

УДК 621.311.6:62-83(045)

DOI: 10.24160/1993-6982-2019-3-70-79

Система управления взаимосвязанными электроприводами с электромеханическим распором и распределением нагрузки

И.С. Полющенко

Приведены результаты разработки двухдвигательной электромеханической системы, в которой автоматическое управление взаимосвязанными электроприводами обеспечивает формирование электромеханического распора для поддержания закрытого состояния люфта в кинематической передаче в заданном диапазоне изменения нагрузки. При выходе из указанного диапазона нагрузка автоматически распределяется поровну между электроприводами. Целями данного технического решения является формирование распора, когда он необходим в соответствии с особенностями нагрузки, действующей на механизм, и исключение завышения установленной мощности электроприводов по сравнению с мощностью, требуемой для движения механизма. Проиллюстрировано применение результатов разработки для управления движением подъёмной оси антенной установки. Это связано с тем, что момент нагрузки указанного механизма является активным, знакопеременным и зависит от угла подъёма. При пересечении вертикали он меняет направление, что способствует раскрытию люфта в кинематической передаче и возникновению автоколебаний. При углах подъёма, близких к горизонтали, момент нагрузки максимален, а люфт под его действием закрыт. Кроме того, вблизи вертикального положения ветровая нагрузка способствует раскрытию люфта. Система регулирования координат электромеханической системы включает контуры регулирования моментов, индивидуальные для каждого из электроприводов, и общий для них контур регулирования положения. Даны рекомендации по синтезу этих контуров. Задаваемая величина момента распора вычисляется нелинейным элементом с трапециевидной характеристикой вход–выход в зависимости от отработанного регулятором положения рассогласования заданного и действительного углового положения оси приводного механизма, что позволяет косвенно оценить величину момента нагрузки.

Разработаны программно-аппаратные средства системы управления. При составлении программного обеспечения микропроцессорной системы управления использованы модельно-ориентированные средства разработки. Изготовлен макет, воспроизводящий конструкцию подъёмного механизма антенной установки. Предложенная система регулирования позволила снизить влияние люфта при углах подъёма, близких к вертикали, и распределить нагрузку между электроприводами при углах подъёма, близких к горизонтали, когда распор не требуется, а также при воздействии ветровой нагрузки. Представлены экспериментальные осциллограммы координат электромеханической системы, подтверждающие заявленные результаты.

Ключевые слова: электромеханический распор, взаимосвязанные электроприводы, электромеханическая система, модельно-ориентированное программирование, регулирование координат.

Для цитирования: Полющенко И.С. Система управления взаимосвязанными электроприводами с электромеханическим распором и распределением нагрузки // Вестник МЭИ. 2019. № 3. С. 70—79. DOI: 10.24160/1993-6982-2019-3-70-79.

Control System for Interconnected Electric Drives with an Electromechanical Torsion and Load Distribution

I.S. Polyushchenkov

The article presents the results from the development of a double-motor electromechanical system, in which the automatic control of interconnected electric drives ensures the formation of electromechanical torsion to maintain the closed state of backlash in the kinematic transmission within the specified load torque variation range. When the load torque escapes from the preset range, it is automatically distributed equally among the electric drives. The aims of this technical solution are to form a torsion when it is needed in accordance with the peculiarities of the load acting on the mechanism, and to prevent the installed capacity of electric drives from being exceeded in comparison with the power required for moving the mechanism. The application of the development results for controlling the motion of the antenna installation lifting axis is illustrated. The peculiarity of this system is that the load torque of this mechanism is active, sign-variable and depends on the lifting angle. When crossing the vertical position, it changes direction, which facilitates the opening of backlash in the kinematic transmission and the occurrence of self-oscillations. At lifting angles close to the horizontal position, the load torque has its maximum value, and the backlash is closed under its action. In addition, when the mechanism is near the vertical position, the wind load facilitates opening of the backlash. The system for controlling the electromechanical systems coordinates includes torque control loops, which are individual for each of the electric drives, and a loop that is common for control of their position. Recommendations for synthesizing these loops are given. The specified torsion torque is calculated by a nonlinear element with a trapezoidal I/O characteristic depending on the mismatch between the specified and actual angular position of the driving mechanism axis processed by the position controller, which makes it possible to indirectly estimate the load torque value.

The control system software and hardware have been developed. In developing the microprocessor control system software, model-oriented development tools were used. A prototype replicating the antenna installation lifting mechanism design has been made. The proposed control system made it possible to reduce the influence of backlash at lifting angles close to the vertical position and to distribute the load

torque between the electric drives at lifting angles close to the horizontal position, when torsion is not required, as well as when exposed to wind load. Experimental oscillograms of electromechanical system coordinates are presented, confirming the declared results.

Key words: electromechanical torsion, interconnected electric drives, electromechanical system, model-oriented programming, coordinate control.

For citation: Polyushchenkov I.S. Control System for Interconnected Electric Drives with an Electromechanical Torsion and Load Distribution. Bulletin of MPEI. 2019;3:70—79. (in Russian). DOI: 10.24160/1993-6982-2019-3-70-79.

Введение

Известны различные системы управления движением, в которых использованы два или более взаимосвязанных электропривода (ЭП), приводящих в движение общий исполнительный механизм и при этом осуществляющих электромеханическую выборку зазоров в кинематических передачах [1 — 4]. Такие электроприводы не только соединены механически, но и обладают единым управлением, а в управляющее воздействие на каждый из них входит две составляющие — основное и дополнительное воздействия.

Основное управляющее воздействие подаётся на электроприводы со стороны общего для них регулятора целевой координаты (скорости или положения) и служит для формирования движущего момента. Дополнительное управляющее воздействие предназначено для формирования моментов распора и задаётся индивидуально каждому из электроприводов.

Для различных способов управления взаимосвязанными электроприводами и, в частности, способов формирования моментов распора характерны ограничения по применению, связанные с особенностями конструкции исполнительного механизма, режимами его движения, характером момента нагрузки и диапазоном изменения, а также влиянием различных возмущающих воздействий. Поэтому при выборе того или иного способа следует учитывать все перечисленные факторы, чтобы получить желаемые статические и динамические характеристики электромеханической системы (ЭМС).

