

РАЗРАБОТКА ЦЕПЕПОЛЕВОЙ МОДЕЛИ ЗАМКНУТОЙ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОПРИВОДА НА БАЗЕ ВЕНТИЛЬНОГО РЕАКТИВНОГО ДВИГАТЕЛЯ

А. В. Качура, С. В. Колычев, А. М. Съянов

Днепродзержинский государственный технический университет

Аннотация. Рассмотрена математическая модель замкнутой системы электропривода (ЭП) на базе вентильного реактивного двигателя (ВРД). В результате объединения полевой модели ВРД и цепевой модели системы управления получена цепе-полевая модель ЭП на основе метода конечных элементов. Модель учитывает конструктивные особенности двигателя и позволяет исследовать ЭП в динамических режимах работы. На основе предложенной модели получены электромагнитные и электромеханические параметры серийного ВРД SRM-57-100-4 в режиме пуска

Ключевые слова: вентильный реактивный двигатель, замкнутая система электропривода, система управления, метод конечных элементов, динамический режим работы, режим пуска.

Введение

За последние десятилетия в мировой промышленности происходят процессы интенсивного внедрения автоматизированных производственных систем и создания технологических комплексов с использованием современного оборудования. На сегодняшний день значительную часть этого оборудования составляют электроприводы (ЭП) на базе вентильных реактивных двигателей (ВРД). Подобные ЭП являются основной составной частью большинства периферийных устройств, систем точного позиционирования, станков с ЧПУ, роботов. Применение ВРД обусловлено их специфичными свойствами, среди которых можно выделить: 1) возможность быстрого старта и реверсирования; 2) прецизионное позиционирование; 3) широкий диапазон регулирования; 4) возможность получения низких скоростей вращения; 5) высокая надежность, связанная с отсутствием щеточного узла. В связи с этим актуальной является задача исследования электромагнитных параметров и характеристик ВРД в составе систем управляемого ЭП.

1. Постановка задачи

При создании ЭП на базе ВРД возникает необходимость согласования электромеханической и схмотехнической части с учётом их взаимного влияния. К основным трудностям, возникающим при построении корректной модели "система управления - ВРД", можно отнести: необходимость учёта взаимного энергообмена между двигателем и электронным коммутатором, явно выраженная зубчатая структура стато-

ра и ротора ВРД, нелинейность свойств материалов, несинусоидальность индукции в воздушном зазоре. Указанные трудности обуславливают необходимость применения численных методов, в частности метода конечных элементов (МКЭ).

В работе рассмотрена цепеполевая математическая модель ЭП на базе ВРД SRM-57-100-4 производства ТОВ "Электротехника" (г. Николаев), который применяется в аппарате искусственной вентиляции легких серии "Бриз-Т". Магнитная система ВРД выполнена с соотношением полюсов статора к ротору 8/6, статорный и роторный пакеты набраны из электротехнической стали марки 2211, толщина пластин 0,5 мм. Активная длина статора и ротора 28 мм. Конструктивные параметры двигателя приведены в [1], его технические данные - в табл. 1.

Для расчета электромагнитных параметров ВРД воспользуемся МКЭ [2]. Данный метод позволяет корректно описать сложную геометрию двигателя с учетом нелинейных свойств материалов в стационарных и переходных режимах работы. В работе рассмотрена двухмерная модель ВРД, в которой приняты следующие допущения: 1) преобразователь частоты представляется в виде идеального инвертора, который питается от источника постоянного напряжения бесконечной мощности; 2) модель двигателя рассматривается в прямоугольной системе координат; 3) плотность тока в обмотке распределяется равномерно по всему сечению; 4) мелкие конструктивные детали (технологические канавки, крепежные выемки и отверстия) упрощены.

© А.В. Качура, С.В. Колычев, А.М. Съянов, 2017

Таблиця 1.

