

Синтез системы управления электроприводом на основе вентильных двигателей с возбуждением от постоянных магнитов

Нгуен Тхань Зыонг

Национальный исследовательский университет «МИЭТ»

Аннотация: Работа посвящена синтезу системы управления электроприводом на основе вентильных двигателей с возбуждением от постоянных магнитов (ВДПМ) методом систем подчиненного регулирования. Система подчиненного регулирования электропривода ВДПМ построена во вращающейся с ротором системе координат d-q. Определены структура и параметры регуляторов тока и скорости вращения ВДПМ. Разработана модель системы подчиненного регулирования ВДПМ в среде Matlab-Simulink. Показано, что качество переходного процесса системы регулирования тока i_d , i_q зависит только от значения некомпенсируемой постоянной времени T_μ . Выделены влияния значения T_μ на работу системы регулирования скорости вращения ω ВДПМ. Установлено, что оптимальным является выбором значения $T_\mu = 1$, которое обеспечивает быстрое действие системы управления электроприводом ВДПМ, а также приемлемое значение пускового тока.

Ключевые слова: вентильный двигатель с возбуждением от постоянных магнитов, электропривод, синтез системы управления, подчиненное регулирование, регулирование тока, регулирование скорости вращения.

Введение

На сегодняшний день вентильные двигатели с возбуждением от постоянных магнитов (ВДПМ) находят широкое применение во многих областях жизнедеятельности человечества [1-3]. Они имеют целый ряд преимуществ перед традиционными асинхронными двигателями и двигателями постоянного тока, таких, как: простота конструкции, высокие удельные показатели, возможность выдерживать нагрузки в широком диапазоне частот вращения, надежность в эксплуатации, высокая точность регулирования выходных параметров за счет использования векторного управления [4, 5]. Несмотря на свои преимущества, система векторного управления ВДПМ представляет собой сложную многосвязную систему, что усложняет процесс анализа и синтеза. В данной работе предложен один подход к решению задачи синтеза системы управления электроприводом

ВДПМ, который обеспечивает высокую динамическую характеристику, а также приемлемое значение переменных ВДПМ в пусковом режиме.

I. Математическая модель ВДПМ

Математические модели ВДПМ в неподвижных системах АВС и α - β координат представлены в работах [6-8]. В данной работе используется математическое описание ВДПМ во вращающейся с ротором системе координат d-q, которая описывается системой уравнений (1). На рис. 1 показана модель ВДПМ в относительных единицах в d-q системе координат [9, 10].

$$\begin{cases} U_d = L \frac{dI_d}{dt} + RI_d - L \cdot I_q \cdot \Omega \\ U_q = L \frac{dI_q}{dt} + RI_q + L \cdot I_d \cdot \Omega + \Psi_m \cdot \Omega \\ M = \frac{3}{2} p \Psi_m I_q \end{cases} \quad \begin{cases} J \frac{d\Omega}{dt} = p(M - M_H) \\ \frac{d\varphi}{dt} = \Omega \end{cases} \quad (1)$$

Где: I_d , I_q , - токи по осям d и q соответственно (А); U_n , U_d , U_q – амплитуда и мгновенные напряжения по осям d и q (В); Ω – угловая скорость ротора (рад/с); t – время (с); R – активное сопротивление фазы обмотки (Ом); L – эквивалентная индуктивность фазы обмотки (Г); M_H – момент нагрузки на роторе (Нм); J – момент инерции ротора с учетом нагрузки (кг·м²); p – число магнитных полюсов на роторе; Ψ_m – максимальное потокосцепление обмотки статора, обусловленное постоянным магнитом ротора (Вб).