Если оценивать влияние возмущающих факторов, а именно, скорости вращения электрических двигателей и момента нагрузки на формирование и стабилизацию момента распора, то наименее подвержена этому влиянию система регулирования, описанная в [1]. В ней указанные возмущающие факторы не ограничивают точность стабилизации моментов распора, а каждый из электроприводов всегда создаёт движущий момент только одного направления. Однако имеется и серьёзный недостаток — более чем двукратное превышение установленной мощности электроприводов по сравнению с мощностью, требуемой для движения механизма. Это связано с неизменным направлением движущих моментов каждого из электроприводов. Кроме того, некоторое дополнительное превышение мощности необходимо для создания моментов распора. Применение подобной системы может быть оправдано для привода поворотных механизмов из-за реактивного характера момента нагрузки и стремления избежать раскрытия люфта при реверсе направления вращения.

Известны системы управления взаимосвязанными электроприводами, в которых электромеханический распор поддерживается только в ограниченном диапазоне изменения момента нагрузки, а при выходе из указанного диапазона нагрузка распределяется между электроприводами [3]. При этом превышение мощности не так велико по сравнению с мощностью, требуемой для движения механизма, и связано только с наличием моментов распора. Более детально оценить установленную мощность электроприводов в такой системе можно только с учётом циклограммы движения и нагрузочной диаграммы механизма.

В этой связи актуальными являются исследования, которые на основании учёта механической характеристики механизма позволяют оценить диапазон изменения нагрузки, за пределами которого допустим переход из режима формирования распора в режим выравнивания нагрузки между электроприводами.

Цель работы — разработка системы управления взаимосвязанными электроприводами, в которой (чтобы избежать превышения их установленной мощности) в зависимости от величины нагрузки осуществляется либо электромеханическая выборка люфта в кинематической цепи, либо распределение нагрузки между электроприводами. Характерным является то, что исследуется использование этой системы управления для привода механизма с активным знакопеременным моментом нагрузки.

Содержание и методология разработки

Несмотря на ограниченный диапазон нагрузки, при котором поддерживается электромеханический распор, система управления взаимосвязанными электроприводами, предусматривающая распределение нагрузки между ними, может быть успешно использована при управлении движением некоторых ЭМС, если механические характеристики электроприводов согласованы с механической характеристикой исполнительного механизма. Сказанное следует отнести к двухдвигательному ЭП подъёмной (горизонтальной) оси исследованной в [1] антенной установки, кинематическая схема которой показана на рис. 1, а. Зависимость активной составляющей момента нагрузки механизма подъёмной оси антенной установки от угла подъёма α (рис. 1, б) описывается следующим выражением:

$$M(\alpha) = mgL \sin \alpha, \quad (1)$$

где m — масса антенны; L — длина опоры; α — угол подъёма.

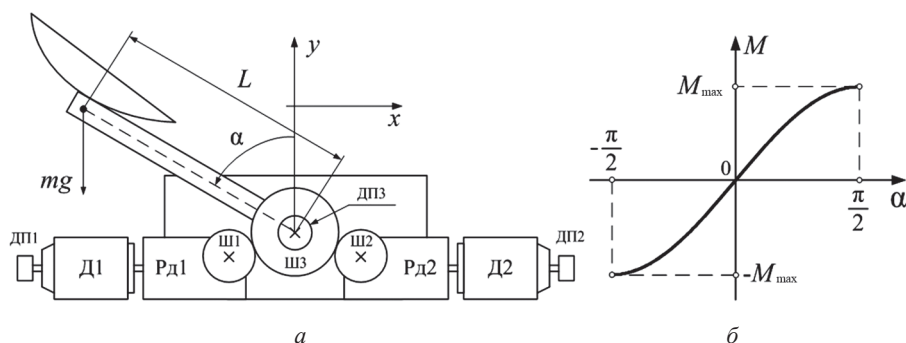


Рис. 1. Механизм подъёмной оси антенной установки:

a — кинематическая схема; *б* — зависимость активной составляющей момента нагрузки от угла подъёма антенны

Момент нагрузки механизма обусловлен силой тяжести, варьируется в широких пределах в зависимости от угла подъёма α и меняет направление при переходе через вертикаль при $\alpha = 0$. Помимо активной составляющей (см. рис. 1, б), имеются ветровая и реактивная (вызванная трением в передаче) нагрузки.

Опыт проектирования подобных механизмов, а также данные [5 — 9] показали, что управление движением антенны в окрестности вертикального положения при $\alpha \approx 0$ осложняется зависимостью (1) момента нагрузки от угла подъёма. Данная зависимость приводит к тому, что при прохождении антенной вертикального положения или при удержании её в этом положении люфт в передаче может раскрыться под действием момента силы тяжести, меняющего знак. Это влияет на точность регулирования положения и может стать причиной автоколебаний. Заметим, что в окрестности вертикали при $\alpha \approx 0$, когда момент силы тяжести близок к нулю, люфт может раскрыться при смещении положения всей установки в поле силы тяжести или под действием ветровой нагрузки вследствие парусности антенны. Напротив, с приближением угла подъёма к горизонтали при $\alpha \gg 0$ или $\alpha \ll 0$ момент силы тяжести возрастает и препятствует раскрытию люфта под действием указанных возмущающих факторов.

Рассмотрим решение указанной проблемы средствами системы автоматического управления с электромеханическим распором и распределением нагрузки между электроприводами, функциональная схема

которой показана на рис.2. Принимается, что в этой схеме кинематические связи между электроприводами и исполнительным механизмом являются жёсткими. Поэтому для регулирования координат такой ЭМС в отличие от [1] может быть успешно применена последовательная коррекция.

В схеме на рис. 2 контур регулирования положения (КРП), общий для электроприводов ЭП1 и ЭП2, имеет регулятор положения РП и замкнут с помощью датчика положения ДП. Дополнительное управляющее воздействие M_{pz} , в отличие от [1], не задаётся постоянным, а рассчитывается вычислителем момента распора ВР в зависимости от величины выходного сигнала регулятора положения M_3 , который, в свою очередь, через величину рассогласования $\Delta\varphi$ зависит от нагрузки M_c , приложенной к механизму, а значит, и от угла подъёма антенны. Поскольку электроприводы ЭП1, ЭП2 должны создавать моменты распора в соответствии с дополнительным задающим воздействием, то в структуре каждого из них обязательно наличие индивидуальных контуров регулирования электромагнитных моментов КРМ1, КРМ2. Также на схеме рис. 2 показаны инерционные массы роторов двигателей ИМ1, ИМ2 и механизма ИМ0. Вычислитель распора позволяет в окрестности вертикали автоматически закрыть люфты Л1 и Л2 и распределить нагрузку между двигателями при росте момента силы тяжести. Диаграммы, изображённые на рис. 3, иллюстрируют вычисление задаваемого момента распора.

