

Стельмашук С. В., Лакеев Ю. И.
S. V. Stelmashchuk, Yu. I. Lakeev

**СИСТЕМА ПОДЧИНЁННОГО УПРАВЛЕНИЯ СКАЛЯРНЫМ
ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМЫМ МНОГОДВИГАТЕЛЬНЫМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ
С НЕЗАВИСИМЫМ СОЕДИНЕНИЕМ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ**

**SUBORDINATE CONTROL SYSTEM OF A SCALAR FREQUENCY-CONTROLLED
MULTI-MOTOR ELECTRIC DRIVE WITH A SEPARATE CONNECTION
OF ASYNCHRONOUS MOTORS**

Стельмашук Сергей Валерьевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: rukdpsv@rambler.ru.

Sergei V. Stelmashchuk – PhD in Engineering, Associate Professor, Electric Drive and Automation of Industrial Installations Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: rukdpsv@rambler.ru.

Лакеев Илья Юрьевич – бакалавр Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: ilya_12__04@mail.ru.

Илья Ю. Lakeev – Bachelor's Degree Student, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: ilya_12__04@mail.ru.

Аннотация. В статье рассмотрена одноконтурная система подчинённого управления многодвигательным электроприводом, объект управления которого представляет собой независимое соединение частотно-регулируемых асинхронных двигателей со скалярным управлением. Осуществляется регулирование скорости рабочего органа без ограничения тока двигателей с общим регулятором скорости для всех двигателей. Задача равномерного распределения нагрузки между двигателями осуществляется с помощью частотной коррекции, которая не учитывается при стандартной настройке системы подчинённого управления. Система управления скоростью и система распределения нагрузки, реализуемой частотной коррекцией, разрабатываются независимо друг от друга, т. е. настройка многодвигательного электропривода как объект управления является независимой от частотной коррекции. В статье рассмотрена стандартная настройка как на модульный, так и на симметричный оптимум с учётом того, что многодвигательный электропривод как объект управления имеет различные значения жёсткости и электромагнитной постоянной времени.

Summary. The paper considers a single-circuit system of subordinate control of a multi-motor electric drive, the control object of which is an independent connection of frequency-controlled asynchronous motors with scalar control. The speed of the working body is regulated without limiting the current of the motors with a common speed controller for all motors. The task of evenly distributing the load between the engines is carried out using frequency correction, which is not taken into account in the standard configuration of the subordinate control system. The speed control system and the load distribution system implemented by frequency correction are developed independently of each other, i.e. the setting of a multi-motor electric drive as a control object is independent of frequency correction. The paper considers the standard settings for both modular and symmetrical optimum, taking into account the fact that a multi-motor electric drive as a control object has different values of stiffness and electromagnetic time constant.

Ключевые слова: стандартная настройка, частотная коррекция, общий механический вал, контур скорости.

Key words: standard tuning, frequency correction, common mechanical shaft, speed contour.

УДК 62-882:621.3.078:621.316.728

Введение. Среди общепромышленных механизмов существуют случаи, когда необходимо вращать рабочий орган несколькими двигателями. Это связано с конструктивными особенностями некоторых механизмов, где требуется равномерное пространственное распределение мощностей

привода. В таких случаях используются многодвигательные электроприводы (МЭП), где валы двух или нескольких двигателей механически жёстко связаны с общим валом рабочего органа.

Основной задачей в управлении двигателями в МЭП является равномерное распределение нагрузки на валу рабочего органа между валами двигателей. В силу различий активного и индуктивного сопротивлений статора и ротора, механические характеристики асинхронных двигателей будут иметь различные жёсткости, и, как следствие, это приведёт к распределению суммарного момента нагрузки на различные значения нагрузок на валах двигателей. Одни двигатели будут недогружены, другие перегружены. Перегруженные двигатели выйдут из строя раньше срока эксплуатации, что ведёт к ухудшению амортизации оборудования. Поэтому равномерное распределение нагрузки является актуальной задачей.