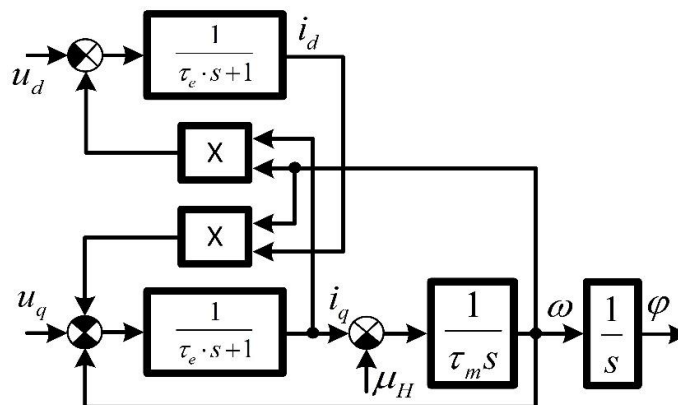


Рис. 1: Модель ВДПМ в относительных единицах в d-q системе координат

Переводим (1) в относительную систему уравнений, приняв за базовые единицы номинальные значения переменных ВДПМ.

$$i_x = \frac{I_x}{I_\delta}; u_x = \frac{U_x}{U_\delta}; \omega = \frac{\Omega}{\Omega_\delta}; \mu = \frac{M}{M_\delta}; \tau = \Omega_\delta \cdot t; x = d, q$$

Где базовые величины:

$$U_\delta = U_{НОМ}; I_\delta = \frac{U_\delta}{R}; \Omega_\delta = \frac{U_\delta}{\Psi_m}; M_\delta = \frac{3}{2} p \Psi_m I_\delta; \tau_e = \frac{\Omega_\delta L}{R}; \tau_m = \frac{J \Omega_\delta^2}{M_\delta}$$

$$\begin{cases} \frac{di_d}{d\tau} = \frac{1}{\tau_e} u_d - \frac{1}{\tau_e} i_d + \mu \omega; \\ \frac{d\mu}{d\tau} = \frac{1}{\tau_e} u_q - \frac{1}{\tau_e} \mu - i_d \omega - \frac{1}{\tau_e} \omega \end{cases} \quad \begin{cases} i_q = \mu \\ \frac{d\omega}{d\tau} = \frac{1}{\tau_m} \mu - \frac{1}{\tau_m} \mu_H \end{cases} \quad (2)$$

Где: i_d, i_q – относительные токи по оси d и q; μ – относительный электромагнитный момент; ω – относительная скорость вращения ротора; u_n – амплитудная величина напряжения; μ_H – относительная нагрузка; τ_e – электрическая постоянная ВДПМ; τ_m – механическая постоянная ВДПМ.

Введем в рассмотрение ВДПМ со следующими параметрами: номинальная мощность $P_{НОМ} = 3$ кВт; напряжение питания $U_{НОМ} = 48$ В; номинальный выходной момент $M_{НОМ_ВД} = 10$ Нм; номинальный ток $I_H = 71$ А; $R = 0,045$ Ом; $L = 0,5$ мГн; $\Psi_m = 0,127$ Вб; $J = 3,84 \cdot 10^{-3}$ кг·м²; $p = 4$. Величины базовых единиц исследуемого ВДПМ приведены в таблице 1.

Таблица 1: Базовые величины ВДПМ

$U_\delta, В$	$I_\delta, А$	$\Omega_\delta, рад/с$	$M_\delta, Нм$	τ_e	τ_m
48	1066,67	377,95	812,8	4,2	0,675

II. Синтез системы управления электроприводом ВДПМ

На рис. 2 представлена модель, построенная в среде Matlab-Simulink, системы регулирования электропривода ВДПМ. Система строится в виде двухконтурной системы регулирования [11, 12]. Внутренние контура отвечают за регулирования величин i_d и i_q , а для скорости вращения ω

формируется внешний контур регулирования по каналу i_q . Где $W1(s) = W2(s) = \frac{1}{\tau_e \cdot s + 1}$ – передаточные функции токов i_d и i_q , $R1(s)$ и $R2(s)$ – передаточные функции регуляторов токов i_d и i_q , $R3(s)$ – передаточная функция регулятора скорости [13, 14].

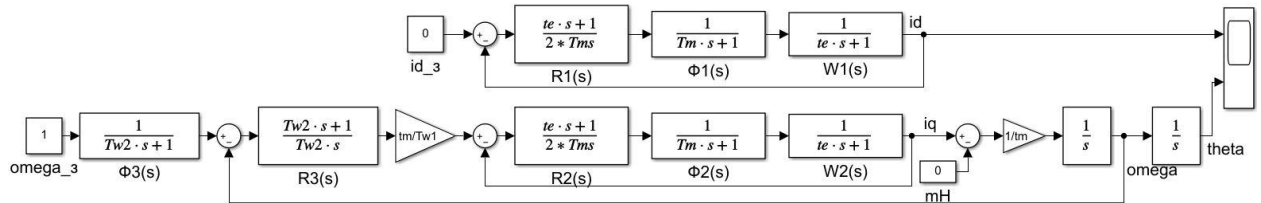


Рис. 2: Система подчиненного регулирования электропривода ВДПМ.