Технические данные ВРД SRM 57-100-4

Номинальный момент, Нм	0,05
Номинальная мощность, Вт	21
Номинальное напряжение, В	24
Максимальная частота вращения, об/мин	4500
Максимальный момент, Нм	0,1
Глубина регулирования	1:500
Момент инерции ротора, кг м ²	0,0000 055
Масса, кг	0,75
Способ охлаждения	IC0040
Степень защиты	IP54

Целью работы является создание цепеполовой модели замкнутой системы ЭП на базе ВРД SRM 57-100-4 для исследования переходных режимов работы с учетом энергообмена между коммутатором и двигателем.

2. Результаты работы.

В преобразователе частоты электромагнитные процессы зависят от ряда факторов: соединения нагрузки, ее характера, алгоритма переключения вентилей, схемы инвертора. Рассмотрим модель однополярного преобразователя со звеном постоянного тока. При коммутации ключей в однополярном режиме график напряжения представляет собой знакопостоянную импульсную функцию с периодом коммутации 60 эл. град. (рис. 1).

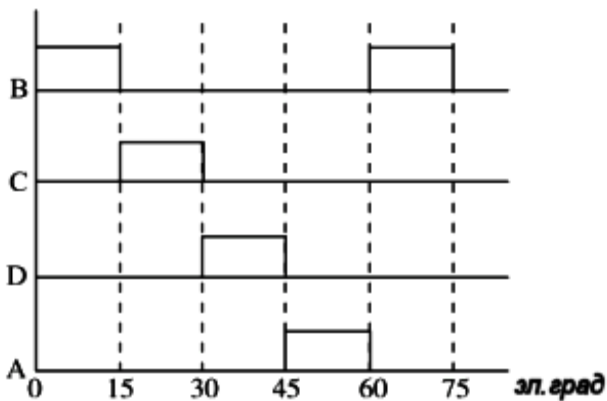


Рис.1. – График коммутации ключей инвертора

Математически импульсная функция может быть описана уравнениями вида:

$$u(\theta) = \begin{cases} +u_{пВ}, 0 < \theta < \frac{\pi}{12}; \\ +u_{пС}, \frac{\pi}{12} < \theta < \frac{2\pi}{12}; \\ +u_{пD}, \frac{2\pi}{12} < \theta < \frac{3\pi}{12}; \\ +u_{пА}, \frac{3\pi}{12} < \theta < \frac{4\pi}{12}; \end{cases} \quad (1)$$

где $u_{пх}$ – напряжение источника питания соответствующей фазы инвертора; $\theta = \Omega \cdot t$ – время в угловых единицах, определяемых частотой Ω выходного напряжения инвертора.

Основываясь на математической модели, рассмотренной в [5], система уравнений, описывающая ВРД, может быть представлена как

$$\begin{cases} -\nabla \times (\nabla \times \vec{A}) = 0 - \text{в воздушном зазоре;} \\ -\nabla \times (\nabla \times \vec{A}) = 0 - \text{в сердечнике статора;} \\ -\nabla \times (\nabla \times \vec{A}) = \frac{N_w i_x}{S_w} - \text{в пазу статора;} \\ -\nabla \times (\nabla \times \vec{A}) = -v \left(\frac{\partial A}{\partial x} - \frac{\partial A}{\partial y} \right) - \text{в сердечнике ротора;} \\ -\nabla \times (\nabla \times \vec{A}) = -\sigma \frac{\partial A}{\partial t} - v \left(\frac{\partial A}{\partial x} - \frac{\partial A}{\partial y} \right) - \text{вал ротора,} \end{cases} \quad (2)$$

где ∇ – оператор набла; v – магнитное сопротивление электротехнической стали; $\vec{A}$ – вектор магнитного потенциала; x – индекс соответствующей фазы; i – фазный ток; N_w, S_w – число витков и площадь поперечного сечения фазной обмотки; σ – электрическая проводимость материала; v – скорость вращения ротора.