Разработке различных способов выравнивания нагрузки посвящено много работ. Одним из способов является выравнивание нагрузки через выравнивание токов статора [1; 2]. Для этого используют скалярное управление частотным приводом, где каждый двигатель питается собственным преобразователем частоты. Система управления МЭП реализуется в виде системы подчинённого двухконтурного управления, где каждый двигатель имеет свой собственный внутренний контур тока статора, а также имеется общий на весь привод контур скорости. Идея заключается в том, что ток статора пропорционален выходной мощности двигателя. С другой стороны, выходная мощность – это момент двигателя, умноженный на скорость, а скорость у всех механически жёстко связанных двигателей одинакова. Таким образом, регулируя ток статора, регулируем мощность, а следовательно, и момент двигателя. Предполагается, что контуры тока статора, имеющие одинаковую стандартную настройку, должны одинаково регулировать моменты двигателей от одного сигнала с общего регулятора скорости. Однако практика показала, что выравнивание моментов осуществляется только в статике, но не в динамике [3].

Ещё одним способом выравнивания нагрузки является использование схемы «ведущий-ведомый» [3; 4]. Здесь предлагается использовать векторный частотный привод с прямым управлением момента. На вход каждого частотного привода подаётся сигнал задания момента с выхода общего регулятора скорости, который измеряется на ведущем приводе. Также предлагается вариант по системе «ведущий-ведомый», где каждый привод имеет свой контур регулирования момента и скорости. Выравнивание нагрузок между приводами осуществляется через управление соотношением моментов, которое выполняется на уровне регулируемого ограничения момента ведомых приводов, по величине момента ведущего привода [5]. Здесь также предлагается использовать векторное управление частотными приводами.

Безусловно, частотные привода с векторным управлением однозначно решают задачу равномерного распределения нагрузки. Но преобразователи частоты с векторным управлением являются дорогостоящими. Учитывая, что МЭП может содержать большое количество двигателей и для каждого двигателя необходим дорогостоящий преобразователь, можем сделать вывод, что подобный МЭП имеет недостаток, обусловленный высокой стоимостью электрооборудования.

Постановка проблемы. Все рассматриваемые выше способы можно охарактеризовать одним подходом – это непосредственное, прямое или косвенное (через ток статора) влияние на момент каждого двигателя в МЭП. Для этого обязательно наличие контура момента или тока статора. Устройство измерения момента двигателя является технологически сложным, а следовательно, дорогостоящим.

Выравнивание нагрузок между частотно-регулируемыми асинхронными двигателями с независимым соединением к общему механическому валу прежде всего это параллельное смещение механических характеристик двигателей таким образом, чтобы они пересекались на среднем значении моментов нагрузки двигателей при заданной скорости. Для параллельного смещения механических характеристик необходимо регулировать синхронные скорости частотных приводов.

В статье предлагается использовать частотные преобразователи со скалярным управлением и одноконтурную систему регулирования скорости с общим регулятором скорости со стандартной настройкой. Скалярное управление позволяет реализовать общий выпрямитель на суммарную мощность МЭП и для каждого двигателя отдельный инвертор, с помощью которого определяется

частота статора и, следовательно, синхронная скорость двигателя ω_{0i} (см. рис. 1). Данная техническая реализация значительно снижает стоимость электрооборудования.

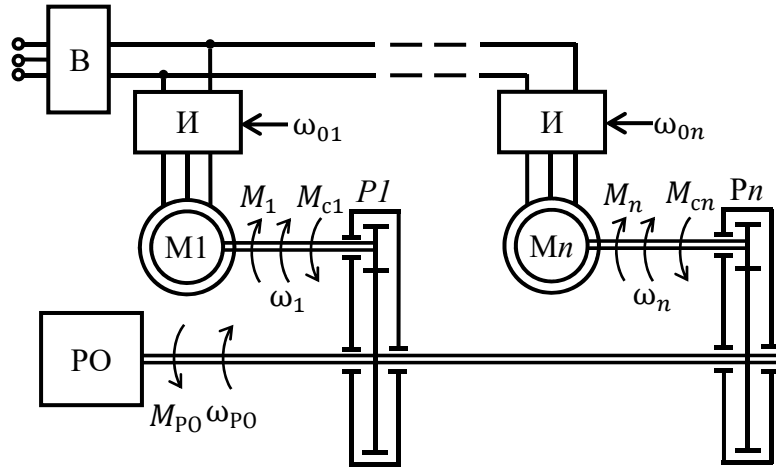


Рис. 1. Частотный многодвигательный электропривод со скалярным управлением

Формирование для каждого двигателя отдельной синхронной скорости ω_{0i} осуществляется с помощью частотной коррекции, где параллельное смещение механической характеристики двигателя осуществляется небольшим изменением заданной синхронной скорости МЭП ω_0 на некоторую величину $\Delta\omega_i$. Условием частотной коррекции является не только равномерное распределение нагрузки, но и независимость настройки МЭП как объекта управления от частотной коррекции, т. е. реакция объекта управления с коррекцией на управляющее воздействие должна быть той же, что и объекта управления без коррекции. Это позволяет использовать те же формулы стандартной настройки регуляторов, что и для индивидуального частотного электропривода со скалярным управлением.