При синтезе предложено, что все переменные системы доступны измерению, внутренние перекрестные связи системы управления компенсированы при вычислении заданного сигнала и не влияют на работу регуляторов. Для определения структуры и параметров регулятора используется метод синтеза систем подчиненного регулирования.

1. Синтез регулятора внутренних контуров i_d , i_q

Передаточные функции токов $W1(s)$, $W2(s)$ идентичны и представляют собой апериодическое звено первого порядка с постоянной времени τ_e . По методике синтеза систем подчиненного регулирования можно настроить данные контура на модульный оптимум. При этом регулятор $R1(s)$ состоит из двух звеньев $R_{K1}(s)$ и $R_{I1}(s)$, как показано на рис. 3. Звено $R_{K1}(s)$ отвечает за компенсацию действия объекта регулирования и имеет передаточную функцию, обратную передаточной функции звена объекта, а вторая составляющая $R_{I1}(s)$ является интегрирующим звеном, обеспечивающим астатизм системы. Фильтр $\Phi1(s)$ ограничивает полосу пропускания системы. Некомпенсируемая постоянная времени T_m выбирается из желаемых показателей переходного процесса. При настройке на модульный оптимум

показатель качества переходного процесса системы не зависит от параметров объекта регулирования и полностью определяются величиной T_μ .

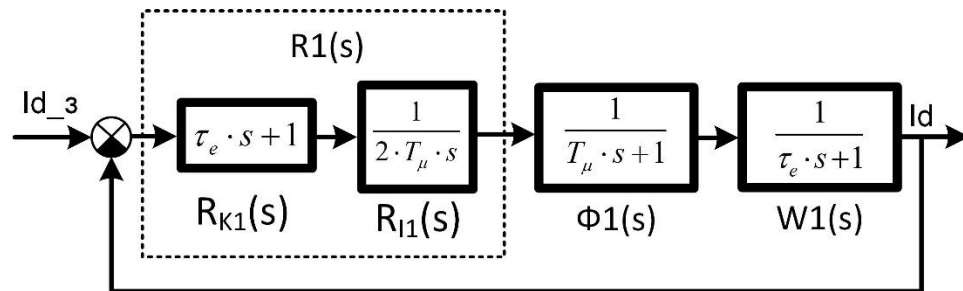


Рис. 3: Система регулирования тока

В итоге передаточная функция регулятора $R1(s)$ определяется формулой:

$$R1(s) = R_{K1}(s)R_{I1}(s) = \frac{\tau_e s + 1}{2T_\mu s} = \frac{\tau_e}{2T_\mu} + \frac{1}{2T_\mu} \frac{1}{s} \quad (3)$$

А передаточная функция замкнутой системы регулирования для i_d и i_q имеет вид:

$$W_{CAP2}(s) = W_{CAP1}(s) = \frac{R1(s)\Phi 1(s)W1(s)}{1 + R1(s)\Phi 1(s)W1(s)} = \frac{1}{2T_\mu^2 s^2 + 2T_\mu s + 1} \quad (4)$$

