

DOI: 10.26730/1999-4125-2017-5-137-144

УДК 621.3

## ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ДВИГАТЕЛЕМ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ

## ENERGY-EFFICIENT CONTROL OF SERIES-WOUND MOTOR

Мин Ту Аунг,

аспирант, e-mail: minthuaung000370@gmail.com

Min Thu Aung, postgraduate

Суздорф Виктор Иванович,

кандидат техн. наук, доцент, e-mail: Susdorf@mail.ru

Susdorf Viktor I., C.Sc. (Engineering), Associate Professor

Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет, 634013, Россия,  
г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27  
Komsomolsk-on-Amur State Technical University, 634013, Komsomolsk-on-Amur, Lenina, 27, Russian Federation

**Аннотация.** Статья посвящена научной проблематике, связанной с оптимизацией энергетики, алгоритмизации управления, анализа динамических свойств и управления электроприводом с двигателем последовательного возбуждения в переходных процессах для поиска оптимальных управлений с точки зрения потерь энергии. Электродвигатели последовательного возбуждения широко применяются в различных сферах от тягового электропривода до бытовых приборов и ручного электроинструмента, результаты исследования, приведенные в статье, констатируют наличие научной проблематики, связанной с оптимизацией энергетики подобных систем. Из целого комплекса проблем оптимизационной задачи в статье поставлен вопрос энергоэффективности управления. При анализе электромагнитных процессов и функциональном синтезе управлений использованы принцип динамического программирования и спектральный метод В.В.Солодовникова, а также моделирование в среде Matlab Simulink.

**Abstract.** The article is devoted to the scientific issues related to optimization of energy, algorithmic control, analysis of dynamic properties and control of electric drive with the series-wound motor in transient processes to find the optimal control from the point of view of energy losses. Series-wound motors are widely used in various fields from traction electric drives to home electric appliances and hand electric tools. The results of the study cited in the article ascertain the presence of scientific issues related to energy optimization of such systems. Out of the whole range of optimization problems, the article raises the issue of management efficiency. In the analysis of electromagnetic processes and the functional control synthesis the authors used dynamic programming principle and V. V. Solodovnikov spectral method as well as simulation in Matlab Simulink.

**Ключевые слова:** двигатель последовательного возбуждения, потери энергии, электромагнитные динамические процессы, алгоритмы управления, оптимизация.

**Keywords:** series-wound motor, energy loss, electromagnetic dynamic processes, control algorithms, optimization.

### Введение

Известно, что электродвигатели последовательного возбуждения (ДПВ) широко применяются в различных сферах от тягового электропривода до бытовых приборов и ручного электроинструмента. Литературные исследования показали наличие научной проблематики, связанной с оптимизацией энергетики подобных систем. С одной стороны, электроприводам с ДПВ не уделено достаточного внимания, с другой – в известных работах Ю.П. Петрова, В.Г. Кагана, Н.Ф. Ильинского и других ученых [2, 4, 5, 6, 7] – показана неоднозначность получаемых решений задачи оптимизации с точки зрения потерь. Из целого комплекса проблем оп-

тимизационной задачи наиболее остро стоит вопрос энергоэффективности управления.

### Постановка задачи

Имеются решения по оптимизации потерь, связанных с конструкцией при проектировании и изготовлении двигателей, известны пути оптимизации потерь в преобразователе, поэтому в настоящей работе рассматриваются процессы, связанные именно с управлением, при питании двигателя от статического преобразователя. Кроме того, так как в статическом режиме работы энергетические характеристики достаточно изучены, то представляет

интерес синтез оптимального закона управления в динамических режимах.