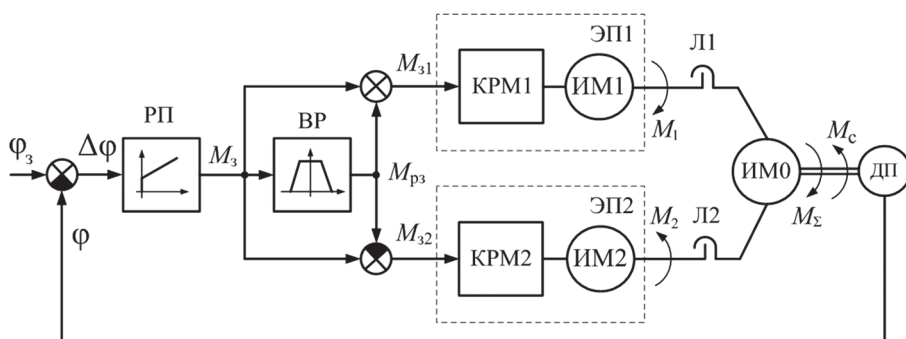


Рис. 2. Функциональная схема двухдвигательной ЭМС с электромеханическим распором и распределением нагрузки между электроприводами

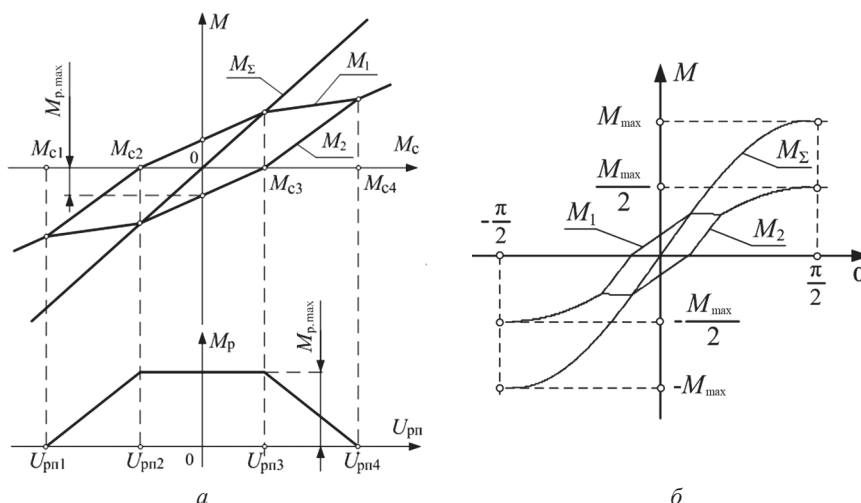


Рис. 3. Формирование момента распора:

а — диаграммы сигналов регулятора положения и вычислителя распора; *б* — нагрузочные диаграммы двигателей

Из-за изменения нагрузки в зависимости от угла подъёма α момент распора имеет максимальную величину при $U_{рп2} < U_{рп} < U_{рп3}$ в окрестности вертикального положения антенны и постепенно снижается до нуля при увеличении отклонения от вертикали. При нулевой величине задаваемого момента распора ($U_{рп} > U_{рп4}$ или $U_{рп} < U_{рп1}$) нагрузка распределена между электроприводами поровну, и электромеханическая выборка люфта не осуществляется. В этом случае распор не требуется, поскольку люфт закрыт под действием активного момента. Возможность такого автоматического формирования момента распора связана с тем, что регулятор положения РП стремится уменьшить рассогласование $\Delta\varphi$ заданного углового положения φ_z подъёмной оси и её действительного углового положения φ , которое возникает под действием момента нагрузки и в динамических режимах. Переходы между двигательным и тормозным режимами работы электрических двигателей изображены на рис. 3, б. Нагрузка аналогичным образом распределена между электроприводами и при воздействии момента, не связанного с углом подъёма антенны, а связанного с действием ветра. Величину момента распора $M_{р,макс}$ следует выбирать в зависимости от величины нагрузки, действие которой вызывает раскрытие люфта. В случае антенной установки это относится к ветровой нагрузке, имеющей произвольное направление. Очевидно, что величины интервалов $U_{рп1} \dots U_{рп4}$ и $U_{рп2} \dots U_{рп3}$ входного сигнала вычислителя распора зависят от $M_{р,макс}$ и диапазона изменения угла α .

Описанный способ задания момента распора и распределения нагрузки не затрагивает работу контура регулирования положения и поэтому может быть использован и в случае модального управления КРП [1]. В результате распределения нагрузки между электроприводами каждый из них должен быть рассчитан на величину момента $M_{макс}/2$. При управлении электроприводами с заданием постоянных моментов распора независимо от величины нагрузки, как в [1], каждый электропривод должен быть

рассчитан на момент $M_{макс}$. Кроме того, в этом случае моменты распора создавались бы и тогда, когда люфт был закрыт под действием момента силы тяжести и электромеханический распор не требовался.

Представлена методика синтеза двухдвигательной системы, основанная на структурной схеме одного из электроприводов — одноканальной системе с подчинённым регулированием координат при условии закрытого люфта. Для простоты синтез системы рассмотрен на примере электрических двигателей постоянного тока независимого возбуждения, поскольку при постоянном потоке их электромагнитные моменты пропорциональны токам якорных цепей, а механические характеристики линейны. Структурная схема контура регулирования тока (КРТ) якорной цепи (ЯЦ) электропривода дана на рис. 4. При практической реализации контура выборка сигнала тока и обработка измеренных значений релейным регулятором тока РРТ и управляемым преобразователем УП, имеющими достаточное для этого быстродействие, осуществляется с частотой $f_{ррт} = 50$ кГц.

Передаточная функция замкнутого контура КРТ упрощённо выглядит как:

$$W_{крт}(p) = \frac{I_{я}(p)}{U_{зт}(p)} = \frac{k_{крт}}{T_{крт}p + 1};$$

$$k_{крт} = \frac{1}{k_{от}}; T_{крт} \approx \frac{1}{f_{ррт}},$$

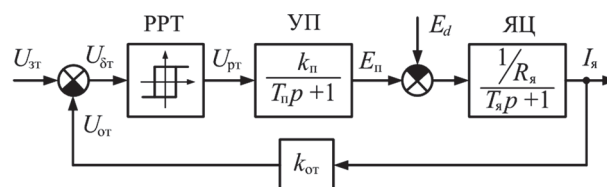


Рис. 4. Структурная схема контура регулирования тока

где $k_{крт}$, $T_{крт}$ — коэффициент передачи замкнутого КРТ и его эквивалентная постоянная времени; $k_{от}$ — коэффициент обратной связи по току; T_n — постоянная времени управляемого преобразователя УП.

