

**ВЗАИМОСВЯЗАННЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД СОГЛАСОВАННОГО ВРАЩЕНИЯ С ПИТАНИЕМ ОТ ТОКОПАРАМЕТРИЧЕСКОГО ВЕНТИЛЬНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ**

Взаимосвязанный электропривод согласованного вращения (ЭПСВ) находит все возрастающее применение в машиностроении. Увеличение числа валопроводов механизма при заданном допустимом ускорении и при заданной статической нагрузке позволяет уменьшить нагрузку каждого валопровода, что приводит к облегчению трансмиссионных передач; уменьшается вероятность пробуксовки; упрощается решение задачи унификации ЭП различных по мощности установок; уменьшается суммарный момент инерции роторов двигателей.

Традиционно питание многодвигательных взаимосвязанных электроприводов постоянного и переменного тока осуществляется от сети или преобразователя, внутреннее сопротивление которых достаточно мало. Такие источники питания (рис. 1,а) принято называть *источниками напряжения* (ИН). В то же время давно разработаны в Институте электродинамики НАН Украины и Московском энергетическом институте [1, 2] системы ЭП с питанием от *источника тока* (ИТ). Особенности динамики взаимосвязанного ЭП постоянного тока с питанием от ИТ, в качестве которого используется высоконадежный токопараметрический вентильный преобразователь (ТПВП) [3], можно установить на основе рассмотрения простейшей двухмассовой электромеханической системы – двухдвигательного взаимосвязанного ЭП, расчетная схема которого представлена на рис. 1,б.

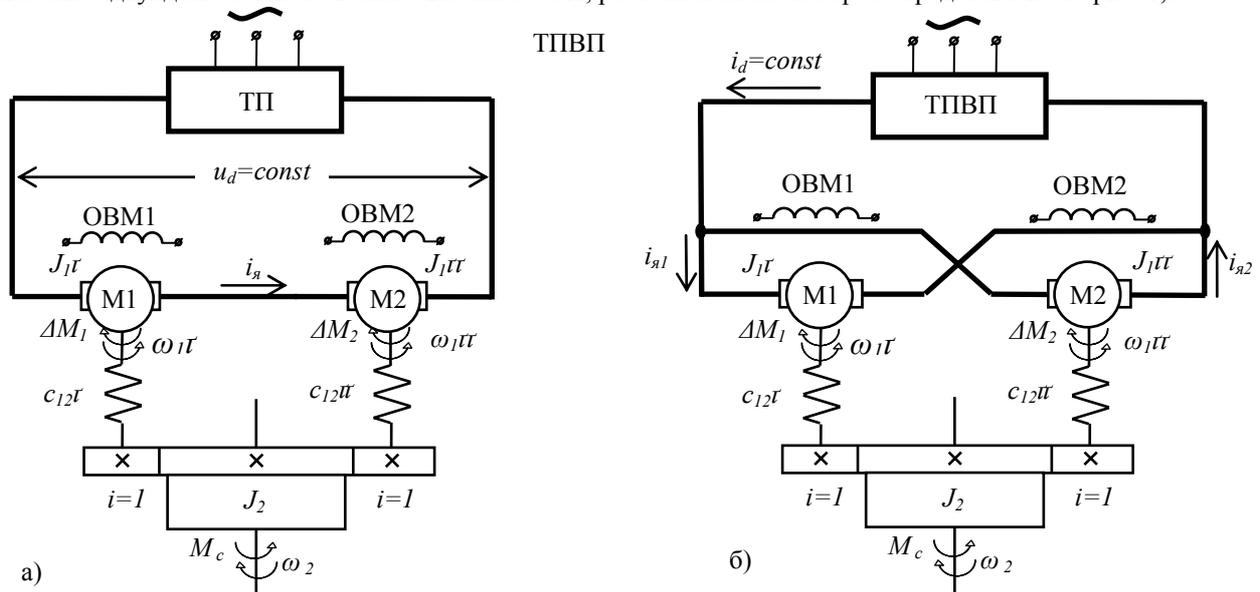


Рис. 1 – Схемы взаимосвязанных ЭП при питании: а) от ИН, б) от ИТ

Исходная система дифференциальных уравнений, если пренебречь индуктивностями якорных цепей двигателей, так как ТПВП обладает большими форсирующими по напряжению возможностями, представлена выражениями (1-7).

