

ФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ СИНТЕЗ УПРАВЛЕНИЯ В ОДНОФАЗНЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДАХ МАЛОЙ МОЩНОСТИ

Ю.Н. Дементьев¹, В.И. Гончаров¹, К.Н. Негодин¹,
А.С. Мешков², Мин Ту Аунг², В.И. Суздорф²

¹ Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск, Россия,

² Комсомольский-на-Амуре государственный университет, г. Комсомольск-на-Амуре, Россия

Рассматривается задача формализации описания движения нелинейной системы в пространстве управляемых параметров на примере коллекторного электродвигателя последовательного возбуждения с питанием от вентильного преобразователя в области прерывистого тока на основе спектрального метода, а также определения функциональных зависимостей регулируемых координат движения. В статье представлены данные о влиянии скорости двигателя на изменение его динамических параметров. Приведены аппроксимированные зависимости, позволяющие осуществить формирование корректирующего сигнала с помощью типовых линейных звеньев. Результаты исследования могут быть полезны при разработке систем электропривода как электрифицированного инструмента, так и тяговых электроприводов для обеспечения оптимумов по быстродействию и минимума потерь в динамических режимах.

Ключевые слова: спектральная характеристика, передаточная функция, квазистационарные процессы, электромагнитные процессы, функциональная зависимость.

Введение

Методы теории автоматического управления, основанные на оперировании передаточными функциями, импульсными переходными характеристиками и т. п., имеют преимущества перед методами численного решения в части возможности проводить более глубокий анализ, делать меньшее число шагов при проектировании. Дальнейшее развитие теории автоматического управления дало возможность приспособить эти методы к цифровым вычислительным машинам. Одним из таких методов является спектральный метод, в котором при расчете используются алгебраические алгоритмы, позволяющие некоторые операции проводить в аналитической форме, что существенно сокращает машинное время. Он не имеет ограничений на порядок дифференциального уравнения, на число и характер переменных параметров, а также на число контуров с обратной связью [1].

Постановка задачи

В настоящее время для управления однофазным коллекторным двигателем последовательного возбуждения (ОДПВ) используются современные вентильные устройства, которые ставятся в цепь переменного или выпрямленного питающего напряжения [2–5]. При питании однофазного коллекторного двигателя от вентильного преобразователя работа ОДПВ имеет ряд специфических особенностей, обусловленных пульсациями питающего напряжения [6]. Появление дополнительных потерь в меди обмоток, стали магнитопровода и конструктивных элементах обусловлено наличием переменных составляющих в токе якоря и магнит-

ных потоках машины. Увеличение потерь в меди связано как с возрастанием действующего значения тока якоря, так и со значительным повышением активных сопротивлений обмоток переменным составляющим тока. В общем случае гармонический состав тока якоря зависит от спектра гармоник выходного напряжения вентильного преобразователя и эквивалентного сопротивления якорной цепи для отдельных составляющих гармоник [7]. Эти и другие обстоятельства актуализируют задачу необходимости исследования электромагнитных процессов в цепях ОДПВ [8] и выявления основных функциональных зависимостей выходных характеристик от управляемых параметров.

Математическое описание и структурные схемы

Математическое описание вентильного электропривода с ОДПВ может быть представлено следующей системой дифференциальных уравнений [6, 9, 10]:

$$\left. \begin{aligned} U(t) &= R_d i(t) + \frac{d\psi(t)}{dt} + k\psi_M(t)\Omega(t); \\ M(t) - M_c(t, \Omega) &= J \frac{d\Omega(t)}{dt}; \\ M(t) &= \psi_M(t)i(t); \\ U(t) &= F(\theta, \omega, m, \psi_M, \psi, t), \end{aligned} \right\}$$

где $U(t)$ – напряжение питания двигателя; $i(t)$ – ток якоря; R_d – активное сопротивление цепи якоря; $\Omega(t)$ – частота вращения вала; k – коэффициент пропорциональности ЭДС вращения; $\psi(t)$, $\psi_M(t)$ – полное потокосцепление и потокосцепление взаимной индукции; $M(t)$, $M_c(t)$ – электромагнитный

момент и момент статического сопротивления на валу; J – момент инерции двигателя; $F(\theta, \omega, m, \psi_M, \psi, t)$ – обобщенная функция, моделирующая выходное напряжение преобразователя; θ – угол регулирования; ω – угловая частота сети; m – число фаз преобразователя; t – время.

