

- що спалюють АШ та шлами [Текст] / Л. О. Кесова, Ю. М. Побіровський // Энергетика: екологія, технології, екологія. — 2000. — № 3. — С. 45–49.
4. Трёмбовля, В. Н. Теплотехнические испытания котельных установок [Текст] / В. И. Трёмбовля, Е. Д. Фингер, А. А. Авдеева. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Энергоатомиздат, 1991. — 416 с.
 5. МУ 34-70-041-83. Методические указания по определению содержания окислов азота в дымовых газах котлов (экспресс методы) [Текст]. — Введен 01.07.1983. — М.: СПО Союзтехэнерго, 1983. — 23 с.
 6. Техническая эксплуатация электрических станций и сетей [Текст]: Правила. — Львов: ОАО «ЛьвовОРГРЭС», ГДП «ДонОРГРЭС», 2002. — Режим доступа: \www/URL: https://kramtp.info/UserFiles/file/doc/PTE%20Ukr.doc
 7. Кузнецов, Н. В. Тепловой расчет котельных агрегатов (Нормативный метод) [Текст] / под ред. Н. В. Кузнецова и др. — Москва: Энергия, 1978. — 296 с.
 8. Энергетические характеристики оборудования Трипольской ГРЭС [Текст]. — М., 1987. — 12 с.
 9. Вукалович, М. П. Таблицы теплофизических свойств воды и водяного пара [Текст] / М. П. Вукалович и др. — М.: Издательство стандартов, 1989. — 311 с.
 10. Котлер, В. Р. Оксиды азота в дымовых газах котлов [Текст] / В. Р. Котлер. — М.: Энергоатомиздат, 1987. — 97 с.
 11. Котлер, В. Р. Снижение выбросов оксида азота котлами ТЭС при сжигании органического топлива [Текст]: итоги науки и техники ВИНТИ / В. Р. Котлер // Серия: Котельные

установки и водоподготовка. — М.: Теплоэнергетика, 1987. — № 7. — С. 6973.

12. Янко, П. І. Режими експлуатації енергетичних котлів [Текст] / П. І. Янко, Й. С. Мисак. — Львів: НВФ «Українські технології», 2004. — 270 с.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ РАБОТЫ КОТЛА ТП-210А ПРИ РАЗЛИЧНЫХ СИСТЕМАХ ПЫЛЕПОДАЧИ

В статье исследована эффективность топочного режима энергетических котлов, оборудованных системой высококонцентрированной пылеподдачи под давлением на горелки при сжигании низкорекреационного угля ухудшенного качества. Рассмотрены основные факторы и их влияние на топочный режим котла при двух технологиях пылеподдачи.

Ключевые слова: паровой котел, топка, высококонцентрированная подача пыли, топочный режим, оксиды азота.

Юрасова Оксана Георгіївна, асистент, кафедра теплотехніки і теплових електричних станцій, Національний університет «Львівська політехніка», Україна, e-mail: yurasova_o@ukr.net.

Юрасова Оксана Георгиевна, ассистент, кафедра теплотехники и тепловых электрических станций, Национальный университет «Львовская политехника», Украина.

Yurasova Oksana, National University «Lviv Polytechnic», Ukraine, e-mail: yurasova_o@ukr.net

УДК 681.5.015.3

DOI: 10.15587/2312-8372.2014.32251

Волянський Р. С.

СТАТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ СО СКОЛЬЗЯЩИМИ РЕЖИМАМИ ВТОРОГО ПОРЯДКА

Предложен метод определения ошибок регулирования в установившихся режимах работы обобщенных электромеханических систем. Выполнено преобразование уравнений движения обобщенной нелинейной электромеханической системы к управляемой форме Бруновского. Найдено уравнение статического равновесия рассматриваемой системы и получены выражения для определения координат замкнутой системы в установившемся режиме.

Ключевые слова: электромеханическая система, скользящий режим второго порядка, статические характеристики, нелинейное управление.