Подход, основанный на частотной коррекции, можно реализовать в соответствии с принципом «ведущий-ведомый», где на ведущий привод задаётся основная синхронная частота $\omega_{01} = \omega_0$, а для остальных осуществляется подкоррекция $\omega_{0i} < \omega_0$ [6]. Но в этом случае жёсткость механической характеристики МЭП обуславливается только жёсткостью ведущего двигателя. В рамках данной статьи осуществляется равноправная коррекция всех двигателей, и жёсткость МЭП является суммирующей характеристикой всех двигателей.

Структурная схема объекта управления. За основу выбрана структурная схема одиночного асинхронного двигателя с частотным преобразователем со скалярным управлением [7; 8]. Так как двигатели жёстко связаны с валом рабочего органа, то механическая часть в структурной схеме МЭП является общей и в операторном виде описывается уравнением

$$J_{\Sigma} p \omega = M - M_c, \tag{1}$$

где $\omega = \omega_i = i_p \omega_{PO}$ – скорость одного из двигателей (они все равны); $M_c = M_{PO}/i_p = \sum M_{ci}$ – нагрузка на валу рабочего органа, приведённая к валам двигателей (суммарная нагрузка на всех валах двигателей M_{ci}), здесь i_p – передаточное число редуктора (у всех двигателей также равны); ω_{PO} – скорость вала рабочего органа; M_{PO} – нагрузка на валу рабочего органа; $M = \sum M_i$ – суммарный электромагнитный момент на всех валах двигателей M_i ; $J_{\Sigma} = \delta_p n J_d + J_{PO}/i_p^2$ – суммарный момент инерции МЭП, здесь δ_p – коэффициент, учитывающий момент инерции редуктора; J_d, J_{PO} – моменты инерции двигателя и рабочего органа соответственно; $i = 1 \dots n$; n – количество двигателей в МЭП.

У каждого двигателя своя электрическая часть на структурной схеме МЭП как объекта управления, каждая из которых описывается операторным уравнением:

$$M_i = \frac{\beta_i}{T_{\varepsilon i} p + 1} (\omega_{0i} - \omega), \quad (2)$$

где $T_{\varepsilon i}$, β_i , ω_{0i} – соответственно электромагнитная постоянная времени, модуль жёсткости линеаризованной механической характеристики и синхронная скорость i -го асинхронного электродвигателя.

С учётом уравнений (1) и (2) структурная схема частотного МЭП со скалярным управлением представлена на рис. 2.

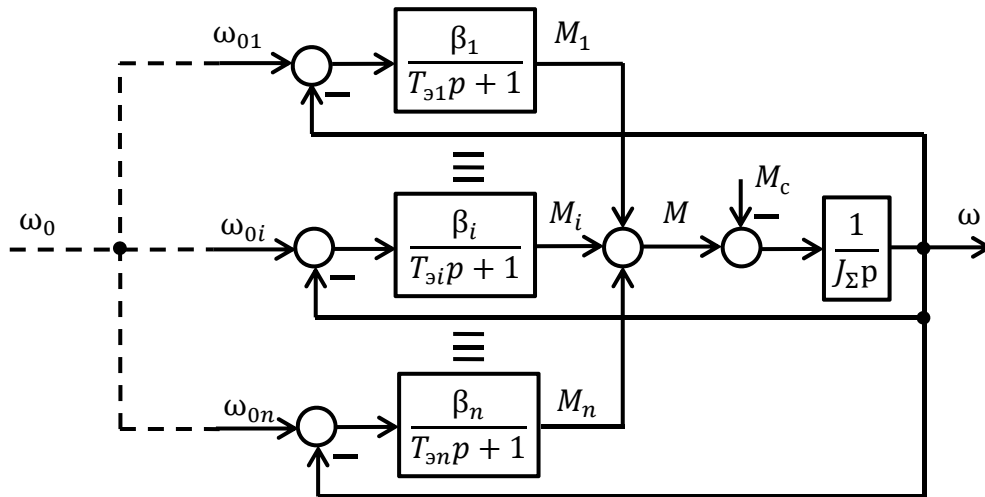


Рис. 2. Структурная схема частотного МЭП с независимым соединением асинхронных двигателей как объекта управления

Частотная коррекция. Для решения задачи равномерного распределения нагрузки на двигателях используем частотную коррекцию для каждого двигателя:

$$\omega_{0i} = \omega_0 - \Delta\omega_i, \quad (3)$$

где ω_0 – управляющее воздействие объекта управления.