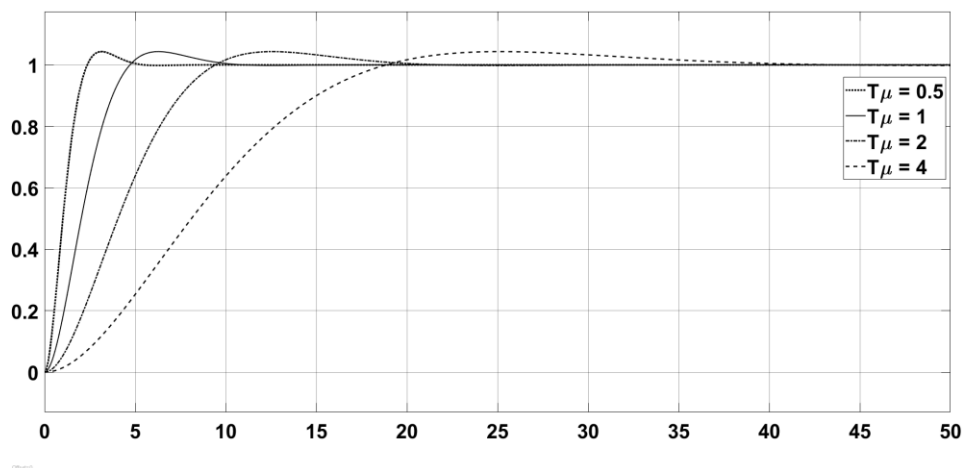


Рис. 4: Реакция системы регулирования тока на ступенчатый сигнал.

В результате применения методов синтеза систем подчиненного регулирования получены регуляторы токов i_d и i_q ПИ типа с коэффициентом усиления $K_\Pi = \tau_e / 2T_\mu$, а коэффициент интегрирующей составляющей равен K_I

$=1/2T_{\mu}$. На рис. 4 показана реакция системы на ступенчатый сигнал при различных значениях некомпенсированной постоянной времени T_{μ} .

Как показано на рис. 4, с ростом некомпенсированной постоянной времени T_{μ} время переходного процесса увеличивается и составляет $4,1T_{\mu}$, время нарастания - $4.7T_{\mu}$, при этом перерегулирование для всех величин T_{μ} постоянное и равно $\sigma \approx 4.3\%$, что приемлемо для силовой схемы электропривода. Отсюда можно сделать вывод о том, что чем меньше значения некомпенсированной постоянной времени T_{μ} , тем больше быстродействие системы регулирования тока. Уменьшение T_{μ} не приведет к повышению максимального тока и возникновению дополнительных колебаний переходного процесса.

2. Синтез регулятора скорости вращения ВДПМ

Система автоматического регулирования скорости строится по каналу i_q показана на рис. 5. Она настроена на симметричный оптимум и формируется путем дополнения к внутреннему контуру регулирования по i_q контуром по скорости.

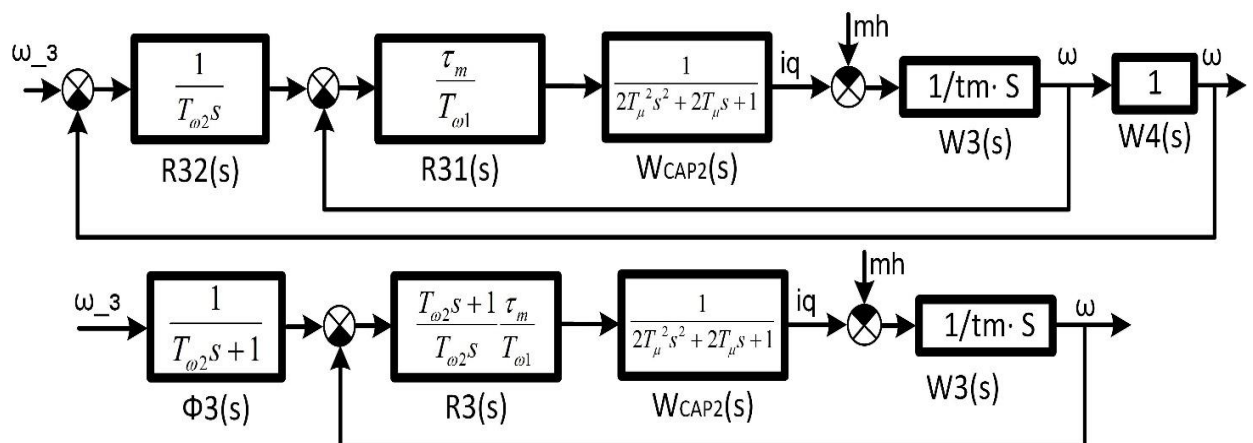


Рис. 5: Система автоматического регулирования скорости. а) первоначальная система с двумя контурами регулирования; б) система регулирования после преобразования с ПИ-регулятором и фильтром сигнала задания

По сути, как показано на рис. 5а, данная система является трехконтурной, в которой внутренний контур отвечает за регулирование тока i_q , а для регулирования скорости образуются 2 внешних контура, промежуточный и внешний. Благодаря такому подходу, система обладает астатизмом первого порядка не только по управлению, но и по возмущению, которое в данном случае является относительным моментом нагрузки μ_H .

