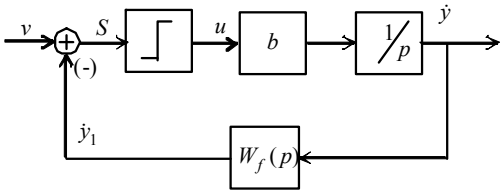


Рис. 2 – Схема подсистемы быстрых движений

Fig. 2 – The fast processes subsystem diagram

Наличие в ней нелинейного элемента типа «идеальное реле» приводит к возникновению в подсистеме быстрых движений автоколебаний [14], параметры которых на выходе дифференцирующего устройства $W_f(p)$ следующие:

$$\omega_a = \frac{1}{\mu}; \qquad A_f = \frac{2u_m b_{\max}\mu}{\pi d}, \tag{9}$$

т. е. зависят от параметров дифференцирующего устройства (8) и релейного регулятора (7) и могут задаваться произвольным образом.

Автоколебания с частотой ω_a, проходя через ДЧ объекта, изменяются по амплитуде, которая на выходе внутреннего контура имеет вид

$$A_k = 2dA_f\mu. \tag{10}$$

Далее автоколебания проходят через ЭХ на выход всей системы, поэтому их целесообразно использовать в качестве поискового пробного сигнала для организации оценки градиента во внешнем контуре системы аналогично методу синхронного детектирования (рис. 3).

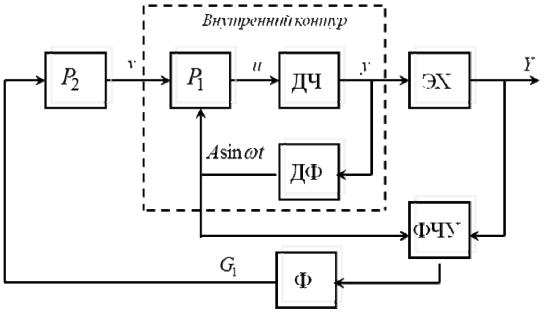


Рис. 3 – Блок-схема замкнутой системы с оценкой градиента

Fig. 3. Block-diagram of a closed-loop system with gradient estimation

Здесь введены следующие обозначения: ФЧУ – фазочувствительное устройство, в качестве которого используется блок умножения; Ф – усредняющий фильтр с передаточной функцией вида $W(s) = \frac{1}{Tp+1}$, T – постоянная времени фильтра; ДФ – дифференцирующее устройство вида (8); G_1 – оценка градиента, которая пропорциональна его точному значению,

$$G_1 = \pi A^2 G. \tag{11}$$

Именно эта оценка градиента используется для формирования регулятора (4).

5. Порядок расчета системы поиска экстремума

Учитывая наличие управляемых автоколебаний в системе, с помощью которых можно организовать получение адекватной оценки градиента, процедуру расчета автоматической системы поиска экстремума можно представить в виде совокупности отдельных этапов.

1. На основе анализа модели ДЧ объекта и его ЭХ в соответствии с рекомендациями метода синхронного детектирования определяются параметры поиско-

вых колебаний A_0 и ω_0, которые будут обеспечивать оценку градиента G_1 с требуемой точностью.

2. Колебания на выходе внутреннего контура регулирования должны соответствовать поисковым колебаниям, т. е. записываются равенства $A_k = A_0$ и $\omega_a = \omega_0$.

3. Определяется выражение для амплитуды автоколебаний на выходе контура быстрых движений согласно соотношению (10) в виде $A_f = \dfrac{A_0}{2d\mu}$.

4. Коэффициент демпфирования дифференцирующего устройства выбирается из диапазона $d = 0,5...0,7$. С учетом выражения (9) вычисляются постоянная времени $\mu = \dfrac{1}{\omega_0}$ и размах реле для регулятора внутреннего контура $u_m = \dfrac{A_0\pi}{4b_{\max}\mu^2}$.

5. В соответствии с заданной длительностью процесса поиска t_n^* и требуемой ошибкой выхода на экстремум δ^* для системы (5) модальным методом находится коэффициент α регулятора внешнего контура (4) с учетом оценки градиента (11).

6. Определяется длительность процессов во внутреннем контуре $t_{\text{внутр}} = Dt_n^*$, на основе которой вычисляется коэффициент c регулятора внутреннего контура (7).

Таким образом, в результате представленной процедуры формируются регуляторы внешнего и внутреннего контуров регулирования системы, обеспечивающие автоматический поиск экстремума с заданными свойствами.

6. Результаты имитационного моделирования

Рассмотрим объект, модель которого имеет вид

$$\begin{cases} \ddot{y} + a_2\dot{y}y + a_1(t)y = b(t)u, \\ Y = Y_0 + q\left[y - y_0\right]^2, \end{cases}$$

где параметры $a_1(t)$ и $b(t)$ изменяются в диапазоне $|a_1(t)| \le 2$, $4 \le b(t) \le 10$ от процесса к процессу; $a_2 = 3$; $q = 2$; $|u| \le 20$. Необходимо за время $t_n \le 5$ с из начального состояния $y(0) = 1,\ \dot{y}(0) = 0$ выйти в точку экстремума, заданную значениями $\{y_0 = -1; Y_0 = 2\}$.

В соответствии с требуемой длительностью процессов во внешнем контуре вычислено значение коэффициента интегрального регулятора $\alpha = 0,15$. Сформировано уравнение поверхности скольжения из условия ускорения процессов во внутреннем контуре,

$$S(y, \dot{y}, v) = -5y + 5v - \dot{y} = 0.$$

Из условия адекватной оценки градиента определены параметры регулятора P_2 и дифференцирующего фильтра: $|u_m| = 20$, $\mu_1 = 0,01$ с.

Схема моделирования системы поиска экстремума в среде MATLAB Simulink представлена на рис. 4.

Рис. 5, *а* и *б* иллюстрируют процессы движения к экстремуму на выходе системы и динамической части соответственно при изменении параметров объекта $a_1(t)$ и $b(t)$ в указанном диапазоне. Видно, что нестационарные

параметры объекта успешно подавляются во внутреннем контуре и не отображаются на графиках $Y(t)$ и $y(t)$. Переходный процесс на выходе системы $Y(t)$ имеет две фазы: первый этап соответствует быстрым процессам во внутреннем контуре регулирования, вторая фаза – движение к экстремуму согласно уравнению (5) для внешнего контура.

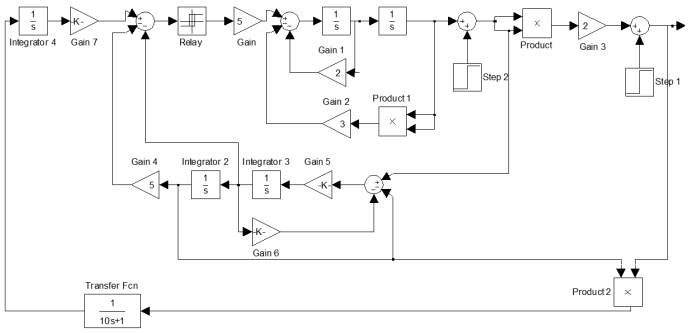
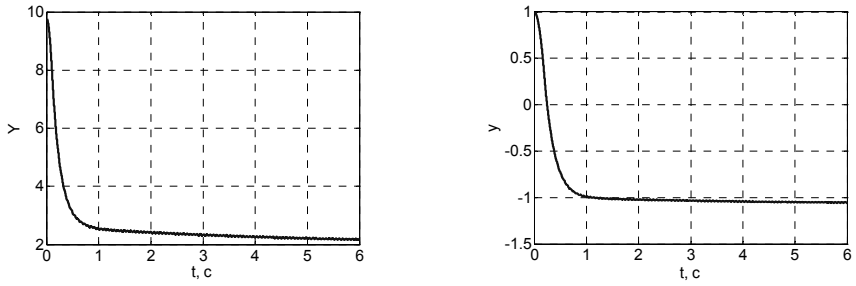


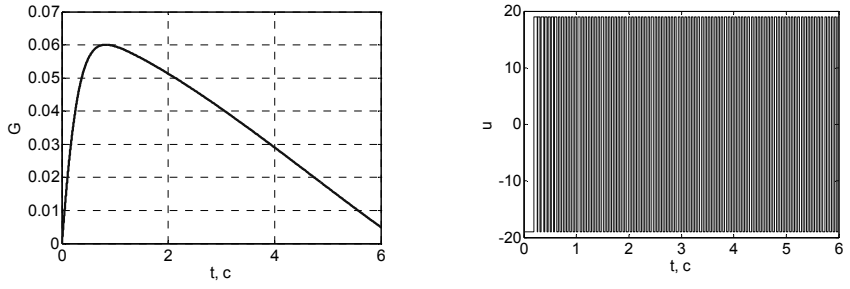
Рис. 4 – Схема моделирования замкнутой системы
Fig. 4 – The simulation scheme of the closed-loop system



а *б*

Рис. 5 – Процессы на выходе системы и ее динамической части
Fig. 5 – Processes at the system output and its dynamic part

На рис. 6 показано изменение градиента (рис. 6, *а*) и управляющего воздействия внутреннего контура (рис. 6, *б*).



а *б*

Рис. 6 – Изменение оценки градиента и управления внутреннего контура
Fig. 6 – Changes in gradient estimation and the inner-loop control

Как видно, с момента времени $t = 0,4$ с начинаются переключения управления, значение которого равно $|u_m| = 19$. Представленные графики переходных процессов показывают, что в замкнутой системе успешно осуществляется поиск экстремума в соответствии с заданными требованиями. Рассчитанные настроечные коэффициенты дифференцирующего устройства и релейного регулятора позволяют получить управляемые автоколебания с требуемыми параметрами.

Заключение

Предложенный метод синтеза двухкаскадной системы экстремального регулирования позволяет решить задачу автоматического поиска экстремума для широкого класса объектов, функционирующих в условиях действия внешних возмущений. При этом нелинейные характеристики динамической части и возмущения подавляются во внутреннем контуре регулятором, основанным на методе скользящих режимов.

Возникающие в качестве «побочного» эффекта автоколебания используются в качестве поисковых для оценки градиента экстремальной характеристики аналогично методу синхронного детектирования. Однако в отличие от классической схемы этого метода при использовании автоколебаний отсутствует необходимость введения в систему специального генератора поисковых колебаний.

Следует отметить, что способ синтеза систем экстремального регулирования с организацией скользящих режимов во внутреннем контуре ориентирован на класс объектов с релейным исполнительным механизмом. В настоящей работе расчетные соотношения для регуляторов двух каскадов представлены для динамических объектов второго порядка, но в дальнейшем могут быть распространены на объекты более высоких порядков.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Моросанов И.С**. Метод экстремального управления // Автоматика и телемеханика. – 1957. – № 18. – С. 1077–1092.
2. **Blackman P.F.** Extremum-seeking regulators // An exposition of adaptive control / ed. by J.H. Westcott. – New York: The Macmillan Company, 1962.
3. **Растригин Л.А.** Системы экстремального регулирования. – М.: Наука, 1974.
4. **Ariyur K.B., Krstic M.** Real-time optimization by extremum-seeking control. – New-Jersey: Wiley, 2003.
5. **Галкин Л.М., Карманов В.И., Стрюков С.М.** Автоматическая оптимизация рабочего режима термоэмиссионных преобразователей по давлению паров цезия // Автоматика и телемеханика. – 1984. – № 11. – С. 151–158.
6. **Востриков А.С., Уткин В.И., Французова Г.А.** Системы с производной вектора состояния в управлении // Автоматика и телемеханика. – 1982. – № 3. – С. 22–25.
7. **Востриков А.С.** Синтез систем регулирования методом локализации. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2007.
8. **Востриков А.С., Французова Г.А.** Теория автоматического регулирования. – М.: Юрайт, 2017.
9. **Уткин В.И.** Скользящие режимы в задачах оптимизации и управления. – М.: Наука, 1981.
10. **Французова Г.А.** Двухконтурные системы экстремального регулирования с формированием заданной динамики // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2008. – № 5. – С. 7–11.

