

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ И РЕГУЛИРОВОЧНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МНОГОДВИГАТЕЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

*С. Г. Деев, ст. преп., Е. М. Потапенко, д.т.н., проф.
Запорожский национальный технический университет
ул. Жуковского, 64, 69063, г. Запорожье, Украина
sgd1968@mail.ru*

Рассматривается возможность энергосберегающего управления многодвигательными приводами переменного тока. Предлагаются алгоритмы, которые позволяют снизить энергопотребление электроприводов и расширить диапазон регулирования их скорости.

Ключевые слова: многодвигательный электропривод, алгоритм управления, энергосбережение.

Введение. Многодвигательные электроприводы применяются для обеспечения резервирования, повышения момента привода, повышения надежности работы технологического оборудования, а также из массогабаритных соображений. В настоящее время в качестве электродвигателей в электроприводах в большинстве случаев устанавливают двигатели переменного тока: синхронные и асинхронные с короткозамкнутым ротором. Примером многодвигательного привода является привод поворота ковша [1] с помощью нескольких двигателей. При увеличении количества двигателей в приводе возникают проблемы синхронизации их работы и обеспечения работоспособности привода при выходе из строя одного или нескольких двигателей.

Цель работы. Исследование энергетических и регулировочных характеристик многодвигательных электроприводов переменного тока и синтез алгоритмов управления многодвигательными приводами, обеспечивающими повышенную надёжность, экономичность и расширенный диапазон регулирования скорости, в том числе при ограничении напряжения источника питания.

Материал и результаты исследования. 1. Формирование электромагнитного момента.

Пусть решается задача, аналогичная той, которая была рассмотрена во введении, а именно: вращение тела с неизвестной массой, подверженного неизвестным внешним воздействиям. Вращение осуществляется с помощью k однотипных электродвигателей, имеющих различные неизвестные отклонения параметров от их номинальных значений. Моменты, создаваемые двигателями, передаются на объект управления (ОУ) через одинаковые редукторы с передаточным числом q . Уравнение вращения описанной системы имеет вид:

$$J \ddot{\vartheta} = q \sum_{i=1}^k m_i + m_l, \quad (1)$$

где J , ϑ – приведенный момент инерции и угол поворота системы, m_i – электромагнитный момент i -го двигателя, m_l – неизвестный момент нагрузки. Пусть J_0 , m_{i0} – номинальные известные значения, J_δ , $m_{i\delta}$ – отклонения от номинальных значений. С учетом принятых обозначений уравнение (1) примет вид:

$$J \ddot{\vartheta} = q \sum_{i=1}^k m_{i0} + f, \quad (2)$$

где неопределенность:

$$f = -J_\delta + q \sum_{i=1}^k m_{i\delta} + m_l. \quad (3)$$

Уравнение (2) представляет собой уравнение полностью детерминированного объекта с номинальными параметрами, подверженного действию суммарной неопределенности f . Из (2) следует:

$$f = J_0 \ddot{\vartheta} - q \sum_{i=1}^k m_{i0}.$$

Задача состоит в оценке неопределенности f , входящей в уравнение (2), и ее компенсации. Оценим неопределенность:

$$y_f = f = J_0 \ddot{\vartheta} - q \sum_{i=1}^k m_{i0}. \quad (4)$$

При достаточной гладкости f в масштабе времени быстройдействующего наблюдателя можно положить:

$$\dot{f} = 0.$$

В этом случае уравнение наблюдателя будет иметь вид:

$$\dot{\hat{f}} = L(\hat{f} - y_f) \quad (5)$$

или

$$\dot{\hat{f}} = L[\hat{f} - (J_0 \ddot{\vartheta} - q \sum_{i=1}^k m_{i0})]. \quad (6)$$

Введём обозначение:

$$z = \hat{f} - LJ_0 \ddot{\vartheta}, \quad (7)$$

откуда

$$\hat{f} = z - LJ_0 \ddot{\vartheta}. \quad (8)$$

Тогда уравнение (6) примет вид:

$$\dot{z} = L(\hat{f} + q \sum_{i=1}^k m_{i0}). \quad (9)$$

Сформируем закон управления в виде:

$$q \sum_{i=1}^k m_{i0} = m_{00} - \mathcal{F}. \quad (10)$$

Подстановка (13) в (2) даёт:

$$J_0 \ddot{\theta} = m_{00} - \mathcal{F} + f. \quad (11)$$

При достаточно точной оценке неопределенности вместо уравнения (11) можно рассматривать невозмущенное уравнение:

$$J_0 \ddot{\theta} = m_{00}. \quad (12)$$

Отслеживание заданной траектории уравнения (12) обеспечивается за счет закона управления:

$$m_{00} = J_0 \ddot{\theta} - k_1 (\dot{\theta} - \dot{\theta}_p) - k_2 (\theta - \theta_p), \quad (13)$$

где k_1, k_2 – коэффициенты управления, θ_p – программное движение ОУ.

