

2. Боль А.А. Повышение качества индукционной наплавки путем оптимизации и автоматизации нагрева / А.А. Боль, В.П. Тимошенко, В.Н. Коваль.– Изв. СО АН СССР. сер. Технические наук, 1989. – Вып. 1. – С. 85-90.
3. Бісюк В.А. Автоматичне керування неперервно-послідовним індукційним наплавленням / В.А. Бісюк, О.К. Дідик // Збірник наукових праць КНТУ. Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація. – 2015. – Вип. 28. – С. 250-255.
4. Данилушкин А.И. Оптимальное управление нелинейным процессом нагрева подвижного объекта / Данилушкин А.И., Руднев В.И. // Межвуз. сб. «Алгоритмизация и автоматизация технологических процессов и промышленных установок». – 1978. – Вип.10. – С. 65-73.
5. Гживачевский М. С. Математическое моделирование оптимального управления процессом индукционного нагрева: автореферат дис. ... доктора физико-математических наук : спец.: 05.13.16. / Гживачевский Марек Стефанович. – Москва, 1991. – 46 с.

Viktor Bisuk, lecturer, Viktor Kalich, Prof., PhD tech. sci., Olexandr Didyk, Assos. Prof., PhD tech. sci.
Kirovograd national technical university, Kirovohrad, Ukraine

Automating the process of applying composite coatings with continuously-sequential induction welding

Getting a high quality finished products is directly dependent on the accuracy of observance of the specified process parameters of induction heating. One of the parameters characterizing the quantitative and qualitative side of the heating process details and application manual, prior to further processing is temperature field product. Average temperature field in the surface layers of details, the degree of heating is determined on the one hand the energy and the design parameters of the heating equipment and the algorithm control Electro installation and a device for moving parts in the field inductor, the other - a large number of external factors that deflection temperature field of the right values.

Automatic system, which provides optimal control parameters such process consistently continuous induction welding as speed moving parts, voltage and frequency current to the inductor will calculate the optimal duration and temperature of the heating surface details will warm uniformly and therefore without significant thermal deformation, will provide sufficiently high coating quality and reduce energy consumption.

continuously-sequential induction welding, composite coating, the factors affecting the quality of composite coatings

Одержано 14.01.16

УДК 531.383

Н.І. Бурау, проф., д-р техн. наук, А.І. Вознюк, асп.

*Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»,
 м. Київ, Україна, E-mail: ai_voznyuk@ukr.net*

В.В. Цісарж, канд.техн. наук, ст. наук. співроб.

Державне підприємство НДІ РС «Квант-Радіолокація», м. Київ, Україна

Система стабілізації та наведення для наземних рухомих об'єктів на базі AHRS

В статті розглядається можливість створення системи стабілізації для наземного рухомого об'єкту на прикладі двохосної системи непрямої стабілізації з використанням приладу типу AHRS в якості гіроскопічного вимірювача. Також в роботі продемонстровано алгоритм перетворення координат, що базується на теорії кінцевих поворотів твердого тіла і використанні кватерніонів з параметрами Родрига-Гамільтона.

Показані основні переваги використання приладів, виготовлених за MEMS-технологіями, а також перспективи їх подальшого використання в системах стабілізації та наведення.

система стабілізації, системи визначення курсового положення, кватерніони

© Н.І. Бурау, А.І. Вознюк, В.В. Цісарж, 2016

Н.И. Бурау, проф., д-р техн.наук, А.И. Вознюк, асп.

Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», г. Киев, Украина

В.В. Цисарж, канд. техн. наук, ст. науч. сотруд.

Государственное предприятие НИИ РС «Квант-Радиолокация», г. Киев, Украина

Система стабилизации и наведения для наземных подвижных объектов на базе AHRS

В статье рассматривается возможность создания системы стабилизации для наземного подвижного объекта на примере двухосные системы косвенной стабилизации с использованием прибора типа AHRS в качестве гироскопического измерителя. Также в работе продемонстрировано алгоритм преобразования координат, основанный на теории конечных поворотов твердого тела и использовании кватернионов с параметрами Родрига-Гамильтона.

Показаны основные преимущества использования приборов, изготовленных по MEMS-технологиями, а также перспективы их дальнейшего использования в системах стабилизации и наведения.