Для выполнения условия равномерного распределения нагрузки приравняем механическую характеристику для i -го двигателя с равномерно распределённой нагрузкой и механической характеристикой МЭП:

$$\omega = \omega_{0i} - \frac{M}{n\beta_i}; \quad \omega = \omega_0 - \frac{M}{\beta},$$

где $\beta = \sum \beta_i$ – жёсткость линеаризованной механической характеристики МЭП.

Из первого уравнения выразим синхронную скорость двигателя ω_{0i} , а из второго – суммарный электромагнитный момент M , который подставим в первое уравнение:

$$\omega_{0i} = \omega + \frac{\beta}{n\beta_i} (\omega_0 - \omega).$$

Приведя подобные, приравняем к выражению (3) для удовлетворения условия независимости настройки объекта управления от частотной коррекции:

$$\frac{\beta}{n\beta_i} \omega_0 - \left(\frac{\beta}{n\beta_i} - 1 \right) \omega = \omega_0 - \Delta\omega_i. \quad (4)$$

Выразим из (4) величину частотной коррекции:

$$\Delta\omega_i = \alpha_i (\omega_0 - \omega),$$

где α_i – коэффициент частотной коррекции,

$$\alpha_i = 1 - \frac{\beta}{n\beta_i}.$$

На рис. 3 представлена структурная схема двигателя МЭП с частотной коррекцией.

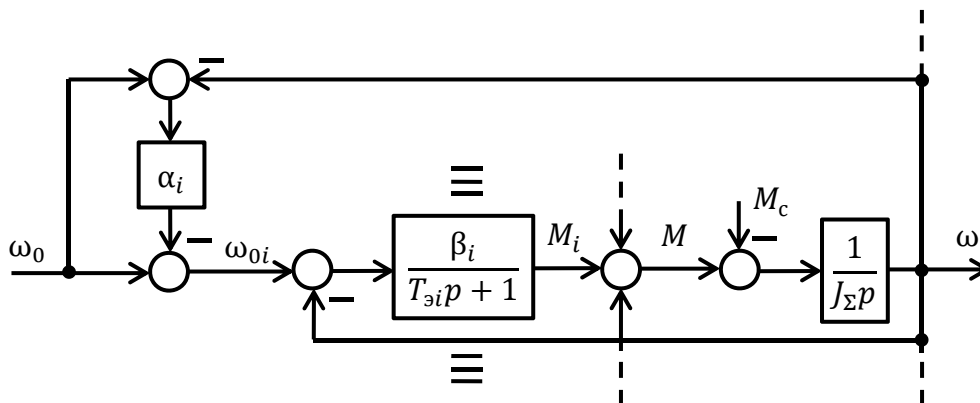


Рис. 3. Структурная схема асинхронного электродвигателя с частотной коррекцией

Стандартная настройка объекта управления. Независимость настройки объекта управления от частотной коррекции позволяет не учитывать звенья с коэффициентами α_i при определении общей передаточной функции объекта управления. Следовательно, можно принять, что $\omega_{0i} = \omega_0$ для $i = 1 \dots n$. Тогда для определения общей передаточной функции объекта управления из (1) можно представить скорость как

$$J_{\Sigma} p \omega = \sum M_i - M_c.$$

Учитывая (2) и $\omega_{0i} = \omega_0$ получим

$$J_{\Sigma} p \omega = (\omega_0 - \omega) \sum \frac{\beta_i}{T_{эi} p + 1} - M_c. \quad (5)$$

Если частоты сопряжения $1/T_{эi}$ располагаются в частотной области в пределах полдекады, то можно принять что

$$\sum \frac{\beta_i}{T_{эi} p + 1} \approx \frac{\beta}{T_{э} p + 1}, \quad (6)$$

где $T_{э} = \sum T_{эi} / n$ – электромагнитная постоянная времени МЭП.