1. Введение

Современный уровень развития производственных отношений требует постоянного повышения качества выпускаемой продукции и улучшения оказываемых услуг, что невозможно без совершенствования процесса производства. Этому способствует существующая материальная база информационной, преобразовательной и исполнительной техник, которая создает все предпосылки для внедрения принципиально новых подходов к процессам управления исполнительными устройствами, отдельными технологическими процессами и всем производством с целью улучшения их технико-экономических характеристик. В настоящее время большое количество,

как самостоятельных исполнительных устройств, так и исполнительных механизмов в составе технологического процесса строится с использованием электроприводов. При этом ведение производственного процесса или обеспечение заданных режимов работы технологического оборудования выполняется путем формирования управляющего воздействия на тот или иной электропривод. Таким образом, одним из путей повышения качества выпускаемой продукции является улучшение качественных показателей процессов управления исполнительными электромеханическими системами и устройствами в результате совершенствования существующих и разработки новых законов управления. Последнее обуславливает актуальность выполнения исследований.

2. Анализ литературных данных и постановка проблемы

Одним из подходов к решению задачи улучшения свойств и характеристик электромеханических систем является формирование в них скользящих режимов высоких порядков [1]. Известно большое количество работ, посвященных построению систем управления динамическими объектами, в которых возникают скользящие режимы второго порядка. В этих работах отражено: непосредственное использование классических алгоритмов супер-скручивания [2], дополнение их элементами адаптации [3], с последующей реализацией синтезированных алгоритмов цифровыми регуляторами [4], расширением полученных результатов на класс систем с несколькими входами [5], придание замкнутой системе особых свойств робастности [6], пониженной колебательности [7], астатизма [8]. Несмотря на значительный объем исследований динамических систем со скользящими режимами второго порядка, приведенных в этих и других работах, существует ряд не изученных вопросов. В первую очередь это аналитическое, а не численное описание статических и динамических характеристик исследуемых динамических систем. Нахождение соответствующих аналитических зависимостей позволит не только уточнить траектории движения переменных состояния, но и предсказывать поведение однотипных динамических систем и осуществлять согласование траекторий их движения. Однако, аналитическое решение уравнений движения обобщенной электромеханической системы невозможно без предварительного определения граничных условий, которые являются точками установившегося режима динамической системы.

Поэтому целью настоящей статьи является разработка метода определения статических характеристик обобщенной электромеханической системы.

Для достижения поставленной цели в работе решены следующие задачи:

1. Выполнена линеаризация обратными связями исходной обобщенной динамической системы.
2. Определено уравнение равновесия системы в установившемся режиме.
3. Найдены выражения статических характеристик.

3. Результаты исследований установившегося режима электромеханических систем со скользящими режимами второго порядка

3.1. Описание метода определения статической ошибки регулирования нелинейной системы. С достаточно высокой степенью точности любую электромеханическую систему с одним входом можно описать в общем случае нелинейными дифференциальными уравнениями, представленными в нормальной форме в матричном виде [9]:

$$p\mathbf{Y} = \mathbf{F}(\mathbf{Y}, u), \quad (1)$$

где $\mathbf{Y} = (y_1 \dots y_n)^T$ — вектор переменных состояния; n — порядок системы управления; u — управляющее воздействие; \mathbf{F} — вектор функций, описывающих динамику системы управления.

Из классической теории автоматического управления известны методы построения статических характеристик $\mathbf{Y} = H(u)$ [10]. Эти методы базируются на решении уравнений статического равновесия исследуемой динамической системы:

$$\mathbf{F}(\mathbf{Y}, u) = 0, \quad (2)$$

которые получаются из уравнений (1) при нулевом значении оператора p .

Для линейных динамических систем такой подход является простым, наглядным и хорошо формализуемым, поскольку сводится к решению системы линейных уравнений n -го порядка. Однако, для нелинейных динамических систем аналитическое решение уравнений (2) затруднено, а в некоторых случаях невозможно. Поэтому исходная система должна быть преобразована к линейному виду.

Преобразованием, которое позволяет сохранить уникальные свойства исходной системы, является линеаризация обратными связями (ЛОС) [11]. Поскольку, в общем случае система (1) может быть неаффинной по управляющему воздействию ее необходимо представить в псевдоаффинной форме:

$$p\mathbf{Y} = \Phi(\mathbf{Y}, u) + \mathbf{G}u, \quad (3)$$

где

$$\mathbf{G} = (0 \dots 0 \ 1)^T, \quad (4)$$

$$\Phi = (f_1(\mathbf{Y}, u) \dots f_{n-1}(\mathbf{Y}, u) \ f_n(\mathbf{Y}, u) - u)^T.$$