система стабилизации, системы определения курсового положения, кватернионы

Постановка проблеми. Актуальним завданням, що стоїть перед промисловим комплексом України, є створення систем стабілізації та наведення обладнання, що розміщується на рухомих об'єктах, як цивільного так і військового призначення. Серед величезної кількості такого обладнання активно використовуються і розвиваються антенні пости, оптико-електронні модулі, навігаційні системи, безпілотних літальних апаратів (БПЛА) тощо. Не менш важливим напрямком є розробка стабілізаторів озброєння на наземному та морському транспорті (гармати, зенітно-ракетні комплекси) [1-4].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Комплексний підхід до вирішення задачі проектування та створення систем стабілізації та наведення включає в себе поступовий відхід від аналогової елементної бази і дедалі більше використання сучасних цифрових пристроїв, застосування сучасних методів та підходів при розробці алгоритмів [1,4]. Так як до складу будь-якої системи стабілізації входять гіроскопічні вимірювачі, які забезпечують систему інформацією про положення об'єкту, лінійні та кутові переміщення, швидкості та прискорення, важливою задачею при створенні системи є вибір такого вимірювача [5]. Завдяки інтенсивному розвитку мікроелектроніки та мікропроцесорної техніки на сьогоднішній день існує широкий вибір гіроскопічних вимірювачів, які використовуються для побудови систем стабілізації та наведення. Одним з найперспективніших напрямів є використання вимірювальних пристроїв, побудованих за технологіями мікроелектромеханічних систем. Зокрема, доцільним є застосування приладів типу AHRS (англ. Attitude and Heading Reference Systems – системи визначення курсового положення), до складу яких входять три акселерометри, три магнетометри та три датчика кутової швидкості, що забезпечує видачу приладом повної інформації про положення об'єкта [2,6,10].

Постановка завдання. Мета даної статті – обґрунтувати можливість створення системи стабілізації на базі AHRS з алгоритмом перетворення координат, що базується на використанні кватерніонів.

Виклад основного матеріалу. AHRS призначений для визначення повороту об'єкта в будь-який момент часу щодо його деякого початкового положення. На рис. 1 наведено функціональну схему двохосної системи непрямої стабілізації на основі вимірювального блоку AHRS. Знаючи сформований акселерометром вектор прискорення вільного падіння V_A , і сформований магнетометром вектор магнітної індукції V_M , можна легко визначити положення об'єкта в просторі. Проте об'єкт під час руху у своїй системі координат за складною траєкторією одночасно відчуває декілька зовнішніх збурень: силу тяжіння Землі, відцентрову силу і силу Коріоліса. Всі ці збурення вимірюються з певною обмеженою точністю і швидкістю, а магнітне поле

додатково може спотворюватися низкою факторів, таких як випромінювання електрообладнання, залізнi конструкції тощо.