Структурная схема замкнутого контура регулирования положения КРП при закрытом люфте продемонстрирована на рис. 5. Следует отметить, что момент инерции J_{Σ} электропривода равен сумме моментов инерции электрического двигателя ИМ1 и общей массы ИМ0. Для коррекции этого контура использован пропорционально-интегрально-дифференциальный ПИД-регулятор положения РП, передаточная функция которого имеет следующий вид:

$$W_{рп}(p) = \frac{U_{рп}(p)}{U_{\deltaп}(p)} = \frac{k_{дп}p^2 + k_{ип}p + k_{инп}}{p}, \quad (3)$$

где $k_{инп}$, $k_{ип}$, $k_{дп}$ — пропорциональный, интегральный и дифференциальный коэффициенты регулятора положения.

С учётом (2), (3) передаточную функцию замкнутого контура регулирования положения запишем в следующей форме:

$$\begin{aligned} W_{\phi}(p) &= \frac{\phi(p)}{U_{зп}(p)} = \\ &= \frac{1}{k_{оп}} (k_{дп}p^2 + k_{ип}p + k_{инп}) \\ &= \frac{J_{\Sigma}T_{крт} p^4 + \frac{J_{\Sigma}}{k_{\Sigma}} p^3 + k_{дп}p^2 + k_{ип}p + k_{инп}}{k_{\Sigma}} \quad (4) \\ &= \frac{1}{k_{оп}} \frac{b_3p^3 + b_2p^2 + b_1p + b_0}{a_4p^4 + a_3p^3 + a_2p^2 + a_1p + a_0} \\ &= \frac{1}{k_{оп}} \frac{B_m(p)}{A_n(p)}, \end{aligned}$$

где $k_{\Sigma} = k_{крт}k_{оп}k\Phi$ — общий коэффициент передачи; $k_{оп}$ — коэффициент обратной связи по положению; $k\Phi$ — коэффициент электрического двигателя постоянного тока.

При такой структуре КРП имеет астатизм третьего порядка по управляющему воздействию, так как в прямом канале контура есть три интегратора, а порядок астатизма по возмущающему воздействию равен единице, поскольку в прямом канале контура имеется один интегратор до точки приложения момента нагрузки M_c [10 — 12]. Судя по виду коэффициентов характеристического полинома в знаменателе передаточной функции (4), динамические свойства замкнутого КРП

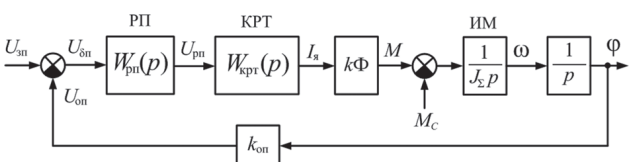


Рис. 5. Структурная схема контура регулирования положения

могут быть обеспечены путём настройки коэффициентов регулятора положения $k_{инп}$, $k_{ип}$, $k_{дп}$.

Для синтеза замкнутого КРП с последовательной коррекцией можно предложить использовать метод нормированных характеристических полиномов, который обычно нужен для синтеза систем с модальным управлением [13]. Применению указанного метода способствует то, что коэффициенты a_2 , a_1 и a_0 характеристического полинома $A_n(p)$ зависят только от коэффициентов регулятора положения. Согласно этому методу мерой быстродействия системы регулирования является её базовая частота:

$$\Omega_6 = \tau/T, \quad (5)$$

где τ — нормированная длительность переходного процесса; T — длительность переходного процесса.

Следует отметить, что наличие динамических составляющих в числителе передаточной функции (4) обуславливает наличие колебательной свободной составляющей движения. Степень её демпфирования зависит от выбранного вида нормированного характеристического полинома, порядок которого должен быть равен порядку полинома $A_n(p)$. Если $T_{крт}$ имеет малую величину и её влиянием на динамику КРП можно пренебречь, то в передаточной функции (4) $a_4 \approx 0$. Тогда нормированный характеристический полином равен:

$$H(p) = H_3p^3 + H_2p^2 + H_1p + H_0 = 1p^3 + 3p^2 + 3p + 1. \quad (6)$$

С учётом влияния $T_{крт}$ нормированный характеристический полином имеет другой вид:

$$\begin{aligned} D(p) &= D_4p^4 + D_3p^3 + D_2p^2 + D_1p + D_0 = \\ &= 1p^4 + 4p^3 + 6p^2 + 4p + 1. \end{aligned} \quad (7)$$

Коэффициенты нормированных полиномов $H(p)$ и $D(p)$ для достижения предельного демпфирования свободной составляющей движения соответствуют биномиальному разложению [13]. Условие пренебрежения величиной $T_{крт}$ может быть сформулировано, исходя из быстродействия КРТ и КРП:

$$\Omega_6 \leq 4\Omega_{доп}; \quad \Omega_{доп} = \frac{a_3D_4}{a_4D_3} = \frac{D_4}{T_{крт}D_3} = \frac{1}{4T_{крт}}. \quad (8)$$

При $T_{крт} \approx 0$ базовая частота Ω_6 может быть задана произвольно, но реально быстродействие ЭП ограничено допустимой нагрузкой на электрический двигатель в переходных процессах. Следовательно, с учётом быстродействия современных полупроводниковых преобразователей условие (8) выполняется.

Коэффициенты передаточной функции (4) связаны с коэффициентами нормированного полинома (6) и заданной базовой частотой Ω_6 следующими соотношениями:

$$\begin{aligned} a_2 = b_2 &= \frac{H_2}{H_3} \Omega_6^2 a_3; \quad a_1 = b_1 = \frac{H_1}{H_3} \Omega_6^2 a_3; \\ a_0 = b_0 &= \frac{H_0}{H_3} \Omega_6^3 a_3. \end{aligned} \quad (9)$$

Из сопоставления выражений (4), (9) можно определить коэффициенты регулятора РП.

Результаты компьютерного моделирования в Matlab Simulink [14,15] показали соответствие замкнутого контура КРП заданным динамическим характеристикам, рассчитанным по (4) — (9).