По методике синтеза систем подчиненного регулирования, для промежуточного контура со звеном объекта $W3(s)$, регулятор $R31(s)$ имеет П-тип с постоянной времени $T_{\omega 1} = 4T_{\mu}$. А для внешнего контура со звеном объекта $W4(s) = 1$, регулятор $R32(s)$ имеет И-тип, где постоянная времени равна $T_{\omega 2} = 2T_{\omega 1} = 8T_{\mu}$.

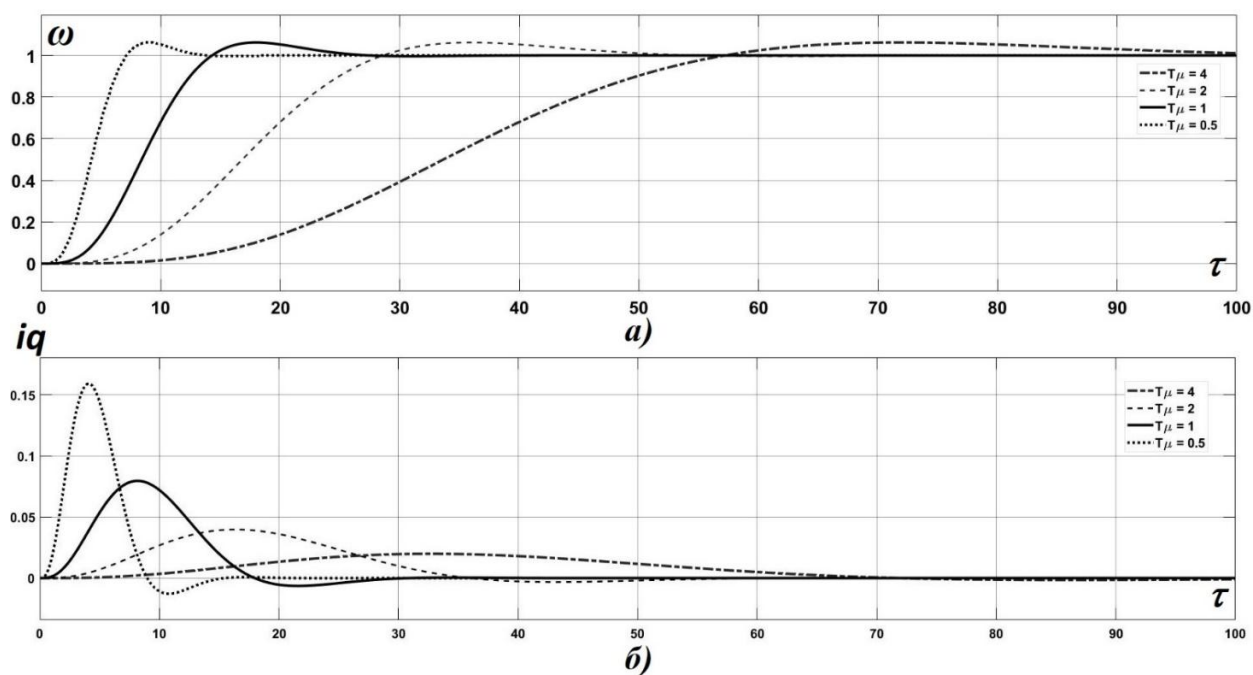


Рис. 6: Переходный процесс системы автоматического регулирования скорости. а) переходный процесс контура регулирования скорости; б) переходный процесс системы регулирования тока i_q

С помощью правил эквивалентных преобразований структурных схем системы автоматического управления можно объединить 2 сумматора на входе схемы, в результате, как показано на рис. 5б, получена система

автоматического регулирования скорости с регулятором $R3(s)$ ПИ типа и входным фильтром в виде апериодического звена. Коэффициенты ПИ-регулятора скорости при этом определяются следующим образом:

$$K_{P\omega} = \frac{\tau_m}{T_{\omega 1}}; K_{I\omega} = \frac{\tau_m}{T_{\omega 1} T_{\omega 2}}$$

На рис. 6 представлен переходный процесс системы автоматического регулирования скорости для различных значений некомпенсированной постоянной времени T_μ при отсутствии нагрузки на валу двигателя $\mu_H = 0$.