В приведенной системе уравнений приняты обозначения:

$i_{я1}, i_{я2}$  – токи якоря первого и второго двигателей;

$c', c''$  – коэффициенты ЭДС (момента), соответственно, первого и второго двигателей;

$R_1, R_2$  – суммарные сопротивления якорных цепей первого и второго двигателей;

$c'_{12}, c''_{12}$  – коэффициенты жесткости I и II валопроводов;

$J'_1, J''_1$  – приведенные моменты инерции I и II валопроводов;

$M'_{12}, M''_{12}$  – упругие моменты, создаваемые каждым из двух валопроводов;

$J_2$  – приведенный момент инерции рабочего механизма.

Задаваемые функции времени, связанные с возмущениями в системе ЭПСВ:

$\left. \begin{matrix} \Delta M_1 = \Delta M_1(t) \\ \Delta M_2 = \Delta M_2(t) \end{matrix} \right\}$  – возмущающие механические воздействия на каждом валопроводе, обусловленные, в ос-

$$\begin{cases} i_{я1} + i_{я2} = i_d = const = I_d & (1) \\ c' \cdot \omega'_1 + i_{я1} \cdot R_1 = c'' \cdot \omega''_1 + i_{я2} \cdot R_2 & (2) \\ c' \cdot i_{я1} - M'_{12} - \Delta M_1 = J'_1 \cdot \frac{d\omega'_1}{dt} & (3) \\ c'' \cdot i_{я2} - M''_{12} - \Delta M_2 = J''_1 \cdot \frac{d\omega''_1}{dt} & (4) \\ M'_{12} + M''_{12} - M_c = J_2 \cdot \frac{d\omega_2}{dt} & (5) \\ M'_{12} = c'_{12}(\varphi'_1 - \varphi_2) & (6) \\ M''_{12} = c''_{12}(\varphi''_1 - \varphi_2) & (7) \end{cases}$$

новном, следующими факторами: погрешности обработки реборд колес и установки подкрановых рельс; погрешности зубчатых зацеплений в редукторах; несоосность валов при соединении их муфтами; шероховатость и неравномерность смазки трущихся поверхностей и т.п.;

$M_c = M_c(t)$  – приведенный статический момент нагрузки;

$I_d = I_d(t)$  – выходной ток ТПВП (для случая регулируемого ЭП по якорю).

Неизвестные переменные системы уравнений:

$\varphi_1, \varphi_1''$  – углы поворота вала первого и второго электродвигателя;

$\omega_1' = d\varphi_1'/dt$  – скорость вращения первого электродвигателя;

$\omega_1'' = d\varphi_1''/dt$  – скорость вращения второго электродвигателя;

$\varphi_2$  – угол поворота вала рабочего механизма, например, приводного колеса моста крана;

$\omega_2 = d\varphi_2/dt$  – скорость вращения вала рабочего механизма.

После решения (1) ч (7) выведены дифференциальные уравнения для упругих моментов, действующих в ЭП, в которых:  $M = c' \cdot i_{a1}$  – электромагнитный момент первого двигателя;  $M_0 = I_d \cdot c''$  – общий электромагнитный момент системы привода;  $a = c'' / c'$  – соотношение коэффициентов ЭДС (момента) первого и второго двигателей (в большинстве случаев  $c'' / c' = c$ , что будет учтено далее).

$$\begin{cases} \frac{d^2 M_{12}' + M_{12}' \left[ \frac{c_{12}'}{J_1} + \frac{c_{12}'}{J_2} \right] + M_{12}'' \left[ \frac{c_{12}''}{J_2} \right] - \frac{c_{12}'}{J_1} \cdot M}{dt^2} = -\frac{c_{12}'}{J_1} \Delta M_1 + \frac{c_{12}'}{J_2} \cdot M_c \\ \frac{d^2 M_{12}'' + M_{12}'' \left[ \frac{c_{12}''}{J_2} \right] + M_{12}' \left[ \frac{c_{12}''}{J_1} + \frac{c_{12}''}{J_2} \right] + M \left[ \frac{c_{12}''}{J_1} \cdot a \right]}{dt^2} = \frac{c_{12}''}{J_1} \cdot M_0 - \frac{c_{12}''}{J_1} \cdot \Delta M_2 + \frac{c_{12}''}{J_2} \cdot M_c \\ M_{12}' \left( -\frac{c'}{J_1} \right) + M_{12}'' \left( \frac{c''}{J_1} \right) + M \left( \frac{c'}{J_1} + \frac{c''}{J_1} \cdot a \right) + k_1 \cdot \frac{dM}{dt} = \frac{c'}{J_1} \cdot \Delta M_1 + \frac{c''}{J_1} (M_0 - \Delta M_2) + \frac{dk_2}{dt} \end{cases} \quad (8)$$