Подстановка (13) в (12) приводит к уравнению

$$J_0 (\ddot{\theta} - \ddot{\theta}_p) + k_1 (\dot{\theta} - \dot{\theta}_p) + k_2 (\theta - \theta_p) = 0 \quad (14)$$

с характеристическим уравнением

$$J_0 p^2 + k_1 p + k_2 = 0. \quad (15)$$

Выбор коэффициентов осуществляется с помощью стандартных полиномов.

Таким образом, суммарный управляющий момент (13) известен. При равномерном распределении управляющего момента между k однотипными двигателями с идентичными редукторами требуемый электромагнитный момент каждого двигателя определяется выражением:

$$m_{0i} = (kq)^{-1} m_0. \quad (16)$$

2. Энергетические характеристики.

2.1. Асинхронный электропривод.

Уравнения электромагнитного момента i -го асинхронного двигателя в синхронном базисе (d_i, q_i) имеют вид:

$$m_i = nL_{mri} \psi_{di} i_{qi}, \quad (17)$$

$$T_{ri} \dot{\psi}_{di} + \psi_{di} = L_{mi} i_{di}. \quad (18)$$

В (17), (18) n – количество пар полюсов; $L_{mri} = L_{mi} L_{ri}^{-1}$; $T_{ri} = L_{ri} R_{ri}^{-1}$ – постоянная времени ротора; L_{mi} – взаимная индуктивность ротора и статора; L_{ri} – собственная индуктивность ротора; R_{ri} – сопротивление ротора; i_{di}, i_{qi} – проекции тока статора; ψ_{di} – проекция потокосцепления ротора. Подставив ψ_{di} из (18) в (17), получим:

$$m_i = nL_{mi} L_{ri}^{-1} (L_{mi} i_{di} - T_{ri} \dot{\psi}_{di}) i_{qi}. \quad (19)$$

Минимизация активной мощности одного i -того АД дает следующие выражения проекций токов в синхронном базисе (d, q) [2]:

$$i_{di} = \sqrt{\frac{R_{r0i} + R_{s0i}}{R_{s0i}}} \sqrt{\frac{|m_{0i}|}{nL_{m0i}}}, \quad (20)$$

$$i_{qi} = \sqrt{\frac{R_{s0i}}{R_{r0i} + R_{s0i}}} \sqrt{\frac{|m_{0i}|}{nL_{m0i}}} \text{sign } m_{0i}, \quad (21)$$

где R_{r0i}, R_{s0i} – номинальные сопротивления ротора и статора, m_0 – задание момента привода, L_{m0i} – номинальная взаимоиндукция ротора и статора.

Выражение минимизированной активной мощности одного АД имеет вид [2]:

$$P_{ai} = |m_{0i}| \left(\frac{2R_{s0i}}{nL_{m0i}} \sqrt{I + R_{r0i} R_{s0i}^{-1}} + \dot{\theta} m_{0i} \right), \quad (22)$$

где $\dot{\theta}$ – угловая скорость.

В зависимости от требований к приводу рассматриваются два случая.

В первом случае в многодвигательном приводе используются АД того же типа, что и в однодвигательном. Суммарная активная мощность k однотипных АД в многодвигательном приводе:

$$P_{ak} = \sum_{i=1}^k P_{ai} = |m_0| \left(\frac{2R_{s0i}}{nL_{m0i}} \sqrt{I + R_{r0i} R_{s0i}^{-1}} + \dot{\theta} m_0 \right); \quad (23)$$

$$m_0 = \sum_{i=1}^k m_{0i} = k m_{0i}. \quad (24)$$

Во втором случае рассматривается однодвигательный привод с двигателем того же типа, создающий электромагнитный момент m_0 . В этом случае активная мощность будет определяться выражением:

$$P_{a1} = |m_0| \left(\frac{2R_{s0i}}{nL_{m0i}} \sqrt{I + R_{r0i} R_{s0i}^{-1}} + \dot{\theta} m_0 \right). \quad (25)$$

Сравнение выражений (23) и (25) показывает, что в асинхронных электроприводах, состоящих, с одной стороны, из k двигателей, с другой стороны – из одного двигателя, при создании одного и того же электромагнитного момента потребляемые мощности одинаковые.