#### Синтез оптимальных законов управления

Согласно принципу взаимности изопериметрических задач, актуальным вопросом является разработка алгоритма синтеза управления на основе метода динамического программирования и критерия быстродействия [4]. С учетом ограничений на координаты движения, связанных с максимально допустимыми значениями напряжения питания и тока якоря, авторами исследованы предельные ди-

Алгоритм предусматривает оптимальную по быстродействию обработку приращения скорости двигателя при принятых ограничениях [3, 7]. Результаты исследования позволили определить закон изменения напряжения на двигателе для предельного быстродействия. Полученные сравнительные энергетические характеристики исследуемого двигателя с оптимальным управлением и при прямом пуске показывали, что потребленная электрическая энергия отличается в 36 раз. Дальнейший анализ показывает, что на интервале поддер-

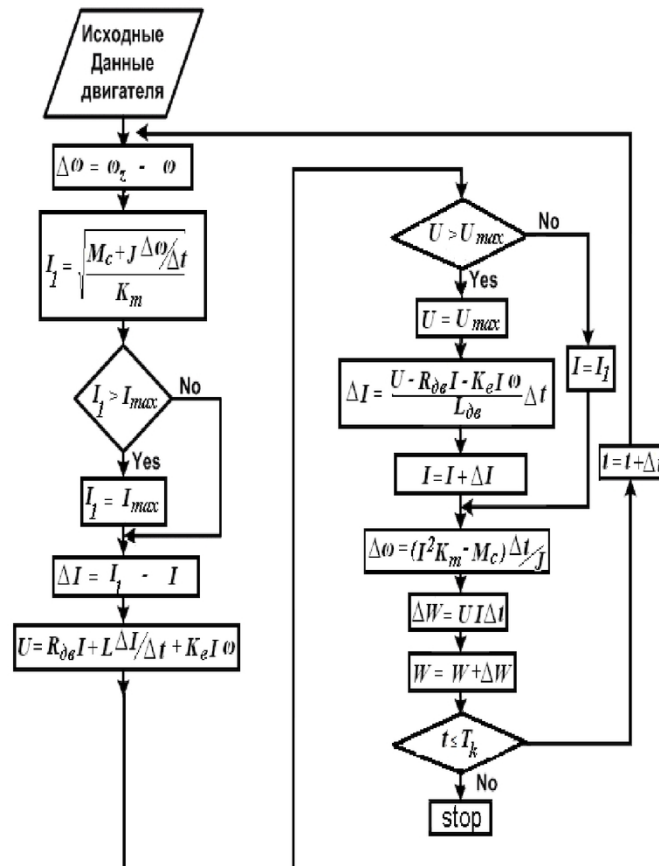


Рис. 1. Алгоритм оптимального управления ДПВ  
 Fig. 1. The algorithm of optimal control for the series-wound motor

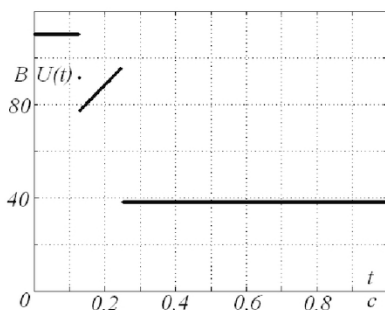


Рис. 2. а Fig. 2. а

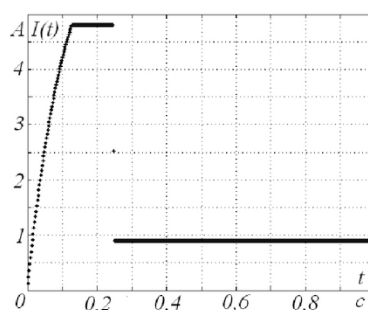


Рис. 2. б Fig. 2. б

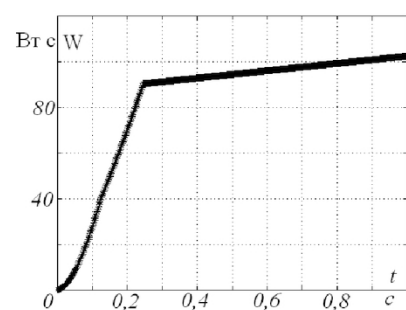


Рис. 2. в Fig. 2, в

намические характеристики однофазного коллекторного двигателя серии КОО561 на основе предложенного алгоритма (рисунок 1).