Перейдя к уравнениям в изображениях при нулевых начальных условиях, используя формулы и свойства операционного исчисления, получим:

$$\begin{cases} M_{12}'(p)(p^2 + \alpha_1 + \beta_1) + M_{12}''(p) \cdot \beta_1 - M(p) \cdot \alpha_1 = -\alpha_1 \cdot \Delta M_1(p) + \beta_1 \cdot M_c(p) \\ M_{12}'(p) \cdot \beta_2 + M_{12}''(p)(p^2 + \alpha_2 + \beta_2) + M(p) \cdot \alpha_2 \cdot a = \alpha_2 (M_0(p) - \Delta M_2(p)) + \beta_2 \cdot M_c(p) \\ M_{12}'(p) \cdot (-\gamma_1) + M_{12}''(p) \cdot \gamma_2 + M(p) \cdot (\gamma_1 + \gamma_2 \cdot a + k_1 \cdot p) = \gamma_1 \cdot \Delta M_1(p) + \gamma_2 (M_0(p) - \Delta M_2(p)) + p \cdot k_2(p) \end{cases} \quad (9)$$

где  $\alpha_1 = c_{12}'/J_1$ ,  $\beta_1 = c_{12}'/J_2$ ,  $\alpha_2 = c_{12}''/J_1$ ,  $\beta_2 = c_{12}''/J_2$ ,  $\gamma_1 = c'/J_1$ ,  $\gamma_2 = c''/J_1$ .

Полученная линейная система трех уравнений с тремя неизвестными  $M_{12}'(p)$ ,  $M_{12}''(p)$ ,  $M(p)$  имеет решение, которое находится по формуле Крамера [4]:

$$M_{12}'(p) = \frac{P_{12}'(p)}{Q(p)}; \quad M_{12}''(p) = \frac{P_{12}''(p)}{Q(p)}; \quad M(p) = \frac{P(p)}{Q(p)},$$

где, числители и знаменатели записанных дробей представляют собой многочлены, найденные при помощи определителей. Характеристическое уравнение указанной системы дифуравнений определяется как  $Q(p) = 0$ . Анализ корней этого уравнения при помощи критерия Гурвица свидетельствует о том, что все его корни при  $J_1' \neq J_2''$  или  $c_{12}' \neq c_{12}''$  имеют отрицательные действительные части. Следовательно,  $M(t)$ ,  $M_{12}'(t)$  и  $M_{12}''(t)$  имеют затухающий характер благодаря демпфирующему действию ЭП.

Исследуем данную модель более подробно при идентичности валопроводов и электродвигателей:

$c' = c'' = c$ ;  $c_{12}' = c_{12}'' = c_{12}$ ;  $J_1' = J_2'' = J$ ;  $R_{a1} = R_{a2} = R_a$ .

Тогда:  $a = c'' / c' = 1$ ,  $M_0 = I_d \cdot c$ ,  $M_2 = M_0 - M$ ,  $k_1 = 2R_a / c$ ,  $k_2 = R_a / I_d$ ,  $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha$ ,  $\beta_1 = \beta_2 = \beta$ ,  $\gamma_1 = \gamma_2 = \gamma$ .