При условии управляемости системы (1) выполнение процедуры ЛОС для уравнений (1) позволяет представить их в управляемой форме Бруновского [11]:

$$p\mathbf{Z} = \mathbf{AZ} + \mathbf{M}v, \quad (5)$$

где \mathbf{Z} — вектор новых переменных состояния, связанных со старыми функциями преобразования $\mathbf{Z} = \mathbf{T}(\mathbf{Y})$; \mathbf{M} — матрица-столбец размера $n \times 1$:

$$\mathbf{M} = (0 \dots 0 \ 1)^T;$$

\mathbf{A} — квадратная матрица размера $n \times n$:

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 1 \\ 0 & 0 & \dots & 0 \end{pmatrix}; \quad (6)$$

v — новое управляющее воздействие, связанное со старым управлением u зависимостью [11]:

$$u = \frac{1}{L_g T_n} (-L_\Phi T_n + v), \quad (7)$$

где T_n – n -я функция преобразования; $L_G T_n$ – производная Ли функции T_n по матрице-функции \mathbf{G} для системы (1) имеет вид:

$$L_G T_n = \nabla T_n \mathbf{G}; \tag{8}$$

$L_\Phi T_n$ – производная Ли функции T_n по матрице-функции Φ :

$$L_\Phi T_n = \nabla T_n \Phi. \tag{9}$$

Поскольку все компоненты вектора \mathbf{Z} связаны между собой дифференциальными зависимостями, то в установившемся режиме при $p=0$ система уравнений (5) вырождается в одно уравнение:

$$v=0. \tag{10}$$

Таким образом, основная идея разработанного метода заключается в использовании преобразования обратной связью с целью упрощения процедуры определения статической характеристики системы (1). Предложенный метод позволяет редуцировать в общем случае нелинейную алгебраическую систему (2) к одному алгебраическому уравнению, которое получено из уравнения (7) подстановкой в него соотношения (10):

$$u = -\frac{L_\Phi T_n}{L_g T_n}. \tag{11}$$

В замкнутой системе управляющее воздействие формируется регулятором на основании вектора переменных состояния \mathbf{Y} и задающего воздействия y^* :

$$u = u(\mathbf{Y}, y_j^*). \tag{12}$$

Разработанный метод заключается в том, что для определения статических характеристик произвольной замкнутой динамической системы необходимо приравнять алгоритм работы регулятора (12) и уравнение равновесия (11):

$$u(\mathbf{Y}, y_j^*) = -\frac{L_\Phi T_n}{L_g T_n}. \tag{13}$$

Решение уравнения (13) относительно вектора \mathbf{Y} определяет искомые статические характеристики системы:

$$\mathbf{Y} = \mathbf{H}(y_j^*), \tag{14}$$

где \mathbf{H} – матрица решений уравнения (13) относительно вектора переменных состояния. В свою очередь из уравнения (14) можно определить статическую ошибку по задающему воздействию для j -й регулируемой переменной:

$$\Delta y_j = y_j^* - y_j = y_j^* - h_j(y_j^*), \tag{15}$$

где h_j – j -й компонент матрицы \mathbf{H} .

3.2. Пример исследования статических характеристик системы управления нелинейным электромеханическим объектом. В качестве примера рассмотрим уравнения движения позиционного электропривода постоянного тока с последовательным возбуждением:

$$\begin{aligned} p\varphi &= \omega; \quad p\omega = \frac{c}{J} I^2; \\ pI &= -\frac{1}{T_a} I - \frac{c}{T_a R_a} \omega I + \frac{1}{R_a T_a} U. \end{aligned} \tag{16}$$

Будем считать, что регулятор положения реализует алгоритм с жесткими обратными связями [12]:

$$\begin{aligned} U &= g \left| K_1(\varphi^* - \varphi) - K_2\omega - K_3 I \right|^\alpha \times \\ &\times \text{sign}(K_1(\varphi^* - \varphi) - K_2\omega - K_3 I), \quad \alpha < 1, \end{aligned} \tag{17}$$

где K_j – некоторые весовые коэффициенты, и, являясь разновидностью алгоритма супер-скручивания, гарантирует возникновение в замкнутой системе скользящего режима второго порядка [1].