жания максимального значения тока закон управления может обеспечить ПИ регулятор, однако длительность интервала нарастания тока при ограничении на напряжение питания нелинейно зави-

сит от скорости двигателя и его нагрузки на валу (рис.2). Электромагнитная составляющая переходного процесса имеет постоянную времени [1]:  $T^* = T_s / (1 + \kappa \Omega)$ , где  $T_s$  – электромагнитная постоянная обмоток двигателя (зависит только от индуктивности и активного сопротивления обмоток двигателя),  $\Omega$  – скорость вращения вала, а  $\kappa$  – коэффициент, учитывающий коэффициент ЭДС якоря и аппроксимирующую кривую намагничивания. Решением уравнения электрического равновесия для ДПВ является выражение:

$$i(t) = \frac{U}{R} \left( 1 - e^{-\frac{t}{T^*}} \right),$$

где  $U$  – напряжение питания двигателя, а  $R$  – сопротивление обмоток двигателя.

Заменяя экспоненту степенным рядом, получим для первых двух членов (учитывая, что ток растет лишь до значения  $I_{max}$ , заданного ограничением по алгоритму на рисунке 1, который меньше, чем  $U/R$ ). Тогда выражение (1) можно записать в виде:

$$i(t) = \frac{U_{max}}{R} \left( t - \left( t - \frac{t}{T^*} \right) \right) = \frac{U_{max}}{R} \frac{t}{T^*},$$

Откуда, с учетом, что  $i(t) = I_{max}$ , получим для времени нарастания тока  $t_p$  и, следовательно, поддержания максимального значения напряжения

$U_{max}$  на двигателе:

$$t_p = \frac{I_{max} R T^*}{U_{max}}.$$

Более точная зависимость  $t_p$  может быть получена решением системы, описываемой дифференциальными уравнениями с переменными параметрами. Для электроприводов, находящихся постоянно в переходных режимах, решение данной задачи является актуальной.

На рис. 2 (а, б, с) приведены результаты расчета для оптимального закона изменения напряжения на двигателе, тока и потребленной энергии.

Предложен алгоритм расчета системы регулирования на основе спектрального метода Солодовникова В.В. с использованием метода припасовывания. Вначале определялись начальные условия в системе, далее на основе принятой системы базисных ортонормированных функций их спектральные характеристики. Аналогично определялись спектральные характеристики других входных сигналов и передаточные функции всех звеньев системы. Структура расчета приведена на рис. 3.

На рисунке 3 приняты следующие обозначения: где  $P_{cc}(t, t)$  – двумерная нестационарная передаточная функция дифференцирующего звена;