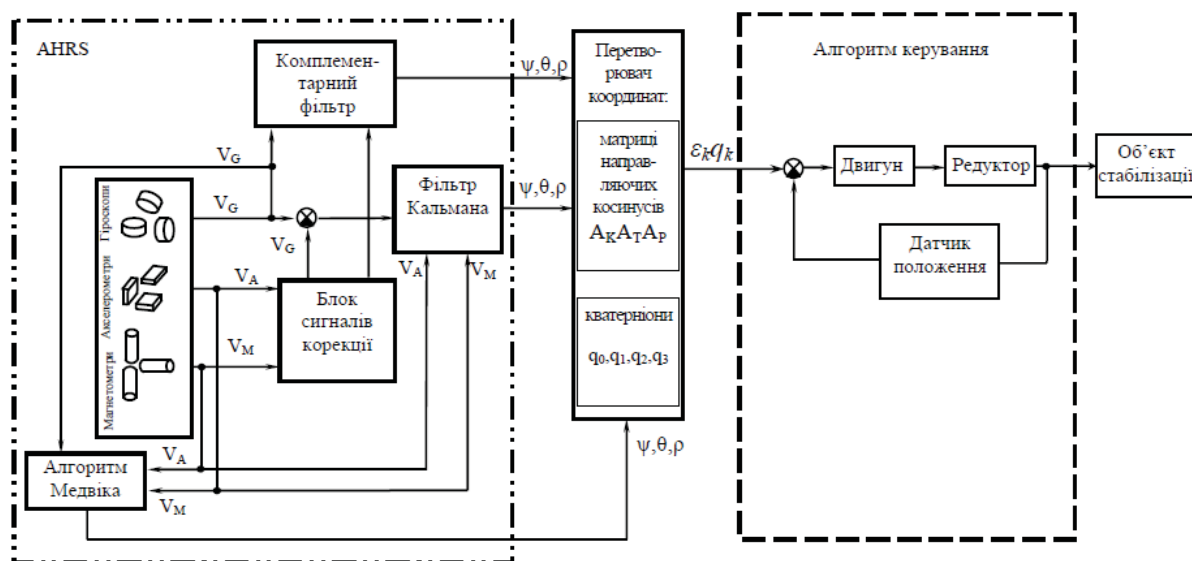


Рисунок 1 – Двохосна система непрямої стабілізації на базі AHRS

Тому в результаті вимірювань будуть сформовані: вектор прискорення об'єкта V_A , що корелюється з вектором тяжіння Землі в стані спокою; вектор магнітної індукції V_M , що корелюється з вектором магнітної індукції Землі і вектор кутових швидкостей V_G . Основним завданням AHRS є коригування похибки вимірювання кутових швидкостей об'єкта, використовуючи дані з акселерометра і магнетометра. На сьогоднішній день для вирішення цієї задачі існує велика кількість алгоритмів. Зокрема, найбільш розповсюдженим є використання алгоритмів, що базуються на фільтрі Калмана (ФК) та його модифікаціях (адаптивний ФК, розширений ФК і т. і.) [6,7]. Також великою популярністю користуються алгоритм, що використовує комплементарний фільтр [9], та алгоритм Медвіка [8].

Існує клас об'єктів, для яких в силу певних причин (зокрема масо-габаритних характеристик) конструктивна реалізація системи стабілізації і наведення можлива у вигляді двохосної редукторної або безредукторної системи. Стабілізацію таких об'єктів доцільно проводити непрямим методом, оскільки його технічна реалізація для таких об'єктів простіша, ніж прямого методу. Розглянемо двохосну систему непрямої стабілізації для наземного рухомого об'єкту. Непрямий метод стабілізації будь-якого обладнання (оптико-електронного модуля, антени, ствола гармати) на рухомому об'єкті полягає в утриманні деякої осі обладнання в заданому напрямку (відносно Землі або обраного орієнтуру). Це здійснюється шляхом введення кутів крену і тангажа і обертання об'єкту щодо відповідних осей наведення. При непрямому методі осі наведення і осі стабілізації збігаються. Сутність непрямого методу стабілізації полягає в перетворенні кутових координат, що характеризують задане положення осі обладнання, наприклад, в земній системі координат, у відповідні кутові координати (параметри стабілізації), віднесені до зв'язаної системи координат і відпрацьованні цих параметрів виконавчим механізмом.

Вирішення завдання перетворення кутових координат здійснюється наступним чином: кути крену і тангажа рухомого об'єкту від AHRS надходять до перетворювача координат, куди також вводяться кутові координати напрямку на деякий орієнтир, наприклад, в земній системі координат, перетворювач координат перераховує їх в

кутові координати в зв'язаній системі координат, які за допомогою виконавчого механізму вводяться на наведення об'єкта. Завдяки цьому вісь обладнання буде зберігати свій напрямок на заданий орієнтир незалежно від кутів крену і тангажа рухомого об'єкта.

Позначимо через $O\xi\eta\zeta$ нерухому систему координат, яка паралельна земним осям, а через $OXYZ$ – систему координат, жорстко зв'язану з об'єктом (рис. 2). Задача перетворення координат зводиться до відображення базису нерухомої системи координат в базис рухомої системи. В загальному вигляді перехід можна представити у вигляді:

$$[X, Y, Z] = A[\xi, \eta, \zeta], \quad (1)$$

де A – матриця переходу:

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix}. \quad (2)$$

Матриця A може бути знайдена через матриці направляючих косинусів [10,11] шляхом трьох послідовних поворотів вихідної системи на кути ристання A_p , тангажа A_T та крену A_K :

$$A = A_K A_T A_p. \quad (3)$$

Інший метод перетворення координат базується на використанні кінцевих поворотів твердого тіла та понятті кватерніонів [11].