Определители системы (9) упрощаются и корни характеристического уравнения имеют вид:

$p_1 = 0$ ;  $p_{2,3} = \pm i \cdot \sqrt{\alpha + 2\beta}$ ;  $p_{4,5} = -\frac{\gamma}{k_1} \pm \sqrt{\frac{\gamma^2}{k_1^2} - \alpha}$ . Записав решение в изображениях, получаем:

$$M(p) = \frac{(p^2 + \alpha) \cdot k_2 + p\gamma(\Delta M_1 - \Delta M_2 + M_0)}{k_1(p - p_4) \cdot (p - p_5)} = \frac{A(p)}{B(p)}, \quad (10)$$

$$M_{12}(p) = \frac{P_{12}(p)}{k_1 \cdot p(p - p_2) \cdot (p - p_3) \cdot (p - p_4) \cdot (p - p_5)} = \frac{P_{12}(p)}{Q(p)}. \quad (11)$$

Используя вторую теорему разложения [4] и перейдя к оригиналам, имеем уравнения вида:

$$M(t) = \frac{A(p_4)}{B'(p_4)} \cdot e^{p_4 t} + \frac{A(p_5)}{B'(p_5)} \cdot e^{p_5 t} = 2 \cdot \operatorname{Re} \left[ \frac{A(p_4)}{B'(p_4)} \cdot e^{p_4 t} \right], \quad (12)$$

$$M_{12}(t) = \frac{P_{12}(0)}{Q'(0)} + \frac{P_{12}(p_2)}{Q'(p_2)} \cdot e^{p_2 t} + \frac{P_{12}(p_3)}{Q'(p_3)} \cdot e^{p_3 t} + \frac{P_{12}(p_4)}{Q'(p_4)} \cdot e^{p_4 t} + \frac{P_{12}(p_5)}{Q'(p_5)} \cdot e^{p_5 t} =$$

$$= \frac{P_{12}(0)}{Q'(0)} + 2Re \cdot \left[ \frac{P_{12}(p_2)}{Q'(p_2)} e^{p_2 t} \right] + 2e \cdot \left[ \frac{P_{12}(p_4)}{Q'(p_4)} e^{p_4 t} \right] \quad (13)$$

Анализ выражений (12) и (13) с учетом вида корней характеристического уравнения показывает:

а) функция  $M(t)$  не содержит незатухающие колебания, поскольку наличие одинаковых множителей  $p(p^2 + \alpha + 2\beta)$  в числителе и знаменателе этой функции привело к их сокращению в формуле  $M(p)$ , а остальные корни характеристического уравнения  $p_4$  и  $p_5$  имеют отрицательные действительные части, что обеспечивает с помощью множителя  $e^{-\gamma t / k_1}$  затухающий характер колебаний  $M(t)$ ;

б) функция  $M_{12}(t)$  содержит незатухающие колебания, которые объясняются наличием чисто мнимых корней  $p_{2,3} = \pm i \cdot \sqrt{\alpha + 2\beta}$  в знаменателе  $M_{12}(p)$ .

Исследование подкоренного выражения  $\alpha + 2\beta = c_{12} / J_1 + 2c_{12} / J_1$  указывает на то, что общая частота незатухающих колебаний будет составлять:  $\Omega = \sqrt{\alpha + 2\beta} = \sqrt{\Omega_0^2 + 2\Omega_1^2}$ , где  $\Omega_0 = \sqrt{c_{12} / J_1}$  – частота свободных колебаний каждого валопровода при неподвижном механизме, а  $\Omega_1 = \sqrt{c_{12} / J_2}$  – частота свободных колебаний выходного валопровода. Если сравнить с подобными частотами при последовательном соединении двигателей и питании от ИН [5], то имеет место увеличение частоты свободных колебаний в  $\sqrt{1 + 2(\Omega_1 / \Omega_0)^2}$  раза. Это указывает на возможность получения лучших динамических качеств взаимосвязанного ЭП с питанием от ИТ, в сравнении с питанием от ИН. Следовательно, он способен обрабатывать более «мелкие» возмущения со стороны механического оборудования, что позволяет уменьшить износ этого оборудования, как это и подтверждает опыт промышленной эксплуатации.