Пусть теперь с рассмотренным выше многодвигательным приводом сопоставляется однодвигательный привод с более мощным двигателем, создающий тот же электромагнитный момент m_0 . В этом случае потребляемая мощность в соответствии с (25) определяется выражением:

$$P_{a1} = |m_0| \left(\frac{2R_{s0}}{nL_{m0}} \sqrt{I + R_{r0} R_{s0}^{-1}} + \dot{\theta} m_0 \right). \quad (26)$$

При этом имеет место соотношение:

$$R_{r0i} R_{s0i}^{-1} \approx R_{r0} R_{s0}^{-1}. \quad (27)$$

Тогда на основании выражений (22), (26) и (27) можно записать:

$$P_{a1} - P_{ak} = |m_0| \left(\frac{2}{n} \sqrt{I + R_{r0} R_{s0}^{-1}} \right) \left(\frac{R_{s0}}{L_{m0}} - \frac{R_{s0i}}{L_{m0i}} \right). \quad (28)$$

С учётом того, что для асинхронных двигателей (например, серии 4А) соотношение $\frac{R_{s0}}{L_{m0}}$ растёт с увеличением мощности двигателя, используя вы-

ражение (28), имеется возможность выбрать оптимальный по энергопотреблению привод.

3. 1. Синхронный двигатель с постоянными магнитами. Рассматривается двигатель с поверхностной установкой магнитов (неявнополюсный).

Уравнения работы i -го двигателя представляются в базе (d_i, q_i) , связанном с ротором, где ось d_i совпадает с вектором магнитного потока магнитов ψ_{mi} , а ось q_i – перпендикулярна ему. Электромагнитный момент определяется выражением [3]:

$$m_i = n\psi_{mi}i_{qi}. \quad (29)$$

Активная мощность с учетом (32) определяется зависимостями:

$$P_{ai} = u_{di}i_{di} + u_{qi}i_{qi} = R_{si}(i_{di}^2 + i_{qi}^2) + \dot{\mathcal{G}}m_i.$$

Первое слагаемое представляет собой потери мощности на нагрев в меди, второе является механической мощностью. В установившемся режиме

$$P_{ai} = R_{si}(i_{di}^2 + i_{qi}^2) + \dot{\mathcal{G}}m_i. \quad (30)$$

Подстановка i_{qi} из (32) в (34) дает:

$$P_{ai} = R_{si}(i_{di}^2 + m_i^2(n\psi_{mi})^{-2}) + \dot{\mathcal{G}}m_i. \quad (31)$$

Из выражения (31) очевидно, что для уменьшения потерь мощности надо уменьшать i_{di}^2 . Пренебрегая этим слагаемым, пропорциональным i_{di}^2 , а также полагая, что для управления используются k однотипных двигателей, получим:

$$P_{ak} = \sum_{i=1}^k P_{ai} = R_{si}(n\psi_{mi})^{-2} \sum_{i=1}^k m_i^2 + \dot{\mathcal{G}}m = R_{si}(n\psi_{mi})^{-2} k \left(\frac{m}{k}\right)^2 + \dot{\mathcal{G}}m = R_{si}(n\psi_{mi})^{-2} \frac{m^2}{k} + \dot{\mathcal{G}}m. \quad (32)$$

Активная мощность одного двигателя того же типа, создающего тот же самый электромагнитный момент:

$$P_{a1} = R_{si}(n\psi_{mi})^{-2} m^2 + \dot{\mathcal{G}}m. \quad (33)$$

Сравнение выражений (32) и (33) показывает, что при управлении с помощью k однотипных двигателей потери в меди в k раз меньше, чем при управлении одним двигателем.

Суммарная активная мощность k однотипных СД в многодвигательном приводе имеет вид:

$$P_{ak} = \sum_{i=1}^k P_{ai} = R_{s0i}(n\psi_{mi})^{-2} \sum_{i=1}^k m_i^2 + \dot{\mathcal{G}}m,$$

откуда

$$P_{ak} = R_{s0i}(n\psi_{mi})^{-2} \frac{m^2}{k} + \dot{\mathcal{G}}m. \quad (34)$$

Активная мощность одного СД того же типа, создающего тот же самый электромагнитный момент [3]:

$$P_{a1} = R_{s0i}(n\psi_{mi})^{-2} m^2 + \dot{\mathcal{G}}m. \quad (35)$$

Сравнение выражений (34) и (35) показывает, что при управлении с помощью k однотипных СД потери в меди в k раз меньше, чем при управлении одним двигателем.