11. **Frantsuzova G.A.** Application of relay controller for extremum seeking in nonlinear system // Proceedings of the IASTED International Conferences on "Automation, Control, and Information Technology (ACIT 2010)", 15–18 June, 2010. – Novosibirsk, 2010. – P. 111–115.
12. **Frantsuzova G.A.** Use of a relay controller for automatic extremum seeking in nonlinear systems // Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing. – 2011. – Vol. 47, iss. 3. – P. 274–280.
13. **Suvorov D.A., Frantsuzova G.A.** Cascaded extremum seeking system design with sliding modes organization // 2016 11th International forum on strategic technology, June 1–3, 2016, Novosibirsk, Russia: proceedings of IFOST-2016. – Novosibirsk: NSTU, 2016. – Pt. 1. – P. 590–593.
14. **Suvorov D.A., Frantsuzova G.A.** Two-cascaded gradient extremum closed loop with seeking self-oscillations // 2017 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON): Proceedings, Kazakhstan, Astana, June 29–30, 2017. – Astana, 2017. – P. 696–699.

SYNTHESIS OF THE TWO-CASCADE EXTREMUM-SEEKING SYSTEM WITH SLIDING MODES

Suvorov D.A., Frantsuzova G.A., Vostrikov A.S.
Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia

The synthesis procedure of the two-cascade extremum-seeking system for a dynamic object is discussed. This object has the following two components- a dynamic part and the static quality function of an extremum nature. In accordance to these features it is proposed to form a two-loop control where the inner contour contains a dynamic part, and the outer one contains the extremum characteristic. In order to suppress the effects of external disturbances, it is suggested to organize a sliding mode in the inner contour. It is shown that in this case controlled self-oscillations arise and they can be used as search oscillations to estimate the gradient of the quality function similar to the method of synchronous detection. It is recommended to use an integral controller based on gradient estimation in order to find an extremum of a required quality in the external circuit. It is proposed to accelerate the stabilization of the dynamic properties in the internal circuit but this acceleration leads to multirate processes. In this case, the study of the system properties is carried out using the method of motion separation. The synthesis procedure is described. It includes recommendations on selecting values of the controller's parameters and search oscillations as well as the corresponding auto-oscillations in the internal circuit. The presented results of simulation of the two-cascade system in MatLab illustrate the process of extremum seeking.

Keywords: extremum seeking, cascade control, sliding mode, localization method, differentiating devices, multirate processes.

DOI: 10.17212/1727-2769-2018-2-82-92

REFERENCES

1. Morosanov I.S. Metod ekstremal'nogo upravleniya [Extreme control method]. *Avtomatika i telemehanika – Automation and Remote Control*, 1957, no. 18, pp. 1077–1092. (In Russian).
2. Blackman P.F. Extremum-seeking regulators. *An exposition of adaptive control*. Ed. by J.H. Westcott. New York, The Macmillan Company, 1962.
3. Rastrigin L.A. *Sistemy ekstremal'nogo regulirovaniya* [Extremum-seeking control systems]. Moscow, Nauka Publ., 1974.
4. Ariyur K.B., Krstic M. *Real-time optimization by extremum-seeking control*. New-Jersey, Wiley, 2003.
5. Galkin L.M., Karmanov V.I., Stryukov S.M. Avtomaticheskaya optimizatsiya rabochego rezhima termoemissionnykh preobrazovatelei po davleniyu parov tseziya [Automatic optimization of the operating mode of thermionic converters for cesium vapor pressure]. *Avtomatika i telemehanika – Automation and Remote Control*, 1984, no. 11, pp. 151–158. (In Russian).

6. Vostrikov A.S., Utkin V.I., Frantsuzova G.A. Sistemy s proizvodnoi vektora so-stoyaniya v upravlenii [Systems with the derivative of the state vector in control]. *Avtomatika i telemehanika – Automation and Remote Control*, 1982, no. 3, pp. 22–25.
7. Vostrikov A.S. *Sintez sistem regulirovaniya metodom lokalizatsii* [Synthesis of control systems by localization method]. Novosibirsk, NSTU Publ., 2007.
8. Vostrikov A.S., Frantsuzova G.A. *Teoriya avtomaticheskogo regulirovaniya* [Theory of automatic control]. Moscow, Yurait Publ., 2017.
9. Utkin V.I. *Skol'zyashchie rezhimy v zadachakh optimizatsii i upravleniya* [Sliding modes in optimization and control tasks]. Moscow, Nauka Publ., 1981.
10. Frantsuzova G.A. Dvukhkonturnye sistemy ekstremal'nogo regulirovaniya s formirovaniem zadannoi dinamiki [Two-contour systems of extreme control with formation of given dynamics]. *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie – Mechatronics, Automation, Control*, 2008, no. 5, pp. 7–11.
11. Frantsuzova G.A. Application of relay controller for extremum seeking in nonlinear system. *Proceedings of the IASTED International Conferences on "Automation, Control, and Information Technology (ACIT 2010)"*, 15–18 June, 2010, Novosibirsk, pp. 111–115.
12. Frantsuzova G.A. Use of a relay controller for automatic extremum seeking in nonlinear systems. *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*, 2011, vol. 47, iss. 3, pp. 274–280.
13. Suvorov D.A., Francuzova G.A. Cascaded extremum seeking system design with sliding modes organization. *2016 11th International forum on strategic technology*, June 1–3, 2016, Novosibirsk, Russia: proceedings of IFOST-2016, pt. 1, pp. 590–593.
14. Suvorov D.A., Frantsuzova G.A. Two-cascaded gradient extremum closed loop with seeking self-oscillations. *2017 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON): Proceedings*, Kazakhstan, Astana, June 29–30, 2017, pp. 696–699.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Суворов Дмитрий Алексеевич – родился в 1991 году, аспирант кафедры автоматики Новосибирского государственного технического университета. Область научных интересов: синтез регуляторов для объектов с нестационарными параметрами. Опубликовано 8 научных работ. (Адрес: 630073, Россия, Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20. E-mail: oknorb1@yandex.ru).

Suvorov Dmitry Alekseevich (b. 1991) – postgraduated the automatics department, Novosibirsk State Technical University. His research interests are currently focused on designing controllers for non-stationary plants. He is the author of 8 research papers. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: oknorb1@yandex.ru).

Французова Галина Александровна – д-р техн. наук, профессор кафедры автоматики Новосибирского государственного технического университета. Область научных интересов: методы анализа и синтеза нелинейных систем управления с нестационарными параметрами. Опубликовано свыше 200 научных работ. (Адрес: 630073, Россия, Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20. E-mail: frants@ac.cs.nstu.ru).

Frantsuzova Galina Aleksandrovna – Doctor of Sciences (Eng.), professor at the automatics department, Novosibirsk State Technical University. Her research interests are currently focused on analysis and design methods for nonlinear control systems with non-stationary parameters. She is the author of more than 200 scientific papers. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: frants@ac.cs.nstu.ru).

Востриков Анатолий Сергеевич – д-р техн. наук, профессор кафедры автоматики Новосибирского государственного технического университета. Область научных интересов: методы анализа и синтеза нелинейных систем управления с нестационарными параметрами. Опубликовано свыше 300 научных работ. (Адрес: 630073, Россия, Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20. E-mail: vostrikov@sintez.nstu.ru).

Vostrikov Anatoliy Sergeevich – Doctor of Sciences (Eng.), professor at the automatics department, Novosibirsk State Technical University. Her research interests are currently focused on analysis and design methods for nonlinear control systems with non-stationary parameters. He is the author of more than 300 scientific papers. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: vostrikov@sintez.nstu.ru)

Статья поступила 12 марта 2018 г.
Received March 12, 2018

To Reference:

Suvorov D.A., Frantsuzova G.A., Vostrikov A.S. Sintez dvukhkaskadnoi sistemy avtomaticheskogo poiska ekstremuma so skol'zyashchimi rezhimami [Synthesis of the two-cascade extremum-seeking system with sliding modes]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii – Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2018, no. 2 (39), pp. 82–92. doi: 10.17212/1727-2769-2018-2-82-92.

ДОКЛАДЫ АН ВШ РФ
2018 апрель–июнь № 2 (39)

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

УДК 621.316.722.025

РЕГУЛЯТОР ПЕРЕМЕННОГО НАПРЯЖЕНИЯ С ПОФАЗНЫМИ КОММУТАТОРАМИ И ЦИФРОВОЙ СИСТЕМОЙ УПРАВЛЕНИЯ

А.В. Удовиченко[1], А.В. Сидоров[1], А.О. Бештинов[2]
[1]Новосибирский государственный технический университет
[2]ЗАО «Эрасиб»

В статье рассматривается бестрансформаторный регулятор переменного напряжения с пофазными коммутаторами, способный повышать напряжение без потери качества тока в системе. Такой преобразователь может быть использован для систем плавного пуска двигателей или в качестве стабилизатора напряжения. Предложена упрощенная топология регулятора, с одним ключом в фазе. Рассмотрена и проанализирована цифровая система бестрансформаторного регулятора переменного напряжения с пофазными коммутаторами, которая выполнена на базе микроконтроллера Atmel AVR Atmega. Приведены результаты эксперимента с цифровой системой управления. Также приведен аналитический расчет действующих значений по первым гармоникам токов и напряжений регулятора переменного напряжения с пофазными коммутаторами и его упрощенной версии.

Ключевые слова: регулятор переменного напряжения, повышающе-понижающий, бестрансформаторный, алгебраизация дифференциальных уравнений.

DOI: 10.17212/1727-2769-2018-2-93-105

Введение

В настоящее время существует несколько решений построения бестрансформаторных регуляторов переменного напряжения (РПН). Наиболее известные топологии регуляторов переменного напряжения:

- с двунаправленными ключами [1];
- с четырехквадрантными ключами [2, 3];
- с коммутируемым квази-импедансом источника питания [4];
- с входным конденсаторным делителем напряжения [5];
- с коммутируемыми и обходными конденсаторами [6];
- с высокочастотным АС-звеном [7, 8].

Топологии регуляторов переменного напряжения модернизируются исходя из следующих требований: повышение напряжения с коэффициентом усиления больше единицы, регулирование напряжения до номинальных величин, также стабилизация напряжения. В настоящее время большое внимание уделяется именно качеству тока и напряжения, что влечет за собой развитие существующих АС–АС-преобразователей до устройств улучшения качества электроэнергии, в том числе устройств мягкого пуска электродвигателей и стабилизаторов напряжения [9–10]. Вследствие этого регуляторы стали модернизировать новыми комбинациями реактивных элементов [11].