Для составления алгоритма работы ОДПВ как объекта управления при детерминированных входных воздействиях и начальных условиях необходимо получить выражения для двухмерных нестационарных передаточных функций и нестационарных спектральных характеристик выходных переменных: скорости вращения двигателя $\Omega(t)$, момента $M(t)$ и тока цепи якоря $I(t)$. Учитывая, что выходные координаты двигателя описываются кусочно-гладкими, монотонными функциями, целесообразно в качестве базисной принять систему нестационарных ортонормированных тригонометрических функций, что значительно упрощает выражения для спектральных характеристик. Учитывая свойства линейности нестационарных спектральных характеристик, производной функции времени при ненулевых начальных условиях и произведения функций времени, получим (здесь и далее нижний индекс «с» будет указывать на спектральную характеристику соответствующей функции):

$$\left. \begin{aligned} E_c(t) - P_{cc}(t, t)\psi_c(t) - R_d I_c(t) &= U_c(t) + \psi_0 \Delta_c(t); \\ J^{-1} P_{cc}^{-1}(t, t)\Omega_c(t) - M_c^c(t) &= J^{-1} \Omega_0 \Delta_c(t) - M_c^c(t) \Delta_c(t); \\ E_c(t) &= k \psi_c^M(t) \Omega_c(t); \\ M_c(t) &= \psi_c^M(t) I_c(t); \\ U_c(t) &= A_{cc}(t, t) U_c^0(t), \end{aligned} \right\}$$

где $P_{cc}(t, t)$ – двумерная нестационарная передаточная функция дифференцирующего звена; $A_{cc}(t, t)$ – двумерная нестационарная передаточная функция вентильного преобразователя, представленного звеном с переменным коэффициентом усиления; $V_{ccc}(t, t)$ – трехмерная передаточная функция множительного звена; $\Omega_c(t)$, $I_c(t)$, $U_c(t)$, $E_c(t)$, $\psi_c(t)$, $\psi_c^M(t)$, $M_c(t)$, $M_c^c(t)$ – нестационарные спектральные характеристики частоты вращения, тока, выходного напряжения вентильного преобразователя, ЭДС вращения, полного потокосцепления, потокосцепления взаимной индукции обмоток якоря и возбуждения, электромагнитного момента и момента сопротивления на валу двигателя, соответственно; Ω_0 , ψ_0 – начальные условия; $\Delta_c(t)$ – нестационарная спектральная характеристика дельта-функции; $U_c^0(t)$ – нестационарная спектральная характеристика модулирующей функции входного напряжения; J – момент инерции системы электропривода, приведенный к валу электродвигателя.

Для составления многомерной передаточной функции исследуемой системы вентильного электропривода с ОДПВ были упорядочены внешние воздействия и выходные сигналы в виде матриц столбцов $g(\tau)$ и $x(\tau)$:

$$g(\tau) = \begin{bmatrix} U(\tau) & M^c(\tau) & t_0(\tau) & \Omega_0 & \psi_0 \end{bmatrix}^T;$$

$$x(\tau) = \begin{bmatrix} \Omega(\tau) & M(\tau) & I(\tau) \end{bmatrix}^T,$$

где $M^c(\tau)$ – статический момент на валу двигателя; t_0 – начальное значение времени на рассматриваемом интервале.

Матрица двумерной нестационарной передаточной функции системы вентильного электропривода с ОДПВ имеет вид:

$$\Phi(t, t) = \begin{bmatrix} \Phi_{11}(t, t) & \Phi_{12}(t, t) & \dots & \Phi_{1v}(t, t) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \Phi_{\mu 1}(t, t) & \Phi_{\mu 2}(t, t) & \dots & \Phi_{\mu v}(t, t) \end{bmatrix},$$

где $\Phi_{\mu v}(t, t)$ – передаточные функции, характеризующие связь μ -го выхода ($\mu = 1, 2, 3$) с v -м входом ($v = 1, 2, 3, 4, 5$).

Приведенные зависимости позволили построить структурную схему ОДПВ с питанием от вентильного преобразователя, представленную на рис. 1. Здесь операторные изображения заменены спектральными характеристиками сигналов.

Нелинейность, связанная с зависимостью абсолютной магнитной проницаемости от тока, аппроксимирована усеченным ортонормированным рядом [11, 12].

С учетом симметричности нелинейности магнитную проницаемость можно выразить:

$$\mu_j = a_1 I + a_3 I^3 + a_5 I^5, \quad 0 < I < I_{\max}.$$

Алгоритм расчета (элементов) матрицы удобно проводить таким образом, чтобы передаточные функции определять на фиксированном временном интервале, а дальнейший процесс расчета продолжить методом припасовывания.