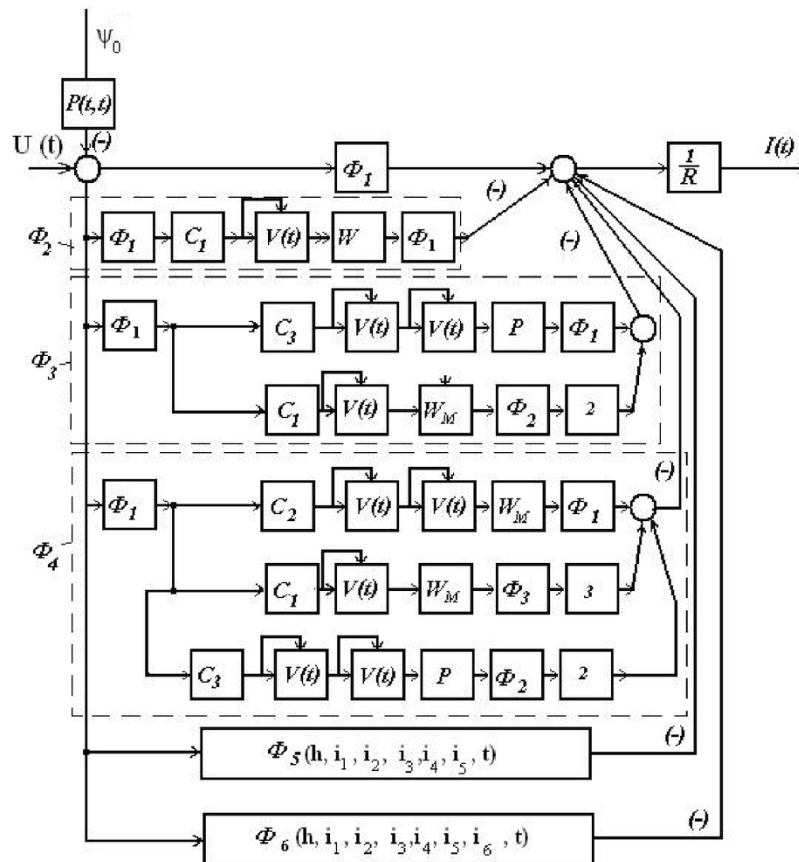


Рис. 3. Структура расчета нелинейной системы  
 Fig. 3. The structure of calculation of the nonlinear system

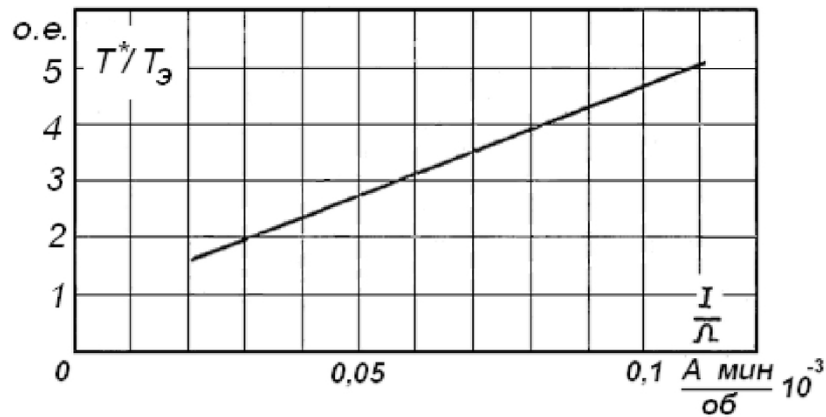


Рис. 5. Относительное значение «постоянной времени» тока двигателя  $T^*$  в зависимости от скорости вращения вала  $\Omega$  и тока  $I$  ( $T_3 = L/R$ )  
 Fig. 5. The relative importance of "time constant" of the motor current  $T^*$  depending on shaft speed  $\Omega$  and current  $I$  ( $T_e = L/R$ )