Под «мелкими» возмущениями подразумеваются моменты сопротивления, возникающие, например, применительно к механизму перемещения мостового крана, из-за трения реборд колес о рельсы при отсутствии параллельности их укладки, неточностей изготовления зубчатых зацеплений в редукторе, несоосности соединительных муфт, износа подшипников и др. От воздействия указанных «механических» возмущений на электро-механическую систему уйти невозможно, однако их влияние на срок службы оборудования крана можно уменьшить, если электропривод будет работать, в какой-то мере, инвариантно к указанным возмущениям. Если говорить проще, то система должна самоподстраиваться под возмущения, и чем ниже будет уровень возмущающих моментов  $\Delta M_1$  и  $\Delta M_2$ , которые способны обрабатывать электроприводы, тем лучше. Указанные возмущения могут нейтрализоваться через изменение электромагнитного момента каждого двигателя, который, в случае питания привода от ИТ, может считаться независимой функцией управления через ослабленный коэффициент электро-механической связи ( $k_{эс}$ ) – комплексный коэффициент, связывающий процессы изменения момента двигателя с механическими процессами в валопроводе.

Известно, что чем больше величина  $k_{эс}$ , тем сильнее связаны между собой эти процессы. Для системы «управляемый преобразователь напряжения – двигатель» он равен [5]:

$$k_{эс} = \frac{\gamma - 1}{\sqrt{\gamma \cdot (\gamma - 1) \cdot T_m^2 \cdot \Omega_0^2 + \gamma^2 \cdot T_{я}^2 \cdot T_m^2 \cdot \Omega_0^4}}, \quad (14)$$

где  $\gamma = (J_1 + J_2) / J_1$  – отношение суммарного момента инерции установки к моменту инерции на валу двигателя;

$T_{я}$  и  $T_m$  – электрическая и электро-механическая постоянные привода;

$\Omega_0$  – частота свободных колебаний вала двигателя.

Используя (14), и имея в виду, что в качестве ИТ может работать не только ТПВП, но и любой управляемый преобразователь напряжения с глубокой отрицательной обратной связью по выходному постоянному току, можно считать, что увеличение собственной (свободной) частоты колебаний каждого канала электро-механической системы снижает степень электро-механической связи в динамике, момента двигателя с механическим моментом  $M_{12}$  в его валопроводе, т.е. делает момент двигателя как бы «независимым» от процессов в валопроводе.

При питании двигателя от ИН высокая жесткость его механической характеристики делает сильной электро-механическую связь (обмен энергией между инерционностями двигателя и механическими массами), а при питании же от ИТ наоборот, резко падает жесткость механической характеристики и колебания скорости не реализуются в колебания момента (он зависит только от управлений). Источник тока делает электро-механическую связь предельно слабой, поэтому колебания, возникающие в механической части взаимосвязанных приводов ( $M'_{12}, M''_{12}$ ), не вызывают существенных колебаний выходного тока  $i_d$  ТПВП, а вызывают лишь перераспределение этого тока между якорными цепями двигателей. Поглощение энергии механических колебаний каждого валопровода якорными цепями приводных двигателей, а тем более отвод ее в питающую сеть, практически отсутствует и, следовательно, демпфирование колебаний электроприводами ослаблено до пренебрежимо малой степени, т.е. системе дается возможность самоподстраиваться не за счет внутреннего перераспределения колебательной энергии (которая может приводить даже к «раскачиванию» системы) между отдельными ЭП, а за счет принудительного подавления этих колебаний энергией источника (преобразователя) тока.

Диаграммы скоростей двигателей, полученные при компьютерном моделировании двухдвигательного ЭП с использованием среды *Matlab / SimPowerSystems* (рис.3 и 4; рис.5 и 6) убедительно подтверждают более высокие динамические качества ЭП при питании от ИТ как на этапе пуска, так и при значительном изменении нагрузки при  $t = 2$  с. Очевидно, что при «мелких» изменениях нагрузки ЭП будут вести себя аналогично. При питании от ИН имеется тенденция к противофазному изменению скоростей двигателей, что и наблюдается на осциллограммах работы ЭП перемещения мостового крана, работающего в условиях действующего металлургического производства (рис. 7).