На рис. 2 приведена структура расчета нелинейной системы вентильного электропривода с ОДПВ для нахождения матрицы $\Phi_{31}(t, t)$. Эта структура представлена в виде параллельного соединения цепей с передаточными функциями $\Phi_1(h, i_1, t)$, $\Phi_2(h, i_1, i_2, t)$, $\Phi_3(h, i_1, i_2, i_3, t)$, $\Phi_4(h, i_1, i_2, i_3, i_4, t)$, $\Phi_5(h, i_1, i_2, i_3, i_4, i_5, t)$, $\Phi_6(h, i_1, i_2, i_3, i_4, i_5, i_6, t)$. Коэффициенты C_1 , C_2 и C_3 взяты из многомерной нестационарной передаточной функции нелинейного звена $\mu(I)$. Таким образом, матрица $\Phi_{31}(t, t)$ определяет зависимость тока $I(\tau)$, которая получена суммированием всех реакций системы вентильного электропривода с ОДПВ.

Полученные соотношения приводят к уравнениям, позволяющим исследовать переходные и квазиустановившиеся процессы в ОДПВ при питании от вентильного преобразователя:

$$I(t) = \Phi_{31}(t, t)U(t) + \Phi_{32}(t, t)M^c(t) + \Omega_0 \Phi_{34}(t, t)\Delta(t) + \psi_0 \Phi_{35}(t, t)\Delta(t);$$

$$M(t) = \Phi_{21}(t, t)U(t) + \Phi_{22}(t, t)M^c(t) + \Omega_0 \Phi_{24}(t, t)\Delta(t) + \psi_0 \Phi_{25}(t, t)\Delta(t);$$

$$\Omega(t) = \Phi_{11}(t, t)U(t) + \Phi_{12}(t, t)M^c(t) + \Omega_0 \Phi_{14}(t, t)\Delta(t) + \psi_0 \Phi_{15}(t, t)\Delta(t).$$

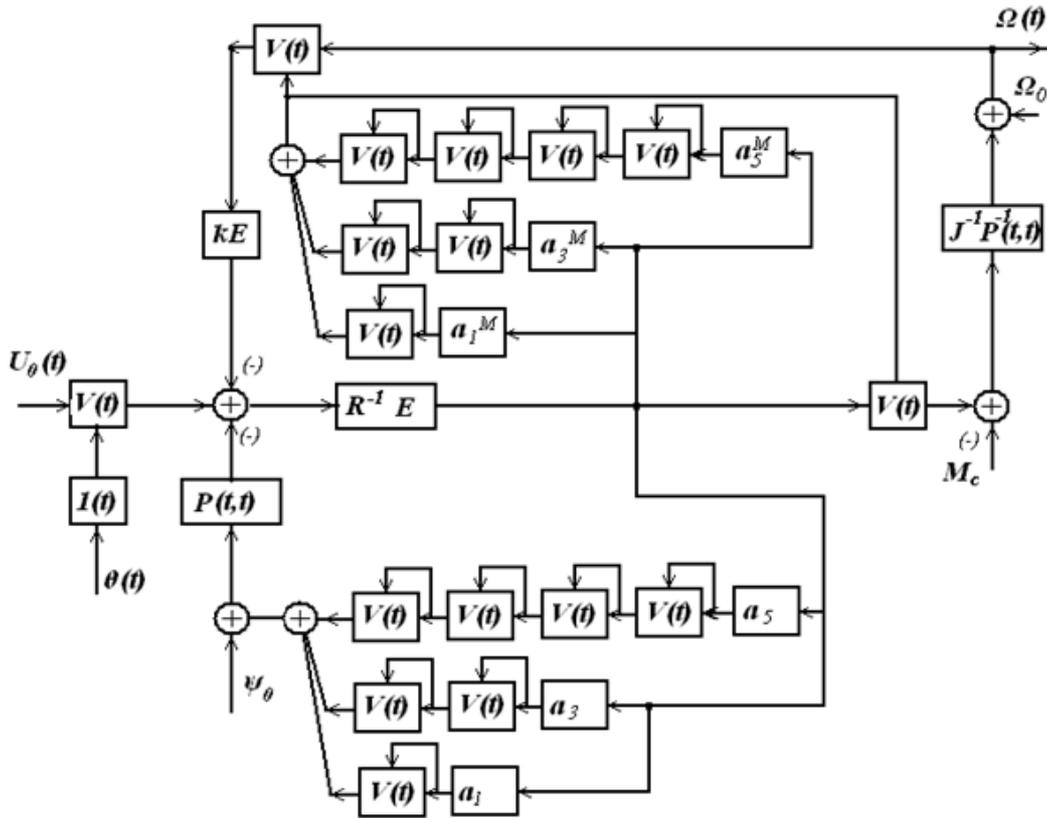


Рис. 1. Структурная схема ОДПВ с питанием от вентильного преобразователя

Электромагнитные процессы при синусоидальной форме питающего напряжения ОДПВ хорошо изучены, поэтому в настоящее время большой интерес представляет исследование электромагнитных процессов при питании ОДПВ от вентильного преобразователя с целью выявления особенностей и новых закономерностей.