Тогда по выражению (5) с учётом (6) можно составить структурную схему частотного МЭП (см. рис. 2). Без учёта частотной коррекции обобщённая структурная схема системы автоматического регулирования (САР) скорости системы ЧП-АД будет представлять собой систему в классическом виде (см. рис. 4).

Обобщённая структурная схема МЭП в классическом виде позволяет осуществлять стандартную настройку частотного МЭП по известным формулам [9; 10] без учёта частотной коррекции:

- для настройки на модульный оптимум

$$W_{PC}(p) = K_{PC};$$

- для настройки на симметричный оптимум

$$W_{PC}(p) = K_{PC} \frac{T_{PC}p + 1}{T_{PC}p},$$

где K_{PC} , T_{PC} – коэффициент усиления и постоянная времени регулятора скорости,

$$K_{PC} = \frac{T_M}{2T_\mu K_\Pi K_{DC}}, \quad T_{PC} = 4T_\mu, \quad (7)$$

здесь $T_\mu = T_\Pi + T_\Sigma$ – малая некомпенсированная постоянная времени; $T_M = J_\Sigma/\beta$ – электромеханическая постоянная времени; $K_\Pi = \omega_{0H}/u_{max}$, T_Π – коэффициент пропорциональности и постоянная времени частотного преобразователя; $K_{DC} = u_{max}/\omega_{0H}$ – коэффициент пропорциональности датчика скорости; u_{max} – максимальное значение сигнала управления; ω_{0H} – номинальная синхронная скорость.

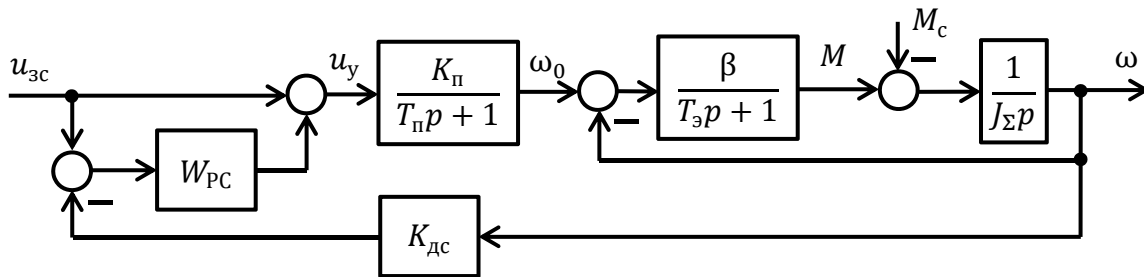


Рис. 4. Структурная схема САР скорости частотного МЭП с независимым соединением асинхронных двигателей в упрощённом виде

Математическое моделирование МЭП. Так как коэффициенты пропорциональности преобразователя и датчика скорости обратно пропорциональны $u_{max}/\omega_{0H} = K_{DC} = 1/K_\Pi$ и можно принять $T_\Pi \approx 0$, то можно допустить, что $(T_\Pi p + 1)/K_\Pi \approx K_{DC}$. Тогда узел частотной коррекции для i -го частотного привода представлен на рис. 5.

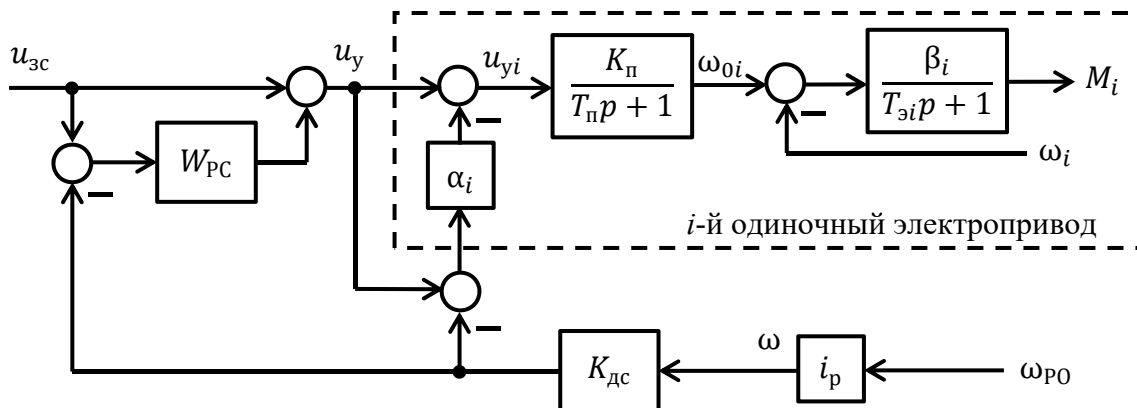


Рис. 5. Структурная схема частотной коррекции i -го одиночного электропривода в МЭП с учётом преобразователя частоты