Так или иначе, баланс между эффективностью, надежностью, габаритами и стоимостью систем привел к развитию сразу нескольких областей построения регуляторов переменного напряжения.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-38-00262мол_а.

© 2018 А.В. Удовиченко, А.В. Сидоров, А.О. Бештинов

1. РПН с пофазными коммутаторами

Исходя из анализа структур регуляторов переменного напряжения[8], следует отметить, что преобразователи должны обладать малым числом полупроводниковых ключей и реактивных элементов, при этом обеспечивая все необходимые функции, присущие регуляторам.

Транзисторный регулятор переменного напряжения с пофазными коммутаторами представлен на рис. 1 [12, 13]. В качестве ключей S1 и S2 принимается встречно-параллельное включение *IGBT*-транзисторов, что представляет собой ключ переменного тока.

Коммутируя ключи реакторной и конденсаторной ветви, можно добиться регулирования напряжения на нагрузке с возможностью его повышения до 20 %. При этом качество электроэнергии остается высоким при малых и средних значениях этих показателей.

Кроме того данный регулятор может быть упрощен до варианта без ключа переменного тока в конденсаторной ветви (рис. 2).

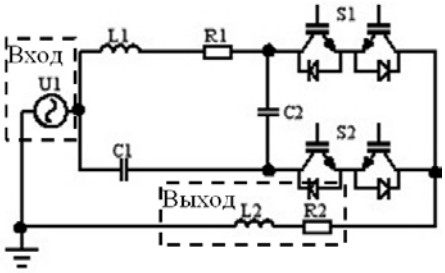


Рис. 1 – Регулятор переменного напряжения с пофазными коммутаторами

Fig. 1 – An AC voltage regulator with per phase switches

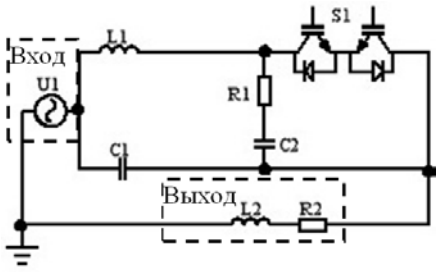


Рис. 2 – Упрощенный регулятор переменного напряжения с коммутируемым реактором

Fig. 2 – A simplified AC voltage regulator with switched reactor

Демпфирующий резистор R_1 и демпфирующий конденсатор C_2 необходимы, чтобы во время выключения ветви с реактором накопленная в нем энергия перенаправилась в демпфирующую ветвь.

Трехфазный вариант такого регулятора представляет собой три параллельно включенных РПН с соответствующей нагрузкой, которой может являться двигатель. Предлагаемый бестрансформаторный регулятор переменного напряжения с пофазными коммутаторами свободен от ограничений типовых устройств плавного пуска [14], содержащих встречно-параллельные тиристоры: пониженные энергетические показатели во время пуска, что связано с несинусоидальностью форм выходных напряжений и выходных и входных токов, а также с наличием сдвига фазы тока относительно напряжения, увеличивающегося по мере регулирования вниз выходного напряжения; ограниченный сверху единицей коэффициент преобразования по напряжению, не позволяющий сохранять номинальное напряжение на выходе регулятора при снижении входного напряжения.

2. Аналитический расчет

В предлагаемой работе оценка качественных характеристик производится при помощи прямого метода расчета алгебраизации дифференциальных уравнений (АДУ2) [15]. Также нами построена математическая модель регулятора, изображенного на рис. 1, по первой гармонике.

Для обоих состояний схемы (когда ключ S1 или S2 замкнут) мы записали дифференциальные уравнения (1):

$$\begin{cases} L_2 \dfrac{di_2}{dt} + R_2 i_2 - u_{c1} - \psi u_{c2} = u_1, \\ L_1 \dfrac{di_{L1}}{dt} + R_1 i_{L1} + u_{c1} + u_{c2} = 0, \\ C_1 \dfrac{du_{c1}}{dt} + i_2 - i_{L1} = 0, \\ C_2 \dfrac{du_{c2}}{dt} + \psi i_2 - i_{L1} = 0. \end{cases} \quad (1)$$

Было выведено соотношение первой гармоники спектра коммутационной функции,которое имеет вид

$$\psi_{(1)} = M_1 + \frac{1}{\pi}\sin(2\pi M_1)\cos(2\pi ft) - \frac{1}{\pi}\left(\cos(2\pi M_1) - 1\right)\sin(2\pi ft). \quad (2)$$

Здесь f – частота коммутации ключей, $M_1 = 1 - M$, M – глубина модуляции.

При алгебраизации дифференциальных уравнений все переменные системы уравнений раскладываются на гармонические функции по методу АДУ2, затем расщепляются первые гармоники на активные (а) и реактивные (р) составляющие, ортогональные друг другу. После усреднения за период первой гармоники получаем систему алгебраических уравнений для синусных и косинусных составляющих, записанную в матричной форме:

$$\begin{vmatrix} R_2 & 0 & -1 & -\psi_{\sin} & \omega L_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_1 & 1 & 1 & 0 & \omega L_1 & 0 & 0 \\ 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & \omega C_1 & 0 \\ \psi_{\sin} & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \omega C_2 \\ \omega L_2 & 0 & 0 & 0 & -R_2 & 0 & 1 & \psi_{\cos} \\ 0 & \omega L_1 & 0 & 0 & 0 & -R_1 & -1 & -1 \\ 0 & 0 & \omega C_1 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \omega C_2 & -\psi_{\cos} & 1 & 0 & 0 \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} I_{2(1)\text{a}} \\ I_{L1(1)\text{a}} \\ U_{C1(1)\text{a}} \\ U_{C2(1)\text{a}} \\ I_{2(1)\text{p}} \\ I_{L1(1)\text{p}} \\ U_{C1(1)\text{p}} \\ U_{C2(1)\text{p}} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} U_{1(1)\text{a}} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{vmatrix}. \quad (3)$$

Отсюда можно найти значения токов и напряжений системы и построить зависимость первой гармоники выходного напряжения от глубины модуляции – регулировочная характеристика $U^*_{2(1)} = f_1(M)$ (рис. 3), а также зависимость первой гармоники выходного напряжения от первой гармоники выходного тока – внешняя характеристика регулятора $U^*_{2(1)} = f_1\left(I^*_{2(1)}\right)$ (рис. 4) (где $U^*_{2(1)}$ – относительная величина, взятая по отношению к входному напряжению U_1, а $I_{2(1)}$ – относительная величина, взятая по отношению к базовому току $I_{\text{б}} = U_1 \big/ \sqrt{L_1 / C_1}$). Также зная активную и реактивную составляющую тока нагрузки, можно определить зависимость входного коэффициента сдвига тока по первой гармонике относительно входного напряжения – входной коэффициент мощности $\cos\varphi_{1(1)} = f_1(M)$.

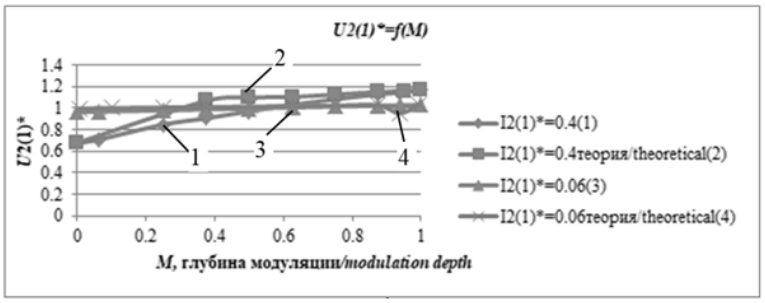


Рис. 3 – Регулировочные характеристики РПН с пофазными коммутаторами

Fig. 3 – RAV characteristics with per phase switches control

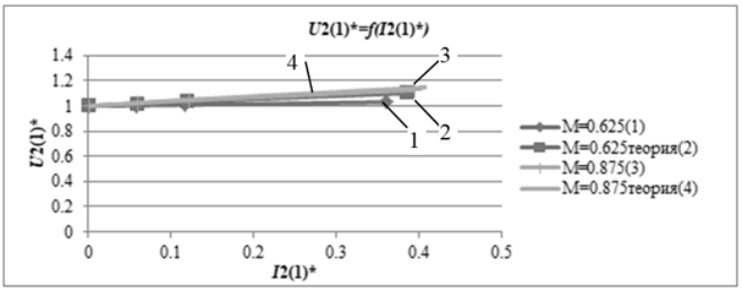


Рис. 4 – Внешние характеристики РПН с пофазными коммутаторами

Fig. 4 – RAV external characteristics with per phase switches

Построенные регулировочные и внешние характеристики приведены совместно с соответствующими характеристиками, полученными в программе моделирования PSIM (под номерами 1, 3). Как видно из характеристик, рабочий диапазон повышения напряжения находится в пределах M = [0,65; 1], при этом максимальное значение выходного напряжения достигает 1,2 кратного увеличения при достаточно высоком качестве. Была произведена оценка качества выходного напряжения и построена зависимость коэффициента гармоник напряжения от глубины модуляции (рис. 5).

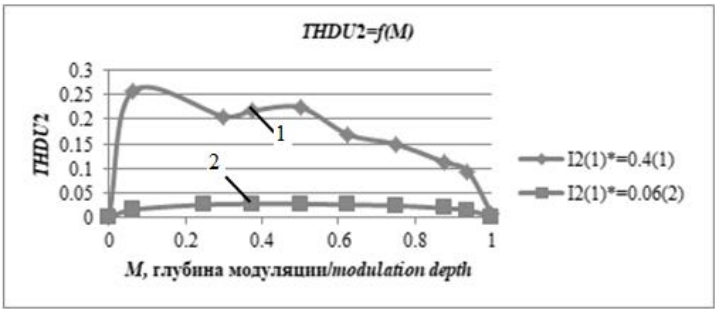


Рис. 5 – Коэффициент гармоник выходного напряжения РПН с пофазными коммутаторами

Fig. 5 – RAV output voltage THD with per phase switches

Повышенное выходное напряжение достигается в диапазоне глубины модуляции M = [0,65; 1], на более низких уровнях глубины модуляции можно получить стабилизированное, как видно из рис. 4.

Для построения математической модели регулятора переменного напряжения с коммутируемым реактором по первой гармонике, как и ранее, воспользуемся прямым методом расчета АДУ2.

Система уравнений схемы для обоих ее состояний с использованием аналитической записи первых гармоник коммутационной функции по методу АДУ2 имеет вид

$$\begin{vmatrix} -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & \omega C_1 & 0 \\ \psi_{\sin} & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\omega C_1 & \psi'_{\sin}\omega C_2 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & \omega L_1 & 0 & 0 & R_1\omega C_2 \\ 0 & R_2 & -1 & 0 & 0 & \omega L_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \omega C_1 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\omega C_1 & \psi'_{\cos}\omega C_2 & -\psi_{\cos} & 1 & 0 & 0 \\ \omega L_1 & 0 & 0 & R_1\omega C_2 & 0 & 0 & -1 & -1 \\ 0 & \omega L_2 & 0 & 0 & 0 & -R_2 & 1 & 0 \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} I_{1(1)\mathrm{a}} \\ I_{2(1)\mathrm{a}} \\ U_{C1(1)\mathrm{a}} \\ U_{C2(1)\mathrm{a}} \\ I_{1(1)\mathrm{p}} \\ I_{2(1)\mathrm{p}} \\ U_{C1(1)\mathrm{p}} \\ U_{C2(1)\mathrm{p}} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ U_{1(1)\mathrm{a}} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{vmatrix}, \quad (4)$$

где $\psi'_{\cos} = 1 - \psi_{\cos}$ и $\psi'_{\sin} = 1 - \psi_{\sin}$.