Выходное напряжение вентильного преобразователя можно определить следующим образом [2]:

$$U(\tau, \theta) = U_m \sum_{n=0}^{\infty} \sin\left(\tau - \frac{2\pi n}{m}\right) \left[1\left(\tau - \frac{2\pi n}{m} - \theta\right) - 1\left(\tau - \frac{2\pi n}{m} - \theta - \lambda_n\right) \right],$$

где U_m – амплитуда питающего напряжения; n – номер вентиля, отсчитываемого от момента подачи первого сигнала управления; θ – угол управления n -го включенного вентиля; τ – текущая угловая координата питающего напряжения; λ_n – угол проводимости включенного вентиля; $1(F)$ – единичная функция, которая равна 1, при $F > 0$ и равна 0 при $F \leq 0$.

Обобщенная функция $U(\tau, \theta)$ может быть представлена в спектральном виде множительным звеном, на один вход которого поступает непрерывный сигнал $U_m \sin\left(\tau - \frac{2\pi n}{m}\right)$, а на другой – последовательность импульсов $\sum_{n=0}^{\infty} 1(\tau - \theta)$.

Слагаемое λ_n учитывает, что нестационарная спектральная

характеристика выходного напряжения преобразователя за пределами нестационарного отрезка

$$t_n = \tau - \frac{2\pi n}{m} - \theta - \lambda_n \text{ равна нулю.}$$

Спектральные характеристики входных сигналов множительного звена определены по следующим выражениям:

$$B_c(t) = S_c [U_m \sin \omega t] = \begin{cases} U_m (\omega \sqrt{t})^{-1} (\cos \omega t - 1), & \text{при } i = 0; \\ U_m \omega \sqrt{2t} (i^2 \pi^2 - \omega^2 t^2)^{-1} [(-1)^i \cos \omega t - 1], & \text{при } i = 1, 2, \dots, \end{cases}$$

$$A_c(t) = S_c [1(\omega t - \theta)] = \begin{cases} (t - \theta) \sqrt{\frac{1}{t}}, & \text{при } i = 0; \\ \sqrt{2t} (i\pi)^{-1} \sin(t - \theta), & \text{при } i = 1, 2, \dots \end{cases}$$

Тогда нестационарная спектральная характеристика выходного напряжения вентильного преобразователя будет иметь вид

$$U_c(t) = \sum_i \sum_k V_{ccc}(h, i, k, t) A_c(k, t) B_c(i, t).$$

Передаточную функцию вентильного преобразователя как звена системы автоматического регулирования можно представить в виде