Экспериментальное исследование

При исследовании управления взаимосвязанными ЭП с электромеханической выборкой люфта и распределением нагрузки в рамках разработки опорно-поворотной установки антенны, ведущейся на ООО НПО «Рубикон — Инновация» (г. Смоленск), разработаны и изготовлены программно-аппаратные средства микропроцессорной системы управления. С помощью 3D-принтера изготовлена экспериментальная установка (рис. 6), конструкция которой воспроизводит подъёмный механизм антенной установки.

Электроприводы обладают общей микропроцессорной системой управления на базе микроконтроллера STM32. Двигатели постоянного тока имеют возбуждение от постоянных магнитов. Питание электрических двигателей осуществляется индивидуальными управляемыми транзисторными преобразователями мостовой схемы. Кроме датчика положения (энкодера), установленного на подъёмной оси механизма, на валах электрических двигателей также находятся эн-

кодеры для контроля закрытия и раскрытия люфта. Для замыкания контура регулирования тока в якорные цепи электрических двигателей включены датчики тока. Программное обеспечение системы управления электроприводов разработано на основе проектов [16, 17] с использованием средств модельно-ориентированного программирования — библиотеки Waijung Blockset системы компьютерной математики Matlab [18, 19]. Предусмотрена связь системы управления с персональным компьютером по последовательному асинхронному интерфейсу [20] и для отслеживания координат движения в виде графиков создано специальное приложение для персонального компьютера. Модельные схемы, показанные на рис. 7 — 9, иллюстрируют использование средств модельно-ориентированного программирования при управлении электроприводами. Опрос сигнальных выходов датчиков тока каждого из электроприводов тактируется таймером с частотой 50 кГц с помощью блока Timer IRQ, как показано на рис. 7, а. Датчики тока подключены к аналоговым входам микроконтроллера AN1 и AN2. При прерывании от переполнения таймера выполняется подсистема Current Measurement, схема которой дана на рис. 7, б. Она выполняет поочерёдный опрос аналоговых входов с использованием модельного блока Regular ADC и релейное регулирование токов каждого из электроприводов с помощью регуляторов тока RT1 и RT2.

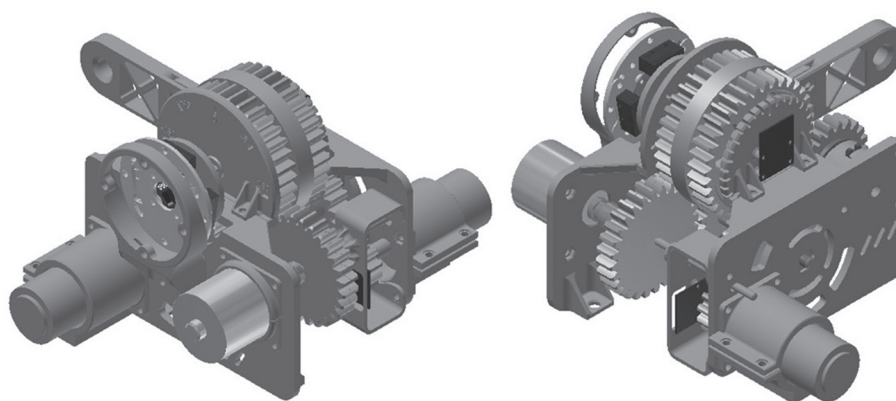


Рис. 6. Модель экспериментальной установки

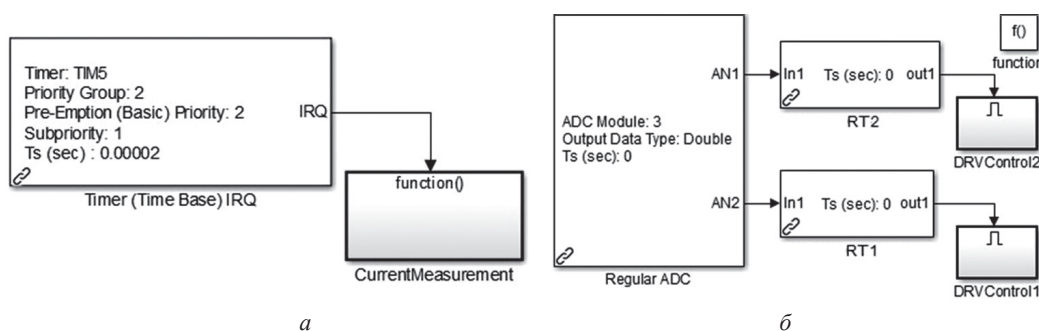


Рис. 7. Модельные схемы для регулирования токов:

а — схема тактирования; б — подсистема для регулирования токов и управления электроприводами

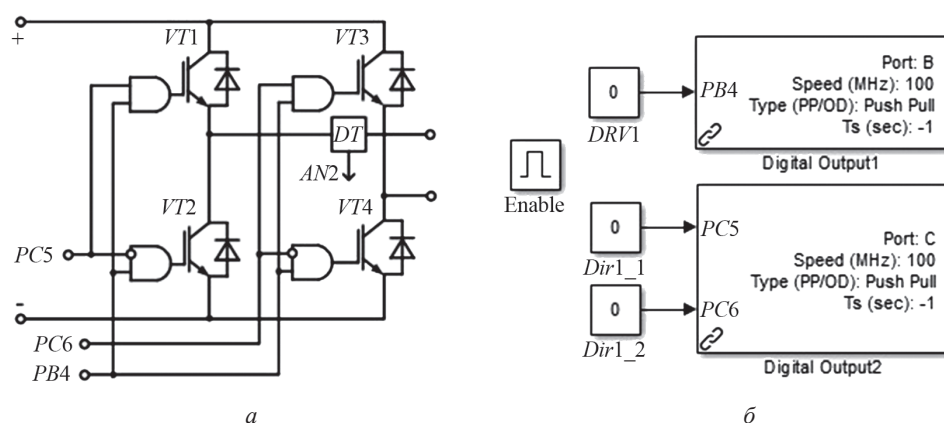


Рис. 8. Силовой преобразователь электропривода:

a — схема; *б* — модельная схема подсистемы для управления силовым преобразователем