Для примера выбран асинхронный двигатель серии МТМ мощностью 50 кВт. Имитационная модель МЭП из трёх двигателей представлена на рис. 6. Предполагается, что в двигателях с небольшим отклонением отличаются активные сопротивления роторов R'_{2i} . Это означает, что у двигателей будут различные критические скольжения $s_{ki} = R'_{2i}/\sqrt{R_1^2 + X_k^2}$, а следовательно, и раз-

личные жёсткости $\beta_i = 2M_k / (\omega_{0H} s_{ki})$ и электромагнитные постоянные времени $T_{\varepsilon i} = 1 / (2\pi f_{1H} s_{ki})$, где M_k – критический момент, который не зависит от R_{2i}' и поэтому у всех двигателей одинаковый; f_{1H} – номинальная частота статора; R_1 – активное сопротивление статора; X_k – индуктивное сопротивление короткого замыкания.

Момент инерции механизма подобран таким образом, чтобы $T_M > 4T_3$. После вычисления параметров двигателей (на модели b1, b2, b3 – жёсткости, $Te1, Te2, Te3$ – электромагнитные постоянные времени, Kp, Tp – параметры частотного преобразователя, J – суммарный момент инерции), вычисляются коэффициенты частотной коррекции (на модели a1, a2, a3), коэффициент датчика скорости (на модели Kds) и параметры регулятора скорости (на модели Krs и Trs), рассчитанные по формулам (7).

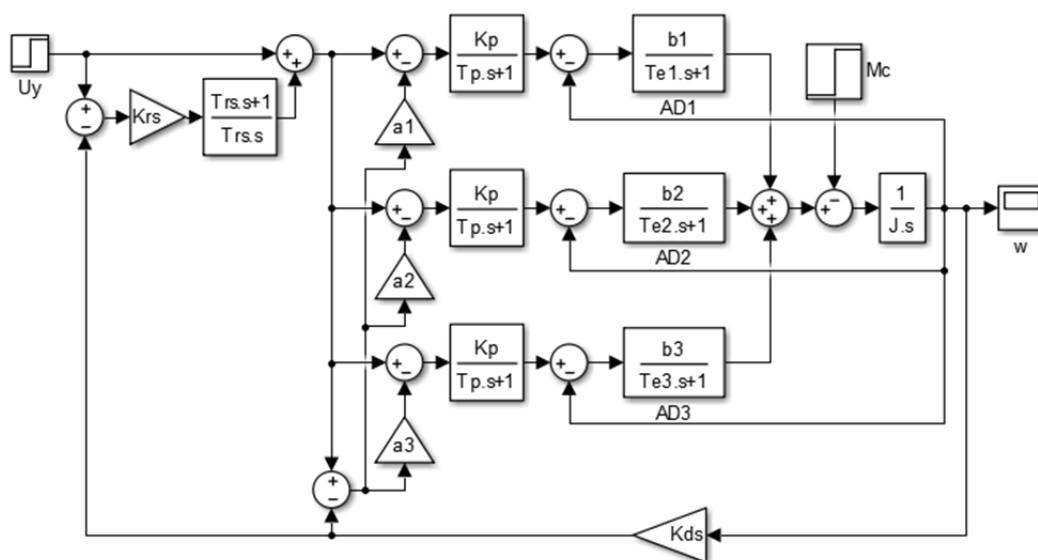


Рис. 6. Имитационная модель МЭП из трёх двигателей серии МТМ

На рис. 7 приведены результаты моделирования, характеризующие изменение скорости САР МЭП, соответствующие малой постоянной времени $T_\mu = 0,0166$ с. Видно, что переходные процессы соответствуют требованиям стандартных настроек.