$$W_c^{np}(t) = \sum_k V_{ccc}(h, i, k, t) A_c(k, t).$$

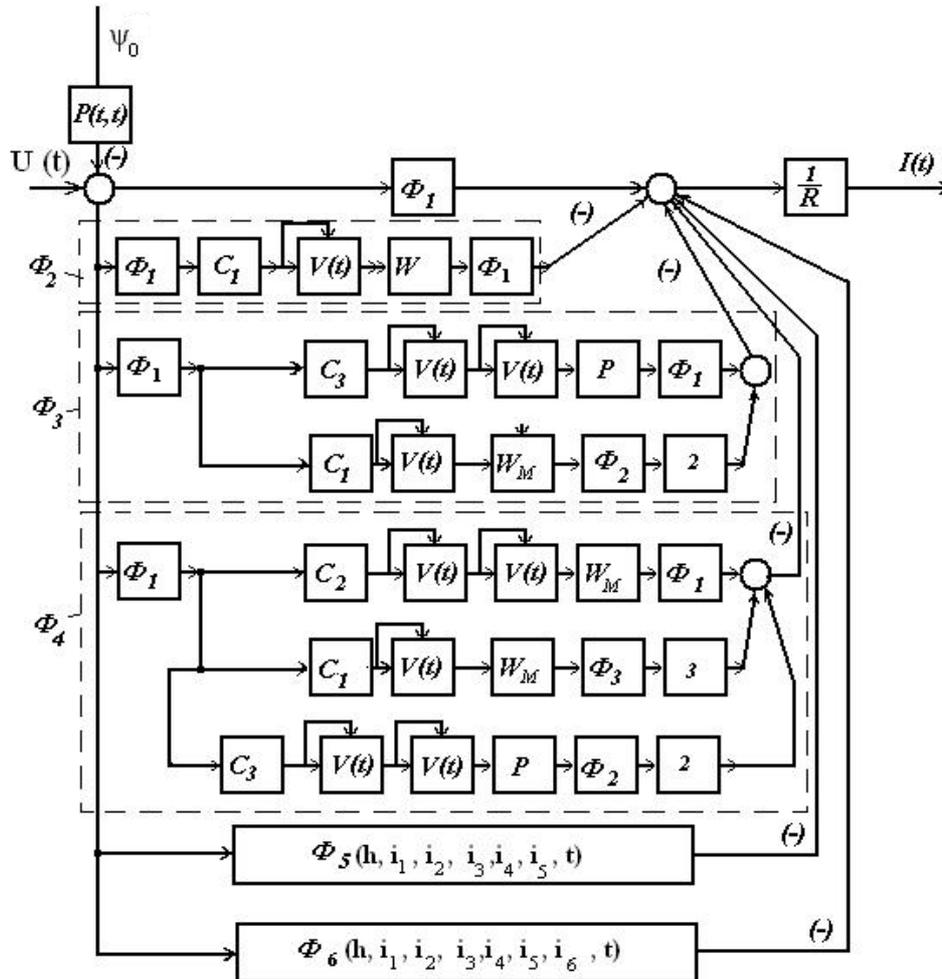


Рис. 2. Структура расчета нелинейной системы

На рис. 3 приведен алгоритм расчета системы вентильного электропривода с ОДПВ. Расчет проводился с использованием метода припасовывания. Вначале определялись начальные условия в системе вентильного электропривода с ОДПВ, далее на основе принятой системы базисных ортонормированных функций находились их спектральные характеристики. Аналогично определялись спектральные характеристики других входных сигналов и передаточные функции всех звеньев системы вентильного электропривода с ОДПВ. Расчет и исследование системы вентильного электропривода с ОДПВ производился на выбранном интервале времени t_j , при этом конечные значения выходных координат движения принимались начальными для последующего t_{j+1} -го интервала времени. Расчет выполнен по одним и тем же уравнениям, менялись лишь начальные условия на каждом интервале.

Разработанный алгоритм расчета реализован в среде MatLab, что позволило исследовать работу вентильного преобразователя с ОДПВ.

На рис. 4, 5 представлены результаты исследований.

Анализ зависимостей, представленных на рис. 4 показал, что время проводимости тока вентилем преобразователя зависит от угла управления θ и скорости вращения Ω . Причем при увеличении скорости вращения ОДПВ время проводящего состояния тока вентилем уменьшается.

На рис. 5 приведены зависимости угла проводимости ωt вентиля преобразователя электропривода с ОДПВ от соотношения тока якоря к скорости вращения двигателя при разных углах управления. Как видно из приведенных графиков, представленные зависимости имеют линейный характер, что повышает их практическую значимость [13].

Полученные зависимости угла проводимости вентиля преобразователя при различных значениях скорости вращения двигателя Ω и его нагрузки на валу можно использовать в приближенных расчетах вентильных систем электропривода с ОДПВ.

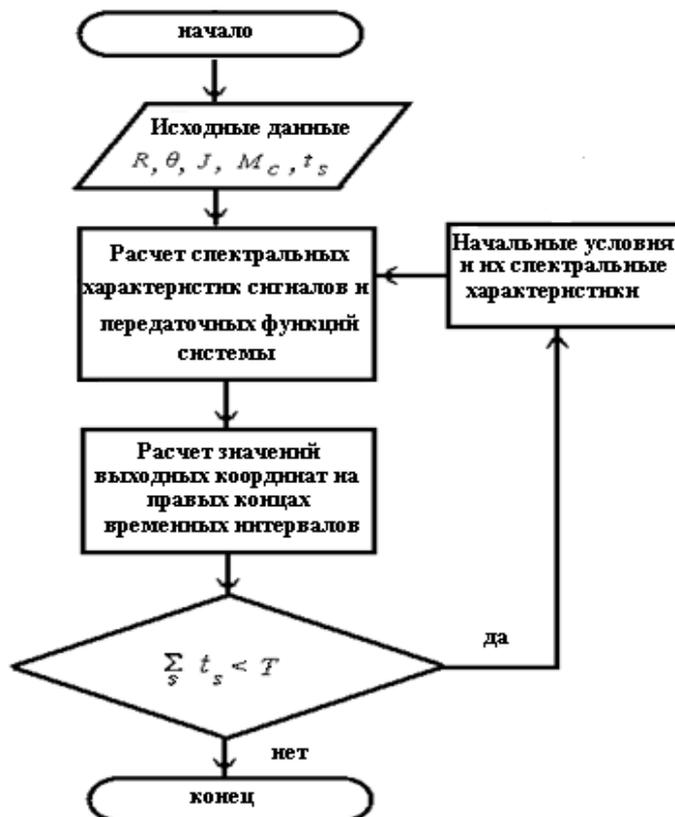


Рис. 3. Алгоритм численного расчета электромагнитных процессов вентильного электропривода с ОДПВ