Спектр коммутационной функции (2) используется тот же, что и в регуляторе, изображенном на рис. 1.

Методика расчета аналогична той, что приведена ранее. По ее результатам были получены действующие значения первых гармоник токов и напряжений и построено семейство внешних характеристик (рис. 6), где $I_б = U_1 / \sqrt{L_1 / C_1}$.

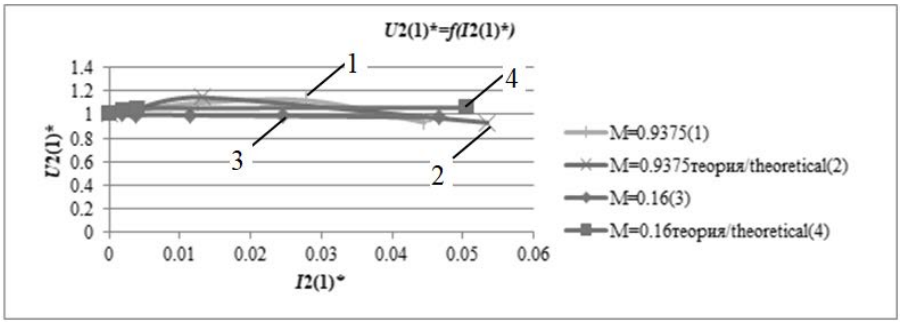


Рис. 6 – Внешние характеристики РПН с коммутируемым реактором

Fig. 6 – RAV external characteristics with a switched reactor

Как видно из внешней характеристики, повышение выходного напряжения происходит вплоть до $I_2 / I_б = 0,06$ при значении M, близком к единице, при этом максимальное значение выходного напряжения до 1,15 раза больше входного при достаточно высоком качестве.

Приведенные характеристики совмещены с соответствующими характеристиками, полученными в модели программы PSIM.

Кроме того, по полученным данным в процессе моделирования была снята зависимость входного коэффициента мощности от глубины модуляции (рис. 7) и оценено качество входного тока, которое представлено в виде зависимостей коэффициента гармоник тока от глубины модуляции (рис. 8).

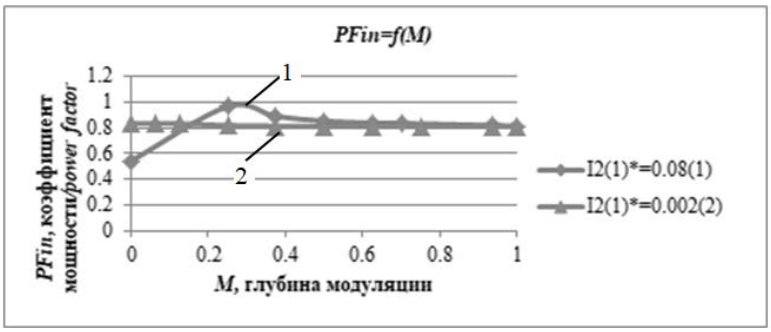


Рис. 7 – Входной коэффициент мощности РПН с коммутируемым реактором

Fig. 7 – RAV input power factor with a switched reactor

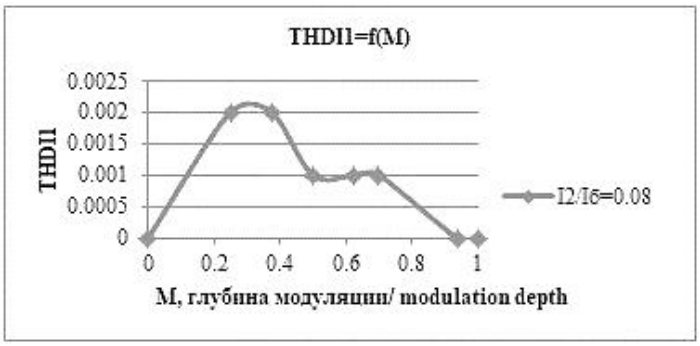


Рис. 8 – Коэффициент гармоник входного тока РПН с коммутируемым реактором

Fig. 8 – THD of RAV input current with switched reactor current

Качество входного тока и выходного напряжения, оцененное их коэффициентами гармоник, составило менее 5 %, как видно из рисунков. Это удовлетворяет требованиям ГОСТ 32144–2013.

3. Результаты моделирования

Нами получены временные диаграммы входных и выходных токов и напряжений при помощи программы моделирования PSIM для транзисторного регулятора переменного напряжения с двумя ключами переменного тока (рис. 9).

На рис. 10 приведены временные диаграммы токов и напряжений для упрощенного транзисторного регулятора переменного напряжения с коммутируемым реактором. Далее эти осциллограммы будут сопоставлены с соответствующими графиками, полученными уже в экспериментальном макете. Стоит отметить, что исходя из эпюр видно, что ток нагрузки I_{nA} синусоидален и не содержит высокочастотных составляющих.

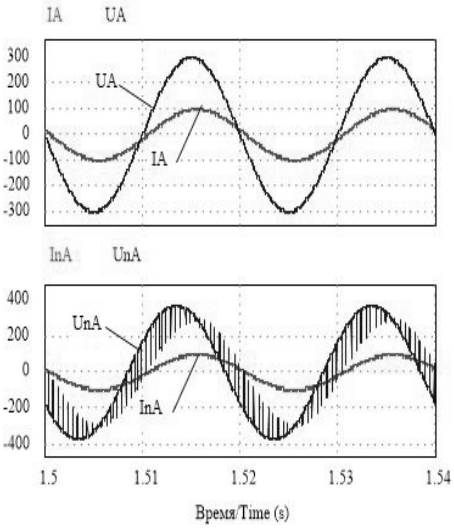


Рис. 9 – Эпюры входных и выходных токов и напряжений

Fig. 9 – Input and output voltage and current diagrams

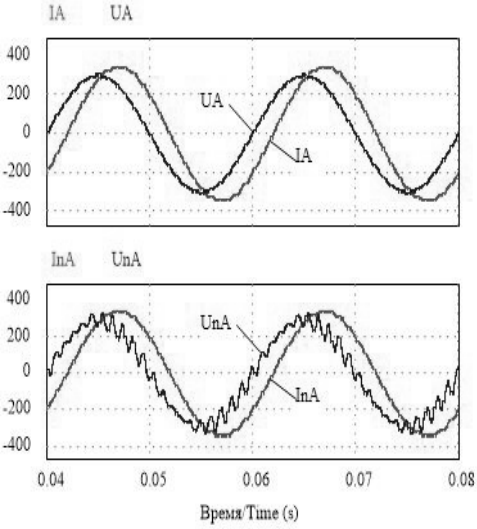


Рис. 10 – Временные диаграммы токов и напряжений упрощенного регулятора с коммутируемым реактором

Fig. 10 – Input and output voltage and current diagrams of a simplified regulator with a switched reactor

4. Цифровая система управления

При разработке макета регулятора переменного напряжения с пофазными коммутаторами (рис. 11) основное внимание было уделено его цифровой системе управления (рис. 12).

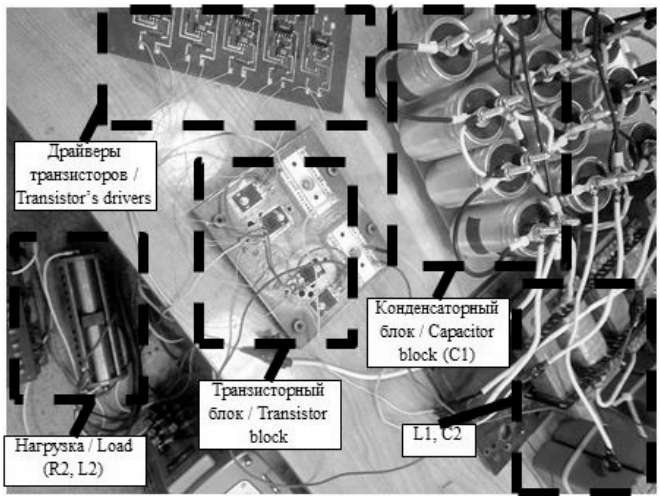


Рис. 11 – Макет регулятора переменного напряжения с пофазными коммутаторами

Fig. 11 – A model of an AC voltage regulator with per phase switches

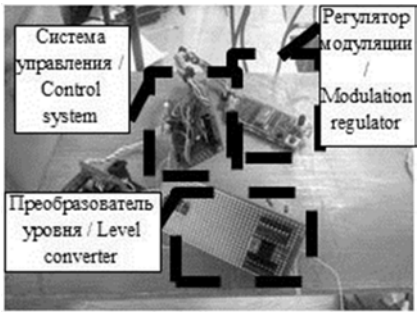


Рис. 12 – Система управления на базе микроконтроллера Atmel AVR Atmega 128A

Fig. 12 – A control system based on the Atmel AVR Atmega 128A microcontroller

Программирование выполнялось на языке СИ в программе редакторе и компиляторе WINAVR с использованием программатора AVR910 [16]. В качестве микроконтроллера был выбран Atmel AVR Atmega 128A [17]. Данный микроконтроллер удовлетворяет всем требованиям, имеющий в своем составе два таймер/счетчика с ШИМ, а также наличие АЦП, с помощью которого возможна реализация регулятора модуляции. Таймер 1 отвечает за ШИМ, таймер 0 – за индикацию. Индикатор показывает текущее задание на модуляцию. Стоит отметить, что на выходе системы управления установлен буфер, усиливающий выходной ток импульса управления транзистором, а также преобразователь уровня с 5 В до 15 В. Это необходимое условие при работе с предлагаемой системой управления.

Алгоритм данной системы

1. Настройка программатора для его согласования с контроллером.

2. Настройка таймеров под широтно-импульсную модуляцию, дополнительную задержку на выдачу импульсов, индикацию уровня модуляции.

3. Инициализация АЦП под регулятор модуляции.

4. Инициализация таймера 1, формирующего ШИМ с частотой 1,8 кГц.

5. Основная функция: реализация слежения за напряжением по внешнему прерыванию int4. Прерывание срабатывает по переднему фронту; формирование сигнала задания, по факту поступления сигнала на АЦП с ручки управления (переменный резистор формирует напряжение от 0 до 5 В). При превышении заданного уровня напряжения нагрузки выставляется флаг, по которому сигнал задания снижается и фиксируется до установленного значения.