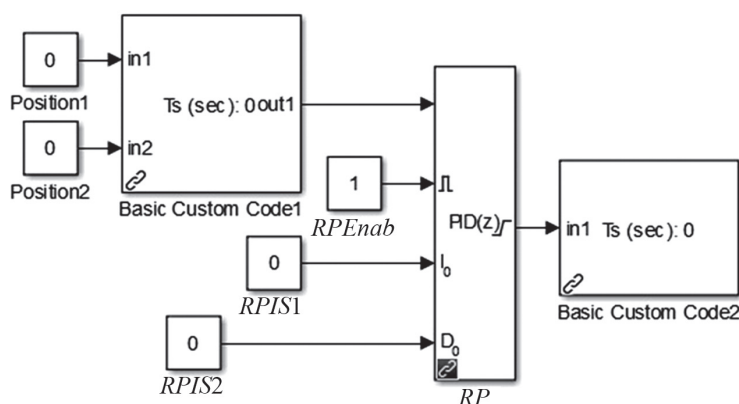


Рис. 9. Модельная схема регулятора положения

Регуляторы токов управляют силовыми преобразователями в зависимости от измеренных значений токов и их заданных значений, вычисленных регулятором положения. На рис. 8, *a* изображена схема силового преобразователя одного из электроприводов с датчиком тока *DT*. При управлении преобразователем транзисторы *VT1* — *VT4* коммутируются в соответствии с сигналами на линиях *PB4*, *PC5* и *PC6* микроконтроллера. Модельная схема подсистемы *DRV Control1* для управления силовым преобразователем одного из электроприводов представлена на рис. 8, *б*. Модельная схема для управления силовым преобразователем второго электропривода *DRV Control2* аналогична ей.

В соответствии со схемами сигналы на линиях *PC5*, *PC6* и, следовательно, переменные *Dir1_1* и *Dir1_2* задают полярность напряжения, приложенного к якорю электрического двигателя, а сигнал на линии *PB4* и соответствующая ему переменная *DRV1* управляют коммутацией транзисторов.

Модельная схема регулятора положения *RP*, в которой использован стандартный регулятор вида *PID-Controller* из библиотеки *Simulink*, показана на рис. 9. В ней предусмотрены элементы для задания начальных условий *RPIS1* и *RPIS2*, а также элемент для вклю-

чения и отключения регулятора *RPEenab*. Блок пользовательской *C*-функции *Basic Custom Code 1* нужен для вычисления сигнала рассогласования, а *Basic Custom Code 2* выполняет вычисление моментов распра.

Экспериментальные осциллограммы координат взаимосвязанных электроприводов, регистрирующиеся и отображающиеся с помощью приложения для персонального компьютера, продемонстрированы на рис. 10. Они иллюстрируют формирование электромеханического распра и распределение нагрузки между электроприводами, устанавливая связь между рассогласованием по положению $\Delta\varphi$ и токами электрических двигателей i_{a1} и i_{a2} .

Величины рассогласования $\Delta\varphi$ и заданного углового положения φ_3 выражены в импульсах, отсчитываемых по энкодеру на оси приводного механизма. Величина $\varphi_3 = 0$ соответствует заданному вертикальному положению антенны, которое остаётся постоянным, а величина $\Delta\varphi$ равна разности заданного положения φ_3 и фактической координаты φ подъёмного механизма антенны. По горизонтальной оси отложены порядковые номера отсчётов времени t_n , в которые регистрируются координаты. Заданное значение суммарного тока электроприводов i_3 и заданные значения токов i_{31} , i_{32}

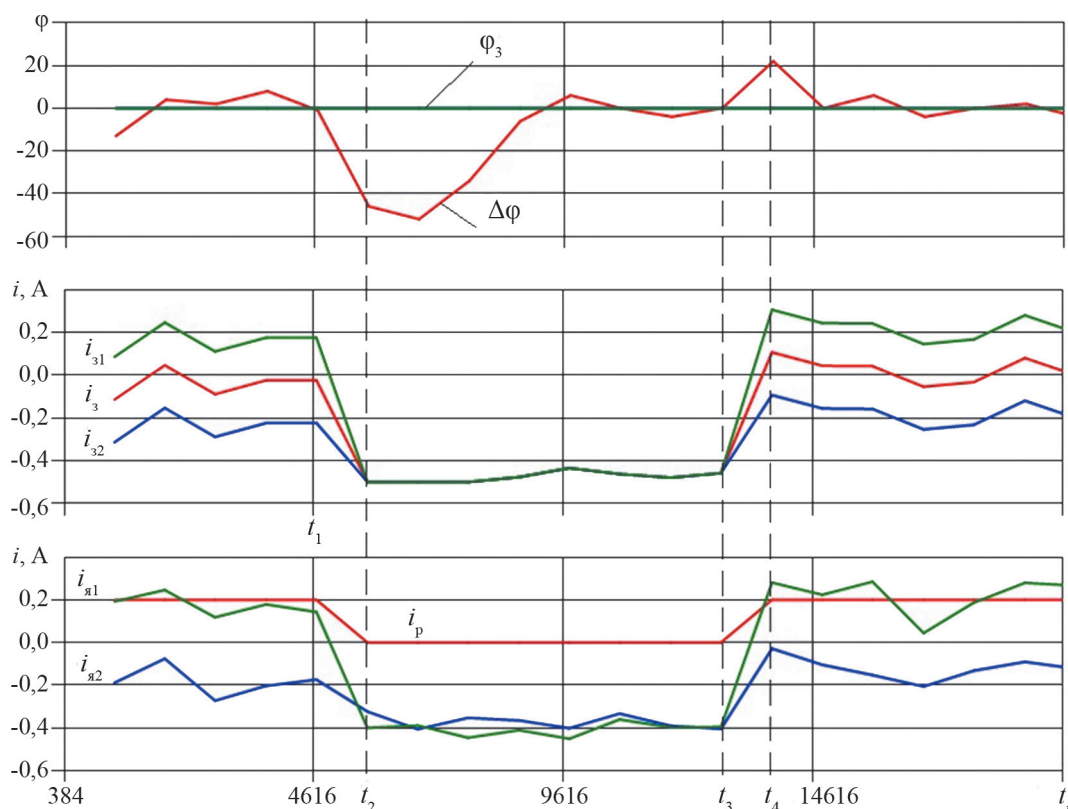


Рис. 10. Осциллограммы координат взаимосвязанных электроприводов

каждого из них вычисляются регулятором положения и вычислителем распора. Для исследования воздействия возмущающего фактора имитируется ветровая нагрузка путём обдува экспериментальной установки сжатым воздухом.