Как и в случае регулятора тока, система регулирования скорости имеет большее быстродействие при убывании значения некомпенсированной постоянной времени T_μ , перерегулирование системы также не зависит от T_μ и составляет 6,2%. По физическому смыслу графики на рис. 6 описывают пусковой режим работы ВДПМ. Несмотря на то, что уменьшение значения T_μ приводит к увеличению быстродействия системы, из графика на рис. 6б можно наблюдать за импульсом пускового тока. Чем меньше значения T_μ , тем более кратковременным становится пусковой ток, при $T_\mu = 0,5$ пусковой ток i_q имеет амплитуду 0,16, а для $T_\mu = 2$ амплитуда тока составляет 0,045, время переходного процесса при этом в 4 раза увеличивается. Короткие импульсы большой амплитуды неблагоприятно влияют на работу электропривода ВДПМ, они приводят к уменьшению срока службы силовых транзисторов и даже к их выходу из строя. Поэтому в данном случае оптимальным является выбор значения $T_\mu = 1$, где для контура тока время переходного процесса составляет $\tau = 4,1$ и амплитуда пускового тока $i_{qп} = 0,08$, что в 1,2 раз больше значения номинального тока, а для контура скорости время переходного процесса составляет $\tau = 20,1$, что соответствует 53 мс.

Заключение

В данной работе проведен синтез систем подчиненного регулирования тока и скорости ВДПМ. Определены структура и параметры регулятора для всех контуров регулирования. При синтезе системы регулирования тока показано, что качество переходного процесса системы не зависит от параметров объекта регулирования и полностью определяется величиной T_{μ} , уменьшение T_{μ} приводит к увеличению быстродействия системы и не создает дополнительные колебания переходного процесса. При синтезе системы регулирования скорости вращения установлено, что оптимальным выбором значения некомпенсируемой постоянной времени является $T_{\mu} = 1$, для которого кратность пускового тока равна 1,2, а время переходного процесса составляет 53 мс. Для подтверждения эффективности обоснованного метода была построена модель системы подчиненного регулирования электропривода ВДПМ в среде Matlab-Simulink. Результаты моделирования показали эффективность метода систем подчиненного регулирования при синтезе системы управления ВДПМ и возможность его применения для решений научных и инженерных задач.

Литература

1. Адалев А. С., Булгаков С. А., Кибардин А. С., Кучинский В. Г., Сойкин В. Ф. Современные вентильные электродвигатели с постоянными магнитами для привода нефтеперекачивающих насосов. Перспективы использования на объектах ТЭК // Трубопроводный транспорт: теория и практика. 2008. №1(11). С. 66-69.
2. Урсу В. Е., Урсу В. В. Патент № 171721 U1 Российская Федерация, МПК В64С 13/50, В64С 13/28. Система управления основным летными функциями самолета с помощью рулевых поверхностей с

электромеханическими приводами: № 2016111952: заявл. 30.03.2016: опубл. 13.06.2017.

3. Романовский В. В., Никифоров Б. В., Макаров А. М. Перспективы развития систем электродвижения // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова. 2018. №3. С. 586-596.

4. Овчинников И. Е. Вентильные электрические двигатели и привод на их основе (малая и средняя мощность): Курс лекций. СПб: КОРОНА-Век, 2016. 336 с.

5. Чернышев А. Д. Сравнительный анализ различных типов электрических двигателей в составе тягового привода электрической трансмиссии // Электротехника: сетевой электронный научный журнал. 2016. №3. С. 47-54.

6. Schagin, A. V. and Nguyen, T. D. 2020. Development of Speed Control System for BLDC Motor with Power Factor Correction. 2020 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, EIconRus 2020, pp: 2411-2414.

7. Nguyen Duong T., 2021 Parametric Identification of Electric Drives Using the Ordinary Least Squares Method. 2021 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, EIconRus 2021, pp: 2640-2644.