В прямоугольной двумерной системе координат система (2) трансформируется к виду:

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial x} \left(v \frac{\partial A}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(v \frac{\partial A}{\partial y} \right) = 0 - \text{в воздушном зазоре;} \\ \frac{\partial}{\partial x} \left(v \frac{\partial A}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(v \frac{\partial A}{\partial y} \right) = 0 - \text{в сердечнике статора;} \\ \frac{\partial}{\partial x} \left(v \frac{\partial A}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(v \frac{\partial A}{\partial y} \right) = \frac{N_w \cdot i_x}{S_w} - \text{в пазу статора;} \\ \frac{\partial}{\partial x} \left(v \frac{\partial A}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(v \frac{\partial A}{\partial y} \right) = -v \left(\frac{\partial A}{\partial x} - \frac{\partial A}{\partial y} \right) - \text{в сердечнике ротора;} \\ \frac{\partial}{\partial x} \left(v \frac{\partial A}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(v \frac{\partial A}{\partial y} \right) = -\sigma \frac{\partial A}{\partial t} - v \left(\frac{\partial A}{\partial x} - \frac{\partial A}{\partial y} \right) - \text{вал ротора;} \end{cases} \quad (3)$$

Система (3) должна быть дополнена уравнениями равновесия напряжения для каждой фазы обмотки

$$\{u_x\} = [r_x]\{i_x\} + \frac{N_w l}{S_w} \left\{ \int \frac{\partial A}{\partial t} dS_w \right\} + L_{\text{л}} \frac{d\{i_x\}}{dt} \quad (4)$$

и основным уравнением динамики вращательного движения

$$M - M_c = J \frac{d\omega}{dt}, \quad (5)$$

где $L_{\text{л}}$ - индуктивность лобовых частей; r_x - активное сопротивление фазы обмотки ВРД; l - длина проводника; M - величина электромагнитного момента; M_c - статический момент сопротивления на валу; J - момент инерции ротора; ω - угловая скорость вращения ротора.

Задача по решению (3) сводится к краевой задаче решения уравнений Пуассона относительно векторного магнитного потенциала $\vec{A}$. Приведем краевую задачу к вариационной и применим МКЭ [3, 4]. При этом система (3) трансформируется к виду

$$[S]\{A\} + [N] \frac{\partial \{A\}}{\partial t} = [C]i$$

где $[S]$, $[C]$, $[N]$ определены в [1].

Определив значения магнитной индукции в каждой точке поля области ВРД, электромагнитный момент, действующий на ротор, может быть вычислен через тензоры напряжений [6]:

$$\vec{M} = \oint_S [\vec{r} \vec{T}_n] dS = \bar{q}_x M_x + \bar{q}_y M_y + \bar{q}_z M_z,$$

где

$$M_x = \bar{q}_x \vec{M} = \oint_S (y T_{nz} - z T_{ny}) dS;$$

$$M_y = \bar{q}_y \vec{M} = \oint_S (z T_{nx} - x T_{nz}) dS;$$

$$M_z = \bar{q}_z \vec{M} = \oint_S (x T_{ny} - y T_{nx}) dS$$

В уравнениях x, y, z - оси выбранной системы координат; $\vec{r}$ - расстояние до поверхности dS , на которую действует усилие, $\vec{r} = \bar{q}_x \cdot x + \bar{q}_y \cdot y + \bar{q}_z \cdot z$; $\bar{q}_x, \bar{q}_y, \bar{q}_z$ - нормали к осям x, y, z ; T_n - натяжение, которое действует

на элемент поверхности; T_{nx}, T_{ny}, T_{nz} - компоненты тензора натяжений по осям системы координат; M_x, M_y, M_z - составляющие электромагнитного момента по координатным осям.