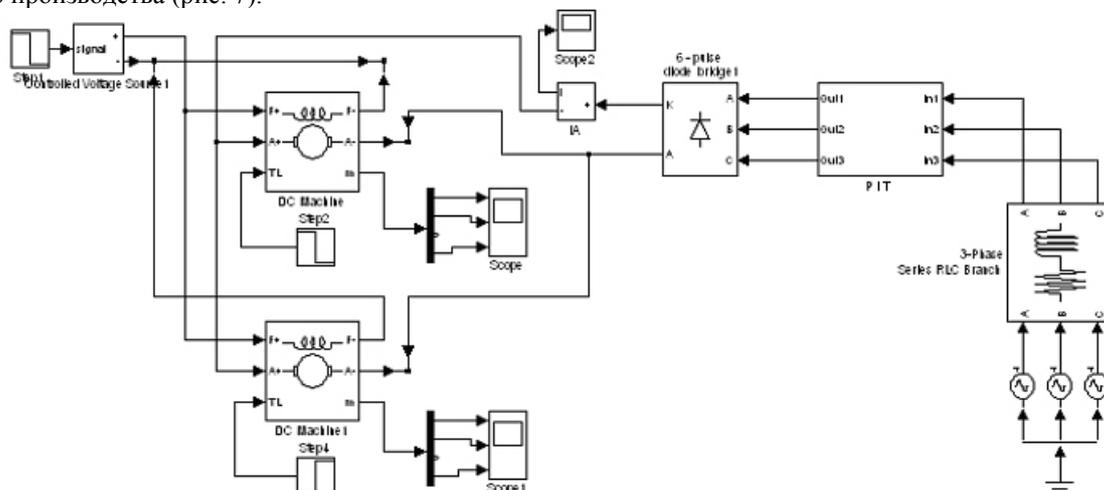


Рис. 3 – Модель двухдвигательного электропривода с питанием от источника тока (ПИТ с шестипульсным выпрямителем на выходе)

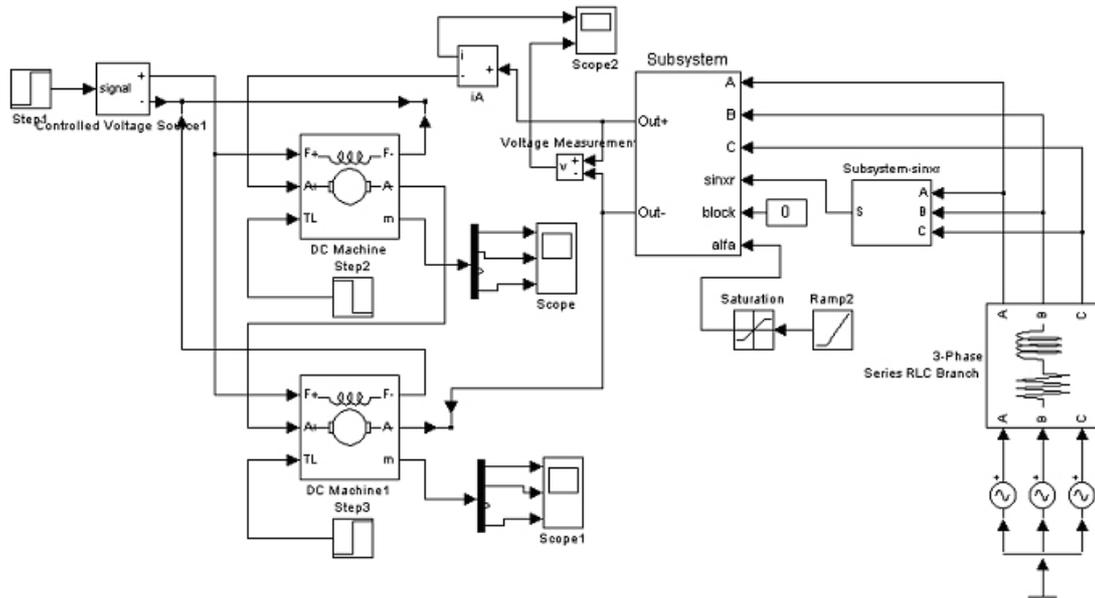


Рис. 4 – Модель двухдвигательного электропривода с питанием от источника напряжения (регулируемого ТП с задатчиком интенсивности пуска)