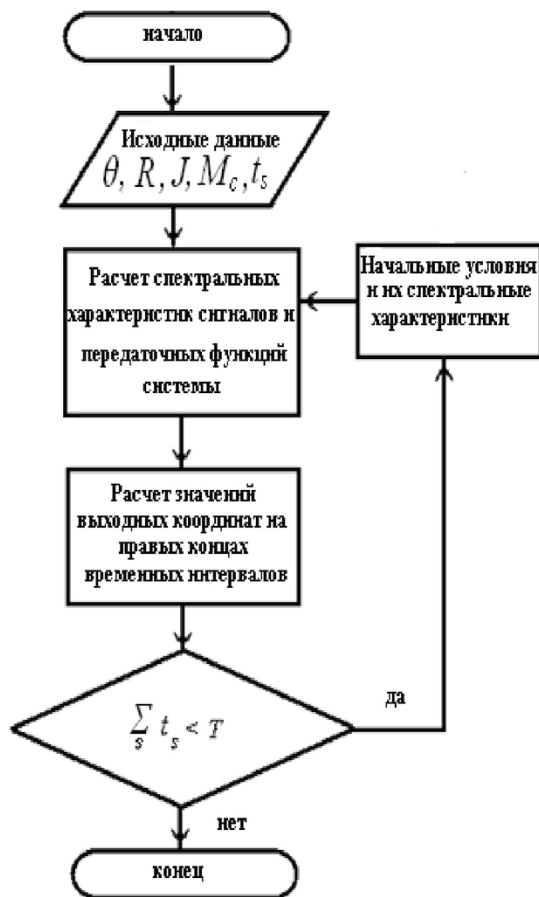


Рис. 4. Алгоритм численного расчета электромагнитных процессов  
 Fig. 4. The algorithm of numerical calculation of electromagnetic processes

$V_{cc}(t, t)$  – 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 преобразователя, э.д.с. вращения, полного потокосцепления, потокосцепления вза-

имной индукции обмоток якоря и возбуждения, электромагнитного момента и момента сопротивления на валу двигателя, соответственно;  $\Omega_0$ ,  $\psi_0$  – 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;  $\Phi_{\mu\nu}(t, t)$  – передаточные функции, характеризующие связь  $\mu$ -го выхода ( $\mu = 1, 2, 3$ ) с  $\nu$ -ым входом ( $\nu = 1, 2, 3, 4, 5$ ).

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 передаточной функции нелинейного звена  $\mu(L)$ , аппроксимирующей кривую намагничивания. Таким образом,  $\Phi_{31}(t, t)$  определяет зависимость  $I(\tau)$ , которая получена суммированием всех реакций системы.

Расчет поведения системы производился на выбранном интервале времени, при этом конечные значения выходных координат движения являлись начальными для последующего интервала времени. Расчет выполнен по одним и тем же уравнениям, менялись лишь начальные условия на каждом интервале (см. рис. 4).

Длительность выхода тока на предельное значение в зависимости от скорости двигателя является определяющим фактором для построения алгоритма управления приводом, на рисунке 5 приведена ее функциональная зависимость от скорости двигателя.

#### Синтез оптимального управления ДПВ с учетом влияния преобразователя

Математическому моделированию вентильных преобразователей посвящено большое количество работ. Можно выделить следующие методы моделирования: аналогового моделирования, цифрового моделирования, гармонического анализа и син-