Тензор натяжений через параметры поля в векторной форме определяют как [6]:

$$\bar{T}_n = \frac{\bar{B} B_n - 0.5 B^2 \bar{n}}{\mu \mu_0}, \text{ где } \bar{B} - \text{вектор индукции}$$

в рассматриваемой точке поля; B_n - нормальная составляющая индукции; $\bar{n}$ - нормальный орт к той стороне поверхности, на которую действует натяжение $\bar{T}_n$. Компоненты тензора натяжений имеют следующий вид:

$$T_{xx} = \frac{B_x^2 - 0.5 B^2}{\mu \mu_0}; T_{xy} = \frac{B_x B_y}{\mu \mu_0}; T_{xz} = \frac{B_x B_z}{\mu \mu_0};$$

$$T_{yx} = \frac{B_y B_x}{\mu \mu_0}; T_{yy} = \frac{B_y^2 - 0.5 B^2}{\mu \mu_0}; T_{yz} = \frac{B_y B_z}{\mu \mu_0};$$

$$T_{zx} = \frac{B_z B_x}{\mu \mu_0}; T_{zy} = \frac{B_z B_y}{\mu \mu_0}; T_{zz} = \frac{B_z^2 - 0.5 B^2}{\mu \mu_0}$$

Помимо инвертора напряжения и ВРД рассматриваемый электропривод включает систему управления (рис. 2), состоящую из: 1) задатчика скорости; 2) датчика положения ротора; 3) датчика скорости; 4) датчика тока обмотки статора; 5) силового IGBT коммутатора; 6) системы управления коммутатором; 7) обратной связи по положению ротора; 8) обратной связи по скорости

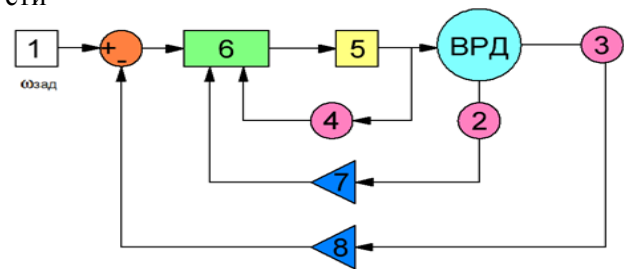


Рис. 2. Система управления ВРД

Объединив полевую модель ВРД с цепевой моделью системы управления (рис. 3), получим цепепольную модель замкнутой системы электропривода с обратной связью по скорости и положению ротора. Получая информацию о текущем положении ротора и его скорости на основе показаний соответствующих датчиков, си-

стема управління формує знакопостійні імпульси з послідовністю фаз В-С-D-A зсміщенням 15 ел. град, поступаючі на силовий інвертор. При цьому інвертор підключає к источнику постійного напруги +24В відповідну фазу ВРД.

На основі розробленої математичної моделі виконані розрахунки режиму пуску і розгону ВРД SRM 57-100-4 до швидкості задання 157 рад/сек. В результаті моделювання отримані залежності кута повороту ротора (рис. 4), електромагнітного моменту (рис. 5), токів в фазах (6).