3. Сравнение возможностей регулирования скорости выше номинальной у однодвигательных и многодвигательных приводов.

При работе двигателей АД и СД прикладываемое напряжение частично компенсируется за счёт противоЭДС. При скоростях выше номинальной степень компенсации увеличивается, вследствие чего уменьшается максимально возможный электромагнитный момент, величина которого определяет рабочий диапазон скоростей.

Поскольку в многодвигательном приводе для создания одного и того же суммарного момента по сравнению с однодвигательным приводом требуется меньший электромагнитный момент, то очевидно, что многодвигательный привод будет иметь больший диапазон регулирования скорости.

Например, максимальный момент АД определяется выражением [4]:

$$M_{\max} = \frac{\pm m_l U_l^2}{\frac{1}{p}(4\pi f_l(\pm R_l + \sqrt{R_l^2 + (X_l + X_2')^2})}. \quad (36)$$

Пренебрегая значением R_l , можем записать:

$$M_{\max} \approx \frac{\pm m_l U_l^2}{4\pi f_l(X_l + X_2')} = \frac{\pm m_l U_l^2}{(8f_l^2(L_l + L_2'))} = \pm \frac{CU_l^2}{f_l^2}, \quad (37)$$

где C – постоянная, X_l – индуктивное сопротивление статора, X_2' – приведенное к статору индуктивное сопротивление ротора, f_l – частота.

Анализ данного выражения показывает, что при фиксированном значении напряжения значение суммарного момента будет пропорционально количеству двигателей. При фиксированном значении напряжения двухдвигательный привод может создавать момент в $\sqrt{2}$ раза больше, чем однодвигательный.

Напряжение статора СД при отсутствии магнитного насыщения описывается уравнениями:

$$u_{di} = R_{si}i_{di} + L_{si} \frac{d}{dt} i_{di} - \dot{\mathcal{G}}nL_{si}i_{di}; \quad (38)$$

$$u_{qi} = R_{si}i_{qi} + L_{si} \frac{d}{dt} i_{qi} - \dot{\mathcal{G}}nL_{si}i_{qi} + \dot{\mathcal{G}}n\psi_{mi}. \quad (39)$$

Квадрат модуля напряжения:

$$|u_i|^2 = u_{di}^2 + u_{qi}^2 = (R_{si}i_{di} + L_{di} \frac{d}{dt} i_{di} - \dot{\mathcal{G}}nL_{qi}i_{qi})^2 + (R_{si}i_{qi} + L_{qi} \frac{d}{dt} i_{qi} - \dot{\mathcal{G}}nL_{di}i_{di} + \dot{\mathcal{G}}n\psi_{mi})^2. \quad (40)$$

Модуль вектора напряжения не должен превышать модуля максимального выходного напряжения преобразователя частоты с ШИМ, то есть

$$|u_{PVMI}| > |u_i|.$$

Рассмотрим неявнополюсный синхронный привод ($i_{di} \equiv 0$), для которого электромагнитный момент определяется выражением (29). Подставим в

уравнение (40) в установившемся режиме i_{qi} из (24) и $i_{di} \equiv 0$. Получим:

$$|u_{PVM}|^2 = (\dot{\vartheta}_i nL_{qi} m(n\psi_{mi})^{-1})^2 + (R_{si} m(n\psi_{mi})^{-1} + \dot{\vartheta}_i n\psi_{mi})^2. \quad (41)$$

где m – требуемый электромагнитный момент привода. Из уравнения (32) легко найти верхнюю границу диапазона регулирования скорости $\dot{\vartheta}_i$ однодвигательного привода. В случае привода, состоящего из k двигателей, будем иметь:

$$|u_{PVM}|^2 = (\dot{\vartheta}_k nL_{qi} m(kn\psi_{mi})^{-1})^2 + (R_{si} m(kn\psi_{mi})^{-1} + \dot{\vartheta}_k n\psi_{mi})^2. \quad (42)$$

Сравнение полученных выражений позволяет записать $\dot{\vartheta}_k > \dot{\vartheta}_i$. Это соотношение подтверждает, что при решении одной и той же задачи и использовании однотипных двигателей диапазон регулирования многодвигательного привода больше диапазона регулирования однодвигательного привода в соотношении, определяемом последними выражениями.