8. Щагин А. В., Нгуен Тхань Зыонг. Задача параметрической идентификации методом наименьших квадратов на примере вентильного двигателя // Инженерный вестник Дона. 2020. №8. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n8y2020/6569

9. Герман-Галкин С.Г. Компьютерное моделирование полупроводниковых систем в MatLab 6.0: учебное пособие. СПб. Корона Принт, 2017. 320 с.

10. Герман-Галкин С.Г., Кардонов Г.А. Электрические машины: Лабораторные работы на ПК: учебное пособие. СПб. Корона Принт. 2003. 256 с.
11. Орлов В. В., Белоусова О. В. Исследование контура тока в электроприводах низкоскоростных моментных двигателей // Энергия - XXI век. 2018. №3(103). С. 75-77.
12. Полющенков И. С. Регулирование координат системы с двухдвигательным электромеханическим торсионом // Вестник Московского энергетического института. 2018. №2. С. 87-94.
13. Туркин И. И., Мин Хеин Совершенствование систем управления электроприводами на основе принципов подчиненного регулирования и самоорганизации // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. 2016. №3. С. 86-92.
14. Ханнанов А. М., Чупина К. В., Усольцев В. К. Повышение астатизма системы автоматического управления путем введения положительной обратной связи // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. 2020. №2(43). С. 67-76.

References

1. Adalev A. S., Bulgakov S. A., Kibardin A. S., Kuchinskiy V. G., Soykin V. F. Truboprovodnyy transport: teoriya i praktika. 2008. №1 (11). pp. 66-69.
 2. Ursu V. YE., Ursu V. V. Patent № 171721 U1 Rossiyskaya Federatsiya, MPK B64C 13/50, B64C 13/28. Sistema upravleniya osnovnym letnymi funktsiyami samoleta s pomoshch'yu rulevykh poverkhnostey s elektromekhanicheskimi privodami [The control system of the main flight functions of the aircraft using steering surfaces with electromechanical drives]. № 2016111952. zayavl. 30.03.2016. opubl. 13.06.2017.
-

3. Romanovskiy V. V., Nikiforov B. V., Makarov A. M. Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S.O. Makarova. 2018. №3. pp. 586-596.

4. I. E. Ovchinnikov, Ventil'nye jelektricheskie dvigateli i privod na ih osnove (malaja i srednjaja moshhnost') Kurs lekciy [BLDC motors and a drive based on them (low and medium power) Course of lectures]. SPb.: KORONA-Vek, 2016. 336 p.

5. Chernyshev A. D. Elektrotehnika: setevoy elektronnyy nauchnyy zhurnal. 2016. №3. pp. 47-54.

6. Schagin, A. V. and Nguyen, T. D. 2020. Development of Speed Control System for BLDC Motor with Power Factor Correction. 2020 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, EIconRus 2020, pp. 2411-2414.

7. Nguyen Duong T., 2021. Parametric Identification of Electric Drives Using the Ordinary Least Squares Method. 2021 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, EIconRus 2021, pp. 2640-2644.

8. Shchagin A. V., Nguyen Tkhan' Zyong. Inzhenernyj vestnik Dona. 2020. №8. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n8y2020/6569.

9. German-Galkin S. G. Komp'yuternoe modelirovanie poluprovodnikovyyh sistem v MATLAB 6.0 Uchebnoe posobie [Simulation of Semiconductor Systems in MATLAB 6.0 Tutorial]. SPb. KORONA print, 2001. 320 p.

10. German-Galkin S.G., Kardonov G.A. Elektricheskiye mashiny: Laboratorn'yye raboty na PK uchebnoye posobiye [Electrical Machines: PC Labs tutorial]. SPb. Korona Print. 2003. 256 p.

11. Orlov V. V., Belousova O. V. Energiya - XXI vek. 2018. №3 (103). pp. 75-77.



12. Polyushchenkov I. S. Vestnik Moskovskogo energeticheskogo instituta. 2018. №2. pp. 87-94.
13. Turkin I. I., Min Khein. Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Morskaya tekhnika i tekhnologiya. 2016. №3. pp. 86-92.
14. Khannanov A. M., Chupina K. V., Usol'tsev V. K. Vestnik Inzhenernoy shkoly Dal'nevostochnogo federal'nogo universiteta. 2020. №2(43). pp. 67-76.