5. Результаты эксперимента

Пример работы макета с данной системой управления показан на рис. 13 и 14. Экспериментальный макет регулятора переменного напряжения с пофазными коммутаторами запускался при разных входных и выходных параметрах. При работе на входном напряжении $U_{вх} = 33$ В, нагрузка выбрана $R_2 = 6$ Ом, $L_2 = 77$ мГн. Данные элементов самого регулятора: $L_1 = 812$ мкГн, $C_1 = 40$ мкФ, $C_2 = 4$ мкФ. Выходное напряжение при этом было повышено до 39 В. При входном напряжении 18,9 В выходное было повышено до 23,6 В. Напряжение и ток нагрузки регулятора, управляемого данной системой управления при данных параметрах, показаны на рис. 13. Также были сняты осциллограммы с меньшей по величине индуктивностью $L_2 = 1,4$ мГн и большими по величине емкостями $C_1 = 160$ мкФ, $C_2 = 8$ мкФ. Результаты этого эксперимента представлены на рис. 14.

Также был снят в компьютерной модели коэффициент полезного действия в рабочем режиме регулятора, который достигает 0,95 %. Построена зависимость КПД от глубины модуляции (рис. 15).

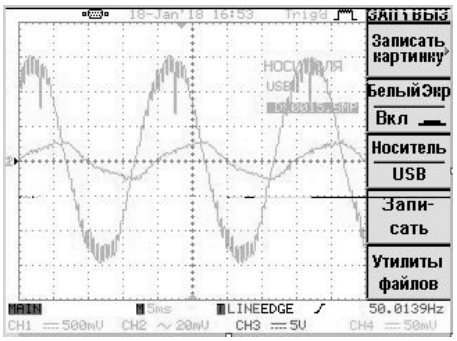


Рис. 13 – Эпюры выходного тока и напряжения при L_1 = 812 мкГн, C_1 = 40 мкФ, C_2 = 4 мкФ

Fig. 13 – Output voltage and current diagrams (L_1 = 812 uH, C_1 = 40 uF, C_2 = 4 uF)

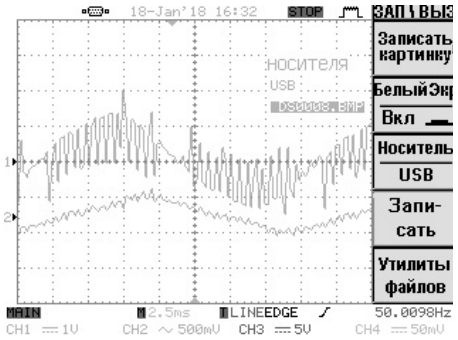


Рис. 14 – Эпюры выходного тока и напряжения при L_1 = 1,4 мГн, C_1 = 160 мкФ, C_2 = 8 мкФ

Fig. 14 – Output voltage and current diagrams (L_1 = 1.4 mH, C_1 = 160 uF, C_2 = 8 uF)

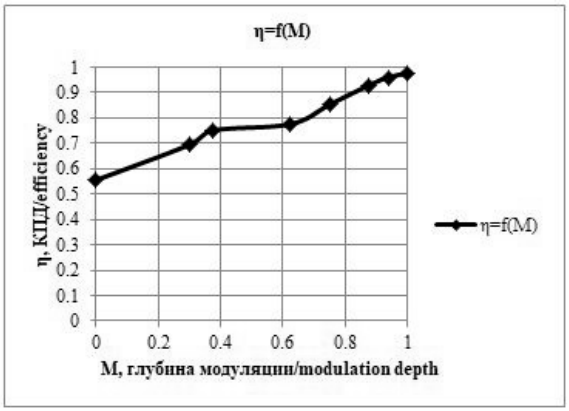


Рис. 15 – КПД регулятора

Fig. 15 – Regulator efficiency

Заключение

Таким образом, в ходе выполнения работы нами было построено расширение прямого метода расчета (АДУ2) действующих значений токов и напряжений, приводящее к дифференциальным уравнениям с периодическими разрывными коэффициентами. По результатам этого метода расчета переменных состояний были построены энергетические характеристики и оценено качество напряжения и тока. А также получены уравнения для первых гармоник всех переменных состояний выходных переменных, по результатам которых построены основные характеристики регулятора: внешние, регулировочные при помощи разложения переменных коэффициентов в ряд Фурье. Построенные характеристики, совмещенные с характеристиками, построенными по результатам моделирования программы PSIM, совпали от 90 до 99 %.

ЛИТЕРАТУРА

1. AC-AC single phase matrix converter with harmonic filter and boost characteristics: a study / M.F.M. Zin, A. Idris, M.N. Seroji, N. Hamzah // 2012 IEEE Student Conference on Research and Development, SCOReD. – Penang, 2012. – P. 166–171.
2. A fast AC voltage regulator / N. Vazquez, A. Velazquez, C. Hernandez, E. Rodríguez, R. Orosco // 2008 IEEE International Power Electronics Congress – CIEP. – Mexico Morelos, 2008. – P. 162–166.
3. **Vazquez N., Velazquez A., Hernandez C.** AC voltage regulator based on the AC-AC buck-boost converter // 2007 IEEE International Symposium on Industrial Electronics, ISIE. – Vigo, Spain, 2007. – P. 533–537.
4. **Zinoviev G.S., Udovichenko A.V.** New family of AC regulators with the switched quasi-impedance of power supply or load // 14th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM 2013), Altai, Erlagol, 1–5 July 2013. – Novosibirsk, 2013. – P. 377–381.
5. **Zinoviev G.S., Udovichenko A.V., Maksimenko V.N.** Energy saving devices for soft start-up of alternative-voltage motors // Proceedings of the 2009 International Forum on Strategic Technologies: IFOST 2009, October 21–23, 2009, Ho Chi Minh City, Vietnam. – Ho Chi Minh City, 2009. – P. 262–266.
6. A novel circuit topology of three-phase direct AC-AC PWM voltage regulator / N.A. Ahmed, M. Miyatake, H.W. Lee, M. Nakaoka // Conference Record of the 2006 IEEE Industry Applications Conference Forty-First IAS Annual Meeting. – 2006. – Vol. 4. – P. 2076–2081.
7. **Keyhani H., Toliyat H.A.** A soft-switched three-phase AC–AC converter with a high-frequency AC link // IEEE Transactions on Industry Applications. – 2014. – Vol. 50, iss. 4. – P. 2637–2647.
8. **Sidorov A.V.** AC voltage regulators review // 17th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM), Erlagol, Altai, 30 June – 4 July, 2016: proceedings. –Novosibirsk, 2016. – P. 563–572.
9. **Zinoviev G.S., Udovichenko A.V.** Power-efficient smooth-start devices in alternating-current engines // Russian Electrical Engineering. – 2009. – Vol. 80, N 12. – P. 691–694.
10. **Udovichenko A.V.** New transformerless AC voltage regulators as devices to improve of power quality // 12th International Conference on Actual Problems of Electronics Instrument Engineering: proceedings APEIE-2014. – Novosibirsk, 2014. – Vol. 1. – P. 766–769.
11. **Zinoviev G.S., Udovichenko A.V.** AC voltage regulators with switched capacitors // IEEE International Power Electronics and Motion Control Conference (PEMC). – Varna, 2016. – P. 44–49.
12. **Zinoviev G.S., Udovichenko A.V.** Transformerless step-up regulators of the alternating voltage with sinusoidal input and output currents // Technical Electrodynamics. – 2012. – N 3. – P. 69–70.
13. **Зиновьев Г.С., Сидоров А.В., Удовиченко А.В.** Повышающе-понижающие регуляторы переменного напряжения с улучшенной электромагнитной совместимостью // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2013. – № 6. – С. 53–57.
14. **Браславский И.Я.** Асинхронный полупроводниковый электропривод с параметрическим управлением. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 224 с.
15. **Зиновьев Г.С.** Основы силовой электроники. – 5-е изд. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2012. – 667 с.
16. **Евстифеев А.В.** Микроконтроллеры AVR семейств Tiny и Mega фирмы ATMEL. – 2-е изд., стер. – М.: Додэка-XXI, 2005. – 560 с.
17. Datasheet Atmega 128 [Electronic resource]. – URL: http://ww1.microchip.com/ downloads/ en/devicedoc/doc2467.pdf (accessed: 08.06.2018).

AC VOLTAGE REGULATOR WITH PHASE SWITCHES AND A DIGITAL CONTROL SYSTEM

Udovichenko A.V., Sidorov A.V., Beshtinov A.O.
Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia

The transformerless AC voltage regulator with phase-to-phase commutators is considered. The regulator is able to increase the voltage without loss of current quality in the system. Such converterы can be used for soft start systems of motors or as a voltage regulator. A simplified topology of the regulator with one key in the phase is proposed. A digital system of an AC transformerless regulator with phase-shift switches is considered and analyzed. This digital system is based on the Atmel AVR Atmega microcontroller. The results of the experiment with a digital control system are shown. An analytical calculation of the effective values for the first harmonics of the currents and voltages of the AC voltage regulator with phase-shift switches and its simplified version are also given.

Keywords: AC voltage regulator, buck-boost, transformerless, algebraization of differential equations.

DOI: 10.17212/1727-2769-2018-2-93-105

REFERENCES

1. Zin M.F.M., Idris A., Seroji M.N., Hamzah N. AC-AC single phase matrix converter with harmonic filter and boost characteristics: a study. *2012 IEEE Student Conference on Research and Development, SCOReD*, Penang, 2012, pp. 166–171.
2. Vazquez N., Velazquez A., Hernandez C., Rodríguez E., Orosco R. A fast AC voltage regulator. *2008 IEEE International Power Electronics Congress – CIEP*, Mexico Morelos, 2008, pp. 162–166.
3. Vazquez N., Velazquez A., Hernandez C. AC voltage regulator based on the AC-AC buck-boost converter. *2007 IEEE International Symposium on Industrial Electronics, ISIE*, Vigo, Spain, 2007, pp. 533–537.
4. Zinoviev G.S., Udovichenko A.V. New family of AC regulators with the switched quasi-impedance of power supply or load. *14th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM 2013)*, Altai, Erlagol, 1–5 July 2013, pp. 377–381.
5. Zinoviev G.S., Udovichenko A.V., Maksimenko V.N. Energy saving devices for soft start-up of alternative-voltage motors. *Proceedings of the 2009 International Forum on Strategic Technologies: IFOST 2009*, October 21–23, 2009, Ho Chi Minh City, Vietnam. – Ho Chi Minh City, 2009. – P. 262–266.
6. Ahmed N.A., Miyatake M., Lee H.W., Nakaoka M. A novel circuit topology of three-phase direct AC-AC PWM voltage regulator. *Conference Record of the 2006 IEEE Industry Applications Conference Forty-First IAS Annual Meeting*, 2006, vol. 4, pp. 2076–2081.
7. Keyhani H., Toliyat H.A. A soft-switched three-phase AC–AC converter with a high-frequency AC link. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2014, vol. 50, iss. 4, pp. 2637–2647.
8. Sidorov A.V. AC voltage regulators review. *17th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM)*, Erlagol, Altai, 30 June – 4 July, 2016: proceedings, pp. 563–572.
9. Zinoviev G.S., Udovichenko A.V. Power-efficient smooth-start devices in alternating-current engines. *Russian Electrical Engineering*, 2009, vol. 80, no. 12, pp. 691–694.
10. Udovichenko A.V. New transformerless AC voltage regulators as devices to improve of power quality. *12th International Conference on Actual Problems of Electronics Instrument Engineering: proceedings APEIE-2014*, Novosibirsk, 2014, vol. 1, pp. 766–769.