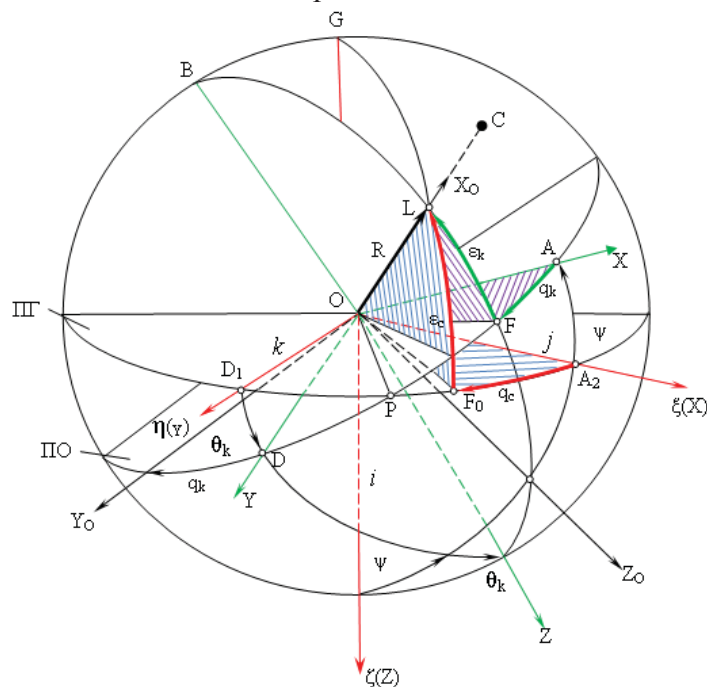


Рисунок 2 – Наведення об'єкта за наявності кутів крену і тангажа

Позначимо через $R = OL$ вектор, що направлений на орієнтир в просторі (рис. 2). Його відображеннями на базисі G і B будуть кватерніони R_G та R_B відповідно:

$$\begin{aligned} R_G &= R_{G\xi}i + R_{G\eta}k + R_{G\zeta}j \\ R_B &= R_{B\xi}i + R_{B\eta}k + R_{B\zeta}j \end{aligned} \quad (4)$$

Тоді перехід від нерухомої системи координат до системи, зв'язаної з об'єктом можна записати у вигляді:

$$R_B = \tilde{\Lambda} \circ R_G \circ \Lambda, \quad (5)$$

де $\Lambda = q_0 + q_1i + q_2k + q_3j$ кватерніон повороту і $\tilde{\Lambda} = q_0 - q_1i - q_2k - q_3j$ кватерніон, спряжений до Λ , а вирази q_0, q_1, q_2, q_3 – параметри Родрига-Гамільтона.

В результаті отримуємо:

$$\begin{aligned} R_{B\xi} &= (1 - 2(q_2^2 + q_3^2))R_{G\xi} + 2(q_0q_3 + q_1q_2)R_{G\eta} + 2(q_1q_3 - q_0q_2)R_{G\zeta}; \\ R_{B\eta} &= 2(q_1q_2 - q_0q_3)R_{G\xi} + (1 - 2(q_1^2 + q_3^2))R_{G\eta} + 2(q_0q_1 + q_2q_3)R_{G\zeta}; \\ R_{B\zeta} &= 2(q_0q_2 + q_1q_3)R_{G\xi} + 2(q_2q_3 - q_0q_1)R_{G\eta} + (1 - 2(q_1^2 + q_2^2))R_{G\zeta}. \end{aligned} \quad (6)$$

Якщо рівняння (6) записати у вигляді:

$$[\xi, \eta, \zeta]_B = A[\xi, \eta, \zeta]_G, \quad (7)$$

це буде відповідати виразу (1), при цьому матриця направляючих косинусів A буде виражена через параметри Родрига-Гамільтона.

Визначимо параметри для двохосної системи непрямої стабілізації (рис. 2). Перехід від базису G до базису B відбувається шляхом двох послідовних поворотів на кути крену θ_k і тангажа ψ , яким відповідають кватерніони $\Theta = \cos \frac{\theta_k}{2} + j \sin \frac{\theta_k}{2}$ та $\Psi = \cos \frac{\psi}{2} + k \sin \frac{\psi}{2}$, результатом буде кватерніон $K = \Psi \circ \Theta$. Отримуємо вирази для параметрів Родрига-Гамільтона кватерніона K :

$$\begin{aligned} q_0 &= \cos \frac{\psi}{2} \cos \frac{\theta_k}{2}, & q_1 &= -\sin \frac{\psi}{2} \sin \frac{\theta_k}{2}, \\ q_2 &= \cos \frac{\psi}{2} \sin \frac{\theta_k}{2}, & q_3 &= \sin \frac{\psi}{2} \cos \frac{\theta_k}{2}. \end{aligned} \quad (8)$$