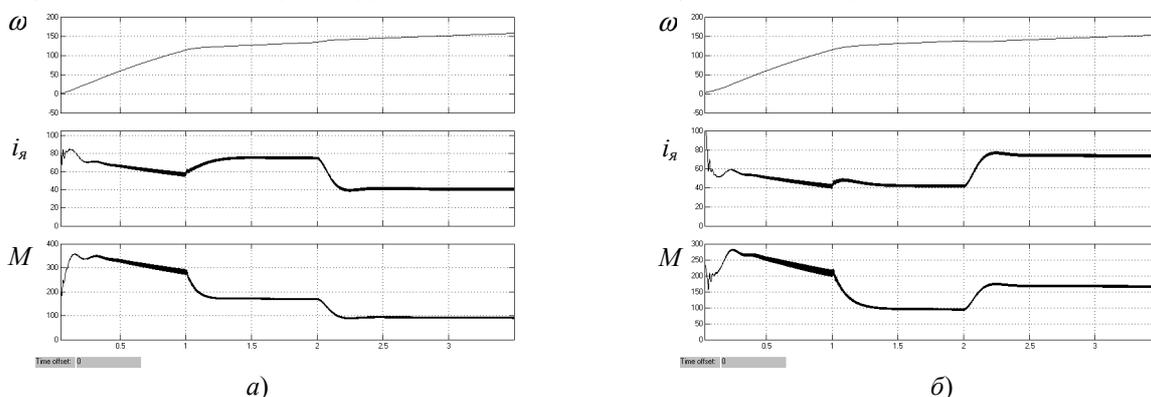


Рис. 5 – Диаграммы скорости, тока якоря и момента (сверху вниз) двигателей при питании от ТПВП; а) первый привод:  $M_c = 150$  Нм, при  $t = 2$  с  $M_c = 75$  Нм ; б) второй привод:  $M_c = 75$  Нм, при  $t = 2$  с  $M_c = 150$  Нм

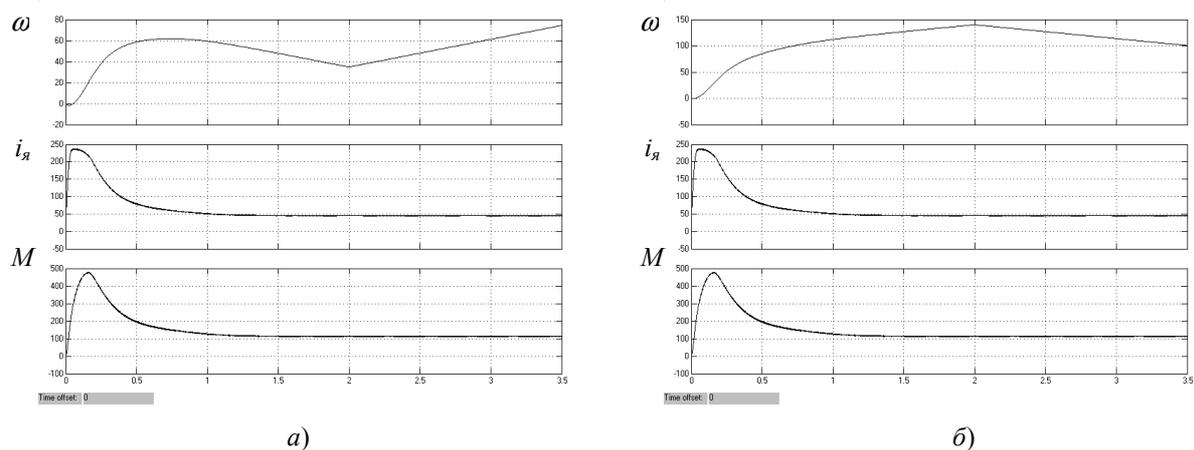


Рис. 6 – Диаграммы скорости, тока якоря и момента (сверху вниз) двигателей при питании от ТП;  
 а) первый привод:  $M_c = 150 \text{ Нм}$ , при  $t = 2 \text{ с}$   $M_c = 75 \text{ Нм}$ ; б) второй привод:  $M_c = 75 \text{ Нм}$ , при  $t = 2 \text{ с}$   $M_c = 150 \text{ Нм}$