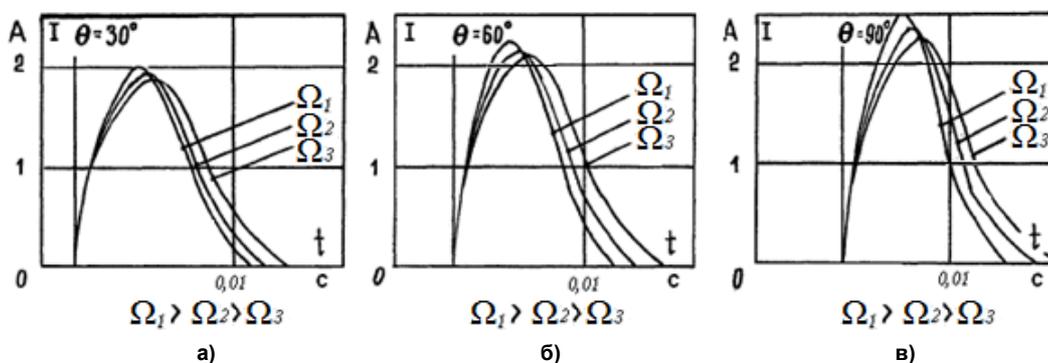


Рис. 4. Зависимости времени проводимости тока вентилем преобразователя от угла управления θ , и скорости вращения Ω

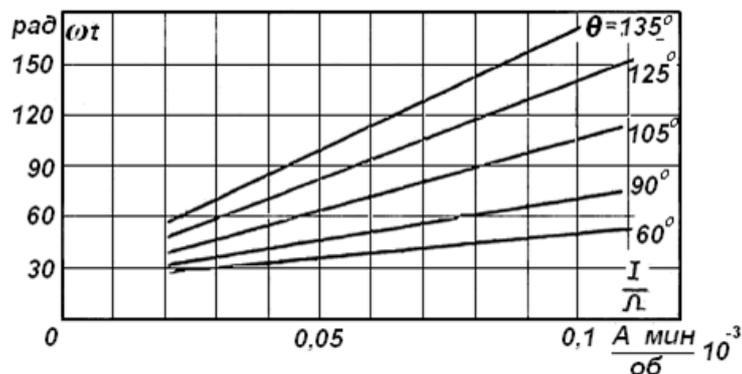


Рис. 5. Зависимости угла проводимости вентилей преобразователя от соотношения тока якоря к скорости вращения двигателя при разных углах управления

Заключение

В результате проведенных исследований установлено, что:

– моделирование объектов регулирования, отличающихся наличием существенных нелинейностей типа «кривая намагничивания», «множительное звено», а также устройств с зависимыми от времени параметрами целесообразно проводить, используя спектральный метод расчета нелинейных нестационарных систем;

– предложенная методика аналитического определения параметров движения на примере ОДПВ, питаемого от вентиляционного преобразователя показывает, что расчет основных величин (тока, напряжения, частоты вращения) целесообразно проводить только для мгновенных значений.

Работа выполнена в рамках программы ВИУ ТПУ 2017-2018.

Литература

1. Солодовников, В.В. Спектральные методы расчета и проектирования систем управления / В.В. Солодовников, А.Н. Дмитриев, Н.Д. Езупов. – М.: Машиностроение, 1986. – 440 с.

2. Каган, В.Г. Полупроводниковые системы с двигателями последовательного возбуждения / В.Г. Каган, Г.В. Лебедев, Л.И. Малинин. – М.: Энергия, 1971. – 96 с.

3. Иванов, А.Г. Системы управления полупроводниковыми преобразователями / А.Г. Иванов, Г.А. Белов, А.Г. Сергеев. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2010. – 448 с.

4. Пат. 2491706 Российская Федерация. Устройство для стабилизации частоты вращения однофазного коллекторного электродвигателя / В.И. Суздорф, А.С. Мешков. – Заявл. 06.02.2012; опубл. 27.08.2013, Бюл. № 21.

5. Микропроцессорные автоматические системы регулирования. Основы теории и элементы: учеб. пособие / В.В. Солодовников, В.А. Коньков, В.А. Суханов, О.В. Шевяков. – М.: Высш. шк., 1991. – 255 с.