Поскольку ток якорной цепи электрического двигателя постоянного тока с возбуждением от постоянных магнитов пропорционален его электромагнитному моменту, то токи и сигналы задания токов (графики на рис. 10) можно соотнести с электромагнитными моментами и сигналами их задания, обозначенными на рис. 2 — 5:

$$i_{я1} \sim M_1; i_{я2} \sim M_2; i_3 \sim U_{рп}; i_{31} \sim M_{31} \sim U_{31};$$

$$i_{32} \sim M_{31} \sim U_{32}; i_{31} = i_p - i_3; i_{32} = i_3 - i_p.$$

Заданное положение φ_3 и рассогласование по положению $\Delta\varphi$ (осциллограммы на рис. 10) сопоставимы с координатами КРП, обозначенными на рис. 5, а именно, $\varphi_3 \sim U_{3п}; \Delta\varphi \sim U_{\deltaп}$.

В исходном состоянии нагрузка невелика и уравновешена суммарным электромагнитным моментом электрических двигателей, создающих электромеханический распор. Регулятор положения поддерживает $\Delta\varphi \approx 0$. При этом токи $i_{я1}$ и $i_{я2}$ имеют противоположные направления и по абсолютной величине примерно равны току распора i_p :

$$i_p \approx i_{я1} \approx -i_{я2}; i_3 \approx 0. \quad (10)$$

Указанное состояние системы характерно для окрестности вертикального положения антенны. Очевидно, что люфт при этом закрыт под действием моментов распора. В момент времени t_1 под действием ветровой нагрузки система выводится из исходного состояния, увеличивается рассогласование $\Delta\varphi$, которое со временем обрабатывается регулятором положения так, чтобы $\Delta\varphi \rightarrow 0$. В связи с ростом выходного сигнала регулятора i_3 в соответствии с диаграммами, показанными на рис. 3, токи $i_{я1}$ и $i_{я2}$ возрастают и приобретают одинаковое направление вслед за i_{31} и i_{32} . При этом прекращается формирование распора. Нагрузка к моменту времени t_2 поровну распределяется между электроприводами:

$$i_p = 0; i_{я1} \approx i_{я2}; i_{31} = i_{32}.$$

При снятии нагрузки в момент времени t_3 распор автоматически восстанавливается и система к моменту времени t_4 возвращается в исходное состояние с формированием распора, согласно формуле (10). Контроль зацепления зубчатых колёс экспериментальной установки при экспериментальных исследованиях осуществлялся визуально.

Следует отметить, что формирование электромеханического распора возможно только при условии, что в конструкции механизма отсутствуют элементы с самоторможением, препятствующие работе электрических двигателей в тормозном режиме, например, червячные редукторы. Это связано с тем, что один из двигателей

работает в генераторном режиме. Поскольку момент нагрузки, приложенный к подъёмному механизму антенной установки, является активным, в конструкции предусмотрен колодочный тормоз с электромагнитным управлением для фиксации механизма при выключенных электроприводах. Логический алгоритм управления тормозом согласован с алгоритмом управления электроприводами.

Заключение

Предложена система управления взаимосвязанными электроприводами, позволяющая в зависимости от величины момента нагрузки поддерживать закрытое состояние люфта в кинематической передаче в заданном диапазоне изменения момента нагрузки, когда электромеханический распор необходим в соответствии с особенностями характеристики механиз-

ма. При выходе величины момента нагрузки из этого диапазона в системе обеспечивается равное распределение нагрузки между двигателями, чем исключается чрезмерное завышение установленной мощности электроприводов.

Предложенная система управления взаимосвязанными электроприводами применяется в приводе подъёмной оси антенной установки. Средствами управления достигнуты выборка люфта при углах подъёма, близких к вертикали и равномерное распределение нагрузки между электроприводами при углах подъёма, близких к горизонтали, когда люфт закрыт под действием активного момента силы тяжести. Кроме того, обеспечен переход электроприводов из режима распора в режим распределения нагрузки вблизи вертикального положения антенной установки при воздействии на неё ветровой нагрузки.

Литература

1. Полющеников И.С. Регулирование координат системы с двухдвигательным электромеханическим тorsiоном // Вестник МЭИ. 2018. № 2. С. 87—94.
2. Пат. № 2316886 РФ. Способ управления взаимосвязанными электроприводами (варианты) / С.В. Тарарыкин, В.А. Иванов, В.В. Тютиков, Е.В. Красильник-янц // Бюл. изобрет. 2008. № 4.
3. Иванов В.А. Разработка и исследование цифровой системы контурно-позиционного управления редукторными электроприводами многоцелевых металлорежущих станков: автореферат ... канд. техн. наук. Иваново: Ивановский гос. энергетический ун-т, 2008.
4. Гнездов Н.Е. Много связанный асинхронный электропривод с векторным управлением и нежёсткой механикой: автореферат ... канд. техн. наук. Иваново: Ивановский гос. энергетический ун-т, 2009.
5. Бронов С.А. и др. Система моделирования с переменной структурой для прецизионных динамических объектов // Журнал Сибирского федерального ун-та. Серия «Техника и технологии». 2014. № 7. С. 797—810.
6. Тушев С.А., Дроздов В.Н. Исследование возмущающих воздействий, приложенных к осям телескопа на качающемся основании // Вестник Ивановского гос. энергетического ун-та. 2014. № 3. С. 59—64.
7. Дроздов В.Н., Тушев С.А. Влияние морской качки на диапазон допустимых координат объекта наблюдения телескопа на палубе корабля // Вестник Ивановского гос. энергетического ун-та. 2013. № 4. С. 54—58.
8. Ловлин С.Ю., Арановский С.В., Смирнов Н.А., Цветкова М.А. Сравнение различных подходов к построению линейных систем управления прецизионными электроприводами // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2013. № 3. С. 31—38.
9. Тушев С.А. Исследование влияния морской качки на систему управления телескопа // Вестник Череповецкого гос. ун-та. 2015. № 4. С. 45—49.