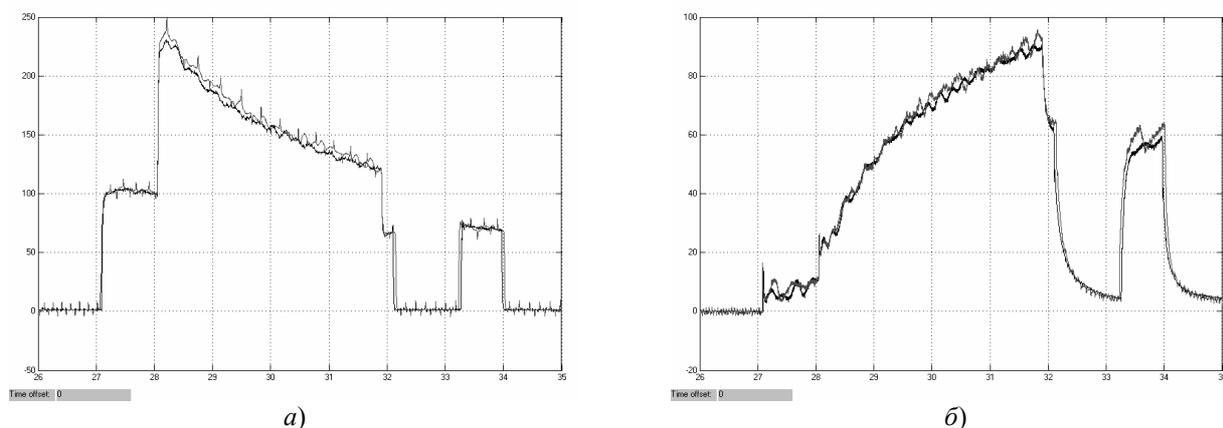


Рис. 7 – Экспериментальные осциллограммы тока якоря (а) и скорости (б) приводных двигателей (Д810-У2, 220 В, 40 кВт, 580 об/мин) механизма передвижения моста клещевого крана для транспортировки слябов г.п. 70/50 т, L=37 м ОАО «АМК»

**Вывод.** Как показывает практика, при питании взаимосвязанных электроприводов от источника тока, удается повысить эксплуатационные и энергетические показатели взаимосвязанных ЭПСВ путем использования законов управления, исключающих из контуров регулирования наиболее инерционную электромеханическую постоянную времени. Это существенно улучшает динамику взаимосвязанного ЭП, например механизма перемещения мостового крана, и снижает износ реборд колес и головок подкрановых рельс, уменьшает количество трещин в сварных швах по балкам крана. Шестилетний опыт эксплуатации двухдвигательного электропривода перемещения моста крана, работающего в одном из прокатных цехов ОАО «Алчевский металлургический комбинат» и построенный согласно патента на изобретение [6], дает достаточно высокий технико-экономический результат (межремонтный цикл по ходовой части крана возрос почти в два раза).

Приведенные в данной статье теоретические результаты, а также опыт практической эксплуатации ЭП перемещения мостового крана с питанием двигателей от преобразователя на базе параметрического источника тока указывают на следующее:

- взаимосвязанные через механическое оборудование системы электроприводов согласованного вращения постоянного и переменного тока должны строиться по новому принципу, который может быть реализован только при питании отдельных приводных двигателей от одного преобразователя с «токовой» внешней характеристикой;

- согласование скоростей двигателей должно осуществляться за счет самостоятельного перераспределения двигателями своих якорных (роторных) токов в зависимости от моментов нагрузки на их валах.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Волков И.В., Исаков В.Н. Электроприводы со стабилизированным током в силовых цепях. – М.: Радио и связь, 1991. – 216 с.
2. Ильинский Н.Ф. Электроприводы постоянного тока с управляемым моментом. – М.: Энергия, 1979. – 144 с.
3. Лабунцов В.А., Обухов С.Г., Чаплыгин Е.Е., Мендыбаев А.А. Токопараметрические вентиляемые преобразователи. – Электротехническая промышленность. Серия «Преобразовательная техника», 1980, вып.1 (120). – С. 3-4.
4. Жевержеев В.Ф., Кальницкий Л.А., Сапогов Н.А. Специальный курс математики для втузов. – М.: Высшая школа, 1970. – 416 с.
5. Ключев В. И. Ограничение динамических нагрузок электропривода. – М.: Энергия, 1971. – 320 с.
6. Патент України на винахід № 44951А, МПК 6НО2Р 7/74. Асинхронний електропривід з синхронним обертанням роторів // Волков І.В., Ісаков В.М., Калужний В.В., Калужний С.В., Шевченко І.С. – № 99020594; Заявл. 02.02.1999; Опубл. 15.03.2002, Бюл. № 3.