Выполняя линеаризацию обратными связями объекта (16), запишем его уравнения движения в матричной форме:

$$p\mathbf{Y} = \Phi(\mathbf{Y}, u) + \mathbf{G}u, \tag{18}$$

где

$$\begin{aligned} \Phi &= \left(\omega \quad \frac{c}{J} I^2 \quad -\frac{1}{T_a} I - \frac{c\omega I}{R_a T_a} \right)^T; \\ \mathbf{G} &= \left(0 \quad 0 \quad \frac{1}{R_a T_a} \right)^T; \quad \mathbf{Y} = (\varphi \quad \omega \quad I)^T \end{aligned}$$

и из соотношений:

$$\begin{aligned} \nabla T_1 \cdot \mathbf{G} &= 0, \quad \nabla T_1 \cdot \text{ad}_\Phi \mathbf{G} = 0, \\ \nabla T_1 \cdot \text{ad}_\Phi^2 \mathbf{G} &\neq 0, \end{aligned} \tag{19}$$

где $\text{ad}_\Phi \mathbf{G}$ и $\text{ad}_\Phi^2 \mathbf{G}$ – скобки Ли первого и второго порядков матриц-функций Φ и \mathbf{G} [11], определим функцию преобразования T_1 :

$$T_1 = \varphi. \tag{20}$$

На основании известной функции T_1 , можно определить остальные компоненты матрицы преобразования $\mathbf{T} = (T_1 \quad T_2 \quad T_3)$:

$$\begin{aligned}
 T_2 &= L_\Phi T_1 = \nabla T_1 \cdot \Phi = \omega; \\
 T_3 &= L_\Phi^2 T_1 = L_\Phi T_2 = \nabla T_2 \cdot \Phi = \frac{c}{J} I^2,
 \end{aligned}
 \tag{21}$$

где $L_\Phi T_1$ и $L_\Phi^2 T_1$ — первая и вторая производные Ли от функции T_1 по функции Φ соответственно.

Функции преобразования (20) и (21) позволяют записать связь новых переменные состояния z_j с координатами объекта управления:

$$\begin{aligned}
 z_1 &= T_1(\varphi, \omega, I) = \varphi; \quad z_2 = T_2(\varphi, \omega, I) = \omega; \\
 z_3 &= T_3(\varphi, \omega, I) = \frac{c}{J} I^2.
 \end{aligned}
 \tag{22}$$

В новых переменных состояния (22) динамика объекта (16) описывается уравнениями в форме Бруновского:

$$pz_1 = z_2; \quad pz_2 = z_3; \quad pz_3 = v,
 \tag{23}$$

а связь управляющих воздействий U и v определяются соотношением:

$$U = \frac{1}{L_G T_3} (-L_\Phi T_3 + v),
 \tag{24}$$

где $L_G T_3$ и $L_\Phi T_3$ — производные Ли от функции T_3 по функциям \mathbf{G} и Φ соответственно:

$$\begin{aligned}
 L_G T_3 &= \nabla T_3 \cdot \mathbf{G} = \left(\frac{\partial T_3}{\partial \varphi} \quad \frac{\partial T_3}{\partial \omega} \quad \frac{\partial T_3}{\partial I} \right) \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{1}{R_a T_a} \end{pmatrix} = \\
 &= \left(0 \quad 0 \quad \frac{2c}{J} I \right) \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{1}{R_a T_a} \end{pmatrix} = \frac{2cI}{J R_a T_a}; \\
 L_\Phi T_3 &= \nabla T_3 \cdot \Phi = \left(0 \quad 0 \quad \frac{2c}{J} I \right) \begin{pmatrix} \omega \\ \frac{c}{J} I^2 \\ \frac{I}{T_a} - \frac{c\omega I}{R_a T_a} \end{pmatrix} = \\
 &= -\frac{2cI}{J} \left(\frac{I}{T_a} + \frac{c\omega I}{R_a T_a} \right).
 \end{aligned}
 \tag{25}$$

Подстановка производных (25) в выражение (11) позволяет записать следующую зависимость для управляющего воздействия рассматриваемого объекта в установившемся режиме:

$$\begin{aligned}
 U &= -\frac{L_\Phi T_3}{L_G T_3} = -\left(-\frac{2cI}{J} \left(\frac{I}{T_a} + \frac{c\omega I}{R_a T_a} \right) \right) / \frac{2cI}{J R_a T_a} = \\
 &= R_a I + c\omega I.
 \end{aligned}
 \tag{26}$$

Соотношение является известным уравнением статического равновесия якорной цепи рассматриваемого электропривода [13] и его получение подтверждает корректность выполненных преобразований.