References

1. Polyushchenkov I.S. Regulirovanie Koordinat Sistemy s Dvukhdvigatel'nyim Elektromekhanicheskim Torsiоnom. Vestnik MEI. 2018;2:87—94. (in Russian).
2. Pat № 2316886 RF. Sposob Upravleniya Vzaimosvyazannymi Elektroprivodami (Varianty) / S.V. Tararykin, V.A. Ivanov, V.V. Tyutikov, E.V. Krasil'nik'yants. Byul. izobret. 2008;4. (in Russian).
3. Ivanov V.A. Razrabotka i Issledovanie Tsifrovoy Sistemy Konturno-pozitsionnogo Upravleniya Reduktornymi Elektroprivodami Mnogotsel'evykh Metallorazhshchikh Stankov: Avtoreferat ... Kand. Tekhn. Nauk. Ivanovo: Ivanovskiy Gos. Energeticheskij Un-t, 2008. (in Russian).
4. Gnezdov N.E. Mnogosvyaznyy Asinkhronnyy Elektroprivod s Vektornym Upravleniem i Nezhestkoy Mekhanikoy: Avtoreferat ... Kand. Tekhn. Nauk. Ivanovo: Ivanovskiy Gos. Energeticheskij Un-t, 2009. (in Russian).
5. Bronov S.A. i dr. Sistema Modelirovaniya s Peremennoy Strukturoy dlya Pretsizionnykh Dinamicheskikh Ob'ektov. Zhurnal Sibirskogo Federal'nogo Un-ta. Seriya «Tekhnika i Tekhnologii». 2014;7:797—810. (in Russian).
6. Tushev S.A., Drozdov V.N. Issledovanie Vozmushchayushchikh Vozdeystviy, Prilozhennykh k Osyam Teleskopa na Kachayushchemsya Osnovanii. Vestnik Ivanovskogo Gos. Energeticheskogo Un-ta. 2014;3:59—64. (in Russian).
7. Drozdov V.N., Tushev S.A. Vliyanie Morskoy Kachki na Diapazon Dopustimyykh Koordinat Ob'ekta Nablyudeniya Teleskopa na Palube Korablya. Vestnik Ivanovskogo Gos. Energeticheskogo Un-ta. 2013;4:54—58. (in Russian).
8. Lovlin S.Yu., Aranovskiy S.V., Smirnov N.A., TSvetkova M.A. Sravnenie Razlichnykh Podkhodov k Postroeniyu Lineynykh Sistem Upravleniya Pretsizionnymi Elektroprivodami. Pribory i Sistemy. Upravlenie, Kontrol', Diagnostika. 2013;3:31—38. (in Russian).
9. Tushev S.A. Issledovanie Vliyaniya Morskoy Kachki na Sistemu Upravleniya Teleskopa. Vestnik Cherepovetskogo Gos. Un-ta. 2015;4:45—49. (in Russian).

10. **Варков А.А.** Разработка и исследование системы управления манипуляционным промышленным роботом на базе контроллера движения: автореферат ... канд. техн. наук. Иваново: Ивановский гос. энергетический ун-т, 2015.

11. **Методы** классической и современной теории автоматического управления / под ред. Н.Д. Егупова. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2000. Т. 2.

12. **Ротач В.Я.** Теория автоматического управления. М.: Издат. дом МЭИ, 2008.

13. **Терехов В.М., Осипов О.И.** Системы управления электроприводов. М.: Академия, 2005.

14. **Черных И.В.** Моделирование электротехнических устройств в Matlab, Sim Power Systems и Simulink. СПб.: Питер, 2008.

15. **Дьяконов В.П.** Matlab 6/6.1/6.5 + Simulink 4/5 в математике и моделировании. М.: СОЛОН-Пресс, 2008.

16. **Полющенко И.С.** Разработка системы управления электропривода на основе метода модельно-ориентированного программирования // Вестник МЭИ. 2016. № 6. С. 87—95.

17. **Полющенко И.С.** Разработка программного обеспечения для управления электроприводом в технологической системе с применением метода модельно-ориентированного программирования // Вестник МЭИ. 2017. № 4. С. 83—91.

18. **Model-Based Design** [Официальный сайт] www.mathworks.com (дата обращения 05.03.2018).

19. **Waijung Blockset** [Официальный сайт] <http://waijung.aimagin.com>. (дата обращения 03.03.2018).

20. **Денисенко В.В.** Компьютерное управление технологическим процессом, экспериментом, оборудованием. М.: Горячая линия – Телеком, 2009.

10. **Varkov A.A.** Razrabotka i Issledovanie Sistemy Upravleniya Manipulyatsionnym Promyshlennym Robotom na Baze Kontrollera Dvizheniya: Avtoreferat ... Kand. Tekhn. Nauk. Ivanovo: Ivanovskiy Gos. Energeticheskiy Un-t, 2015. (in Russian).

11. **Metody** Klassicheskoy i sovremennoy Teorii Avtomaticheskogo Upravleniya / pod Red. N.D. Egupova. M.: Izd-vo MGTU im. N.E. Baumana, 2000;2. (in Russian).

12. **Rotach V.Ya.** Teoriya Avtomaticheskogo Upravleniya. M.: Izdat. Dom MEI, 2008. (in Russian).

13. **Terekhov V.M., Osipov O.I.** Sistemy Upravleniya Elektroprivodov. M.: Akademiya, 2005. (in Russian).

14. **Chernykh I.V.** Modelirovanie Elektrotekhnicheskikh Ustroystv v Matlab, Sim Power Systems i Simulink. SPb.: Piter, 2008. (in Russian).

15. **D'yakonov V.P.** Matlab 6/6.1/6.5 + Simulink 4/5 v Matematike i Modelirovanii. M.: SOLON-Press, 2008. (in Russian).

16. **Polyushchenkov I.S.** Razrabotka Sistemy Upravleniya Elektroprivoda na Osnove Metoda Model'no-orientirovannogo Programirovaniya. Vestnik MEI. 2016;6:87—95. (in Russian).

17. **Polyushchenkov I.S.** Razrabotka Programmogo Obespecheniya dlya Upravleniya Elektroprivodom v Tekhnologicheskoy Sisteme s Primeneniem Metoda Model'no-orientirovannogo Programirovaniya. Vestnik MEI. 2017;4:83—91. (in Russian).

18. **Model-Based Design** [Ofits. Sayt] www.mathworks.com (Data Obrashcheniya 05.03.2018).

19. **Waijung Blockset** [Ofits. Sayt] <http://waijung.aimagin.com>. (Data Obrashcheniya 03.03.2018).

20. **Denisenko V.V.** Komp'yuternoe Upravlenie Tekhnologicheskim Protssesom, Eksperimentom, Oborudovaniem. M.: Goryachaya Liniya – Telekom, 2009. (in Russian).

Сведения об авторе:

Полющенко Игорь Сергеевич — кандидат технических наук, доцент кафедры электромеханических систем Смоленского филиала НИУ «МЭИ», e-mail: polyushchenkov.igor@yandex.ru

Information about author:

Polyushchenkov Igor S. — Ph.D. (Techn.), Assistant Professor of Electromechanical Systems Dept., Branch of NRU MPEI in Smolensk, e-mail: polyushchenkov.igor@yandex.ru

Статья поступила в редакцию: 06.04.2018

The article received to the editor: 06.04.2018