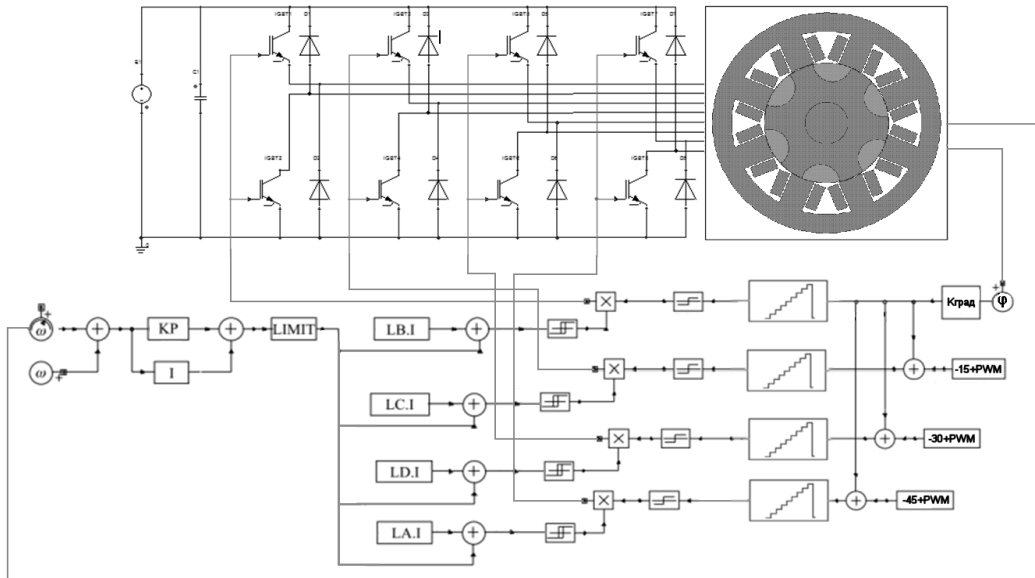


Рис. 3. Структурна схема замкнутої системи ЕП на базі ВРД

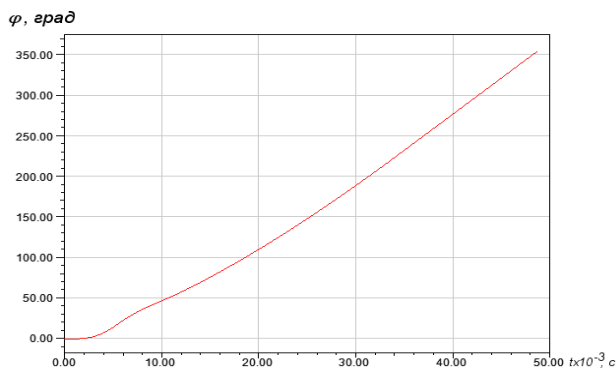


Рис. 4. Залежність кута повороту ротора ВРД

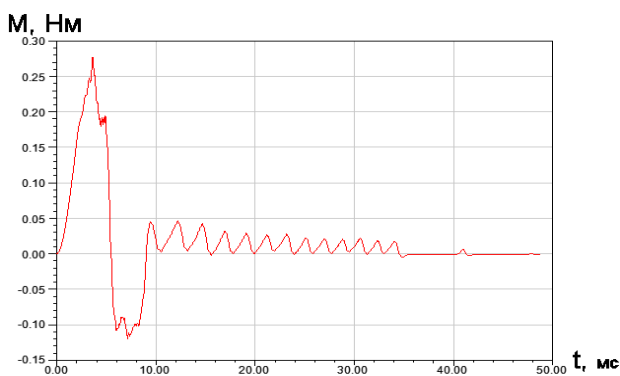


Рис. 5. Графік переходного процесу електромагнітного моменту

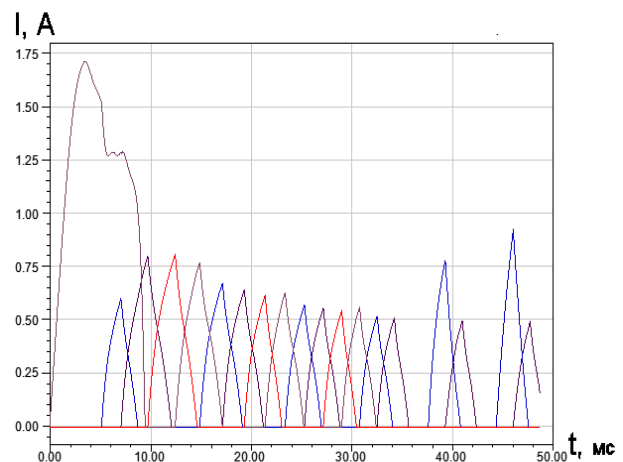


Рис. 6. Графіки переходних процесів токів в фазах ВРД

Висновки. На основі отриманих результатів можна зробити наступні висновки: 1) кінечно-елементна модель ВРД може бути об'єднана з цеповою моделлю силового комутатора і його системою управління, формуючи тем самым замкнуту систему електропривода з зворотними зв'язями по положенню ротора і швидкості ВРД; 2) із рис. 4-6, слідує, що використання замкнутої системи ЕП дозволяє забезпечити практично лінійний характер зміни