Приравняем выражения (26) и (17):

$$\begin{aligned}
 R_a I + c\omega I &= g \left| K_1 (\varphi^* - \varphi) - K_2 \omega - K_3 I \right|^\alpha \times \\
 &\times \text{sign} \left(K_1 (\varphi^* - \varphi) - K_2 \omega - K_3 I \right).
 \end{aligned}
 \tag{27}$$

Принимая во внимание, что в установившемся режиме выходной сигнал φ не изменяется, следовательно, в силу первого уравнения системы (16) скорость двигателя ω будет равна нулю и уравнение (27) может быть упрощено:

$$R_a I = g \left| K_1 (\varphi^* - \varphi) - K_3 I \right|^\alpha \text{sign} \left(K_1 (\varphi^* - \varphi) - K_3 I \right).
 \tag{28}$$

Нелинейность в правой части уравнения (28) является симметричной относительно начала координат. Этот факт позволяет рассматривать положительную ветвь линии переключения регулятора, которая описывается уравнением:

$$R_a I = g \left(K_1 (\varphi^* - \varphi) - K_3 I \right)^\alpha.
 \tag{29}$$

В силу симметрии статической характеристики регулятора результаты, полученные для положительной ветви линии переключения можно распространить и на отрицательную ветвь.

Возведение уравнения (29) в степень $1/\alpha$ позволяет получить уравнение:

$$R_a^{1/\alpha} I^{1/\alpha} / g^{1/\alpha} + K_3 I - K_1 (\varphi^* - \varphi) = 0,
 \tag{30}$$

определить ошибку регулирования:

$$\varphi^* - \varphi = \frac{R_a^{1/\alpha} I^{1/\alpha} / g^{1/\alpha} + K_3 I}{K_1},
 \tag{31}$$

и записать выражение для статической характеристики системы управления объектом (16) с алгоритмом (17):

$$\varphi = \varphi^* - \frac{R_a^{1/\alpha} I^{1/\alpha} / g^{1/\alpha} + K_3 I}{K_1}.
 \tag{32}$$

Исследуем значения ошибки регулирования (32) на границах интервала допустимых значений α , обеспечивающих

формирование скользящего режима второго порядка. При малых значениях α алгоритм управления (17) приближается к алгоритму управления:

$$U = \text{sign}(K_1(\varphi^* - \varphi) - K_2\omega - K_3I), \quad (33)$$

который реализует скользящий режим первого порядка, и уравнение установившейся ошибки определяется пределом:

$$\varphi^* - \varphi = \lim_{\alpha \rightarrow 0^+} \frac{R_a^{1/\alpha} I^{1/\alpha} / g^{1/\alpha} + K_3 I}{K_1} = \frac{K_3}{K_1} I, \quad (34)$$

который приводит к известным результатам [11].

Аналогичным образом при показателе степени α , близком к единице, установившаяся ошибка будет:

$$\varphi^* - \varphi = \lim_{\alpha \rightarrow 1^-} \frac{R_a^{1/\alpha} I^{1/\alpha} / g^{1/\alpha} + K_3 I}{K_1} = \frac{R_a/g + K_3}{K_1} I, \quad (35)$$

что тоже является известным результатом.

Выражения (34) и (35) определяют соответственно минимальное и максимальное значение установившейся ошибки регулирования в исследуемой системе. При произвольных значениях α , ошибка регулирования будет занимать между этими ошибками промежуточное место.

4. Выводы

Выполненные исследования и приведенные в работе выкладки позволяют сформулировать следующие выводы:

- использование основных положений дифференциальной геометрии позволяет упростить определение статических характеристик замкнутой динамической системы;
- левые и правые части уравнений движения динамического объекта, представленные в форме Бруновского, в установившемся режиме тождественно равны нулю;
- уравнение равновесия объекта управления в матричной форме определяется матрицами объекта управления и функцией преобразования T_n ;
- уравнение статической характеристики обобщенного электромеханического объекта может быть получено путем приравнивания управляющего воздействия, формируемого регулятором, и уравнения равновесия;
- ошибка регулирования в системах управления со скользящим режимом второго порядка принимает промежуточные значения между ошибками в линейных системах и системах, в которых возникает скользящий режим первого порядка.