5. Моделирование разработанных алгоритмов.

На рис. 1 приведена структурная схема математической модели двухдвигательного электропривода на основе АД. Формирователь момента, обеспечивающий робастное комбинированное управление с наблюдателем неопределённости, выполнен по уравнениям (1)–(16), упрощённые контуры регулирования токов и моментов двигателей, обеспечивающие векторное управление электроприводом, полученные с применением методов робастного комбинированного управления, взяты из работы [5].

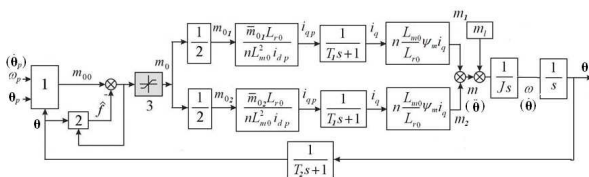


Рисунок 1 – Структурная схема математической модели двухдвигательного электропривода

Структурная схема линейризованной системы ВУ с двухдвигательным приводом состоит из формирователя момента, двух параллельных ветвей электромагнитной части асинхронных двигателей [2] и общей для обоих двигателей механической части системы.

На рис. 1 (1) – формирователь момента; (2) – наблюдатель неопределённости. Блок 3 учитывает ограничение тока в исходной системе. Звено в обратной связи с постоянной времени T_2 учитывает

запаздывание, вносимое наблюдателем в исходной нелинейной системе. Линеаризация исходной нелинейной неопределённой системы ранее осуществлена за счет применения робастных методов управления, компенсирующих неопределённости [5]. Поэтому все параметры схемы, за исключением нагрузки, достоверно известны и задаются заранее.

Для анализа возможностей применения предложенных алгоритмов управления моделировалась следующая циклограмма работы привода: пуск привода с двумя двигателями, на третьей секунде отключение одного из двигателей и дальнейшая остановка электропривода с одним работающим двигателем.

На рис. 2 показан переходный процесс по скорости в двухдвигательном приводе с нагрузкой 130 Нм при выходе из строя двигателя 1 на третьей секунде. На рис. 3 показаны электромагнитные моменты двигателей 1 и 2. Как видно из рис. 2, выход из строя одного из двух двигателей приводит лишь к кратковременному незначительному нарушению скорости привода. На рис. 3 видно, что исчезновение момента m_1 компенсируется увеличением момента двигателя 2.

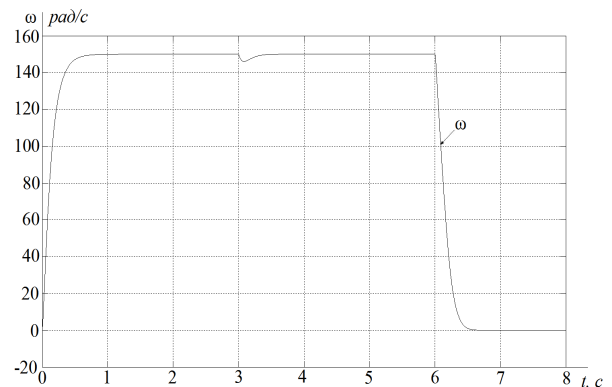


Рисунок 2 – Изменение угловой скорости двухдвигательного электропривода с АД при пуске, торможении и отключении одного двигателя

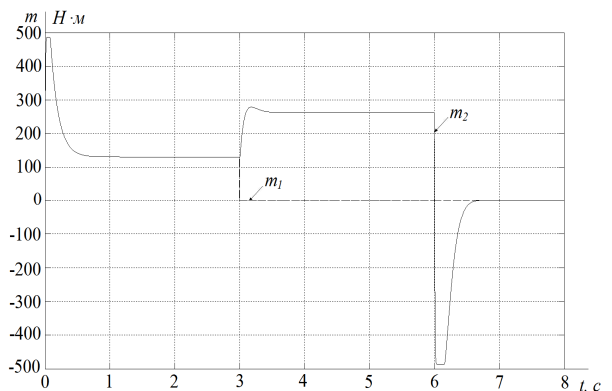


Рисунок 3 – Изменение управляющих моментов в двухдвигательном электроприводе с АД при пуске, торможении и отключении одного двигателя