угла поворота ротора. При этом наблюдается пятикратный бросок пускового момента на промежутке времени 10 мс. Дальнейший разгон двигателя сопровождается уменьшением пускового момента с последующей его стабилизацией на уровне 0,025-0,05 Нм; 3) установлено, что двигатель достигает требуемой скорости задания за 35 мс. При этом величина пускового тока возрастает до 1,7 А с последующим снижением до 0,5 А; 4) на промежутке времени 36-38 мс и 42-44 мс наблюдается снижение тока фаз и электромагнитного момента до 0 А и 0 Нм соответственно, что объясняется выключением определенных фаз двигателя инвертором на основе сигналов системы управления при увеличении скорости вращения ротора ВРД выше заданной.

Список использованной литературы

1. Качура А. В. Разработка математической модели вентильного реактивного двигателя на основе метода конечных элементов для систем точного позиционирования / А. В. Качура, А. М. Сьянов // Збірник наукових праць Дніпродзержинського державного технічного університету. Технічні науки. - 2015. - Вип. 1. - С. 87-93.
2. Сегерлинд Л. Применение метода конечных элементов — М.: Мир, 1979. — 392 С.
3. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике — М.: Мир, 1975.
4. Сильвестр П., Феррари Р. Метод конечных элементов для радиоинженеров и инженеров-электриков: Пер. с англ. — М.: Мир, 1986. — 229 с.
5. Качура А. В. Математическое моделирование вентильного реактивного двигателя с уменьшенным моментом инерции / А. В. Качура, Л. Ю. Мороз, А. М. Сьянов // Збірник наукових праць Дніпродзержинського державного технічного університету. Технічні науки. - 2015. - Вип. 2. - С. 127-135.
6. Иванов-Смоленский А.В. Электромагнитные силы и преобразование энергии в электрических машинах: Учеб. пособие для вузов по спец. “Электромеханика”. — М.: Высш. шк., 1989. — 312 с.

References

1. Kachura, A. V., Syanov, A. M. (2015) Development of a mathematical model of a valve of a jet engine based on the finite element method for exact positioning systems [Razrabotka matematicheskoy modeli ventil'nogo reaktivnogo dvigatelya na osnove metoda konechnykh ehlementov dlya sistem tochnogo pozicionirovaniya] Collection of scientific papers of Dniprodzerzhynsk state technical University. Engineering science. VIP. 1. P. 87–93
2. Segerlind, L. (1979) Application of the finite element method [Primenenie metoda konechnykh ehlementov], Mir, M. 392 p..
3. Zenkevich, O. (1975) Finite element Method in engineering [Metod konechnykh ehlementov v tekhnike], Mir, M.
4. Sylvester, P., Ferrari, R.(1986), Finite elements for radio engineers and electrical engineers: TRANS. from English.[Metod konechnykh ehlementov dlya radioinzhenerov i inzhenerov-ehlektrikov] , Mir, M., 229 p.
5. Kachura, A. V., Moroz, L. Ju. Syanov, A. M.(2015) Mathematical modeling of gate jet engine with a reduced moment of inertia [Matematicheskoe modelirovanie ventil'nogo reaktivnogo dvigatelya s umen'shennym momentom inercii] Collection of scientific papers of Dniprodzerzhynsk state technical University. Engineering science. VIP. 2. pp. 127–135.
6. Ivanov-Smolensky, A.V. (1989) Electromagnetic forces and power conversion in electrical machines: Textbook. textbook for universities on spec. “Electrician” [EHlektromagnitnye sily i preobrazovanie ehnergii v ehlektricheskikh mashinah: Ucheb. posobie dlya vuzov po spec. “EHlektromekhanika”]. Higher. wk., M.p. 312.