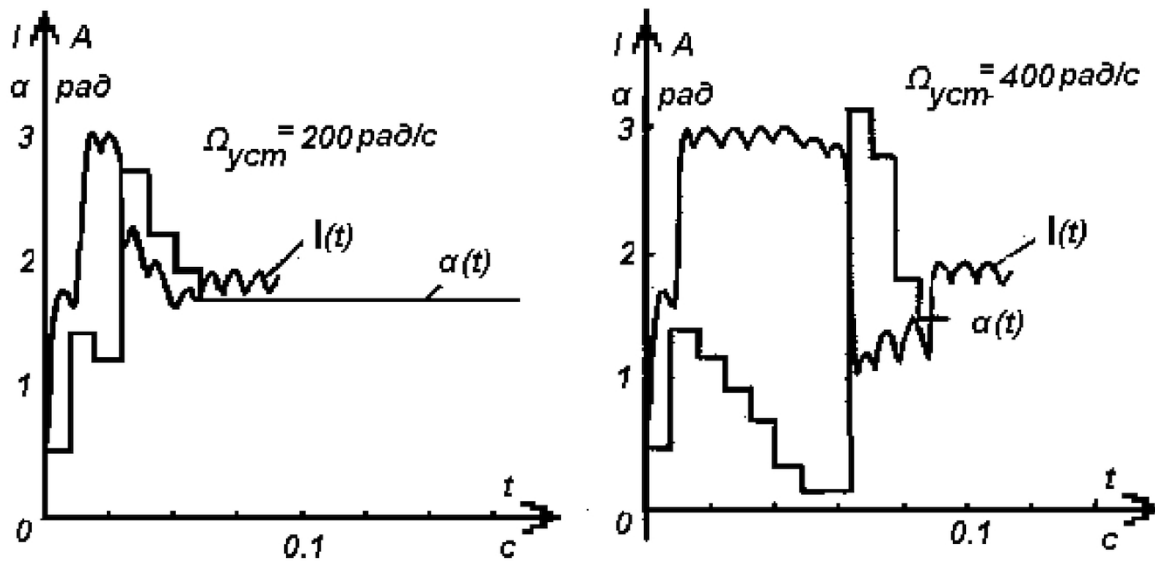


Рис. 6. Оптимальные переходные процессы с учетом дискретности преобразователя (структура САП представлена на рисунке 7.)  
 Fig. 6. Optimal transient processes taking into account the discreteness of the converter (SAR structure is shown in Fig. 7.)

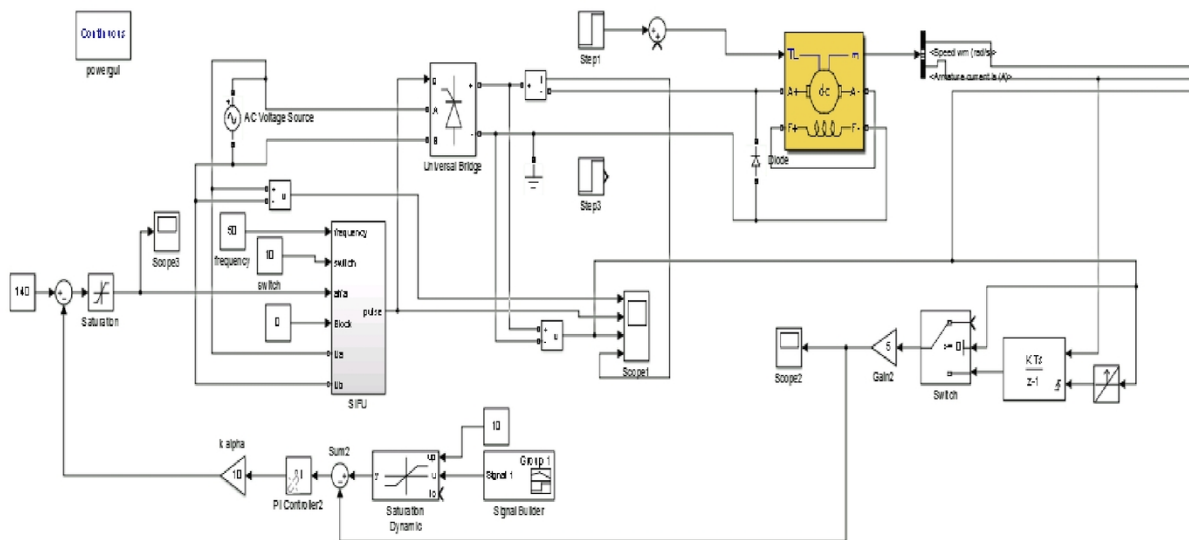


Рис. 7. Функциональная схема динамической коррекции ДПВ  
 Fig. 7. Functional scheme of dynamic correction for the series-wound motor

теза, фазового пространства, функций Уолша, переходных матриц, конечного и периодического преобразования Лапласа, эквивалентных источников, метод Z-преобразования, топологический, разностных уравнений, переключающих функций, приспособивания, интерполяционный.

Для составления алгоритма анализа двигателя как объекта управления при детерминированных входных воздействиях и начальных условиях выведены выражения для двумерных 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 описываются кусочно-гладкими, монотонными функциями, целесообразно в качестве базисной принять систему нестационарных ортонормированных тригонометрических функций, при этом получаются наиболее простые выражения для спектральных характеристик

Электромагнитные процессы при синусоидальной форме питающего напряжения хорошо изучены. Интерес представляет изучение процессов при питании от статического преобразователя с целью выявления новых закономерностей.