11. Zinoviev G.S., Udovichenko A.V. AC voltage regulators with switched capacitors. *IEEE International Power Electronics and Motion Control Conference (PEMC)*, Varna, 2016, pp. 44–49.
12. Zinoviev G.S., Udovichenko A.V. Transformerless step-up regulators of the alternating voltage with sinusoidal input and output currents. *Technical Electrodynamics*, 2012, no. 3, pp. 69–70.
13. Zinoviev G.S., Sidorov A.V., Udovichenko A.V. Povyshayushche-ponizhayushchie regulyatory peremennogo napryazheniya s uluchshennoi elektromagnitnoi sovmestimost'yu [Buck-boost AC voltage regulators with improved electromagnetic compatibility]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Elektromekhanika – Russian Electromechanics*, 2013, no. 6, pp. 53–57. (In Russian).
14. Braslavskii I.Ya. *Asinkhronnyi poluprovodnikovyi elektroprivod s parametricheskim upravleniem* [Asynchronous semiconductor electric drive with parametric control]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1988. 224 p.
15. Zinoviev G.S. *Osnovy silovoi elektroniki* [Power electronics]. 5th ed. Moscow, NSTU Publ., 2012. 667 p.
16. Evstifeev A.V. *Mikrokontrollery AVR semeistv Tiny i Mega firmy ATMEL* [The families of AVR Tiny and Mega ATMEL]. 2nd ed. Moscow, Dodeka-XXI Publ., 2005. 560 p.
17. *Datasheet Atmega 128*. Available at: http://ww1.microchip.com/downloads/en/devicedoc/doc2467.pdf (accessed 08.06.2018).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Удовиченко Алексей Вячеславович – родился в 1987 году, канд. техн. наук, доцент кафедры электроники и электротехники, Новосибирский государственный технический университет. Область научных интересов: энергоэффективные регуляторы переменного напряжения, плавный пуск двигателей, силовая электроника. Опубликовано 44 научные работы. (Адрес: 630073, Россия, Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20. E-mail: udovichenko@corp.nstu.ru).

Udovichenko Aleksey Vyacheslavovich (b. 1987) – Candidate of Sciences (Eng.), associate professor at the electronics and electrical engineering department, Novosibirsk State Technical University. His research interests are currently focused on energy-efficient AC voltage regulators, soft-start of engines, and power electronics. He is the author of 44 scientific papers. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: udovichenko@corp.nstu.ru).

Сидоров Андрей Викторович – родился в 1989 году, аспирант кафедры электроники и электротехники, инженер 2-й категории Института силовой электроники, Новосибирский государственный технический университет. Область научных интересов: регуляторы переменного напряжения, силовые электронные трансформаторы. Опубликовано 14 научных работ. (Адрес: 630073, Россия, Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20. E-mail: Sidorov_corp@mail.ru).

Sidorov Andrey Victorovich (b. 1989), postgraduate student at the electronics and electrical engineering department, Novosibirsk State Technical University, a 2 category engineer in the Power Electronics Institute, Novosibirsk State Technical University. His research interests are currently focuswed on ac voltage regulators and power electronic transformers. He is the author of 14 scientific papers. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: Sidorov_corp@mail.ru).

Бештинов Амыр Олегович – родился в 1993 году, инженер-конструктор ЗАО «Эрасиб». Область научных интересов: микропроцессорные системы управления. (Адрес: 630073, Россия, Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20. E-mail: amyr.beshtinov.93@mail.ru).

BeshtinovAmyrOlegovich (b. 1989), engineer-designer of the Erasib company CJSC. His research interests are currently focused on microprocessor control systems. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia, Russia. E-mail: amyr.beshtinov.93@mail.ru).

Статья поступила 29 января 2018 г.
Received January 29, 2018

To Reference:

Udovichenko A.V., Sidorov A.V., Beshtinov A.O. Regulyator peremennogo napryazheniya s pofaznymi kommutatorami i tsifrovoi sistemoi upravleniya [AC voltage regulator with phase switches and a digital control system]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii – Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2018, no. 2 (39), pp. 93–105. doi: 10.17212/1727-2769-2018-2-93-105.

ДОКЛАДЫ АН ВШ РФ
2018 апрель–июнь № 2 (39)

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

УДК 621.313.323

СНИЖЕНИЕ ПУЛЬСАЦИЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО МОМЕНТА СИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С МОДУЛИРОВАННЫМ МАГНИТНЫМ ПОТОКОМ И ГЛАДКИМ ГАРМОНИЧЕСКИМ РОТОРОМ

А.Ф. Шевченко, Л.Г.Шевченко
Новосибирский государственный технический университет

Для высокоточных приводов большое значение имеет постоянство электромагнитного момента, создаваемого электрическим двигателем. Пульсации электромагнитного момента могут возникнуть вследствие различных независимых причин. В данной работе рассматриваются пульсации момента, вызванные особенностью распределения обмотки статора в воздушном зазоре и ступенчатости реальной кривой МДС. При этом ток в фазах двигателя формируется по определенному закону. В качестве объекта исследования использовался синхронный двигатель с модулированным магнитным потоком и гладким гармоническим ротором. Для определения и исследования электромагнитного момента была создана математическая модель, реализованная в среде MathCAD. В созданной модели электромагнитный момент определялся через изменение энергии магнитного поля. Аналитическое выражение для энергии поля было получено ранее с использованием метода конформного преобразования. Исследовано влияние формы тока фаз обмотки статора на электромагнитный момент, в результате которого были выявлены пульсации максимального электромагнитного момента, составляющие 7,36 % от среднего значения момента. Для уменьшения пульсаций момента было предложено в закон изменения тока фаз обмотки статора ввести модулирующий коэффициент в виде гармонического ряда. Это позволило скорректировать пульсации максимального электромагнитного момента до 0,28 % от среднего значения.

Ключевые слова: электромагнитный момент, форма тока, модулирующий коэффициент, энергия поля.

DOI: 10.17212/1727-2769-2018-2-106-115

Введение

При построении высокоточных электроприводов большое значение придается постоянству создаваемого двигателем электромагнитного момента, т. е. отсутствию пульсаций момента. Пульсации момента в электрических машинах возникают по целому ряду независимых причин: из-за особенностей распределения обмотки в воздушном зазоре и ступенчатости реальной кривой МДС; из-за зубчатости поверхности воздушного зазора и залипания ротора; из-за несинусоидальности питающего напряжения; из-за магнитной, либо другой несимметрии, допущенной в конструкции электрической машины. Первые причины возникновения пульсаций момента считаются до определенной степени неизбежными. Невозможно выполнить электрическую машину без зубцов и с идеально распределенной обмоткой, не пожертвовав при этом другими рабочими качествами машины. Последняя причина – несимметрия электрической машины является в большей степени технологической, чем конструктивной. За редким исключением все электрические машины проектируются полностью симметричными.

В данной работе рассматривается один из методов уменьшения пульсаций момента, вызванных особенностью распределения обмотки в воздушном зазоре и ступенчатости реальной кривой МДС, в основе которого лежит формирование тока в фазах двигателя, изменяющегося по определенному закону. В качестве

© 2018 А.Ф. Шевченко, Л.Г. Шевченко

объекта, на примере которого производилось исследование, используется синхронный двигатель с модулированным магнитным потоком и гладким гармоническим ротором. Обмотка статора двигателя выполнена из отдельных катушек, размещенных на зубцах статора, ротор – явнополюсный, с числом полюсов, как правило, равным двум. По обмоткам статора наряду с переменными составляющими протекает и постоянная составляющая тока.

Рассматриваемый двигатель имеет шестифазное исполнение с дробной зубцовой обмоткой с $q = 1/2$ на статоре. Переменная величина воздушного зазора между статором и ротором обеспечивает гармоническое изменение проводимости воздушного зазора. Магнитная система и распределение магнитного поля в шестифазном двигателе с вентильным подмагничиванием приведены на рис. 1. Принцип действия такого двигателя подробно изложен в работах [1, 2].

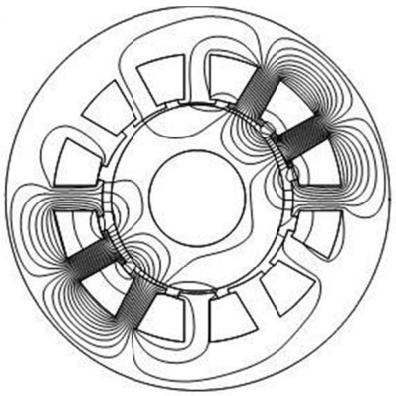


Рис. 1 – Магнитная система и распределение магнитного поля в шестифазном двигателе с вентильным подмагничиванием

Fig. 1 – Magnetic system and field distribution in a six-phase synchronous motor with switched magnetization

1. Математическая модель для расчета электромагнитного момента

Исходя из допущения, что магнитная система рассматриваемого двигателя линейна (а для линейной системы энергия магнитного поля равна Q-энергии), электромагнитный момент можно записать через изменение энергии магнитного поля следующим образом [3, 4]:

$$M = \left.\frac{\partial W}{\partial \theta}\right|_{\text{при } I_k = \text{const}}, \qquad (1)$$

где ∂W – изменение энергии магнитного поля в воздушном зазоре; $\partial\theta$ – изменение угла поворота ротора; I_k – фиксированные токи в катушках обмотки статора.

В основе аналитического расчета энергии магнитного поля, входящей в формулу (1), лежит метод конформного отображения, при котором сложная исходная область воздушного зазора рассматриваемого двигателя преобразуется в кольцевую область [5]. В кольцевой области определяется потенциал поля из решения уравнения Лапласа методом разделения переменных. А так как энергия есть инвариант относительно конформного преобразования, то для ее определения использовались формулы индукции и напряженности магнитного поля в кольцевой области. В результате для кольцевой области была получена формула энергии

$$W = \pi\mu_0 l \sum_{n=-\infty}^{\infty} \frac{n g_n g_{-n}}{\left(1-\rho_0^{2n}\right)^2}\left(1-\rho_0^{4n}\right), \qquad (2)$$

где ρ_0 – радиус кольца ротора; l – длина двигателя; g_n, g_{-n} – коэффициенты Фурье.

Коэффициент Фурье g_n зависит от угла θ:

$$g(n,\theta)=\frac{i}{\pi n^2}\left[\sum_{k=1}^{Nhalf-1}\frac{f_k-f_{k-1}}{d(k,\theta)}\sin\left(\frac{nd(k,\theta)}{2}\right)w\left(z_k e^{2i\theta}\right)^n+\right.$$

$$\left.+\frac{f_{Nhalf-1}-f_0}{d(0,\theta)}\sin\left(\frac{nd(0,\theta)}{2}\right)w\left(z_0 e^{2i\theta}\right)^n\right], \qquad (3)$$

где $d(k,\theta)=\left|wp\left(z_k e^{2i\theta}\right)\right|2b_n$ – ширина паза статора в кольцевой области воздушного зазора; wp – функция конформного преобразования; $z_k=e^{2i\left(tz\cdot k+\frac{b_n}{2}\right)}$, t_z, b_n – координаты центров пазов, зубцовое деление и ширина паза статора в исходной области воздушного зазора; f_k, f_{k-1} – потенциалы соседних зубцов статора; $Nhalf$ – число зубцов статора на половину машины; θ – угол поворота катушек статора относительно ротора.