6. Климов, Б.П. Тиристорный электропривод с исполнительным двигателем последовательного возбуждения / Б.П. Климов. – М.: Энергия, 1972. – 87 с.

7. Боровиков, Ю.С. Программируемый микроконтроллер для управления универсальным коллекторным двигателем / Ю.С. Боровиков, Ю.Н. Дементьев // Современные техника и технологии: труды V областной науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых. – Томск: Томский политехн. ун-т, 1999. – С. 329–330.

8. Беллман, М.Х. Переходные процессы в микродвигателях постоянного тока при импульсном питании / М.Х. Беллман. – Л.: Энергия, 1975. – 134 с.

9. Energy efficiency improvement of medical electric tools and devices / A.S. Meshkov, V.I. Susdorf, Y.N. Dementyev, D.A. Kaftasyev // The 2nd International Youth Forum “Smart Grids”, MATEC Web of Conferences. – 2014. – Vol. 19. – 01024. DOI: 10.1051/mateconf/20141901024

10. Пат. 1676418 Российская Федерация. Электропривод постоянного тока с двигателем последовательного возбуждения / А.Е. Алехин, Ю.Н. Дементьев, В.И. Суздорф. – Заявл. 06.02.1990.

11. Meshkov, A.S. Improving energy efficiency of smart house-hold appliances and devices / A.S. Meshkov, V.I. Susdorf // Journal of Power and Energy Engineering, USA. – 2014. – Vol. 2, no. 4. – P. 58–63. DOI: 10.4236/jpee.2014.24009

12. Gearless Micro Hydropower Plant for Small Water-Course / Yu. Dementyev, R. Kuzmin, A. Serikov et al. // Acta Polytechnica Hungarica. – 2017. – Vol. 14, iss. 4. – P. 155–166.

13. Мин Ту Аунг. Динамическая коррекция электропривода с двигателем последовательного возбуждения / Мин Ту Аунг, В.И. Суздорф // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. – 2018. – Т. 16, № 1, – С. 54–60. DOI: 10.18503/1995-2732-2018-16-1-54-60

Дементьев Юрий Николаевич, Ph.D., канд. техн. наук, профессор, Отделение электроэнергетики и электротехники, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск; dementev@tpu.ru.

Гончаров Валерий Иванович, д-р техн. наук, профессор, Отделение автоматизации и робототехники, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск; gvi@tpu.ru.

Негодин Кирилл Николаевич, аспирант, Отделение электроэнергетики и электротехники, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск; knn1@tpu.ru.

Мешков Александр Сергеевич, канд. техн. наук, доцент кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок», Комсомольский-на-Амуре государственный университет, г. Комсомольск-на-Амуре; meshkovlive@gmail.com.

Мин Ту Аунг, аспирант кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок», Комсомольский-на-Амуре государственный университет, г. Комсомольск-на-Амуре; minthuaung000370@gmail.com.

Суздорф Виктор Иванович, канд. техн. наук, профессор кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок», Комсомольский-на-Амуре государственный университет, г. Комсомольск-на-Амуре; susdorf@mail.ru.

Поступила в редакцию 9 сентября 2018 г.

DOI: 10.14529/power180312

FUNCTIONAL CONTROL SYNTHESIS OF SINGLE-PHASE LOW-POWER ELECTRIC DRIVES

*Yu.N. Dementyev*¹, *dementev@tpu.ru*,
*V.I. Goncharov*¹, *gvi@tpu.ru*,
*K.N. Negodin*¹, *knn1@tpu.ru*,
*A.S. Meshkov*², *meshkovlive@gmail.com*,
*Min Thu Aung*², *minthuaung000370@gmail.com*,
*V.I. Susdorf*², *susdorf@mail.ru*

¹ National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation,

² Komsomolsk-na-Amure State University, Komsomolsk-na-Amure, Russian Federation

This paper dwells upon the problem of using the spectral method to formalize the description of non-linear system motion in the space of controllable parameters, with evidence from a series-wound commutator motor power from a gate converter in the discontinuous-current region; it also covers the functional relationships of the controlled motion coordinates. The paper presents data on how the motor speed affects the change in its dynamic parameters. It gives approximated dependencies that enable generating the corrective signal by means of typical linear links. Results of the study might find use in designing motor drive systems as an electrified tool, or traction drives for optimal speed and minimum losses in dynamic modes.

Keywords: spectral characteristic, transfer function, quasi-stationary processes, electromagnetic processes, functional relationship.

The research is carried out at Tomsk Polytechnic University within the framework of Tomsk Polytechnic University Competitiveness Enhancement Program.