Рис. 8. Реакция системы на ступенчатое входное воздействие.  
 Fig. 8. The response of the system to a step input signal

Выходное напряжение преобразователя [1]:

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

где  $U_m$  – амплитуда питающего напряжения;  $n$  – номер вентиля, отсчитываемого от момента подачи первого сигнала управления;  $\theta$  – угол управления  $n$ -го включенного вентиля;  $\tau$  – текущая угловая координата питающего напряжения;  $\lambda_n$  – 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  $\lambda_n$  учитывается тем, что нестационарная спектральная характеристика выходного напряже-

ния преобразователя за пределами нестационарного отрезка  $t_n = \tau - \frac{2\pi n}{m} - \theta - \lambda_n$  равна нулю. Спектральные характеристики входных сигналов множительного звена определены из следующих выражений:

$$B_c(t) = S_c[U_m \sin \omega t]$$

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

$$A_c(t) = S_c [1(\omega t - \theta)]$$

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

Тогда нестационарная спектральная характеристика выходного напряжения преобразователя будет иметь вид:

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

Передающую функцию преобразователя, как звена системы автоматического регулирования, можно представить в виде:

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

Полученные методом припасовывания динамические зависимости выходных параметров системы управления электроприводом для тока двигателя при различных значениях заданной скорости вращения и, соответственно углах управления преобразователем  $\alpha$ , приведены на рис. 6.

Модельный эксперимент, реализованный в среде Matlab Simulink, где максимальное напряжение подают на двигатель в течение времени, зависящем от скорости, согласно найденному выражению, проведен по схеме, изображенной на рисунке 7.

Типичная для системы реакция на ступенчатое управляющее воздействие приведена на рисунке 8.

#### Заключение

Проведенные исследования, показали, что ра-

ционально вести моделирование объектов регулирования, отличающихся наличием существенных нелинейностей типа «кривая намагничивания», «множительное звено», а также элементов с зависимыми от времени параметрами, на базе спектрального метода расчета нелинейных нестационарных систем.

В результате исследования электромагнитных процессов выявлено:

- электромагнитная постоянная времени может изменяться, по крайней мере в 8 раз в диапазоне регулирования скорости;

- величина электромагнитной постоянной времени по отношению к периоду коммутации вентилей однофазного преобразователя приводит к однозначному выводу о наличии режима прерывистых токов во всем диапазоне регулирования и рабочих нагрузок;

- из-за дискретности управления двигателем, при наличии преобразователя, необходима коррекция закона управления и определение ее рациональной аппроксимации.

Предложенная методика аналитического определения параметров движения ОДПВ, показывает, что расчет может вестись только в мгновенных значениях на базе теории электромагнитного поля.

Предложен алгоритм синтеза оптимального управления с учетом ограничений на координаты движения;

Выявлена функциональная зависимость между скоростью нарастания тока и скоростью вращения вала двигателя, что позволяет синтезировать корректирующее управление динамикой по оптимальным энергетическим траекториям.

Предложена динамическая коррекция управления с функциональной зависимостью от скорости двигателя, что позволяет обеспечить оптимальную, с точки зрения энергетики, траекторию движения электромеханической системы.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Повышение энергетической эффективности медицинских инструментов и приборов / Дементьев Ю.Н., Кафтасев Д.А., Мешков А.С., Суздорф В.И. // В сборнике: Интеллектуальные энергосистемы. Труды II Международного молодежного форума. 2014. С. 103 -110.
2. Петров Ю.П. Оптимальное управление электроприводом / Ю.П. Петров -Государственное энергетическое издательство М., 1961 – 188 с.
3. Мешков, А.С. Энергоэффективный электрифицированный инструмент / А.С. Мешков, В.И. Суздорф – Сб. научно-исследовательских работ финалистов конкурса аспирантов и молодых ученых в области энергосбережения в промышленности, г. Новочеркасск: Лик, 2010. - С.49-53.
4. Каган В.Г. Полупроводниковые системы с двигателями последовательного возбуждения / В.Г. Каган, Г.В. Лебедев, Л.И. Малинин - М., Энергия, 1971. – 96 с.
5. Алехин А.Е., Дементьев Ю.Н., Суздорф В.И. Электропривод постоянного тока с двигателем последовательного возбуждения. Патент на изобретение RU 1676418 06.02.1990.
6. Беллман, М.Х. Переходные процессы в микродвигателях постоянного тока при импульсном питании. / М.Х. Беллман – Л.: Энергия, 1975. – 134 с.