Расчет электромагнитного момента двигателя с использованием формул (1)–(3) возможен только численными методами, которые легко реализуются в системе Mathcad. Поэтому для проведения необходимых расчетов была создана математическая модель для расчета магнитного поля, энергии магнитного поля в воздушном зазоре и электромагнитного момента.

В работах [6, 7] рассматривается угловая характеристика двигателя для фиксированного распределения потенциала на поверхности статора, рассчитанная по созданной модели (рис. 2).

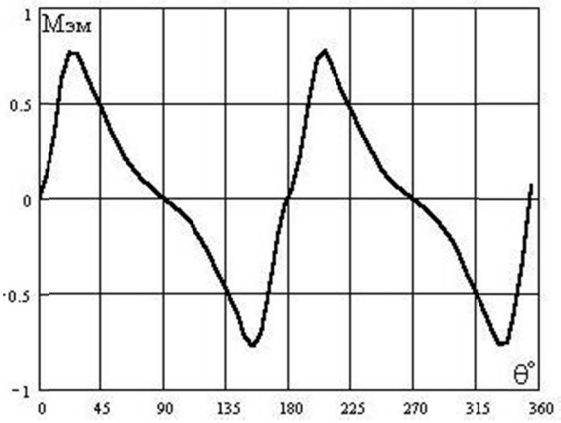


Рис. 2 – Угловая характеристика двигателя

Fig. 2 – Angle-torque characteristics of the motor

2. Расчет пульсаций максимального электромагнитного момента

В данной работе математическая модель для расчета электромагнитного момента была несколько усовершенствована. Усовершенствованная модель позволяет рассчитывать момент для любого произвольного распределения потенциалов

по зубцам статора, т. е. для любых законов изменения токов. Это дает возможность не только проанализировать характер изменения электромагнитного момента в зависимости от нагрузки (угловая характеристика) при фиксированных токах, но и провести исследование изменения электромагнитного момента в процессе работы двигателя, т. е. учесть и характер изменения токов в фазах, и распределение МДС вдоль воздушного зазора.

Момент в модели определяется и как функция угла поворота θ, и как функция от распределения потенциала по зубцам статора:

$$M_{\text{эм}} = f(\theta, F(t)),$$

где $\theta = \frac{\omega}{2}t + \theta_0$ – угол поворота в произвольный момент времени; $\frac{\omega}{2}$ – угловая скорость двигателя; $F(t)$ – распределение потенциала по зубцам статора в произвольный момент времени.

Распределение потенциала определяется законом изменения тока в фазах, для шестифазного двигателя закон изменения тока можно представить как вектор

$$I_k = (-1)^k I_m \left(1 + \cos\left(\omega t - \frac{\pi}{3}k\right)\right),$$

где k – номер катушки (фазы).

Пульсации электромагнитного момента правомерно определять относительно постоянной составляющей момента, которую можно определить как среднее значение всех моментов M_i, рассчитанных в i-е моменты времени:

$$M_0 = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} M_i,$$

где n – количество точек на временной оси в течение одного периода изменения тока.

На рис. 3 представлена кривая изменения максимального электромагнитного момента в течение одного периода изменения тока для шестифазного двигателя с вентильным подмагничиванием (при этом было принято, что по обмоткам статора протекает только постоянная составляющая и первая гармоника тока).

В отличие от классических электрических машин с распределенными обмотками, у которых результирующая МДС в воздушном зазоре практически остается неизменной, в данных двигателях с дробными зубцовыми обмотками изменение распределения МДС приводит к изменению как амплитуды максимального электромагнитного момента, так и угла нагрузки при максимальном моменте.

Электромагнитный момент за один период шесть раз претерпевает изменения, принимая максимальное и минимальное значения. Порядок переменной составляющей момента соответствует числу фаз. Это вполне объяснимо, так как и форма МДС, создаваемой обмоткой в шестифазном двигателе, шесть раз изменяется в течение одного периода изменения тока. Максимальное значение электромагнитного момента соответствует максимальному значению тока в одной из фаз (случай t_1 на рис. 4), а минимальное значение – в момент времени, когда переменная составляющая тока в одной из фаз переходит через нуль (случай t_2 на рис. 4). Величина пульсаций электромагнитного момента в шестифазных двигателях достигает 7,36 % от среднего значения.

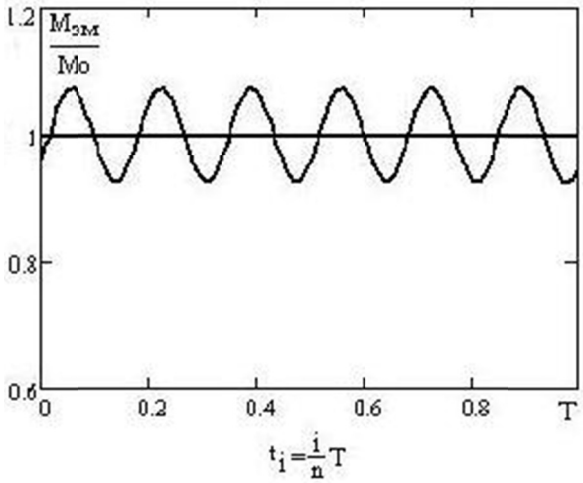


Рис. 3 – Изменение максимального момента шестифазного двигателя в течение одного периода изменения тока

Fig. 3 – The variation of a six-phase motor maximum torque during one period of the current oscillation

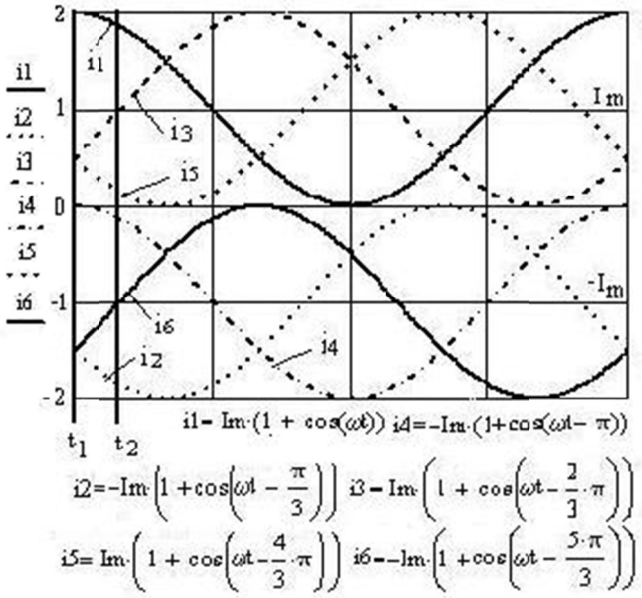


Рис. 4 – Распределение тока в фазах шестифазного двигателя

Fig. 4 – Current distribution in six-phase motor phases

На рис. 5 показана зависимость электромагнитного момента шестифазного двигателя (z_1 = 12, q = 1/2) от угла нагрузки. Зависимости рассчитаны для двух крайних случаев t_1 и t_2 (рис. 4) – кривая *1*, ток в одной из фаз максимален, и кривая *2*, переменная составляющая тока в одной из фаз переходит через нуль. Максимум электромагнитного момента наступает при угле нагрузки менее 45°.

Причем угол нагрузки при максимальном моменте с изменением тока в фазах меняет свое значение. Это приведет к тому, что при работе двигателя с датчиком положения ротора настройка его на максимальный момент становится невозможной. Настройка датчика положения в реверсивном двигателе на угол 45° приводит к тому, что пульсация электромагнитного момента достигнет еще большей величины.

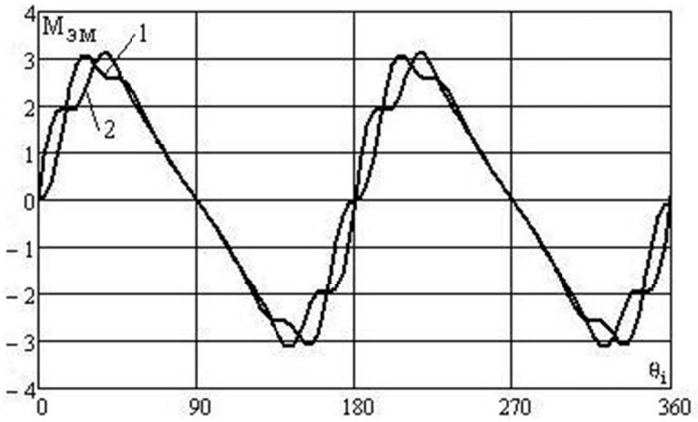


Рис. 5 – Угловые характеристики шестифазного двигателя в разные моменты времени

Fig. 5 – Angle-torque characteristics of the six-phase motor at different moments of time

3. Выбор формы тока для снижения пульсаций момента

Уничтожить или в значительной степени снизить пульсации максимального момента можно соответствующим выбором формы тока обмотки статора. Ниже определяется форма тока обмотки статора, обеспечивающая постоянство электромагнитного момента при фиксированном угле нагрузки двигателя. Этот случай соответствует работе двигателя с датчиком положения ротора и специальным источником питания, обеспечивающим формирование любой заданной формы тока.

В общем случае электромагнитный момент является функцией как углового положения ротора, так и мгновенного значения токов фаз:

$$\tilde{M}(t) = M\left[\theta(t),\, i_k(t)\right] = M\left[\frac{\omega}{2}t + \theta_0,\, i_k(t)\right].$$

Он содержит постоянную составляющую M_0 и изменяющуюся во времени $M_{\sim}$ в зависимости от тока в фазах,

$$\tilde{M}(t) = M_0 + M_{\sim}.$$

Постоянная составляющая электромагнитного момента на периоде изменения тока фаз

$$M_0 = \frac{1}{T}\int_0^T \tilde{M}(t)dt.$$

Для компенсации переменной составляющей момента необходимо найти соответствующий закон изменения тока. Учитывая, что электромагнитный момент пропорционален квадрату тока, легче всего воздействовать на электромагнитный момент одновременным изменением тока во всех фазах, т. е. проводя его модуляцию,

$$i_k = \left[I_0 + I_{mk}\cos(\omega t - \varphi_k - \theta)\right]\cdot K(t).$$

Очевидно, что если поддерживать постоянным момент, равным постоянной составляющей момента M_0, то коэффициент $K(t)$ может быть найден из условия

$$K(t) = \sqrt{\frac{M_0}{\tilde{M}(t)}}.$$

В этом случае электромагнитный момент становится тождественно равным постоянной составляющей момента

$$M\left[\frac{\omega}{2}t + \theta_0,\ K(t)\cdot i_k(t)\right] \equiv M_0.$$

Если в выражении (4) вместо M_0 подставить некоторое другое значение момента (например, максимальное), то электромагнитный момент будет поддерживаться на новом уровне.

Созданная математическая модель позволяет реализовать предложенный метод определения тока.