References

1. Solodovnikov V.V., Dmitriev A.N., Egupov N.D. *Spektral'nye metody rascheta i proektirovaniya sistem upravleniya* [Spectral Methods for Computing and Designing Control Systems]. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 1986. 440 p.
2. Kagan V.G., Lebedev G.V., Malinin L.I. *Poluprovodnikovye sistemy s dvigatelyami posledovatel'nogo vzbuzhdeniya* [Semiconducting Systems with Series-Wound Motors]. Moscow, Energiya Publ., 1971. 96 p.
3. Ivanov A.G., Belov G.A., Sergeev A.G. *Sistemy upravleniya poluprovodnikovymi preobrazovatelyami* [Control Systems of Semiconducting Converters]. Cheboksary, Chuvashiya University Publ., 2010. 448 p.
4. Meshkov A.S., Susdorf V.I. *Ustrojstvo dlya stabilizacii chastoty vrashcheniya odnofaznogo kollektornogo ehlektrodivigatelya* [Rotation Speed Stabilizer for Single-Phase Commutator Motors]. Patent RF, no. 2491706, 2013.
5. Solodovnikov V.V., Konkov V.A., Sukhanov V.A., Shevyakov O.V. *Mikroprocessornye avtomaticheskie sistemy regulirovaniya. Osnovy teorii i ehlementy. Uchebnoe posobie* [Microprocessor-Based Automotive Regulation Systems. Textbook]. Moscow, Visshaya shkola Publ., 1991. 255 p.
6. Klimov B.P. *Tiristornyj ehlektroprivod s ispolnitel'nyim dvigatelyem posledovatel'nogo vzbuzhdeniya* [Thyristor Electric Drive with Series-Wound Motor]. Moscow, Energiya Publ., 1972. 87 p.

7. Borovikov Yu.S. Dementyev Yu.N. [Programmable Microcontroller for Controlling a Universal Commutator Motor]. *Programmiruemyj mikrokontroller dlya upravleniya universal'nyim kollektornym dvigatelem* [V Regional Research and Practice Conference of Students, Graduate Students and Young Scientists on Modern Appliances and Technologies]. Tomsk, 1999, pp. 329–330. (in Russ.)
8. Bellman M.H. *Perekhodnye processy v mikrodvigatelyah postoyannogo toka pri impul'snom pitanii* [Transients in DC Micromotors with Pulsed Power Supply]. Leningrad, Energiya Publ., 1975. 134 p.
9. Meshkov A.S., Susdorf V.I., Dementyev Y.N., Kaftasyev D.A. Energy Efficiency Improvement of Medical Electric Tools and Devices. *The 2nd International Youth Forum “Smart Grids”, MATEC Web of Conferences*, 2014, vol. 19, 1024. DOI: 10.1051/mateconf/20141901024
10. Alehin A.E., Dementyev Yu.N., Susdorf V.I. *Elektroprivod postoyannogo toka s dvigatelem posledovatel'nogo vozbuzhdeniya* [DC Electric Drive with Sequential Excitation Motor]. Patent RF, no. 1676418, 1990.
11. Meshkov A.S., Susdorf V.I. Improving Energy Efficiency of Smart House-Hold Appliances and Devices. *Journal of Power and Energy Engineering, USA*, 2014, vol. 2, no. 4, pp. 58–63. DOI: 10.4236/jpee.2014.24009
12. Yury Dementyev, Roman Kuzmin, Aleksandr Serikov, Viktor Suzdorf, Kirill Negodin, Istvan Vajda. Gearless Micro Hydropower Plant for Small Water-course. *Acta Polytechnica Hungarica*, 2017, vol. 14, iss. 4, pp. 155–166.
13. Min Thu Aung, Susdorf V.I. [Dynamic Correction of an Electric Drive with a Series-Wound Motor]. *Dinamicheskaya korrekciya ehlektroprivoda s dvigatelem posledovatel'nogo vozbuzhdeniya* [Bulletin of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2018, vol. 16, no. 1, pp. 54–60. (in Russ.) DOI: 10.18503/1995-2732-2018-16-1-54-60

Received 9 September 2018

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Функциональный синтез управления в однофазных электроприводах малой мощности / Ю.Н. Дементьев, В.И. Гончаров, К.Н. Негодин и др. // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2018. – Т. 18, № 3. – С. 98–105. DOI: 10.14529/power180312

FOR CITATION

Dementyev Yu.N., Goncharov V.I., Negodin K.N., Meshkov A.S., Min Thu Aung, Susdorf V.I. Functional Control Synthesis of Single-Phase Low-Power Electric Drives. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*, 2018, vol. 18, no. 3, pp. 98–105. (in Russ.) DOI: 10.14529/power180312