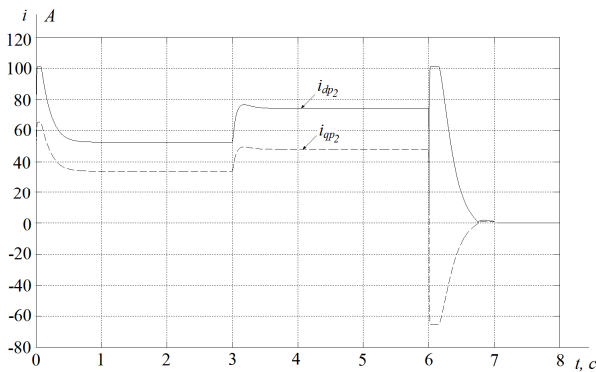


Рисунок 4 – Изменения намагничивающего и моментного токов второго двигателя двухдвигательного электропривода с АД

На рис. 4 показаны изменения намагничивающего и моментного токов второго двигателя.

Как видно из рис. 2 и 3, во всех режимах работы: разгоне, отключении одного двигателя под нагрузкой и в останове привода при работе с одним двигателем – предлагаемая система векторного управления обеспечивает хорошие показатели качества регулирования, в частности, система компенсирует выход из строя одного из двигателей. Как следует из рис. 2, выход из работы одного из двигателей только кратковременно нарушают стабилизацию заданной скорости и далее она восстанавливается после незначительного провала.

Выводы. Применение многодвигательных приводов переменного тока позволяет, при использовании для расчёта соотношений (28), (32)–(35), (41) и (42), снизить энергопотребление и расширить диапазон регулирования электроприводов на основе АД и СД. Полученные соотношения позволяют проектировать многодвигательные и однодвигательные электроприводы с улучшенными энергетическими, динамическими характеристиками и повышенной степенью надёжности.

ЕНЕРГЕТИЧНІ І РЕГУЛЮВАЛЬНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ БАГАТОДВИГУНЕВИХ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ ЗМІННОГО СТРУМУ

*С. Г. Деев, ст. викл., Є. М. Потапенко, д.т.н., проф.
Запорізький національний технічний університет
вул. Жуковського, 64, 69063, м. Запоріжжя, Україна
sgd1968@mail.ru*

Розглядається можливість енергозберігаючого керування багатодвигуневими приводами змінного струму. Пропонуються алгоритми, які дозволяють знизити енергоспоживання електроприводів і розширити діапазон регулювання їх швидкості.

Ключові слова: багатодвигуневий електропривод, алгоритм керування, енергозбереження.

ENERGY AND ADJUSTING CHARACTERISTICS OF MULTI-MOTOR AC DRIVE

*S. Deev, Sen. Lect., E. Potapenko, D.Sc. (Eng), Prof.
Zaporizhzhya National Technical University
vul. Zhukovskoho, 64, 69063, Zaporizhzhya, Ukraine
sgd1968@mail.ru*

It's consider the possibility of power-saving control of multi-motor AC drives. It's proposed algorithms that reduce the power consumption of the electric drives and expand the range control of speed.

Key words: multi-motor electric drive, control algorithm, power saving.

Энергосбережение в многодвигательных приводах достигается за счёт снижения потерь в меди по сравнению с однодвигательными одинаковой мощности, а также снижение потерь в приводе за счёт формирования оптимальных значений намагничивающей и моментной составляющей тока статора АД и моментной составляющей СД.

Многодвигательный привод в сочетании с робастным комбинированным управлением с наблюдателем неопределённости обладает способностью без специальных алгоритмов автоматически компенсировать выход из строя одного или нескольких двигателей без определения неисправностей.

ЛИТЕРАТУРА.

1. Лимонов Л.Г. Автоматизированный электропривод промышленных механизмов. – Х.: Изд-во ФОРТ, 2009. – 272 с.
2. Потапенко Е.М., Потапенко Е.Е. Робастные алгоритмы векторного управления асинхронным приводом. – Запорожье: ЗНТУ. – 2009. – 352 с. (Монография).
3. Vas P. Sensorless and direct torque control. – Oxford, New York, Tokyo: Oxford University Press, 1998 – 728 p.
4. Электрические машины и микромашины // Д.Э. Брускин, А.Е. Зорохович, В.С. Хвостов. – М.: Высшая школа, 1990. – 528 с.
5. Линейная динамическая модель асинхронного двигателя с векторным управлением / Е.М. Потапенко, С.Г. Деев, Е.В. Душинова, А.Е. Казурова // Электротехника и энергетика. – 2010. – № 6. – С. 2–36.

Стаття надійшла 30.06.2011 р.
Рекомендовано до друку к.т.н., доц.
Каліновим А.П.