При расчете коэффициент $K(t)$ был представлен в виде следующего ряда:

$$K(t) = a_0 + a_1\cos(m\omega_1 + \varphi_1) + a_2\cos(2m\omega_1 t + \varphi_2) + \\ + \ldots + a_k\cos(mk\omega_1 t + \varphi_k),$$

здесь m – число фаз обмотки статора.

Значения коэффициентов a_k для шестифазной машины сведены в таблицу.

Значения коэффициентов a_k для шестифазной машины /

The a_k coefficients values for the six-phase motor

a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6	a_7
0,037	$1{,}287\cdot 10^{-3}$	$2{,}396\cdot 10^{-4}$	$5{,}889\ \ 10^{-5}$	$1{,}107\cdot 10^{-4}$	$6{,}685\cdot 10^{-5}$	$5{,}439\ \ 10^{-5}$

С достаточной точностью поддержания постоянной величины момента можно ограничиться первым коэффициентом a_1. Результаты расчета электромагнитного момента при угле нагрузки $\frac{\pi}{4}$ и скорректированном токе приведены на рис. 6. Кривая *1* соответствует моменту до корректировки, а кривая *2* – моменту после корректировки. Отклонение скорректированного момента (кривая *2*) от среднего момента M_0 не превышает 0,28 %.

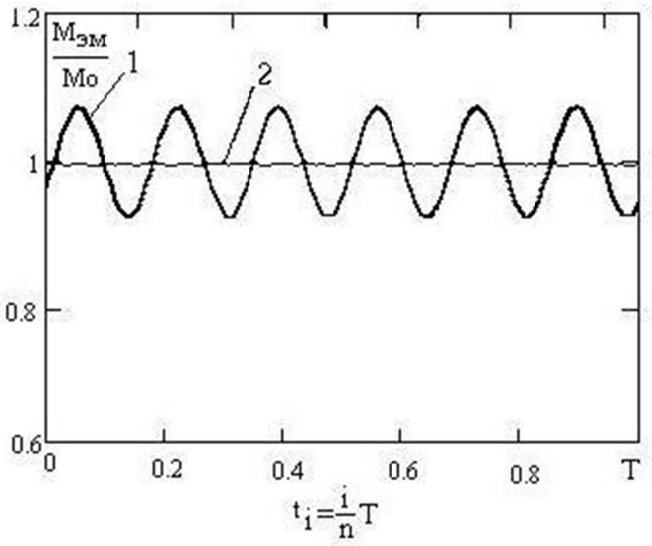


Рис. 6 – Максимальный электромагнитный момент до корректировки (кривая *1*) и после корректировки (кривая *2*)

Fig. 6 – A maximal electromagnetic torque before (curve *1*) and after (curve *2*) correction

Заключение

Предложенный метод компенсаций пульсаций электромагнитного момента, вызванных ступенчатым законом распределения м.д.с. в воздушном зазоре, показал высокую эффективность. Так, в некомпенсированном двигателе величина пульсаций момента достигает 7,36 % от среднего значения, а введение компенсации позволило снизить пульсации момента до 0,28 % от среднего значения.

Для компенсации пульсаций электромагнитного момента предложен закон изменения тока

$$i_k = \left[I_0 + I_{mk}\cos(\omega t - \varphi_k - \theta)\right] \cdot K(t),$$

где модулирующий коэффициент $K(t)$ представлен в виде ряда

$$K(t) = a_0 + a_1\cos(m\omega_1 + \varphi_1) + a_2\cos(2m\omega_1 t + \varphi_2) +$$
$$+ \ldots + a_k\cos(mk\omega_1 t + \varphi_k).$$

Очевидно, что данный метод компенсации пульсаций электромагнитного момента можно применить и для классических электрических машин.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Шевченко А.Ф., Шевченко Л.Г.** Новый электродвигатель с переменным магнитным сопротивлением воздушного зазора (SR-двигатель) для высокоскоростных электроприводов // Электротехника. – 2000. – № 11. – С. 20–23.
2. **Шевченко А.Ф.** Магнитодвижущие силы однозубцовых дробных обмоток с $q < 1$ // Научный вестник НГТУ. – 1996. – № 2. – С. 99–100.
3. **Иванов-Смоленский А.В**. Определение электромагнитных сил в нелинейной магнитной системе по натяжениям // Электричество. – 1985. – № 7. – С. 12–21.

4. **Иванов-Смоленский А.В**. Электромагнитные силы и преобразование энергии в электрических машинах. – М.: Высшая школа, 1989. – 312 с.
5. **Лаврентьев М.А., Шабат Б.В**. Методы теории функций комплексного переменного. – М.: Наука, 1965. – 716 с.
6. **Shevchenko A.F., Chestyunina T.V.** Analysis of magnetomotive forces of fractional-slot windings of electrical machines // Russian Electrical Engineering. – 2009. – Vol. 80, N 12. – P. 641–645.
7. **Шевченко Л.Г.** Электромагнитный момент вентильного индукторного двигателя // Сборник научных трудов НГТУ. – 2000. – № 5. – С. 97–102.

REDUCTION IN ELECTROMAGNETIC TORQUE RIPPLES IN A SYNCHRONOUS MOTOR WITH AMODULATED MAGNETIC FLUX AND A SMOOTH HARMONIC ROTOR

Shevchenko A.F., Shevchenko L.G.
Novosibirsl State Technical University, Novosibirsk, Russia

There are many independent causes which can lead to electromagnetic torque ripples in an electrical motor. These ripples are inadmissible in high-precision drives where the constancy of the torque is of great importance. So the problem of ripple reduction is of great interest. In this paper we consider a synchronous motor with a modulated magnetic flux and a smooth harmonic rotor and study its torque ripple caused by some peculiar features of the stator winding distribution in the air gap of the motor. We take into account an actual curve of the magnetomotive force distribution which has a step-like form. The torque is determined from the derivative of the magnetic field energy over the rotation angle. An analytical expression for the field energy was obtained earlier using the conformal transformation method. All calculations are made in the MathCAD environment. The effect of the phase current distribution of the stator winding on the torque is studied. The maximum torque ripple amplitude is found to be 7.36 % of its mean value. To correct the torque ripple we propose adding some modulating factor in the phase current of the stator winding. The required factor is obtained in our paper in the form of a harmonic series. Using current modulation allows us to decrease the torque ripple amplitude down to 0.28 %.

Keywords: electromagnetic torque, current profile, modulation coefficient, field energy.

DOI: 10.17212/1727-2769-2018-2-106-115

REFERENCES

1. Shevchenko A.F., Shevchenko L.G. Novyi elektrodvigatel' s peremennym magnitnym soprotivleniem vozdushnogo zazora (SR-dvigatel') dlya vysokoskorostnykh elektroprivodov [A new electric motor with variable magnetic reluctance of the air gap (SR-motor) for high-speed electric drives]. *Elektrotekhnika – Russian Electrical Engineering*, 2000, no. 11, pp. 20–23. (In Russian).
2. Shevchenko A.F. Magnitodvizhushchie sily odnozubtsovykh drobnykh obmotok s $q < 1$ [Magnetomotive forces of single-tooth fractional windings with $q < 1$]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 1996, no. 2, pp. 99–100.
3. Ivanov-Smolenskii A.V. Opredelenie elektromagnitnykh sil v nelineinoi magnitnoi sisteme po natyazheniyam [Determination of electromagnetic forces in a nonlinear magnetic system by stress tensor]. *Elektrichestvo – Electrical Technology Russia*, 1985, no. 7, pp. 12–21.
4. Ivanov-Smolenskii A.V. *Elektromagnitnye sily i preobrazovanie energii v elektricheskikh mashinakh* [Electromagnetic forces and energy conversion in electrical machines]. Moscow, Vysshaia shkola Publ., 1989. 312 p.
5. Lavrent'ev M.A., Shabat B.V. *Metody teorii funktsii kompleksnogo peremennogo* [Methods of the theory of functions of a complex variable]. Moscow, Nauka Publ., 1965. 716 p.
6. Shevchenko A.F., Chestyunina T.V. Analysis of magnetomotive forces of fractional-slot windings of electrical machines. *Russian Electrical Engineering*, 2009, vol. 80, no. 12, pp. 641–645.

7. Shevchenko L.G. Elektromagnitnyi moment ventil'nogo induktornogo dvigatelya [Electromagnetic torque of the switched induction motor]. *Sbornik nauchnykh trudov Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Transaction of scientific papers of the Novosibirsk state technical university*, 2000, no. 5, pp. 97–102.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Шевченко Александр Фёдорович – родился в 1948 г., д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой электромеханики Новосибирского государственного технического университета. Область научных интересов: электрические машины с дробными зубцовыми обмотками (с постоянными магнитами, с электромагнитной редукцией частоты вращения, индукторные). Опубликовано 100 научных работ. (Адрес: 630073, Россия, Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20. E-mail: a.shevchenko @corp.nstu.ru).

Shevchenko Aleksandr Fedorovich (b. 1948) – Doctor of Sciences (Eng.), professor, head of the department of electromechanics, Novosibirsk State Technical University (NSTU). His research interests are currently focused on electrical motors with fractional tooth windings (with permanent magnets, with electromagnetic reduction of rotational speed, and induction motors). He is he author of 100 scientific papers. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: a.shevchenko@corp.nstu.ru).

Шевченко Людмила Григорьевна – родилась в 1951 г., канд. техн. наук, доцент кафедры электромеханики Новосибирского государственного технического университета. Область научных интересов: двигатели с модулированным магнитным потоком и гладким гармоническим ротором. Опубликовано 20 научных работ. (Адрес: 630073, Россия, Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20. E-mail: Lusi_ol@mail.ru).

Shevchenko Liudmila Grigoryevna (b. 1951) – Candidate of Sciences (Eng.), associate professor at the department of electromechanics, Novosibirsk State Technical University (NSTU). Her research interests are currently focused on electrical motors with a modulated magnetic flux and a smooth harmonic rotor. She is the author of 20 scientific papers. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: Lusi_ol@mail.ru).

Статья поступила 27 марта 2018
Received March, 27, 2018

To Reference:

Shevchenko A.F., Shevchenko L.G. Snizhenie pul'satsii elektromagnitnogo momenta sinkhronnogo dvigatelya s modulirovannym magnitnym potokom i gladkim garmonicheskim rotorom [Reduction in electromagnetic torque ripples in a synchronous motor with amodulated magnetic flux and a smooth harmonic rotor]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii – Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2018, no. 2 (39), pp. 106–115. doi: 10.17212/1727-2769-2018-2-106-115.

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

**ДОКЛАДЫ АКАДЕМИИ НАУК
ВЫСШЕЙ ШКОЛЫ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

Выпуск 2(39) апрель–июнь 2018

Выпускающий редактор *И.П. Брованова*
Корректор *И.Е. Семенова*
Компьютерная верстка *Н.В. Гаврилова*

Налоговая льгота – Общероссийский классификатор продукции
Издание соответствует коду 95 2000 ОК 005-93 (ОКП)

Подписано в печать 29.06.2018. Бумага офсетная. Формат 70×108 1/16
Тираж 300 экз. Уч.-изд. л. 10,15. Печ. л. 7,25. Изд. № 165. Заказ № 957

Отпечатано в типографии
Новосибирского государственного технического университета
630073, Новосибирск, пр. К. Маркса, 20