DEVELOPMENT CAPOLAVORI MODEL OF THE CLOSED SYSTEM OF THE ACTUATOR ON THE BASIS OF GATE JET ENGINE

Kachura A. V., Kolychev S. V., Syanov A. M.
Dneprodzerzhinsk state technical University

Abstract. The disnribution of switched reluctance monors (SRM) is due to their specific properties: high reability due to the absence of sliding contacts, precise positioning wide range of regulation. These properties allow the use of SRM in various adjustable electric drives in conjunction with semiconductor control systems. The complexity of the study of such systems is a correct representation of both the control system itself and the motor, taking into account their mutual influence and energy exchange. In addition, as a rule, SRM have a rather specific design, which limits the use of classical design methods for their calculation and causes the use of numerical methods. The paper presents a mathematical model of a closed electric sys-

tem on the rotor position and speed based on the switched reluctance motor. As a result of the unification of the SRM field model constructed on the basis of the Laplace and Poisson equations and the circuit model of the control system, a circuit-field ED model is obtained on the basis of the finite element method. The model takes into account the design features of the motor and allows you to explore the ED in dynamic modes of operation. An algorithm for switching power inverter keys for four phases of the SRM is developed. From the obtained values of magnetic induction, tension tensors and the electromagnetic moment of the motor are calculated. Electromagnetic and electromechanical parameters of the serial SRM SRM-57-100-4 in the start-up mode are obtained for the proposed model

Key words: valve jet engine, closed-loop electric drive system, control system, finite element method, the dynamic operation mode, trigger mode.

ПРАВИЛА ОФОРМЛЕННЯ РУКОПИСІВ СТАТЕЙ ДЛЯ ПУБЛІКАЦІЙ В ЖУРНАЛІ «ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНІ ТА КОМП'ЮТЕРНІ СИСТЕМИ»

А. В. Качура, С. В. Количев, А. М. Сьянов

Дніпродзержинський державний технічний університет

Анотація. Розглянута математична модель замкненої системи електропривода (ЕП) на базі вентильного реактивного двигуна (ВРД). У результаті об'єднання польової моделі ВРД і ланцюгової моделі системи керування отримана ланцюгово-польова модель ЕП на основі методу скінчених елементів. Модель враховує конструктивні особливості двигуна й дозволяє досліджувати ЕП у динамічних режимах роботи. На основі запропонованої моделі отримані електромагнітні й електромеханічні параметри серійного ВРД SRM-57-100-4 у режимі пуску.

Ключові слова: вентильний реактивний двигун, замкнена система електроприводу, система керування, метод скінчених елементів, динамічний режим роботи, режим пуску

Отримано 10.04.2017



Качура Алексей Викторович, кандидат технических наук, доцент, Днепро-дзержинский государственный технический университет, доцент кафедры электротехники и электромеханики, тел. +38 (0569) 55-20-05, e-mail: fem@ukr.net

Kachura Alexey Viktorovich, Candidate of technical Sciences, Associate Professor, Dneprodzerzhinsk state technical University, Associate Professor at the Department of electrical engineering and electromechanics, tel. +38 (0569) 55-20-05, e-mail: fem@ukr.net

ORCID ID: 0000-0002-6338-0974



Колычев Сергей Викторович, кандидат технических наук, доцент, Днепро-дзержинский государственный технический университет, доцент кафедры электротехники и электромеханики, тел. +38 (0569) 55-20-05

Kolychev Sergey Viktorovich, Candidate of technical Sciences, Associate Professor, Dneprodzerzhinsk state technical University, Associate Professor at the Department of electrical engineering and electromechanics, kolychev70@mail.ua tel. +38 (0569) 55-20-05

ORCID ID: 0000-0002-1017-5125



Сьянов Александр Михайлович, доктор технических наук, профессор, Днепро-дзержинский государственный технический университет, декан факультета электроники и компьютерной техники, тел. +38 (0569) 55-13-61, e-mail: alexandr.sianov@gmail.com

Syanov Alexander Mikhailovich, Doctor of technical Sciences, Professor, Dneprodzerzhinsk state technical University, Dean of the faculty of electronics and computer technology, tel. (0569) 55-13-61, e-mail: alexandr.sianov@gmail.com

ORCID ID: 0000-0003-4120-4926