Відображеннями вектора R на базисах G і B , відповідно до виразу (4) та рис. 2:

$$\begin{aligned} R_{G\xi} &= -\sin \varepsilon_c, & R_{G\eta} &= \cos q_c \cos \varepsilon_c, & R_{G\zeta} &= \sin q_c \cos \varepsilon_c \\ R_{B\xi} &= -\sin \varepsilon_k, & R_{B\eta} &= \cos q_k \cos \varepsilon_k, & R_{B\zeta} &= \sin q_k \cos \varepsilon_k \end{aligned} \quad (9)$$

Відповідно до (5) перетворення координат матиме вигляд $R_B = \tilde{K} \circ R_G \circ K$, в результаті чого отримуємо вираз (6). Підставивши в (6) значення проєкцій вектора R (9), маємо:

$$\sin \varepsilon_k = (1 - 2(q_2^2 + q_3^2))\sin \varepsilon_c - 2(q_0q_3 + q_1q_2)\cos q_c \cos \varepsilon_c + 2(q_1q_3 - q_0q_2)\sin q_c \cos \varepsilon_c; \quad (10)$$

$$\operatorname{tg} q_k = \frac{-2(q_0q_2 + q_1q_3)\sin \varepsilon_c + 2(q_2q_3 - q_0q_1)\cos q_c \cos \varepsilon_c + (1 - 2(q_1^2 + q_2^2))\sin q_c \cos \varepsilon_c}{2(q_1q_2 - q_0q_3)\sin \varepsilon_c + (1 - 2(q_1^2 + q_3^2))\cos q_c \cos \varepsilon_c + 2(q_0q_1 + q_2q_3)\sin q_c \cos \varepsilon_c}. \quad (11)$$

Вирази (10), (11) є кутами стабілізації системи, що надходять до виконавчого механізму (рис. 2). Таким чином отримано алгоритмом перетворення координат, що базується на теорії кінцевих поворотів твердого тіла та використанні кватерніонів з параметрами Родрига-Гамільтона.

Головними перевагами використання кватерніонів при перетворенні координат є те, що параметри Родрига-Гамільтона не вироджуються при будь-яких положеннях твердого тіла, а вирішення задачі перетворення зводиться до розв'язку системи чотирьох лінійних рівнянь.

Висновки. Запропоновано та обґрунтовано підхід для створення систем стабілізації та наведення наземних рухомих об'єктів, що базується на використанні вимірювального модуля AHRS. Отримано алгоритм визначення кутів стабілізації та показано переваги використання кватерніонів для перетворювача координат двохосної системи непрямої стабілізації.

Список літератури

1. Безвесільна О.М. Системи наведення та стабілізації озброєння: монографія / О.М. Безвесільна, В.Г. Цірук, В.П. Квасніков, В.В. Чіковані. – К.: НАУ, 2014. – 176 с.
2. Патент України 83793. Інтегрована система пошуку, наведення, стабілізації та керування вогнем «триада-бт». Пиронер Я.М., Цисарж В.В., Стецюк В.Л., Яновський Ю.В., Баранчук О.І., Долеско А.О.; заявл. 26.04.2013, опубл. 25.09.2013, бюл. №18/2013.
3. Кузнецов Б.И. Разработка нейросетевой системы наведения и стабилизации вооружения легкобронированных машин / Б.И. Кузнецов, Т.Е. Василец, А.А. Варфоломеев // Электротехника і Електромеханіка. – 2008. – №2. – С. 31–34.
4. Путов В.В. Адаптивные электромеханические системы наведения и стабилизации специальных объектов и мобильных робототехнических комплексов / В.В. Путов, Ю.К. Козлов, В.П. Казаков, А.В. Путов // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». – 2004. – №1. – С. 3–8.
5. Сущенко О.А. Методика выбора гироскопического измерителя для системы стабилизации информационно-измерительных устройств / О.А. Сущенко, С.Г. Егоров, С.В. Карасев // Електроніка та системи управління. – 2011. – №4(30) – С.63–67. – ISSN 1990–5548.
6. João Luís Marins An Extended Kalman Filter for Quaternion-Based Orientation Estimation Using MARG Sensors / João Luís Marins, Xiaoping Yun, Eric R. Bachmann, Robert B. McGhee, Michael J. Zyda // International Conference on Intelligent Robots and Systems – 2001 – Maui – pp. 2003–2011.
7. Philippe Martin Generalized Multiplicative Extended Kalman Filter for Aided Attitude and Heading Reference System. Philippe Martin, Erwan Salaun. // AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference. – Aug 2010. – Toronto, Canada. – pp. AIAA 2010-8300.
8. Madgwick S.O.H., Harrison A.J.L., Vaidyanathan R. Estimation of IMU and MARG orientation using a gradient descent algorithm // IEEE International Conference on Rehabilitation Robotics (ICORR). – Zurich, 2011. – pp.1-7.
9. Mahony R., Hamel T., Pfimlin J.M. Non-linear complimentary filters on the special orthogonal group // IEEE Transactions on Automatic Control. – Notre Dame, 2008. – №53(5). – pp.1203 - 1218.
10. E.Macias, D. Torres, and S. Ravindran, "Nine-axis sensor fusion using the Direction Cosine Matrix Algorithm on the MSP430F5xx Family", Application report, Texas Instruments Inc., Texas, February 2012, pp. 3–7.
11. Журавлев В.Ф. Основы теоретической механики. Изд. 2-е, перераб. / Журавлев В.Ф. – М.: Издательство физико-математической литературы. – 2001. – 320 с. – ISBN 5-94052-041-3.