7. Kaftasyev Energy efficiency improvement of medical electric tools and devices// A.S. Meshkov, V.I. Susdorf, Y. N. Dementiev , D.A. /The 2<sup>nd</sup> International Youth Forum “Smart Grids”, MATEC Web of Conferences, Volume 19, 2014, Published online: 15 December 2014.

8. Мешков, А.С. Формирование характеристик электроприводов малой мощности // Мешков А.С., Суздорф В.И., Гринкруг М.С. / «Вестник Приамурского государственного университета им. Шолом-Алейхема» № 4(17)2014, С. 61-71

9. Мешков, А.С. Электропривод малой мощности с улучшенными энергетическими характеристиками // Мешков А.С., Суздорф В.И. /Вестник ТОГУ, №1(28), 2013 г. с.115- 124

10. Устройство для стабилизации частоты вращения однофазного коллекторного электродвигателя / Мешков А.С., Суздорф В.И. - Пат. 2444838 Российская Федерация, МПК H02P7/29, опубл. 10.03.2012..

## REFERENCES

1. Energy efficiency of medical instruments and devices / Dementiev Yu. N., Kartashev D. A., Meshkov A. S., Susdorf V. I. // In book: smart grids. Proceedings of II International youth forum. 2014. p. 103 -110.

2. Petrov, Yu. P. Optimal actuator / Yu. p. Petrov-State energy publishing house, M., 1961 – p. 188.

3. Meshkov, A. C. energy-Efficient electric tools / A. S. Meshkov, V. I. Suzdorf – Sat. research works of the finalists of the contest of students and young scientists in the field of energy saving in industry, Novocherkassk: Face, 2010. - pp. 49-53.

4. Kagan, V. G. Semiconductor systems with motors sequential excitation / V. G. Kagan, G. V. Lebedev, L. I. Malinin, M., Energy, 1971. – p. 96.

5. DC drive motor with a serial excitation/ Alyokhin A. E., Dementiev Yu. N., Susdorf V.I.- the patent for invention RUS 1676418 06.02.1990.

6. Bellman, M. H. Transients in the DC micro-motors with pulse power. / M. H. Bellman – L.: Energy, 1975. – p. 134.

7. Meshkov, A. S. Energy efficiency improvement of medical electric tools and devices// Meshkov A. S., Susdorf V. I., Dementiev Y N., Kaftasyev D. A /The 2<sup>nd</sup> International Youth Forum “Smart Grids”, MATEC Web of Conferences, Volume 19, 2014, Published online: 15 December 2014.

8. Meshkov, A S. The formation of the characteristics of the actuator is low power single-phase commutator motors // Meshkov, A S., Susdorf V I., Grinkrug M. S. / Bulletin of Priamursky state University. Sholom-Aleichem. 2014, no.4(17). Pp. 61-71.

9. Meshkov, A. S., Susdorf V. I.. Electric drive low power with improved power characteristics / Bulletin of Pacific national University. 2013.

No. 1 (28). pp. 115-124.

10. The device to stabilise rotation frequency of single-phase commutator motor / Susdorf V. I., Meshkov, A. S. - the patent for invention RUS 2444838 24.08.2010.

Поступило в редакцию 19.09.2017

Received 19.09.2017