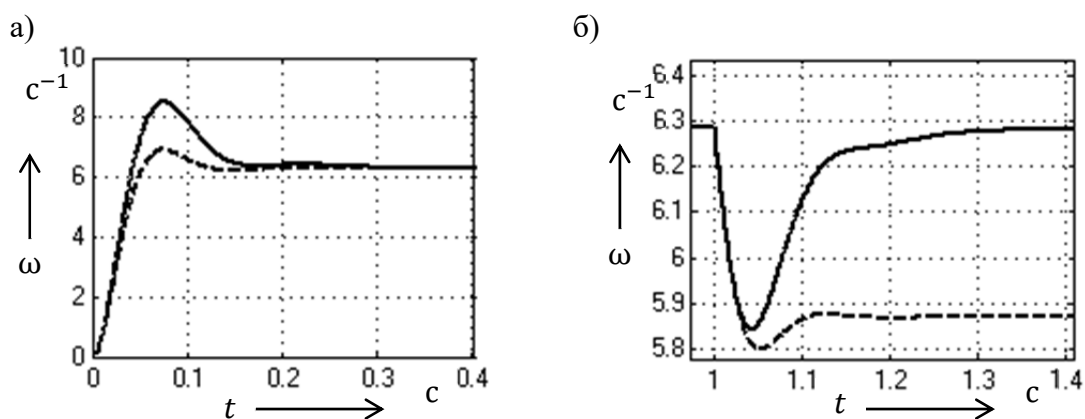


Рис. 7. Результаты моделирования изменения скорости имитационной модели САР МЭП, настроенной на модульный (пунктирная линия) и симметричный (сплошная линия) оптимум по управлению (а) и возмущению (б)

На рис. 8 представлены графики изменения моментов отдельных двигателей с отключённой и включённой частотной коррекцией при настройке на симметричный оптимум. Несмотря на то что частотная коррекция разрабатывалась на основе механической характеристики, т. е. по статическим характеристикам, равномерное распределение нагрузки осуществляется и в динамическом режиме. Это видно по графикам на рис. 8: не только установившиеся значения, но и переходные процессы моментов двигателей совпадают.

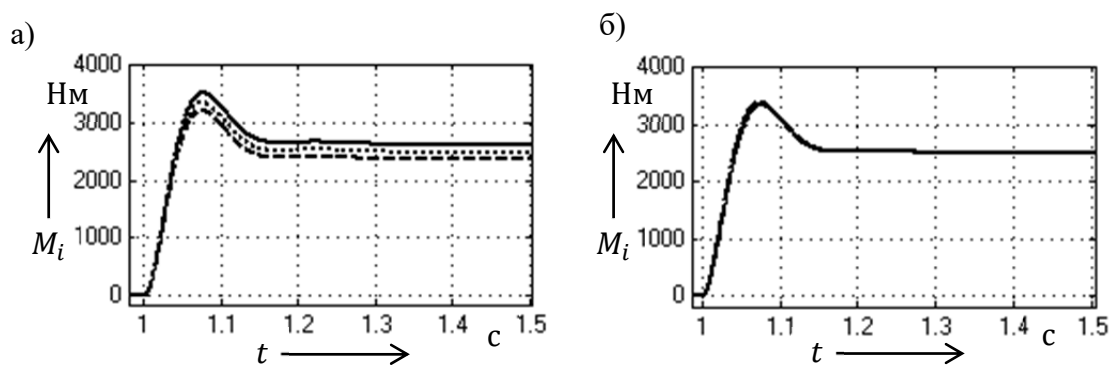


Рис. 8. Графики переходных процессов моментов двигателей МЭП при отключённой (а) и включённой (б) частотной коррекции

При отключённой частотной коррекции переходные процессы скорости не изменяются и также соответствуют стандартной настройке, что говорит о независимости настройки объекта управления от частотной коррекции. САР и система частотной коррекции работают независимо друг от друга.

Выводы:

1. Проблема равномерного распределения нагрузки между двигателями МЭП осуществляется без использования дорогостоящего оборудования, с помощью скалярного частотно-регулируемого электропривода с общим выпрямителем и одноконтурной системы подчинённого управления. Это достигнуто благодаря независимому соединению двигателей и использованию частотной коррекции, позволяющей параллельно смещать механические характеристики частотно-регулируемых двигателей.

2. Независимость настройки МЭП как объекта управления от частотной коррекции позволяет использовать те же формулы стандартной настройки, что и для одиночного скалярного частотно-регулируемого электропривода.