Nadiia Bouraou, Prof., DSc., Anton Vozniuk, post-graduate

The National Technical University of Ukraine, "Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine

Viacheslav Tsisarzh, PhD tech. sci., senior researcher

State Enterprise Scientific Research Institute Kvant Radar Systems, Kyiv, Ukraine

Stabilization and pointing system for land moving objects based on AHRS

The objective of the article is to demonstrate the advantages of attitude heading reference systems (AHRS) based on MEMS technology and coordinate converter based on the theory of finite rotations of a rigid body and quaternions.

This paper shows a possibility of creation stabilization and pointing system for land moving objects AHRS based. It is illustrated by the biaxial system of indirect stabilization. It is shown the way to get two stabilization angles in quaternions representation. The main advantage of coordinate converter quaternions based is that the Rodrigues-Hamilton parameters do not degenerate under any position of rigid body and solving the problem of conversion is reduced to solving a system of four linear equations.

stabilization system, position detection system course, quaternions

Одержано 12.11.15

УДК 621.311

Ю.Н. Веприк, проф., д-р техн. наук, О.А. Небера, асп.,

Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», г.Харьков, Украина, E-mail: neberaolga@gmail.com

А.П. Свиридов, доц., канд. техн. наук

Кировоградский национальный технический университет, г.Кировоград, Украина

Математическая модель переходных процессов в системах электроснабжения с двигательной нагрузкой и ее программная реализация

В статье представлена модель систем электроснабжения в переходных режимах и её программная реализация на основе уравнений в фазных координатах, которая позволяет воспроизводить как электромагнитные, так и электромеханические составляющие переходных процессов в электрической сети произвольной конфигурации.

переходные процессы, фазные координаты, математическая модель, электрические машины, двигательная нагрузка

Ю.М. Веприк, проф., д-р техн. наук, О.О. Небера, асп.

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м.Харків, Україна

А.П. Свіридов, доц., канд. техн. наук

Кіровоградський національний технічний університет, м.Кіровоград, Україна

Математична модель перехідних процесів в системах електропостачання з двигунним навантаженням та її програмна реалізація

У статті запропоновано метод математичного моделювання систем електропостачання в перехідних режимах, що забезпечує можливість представлення електричної мережі довільної конфігурації. Представлена модель розроблена на основі рівнянь в фазних координатах і дозволяє відтворювати як електромагнітні, так і електромеханічні складові перехідних процесів.

перехідні процеси, фазні координати, математична модель, електричні машини, двигунне навантаження

Постановка проблемы. В реальной эксплуатации системы электроснабжения с двигательной нагрузкой (ЭСДН) находятся в условиях постоянно действующих возмущений – со стороны внешней энергосистемы, со стороны рабочих механизмов, со стороны внешней среды. Результатом этих воздействий является появление небалансов мощностей и моментов на валах электродвигателей. Отклонения параметров режима системы в ходе возникающих при этом переходных процессов могут выходить за