Литература

1. Емельянов, С. В. Новые типы обратной связи [Текст] / С. В. Емельянов, С. К. Коровин. — М.: Наука, 1997. — 352 с.

2. Khan, M. K. Second order sliding mode control of a diesel engine [Text] / M. K. Khan, K. B. Goh, S. K. Spurgeon // Asian Journal of Control. — 2003. — Vol. 5, № 4. — P. 614–619. doi:10.1111/j.1934-6093.2003.tb00177.x

3. Bartolini, G. On the second-order sliding mode control of nonlinear systems with uncertain control direction [Text] / G. Bartolini, A. Pisano, E. Usai // Automatica. — 2009. — Vol. 45, № 12. — P. 2982–2985. doi:10.1016/j.automatica.2009.09.018

4. Bartolini, G. Digital second-order sliding mode control for uncertain nonlinear systems [Text] / G. Bartolini, A. Pisano, E. Usai // Automatica. — 2001. — Vol. 37, № 9. — P. 1371–1377. doi:10.1016/s0005-1098(01)00085-1

5. Punta, E. Multivariable Second Order Sliding Mode Control of Mechanical Systems [Text] / E. Punta // Proceedings of the 45th IEEE Conference on Decision and Control. — IEEE, 2006. — P. 4939–4944. doi:10.1109/cdc.2006.376980

6. Laghrouche, S. Robust second order sliding mode controller for electropneumatic actuator [Text] / S. Laghrouche, M. Smaoui, X. Brunand, F. Plestan // Proceedings of American control conference, June 30, 2004 – July 2, 2004. — Boston, USA, 2004. — Vol. 6. — P. 5090–5095.

7. Chen, M.-S. An LTR-observer-based dynamic sliding mode control for chattering reduction [Text] / M.-S. Chen, C.-H. Chen, F.-Y. Yang // Automatica. — 2007. — Vol. 43, № 6. — P. 1111–1116. doi:10.1016/j.automatica.2006.12.001

8. Волянский, Р. С. Синтез оптимальной системы управления с нелинейной активационной функцией [Текст] / Р. С. Волянский, А. В. Садовой // Электротехнические и компьютерные системы. — 2014. — № 15(91). — С. 69–71.

9. Копылов, И. П. Математическое моделирование электрических машин [Текст] / И. П. Копылов. — М.: Высшая школа, 2001. — 327 с.

10. Ким, Д. П. Теория автоматического управления. Линейные системы [Текст] / Д. П. Ким. — М.: Физматлит, 2003. — 288 с.

11. Ким, Д. П. Теория автоматического управления. Многомерные, нелинейные, оптимальные и адаптивные системы [Текст] / Д. П. Ким. — М.: Физматлит, 2004. — 464 с.

12. Садовой, А. В. Системы оптимального управления прецизионными электроприводами [Текст] / А. В. Садовой, Б. В. Сухинин, Ю. В. Сохина. — К.: ИСИМО, 1998. — 298 с.

13. Чиликин, М. Г. Общий курс электропривода [Текст] / М. Г. Чиликин, А. С. Сандлер. — М.: Энергоиздат, 1981. — 576 с.

СТАТИЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ СИСТЕМ З КОВЗНИМИ РЕЖИМАМИ ДРУГОГО ПОРЯДКУ

Запропоновано метод визначення регулювання в усталеному режимі роботи узагальнених електромеханічних систем. Виконано перетворення рівнянь руху узагальненої електромеханічної системи до керованої форми Бруновського. Знайдено рівняння статичної рівноваги системи, яка розглядається, та отримано вирази для визначення координат замкненої системи в усталеному режимі.

Ключові слова: електромеханічна система, ковзний режим другого порядку, статичні характеристики, нелінійне керування.

Волянский Роман Сергеевич, кандидат технических наук, доцент, кафедра электротехники и электромеханики, Днепро-дзержинский государственный технический университет, Украина, e-mail: voliansky@ua.fm.

Волянський Роман Сергійович, кандидат технічних наук, доцент, кафедра електротехніки та електромеханіки, Дніпро-дзержинський державний технічний університет, Україна.

Voliansky Roman, Dniprodzerzhynsk State Technical University, Ukraine, e-mail: voliansky@ua.fm