3. Равноправная частотная коррекция без разделения двигателей на ведущего и ведомых позволяет формировать динамические и статические характеристики МЭП как суммирующие те же характеристики отдельных двигателей. Это позволило равномерно распределять нагрузку как в статике, так и в динамике.

4. Недостатком является изменчивость коэффициентов частотной коррекции в зависимости от изменчивости параметров двигателей (активного и индуктивного сопротивления), что заставляет использовать дополнительные меры для учёта этой изменчивости. Данный недостаток можно устранить двумя способами: идентификацией параметров двигателей, что достигается электрическим измерением, и использованием нечётких систем управления электроприводами переменного тока [11].

5. Также недостатком является присущее всем одноконтурным системам отсутствие ограничения токов двигателей. Данный недостаток устраняется с помощью задатчика интенсивности [12]. Равномерное распределение нагрузки на всех двигателях позволяет использовать общий задатчик интенсивности на входе контура скорости.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бабокин, Г. И. Синтез системы управления многодвигательного регулируемого электропривода горных машин / Г. И. Бабокин, Т. В. Насонова // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2011. – № S4. – С. 230-233.
2. Исследование неравномерности нагружения двухдвигательного частотно-регулируемого электропривода скребкового конвейера / Д. М. Шпрехер, Г. И. Бабокин, Е. Б. Колесников, Д. С. Овсянников // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2021. – Т. 64. – № 4-5. – С. 37-45.
3. Шпрехер, Д. М. Система управления выравниванием нагрузки в многодвигательном электроприводе скребкового конвейера / Д. М. Шпрехер, Г. И. Бабокин, Д. С. Овсянников // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2022. – Т. 65. – № 3. – С. 56-65.
4. Шпрехер, Д. М. Разработка и исследование систем управления многодвигательным электроприводом шахтного скребкового конвейера / Д. М. Шпрехер, Д. С. Овсянников // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2022. – № 9. – С. 524-531.
5. Лицин, К. В. Реконструкция многодвигательного электропривода тянуще-правильной машины / К. В. Лицин, А. В. Цуканов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2021. – № 4. – С. 214-219.
6. Копысов, А. В. Двухдвигательный электропривод с жёсткой механической частью в режиме «ведущий-ведомый» / А. В. Копысов, С. В. Стельмашук // Молодёжь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований: материалы VI Всероссийской национальной научной конференции молодых учёных, Комсомольск-на-Амуре, 10-14 апреля 2023 г. В 3 ч. Ч. 1. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВО «КнАГУ», 2023. – С. 233-235.
7. Терехов, В. М. Системы управления электроприводов: учеб. / В. М. Терехов, О. И. Осипов; под ред. В. М. Терехова. – Москва: Academia, 2005. – 304 с.
8. Автоматизированный электропривод промышленных установок / Г. Б. Онищенко, М. И. Аксенов, В. П. Грехов, М. Н. Зарицкий, А. В. Куприков, А. И. Нитиевская. – М.: РАСХН, 2001. – 520 с.
9. Чернышев, А. Ю. Электропривод переменного тока: учеб. пособие / А. Ю. Чернышев, Ю. Н. Дементьев, И. А. Чернышев; Национальный исследовательский Томский политехнический университет (ТПУ). – Томск: Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 2011. – 213 с.
10. Аминов, К. С. Проблема внутренней обратной связи в типовой настройке частотного асинхронного электропривода со скалярным управлением / К. С. Аминов, С. В. Стельмашук // Молодёжь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований: материалы III Всероссийской национальной научной конференции студентов, аспирантов и молодых учёных, Комсомольск-на-Амуре, 06-10 апреля 2020 года. В 3 ч. Ч. 1. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВО «КнАГУ», 2020. – С. 176-178.
11. Бузикаева, А. В. Анализ многокаскадных нечётких регуляторов Сугено и Мамдани во внешнем каскаде для систем управления электроприводами переменного тока / А. В. Бузикаева, С. П. Черный // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2020. – № VII (47). – С. 76-84.
12. Послов, С. В. Особенности моделирования интеллектуальных задатчиков интенсивности / С. В. Послов, А. В. Бузикаева, С. П. Черный // Молодёжь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований: материалы IV Всероссийской национальной научной конференции студентов, аспирантов и молодых учёных, Комсомольск-на-Амуре, 12-16 апреля 2021 г. В 4 ч. Ч. 2. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВО «КнАГУ», 2021. – С. 52-54.