

# Динамика взаимосвязанного электропривода согласованного вращения

КАЛЮЖНЫЙ С.В.

Проведен анализ динамических свойств взаимосвязанного электропривода с питанием якорных цепей двигателей от источника (преобразователя) тока. Выведены дифференциальные уравнения для упругих моментов, анализ которых указывает на более высокие частотные свойства взаимосвязанного привода с токовой системой питания по сравнению с питанием от источника (преобразователя) напряжения. Это дает возможность обрабатывать более «мелкие» возмущения со стороны механического оборудования машины, т.е. уменьшить его износ.

Ключевые слова: двухмассовый взаимосвязанный электропривод, токовая система питания, частотные свойства

Взаимосвязанный электропривод (ВЭП) согласованного вращения находит все возрастающее применение в машиностроении. Преимущества ВЭП с двумя и более приводными двигателями известны: уменьшение нагрузки на каждый валопровод; упрощение решения задачи унификации приводов различных по мощности установок; уменьшение суммарного момента инерции роторов двигателей; увеличение сцепной массы, приходящейся на каждое приводное колесо, и, как следствие, снижение вероятности пробуксовки колес.

Традиционно многодвигательные ВЭП как постоянного, так и переменного тока питаются от сети или от преобразователя, внутреннее сопротивление которых достаточно мало. Такие источники питания принято называть источниками напряжения. При включении электрических машин, получающих питание от ИН и установленных на одной оси, используют обычно последовательную схему. Однако, как показывает практика, при такой схеме питания ВЭП, например механизма перемещения мостового крана, наблюдается достаточно большой износ реборд колес и головок подкрановых рельсов, возникают многометровые трещины в сварных швах по балкам крана [1].

Цель статьи: теоретическое обоснование новой концепции построения ВЭП, в соответствии с которой приводные двигатели питаются от источника тока (ИТ), в качестве которого может использоваться высоконадежный токопараметрический вентильный преобразователь (ТПВП) [2]. Особенности динамики ВЭП постоянного тока с питанием от

The dynamic properties of an interconnected electric drive with the motor's armature circuits energized from a current source (converter) are analyzed. Differential equations for elastic torques are derived, and it is shown from an analysis of these equations that the interconnected drive with a current-type power supply system has frequency properties better than those in the case of supplying power to it from a voltage source (converter). Owing to these properties, the drive responds to smaller disturbances on the side of the machine's mechanical equipment, due to which less intensive wear of this equipment is achieved.

Key words: interconnected two-mass electric drive, current-type power supply system, frequency characteristics

ИТ по сравнению с питанием от ИН можно установить на основе рассмотрения простейшей двухмассовой электромеханической системы, приведенной на рис. 1.

Исходную систему дифференциальных уравнений, пренебрегая люфтами  $z_0$  в передачах и индуктивностями якорных цепей двигателей, так как ТПВП обладает большими форсирующими возможностями по напряжению, запишем в виде:

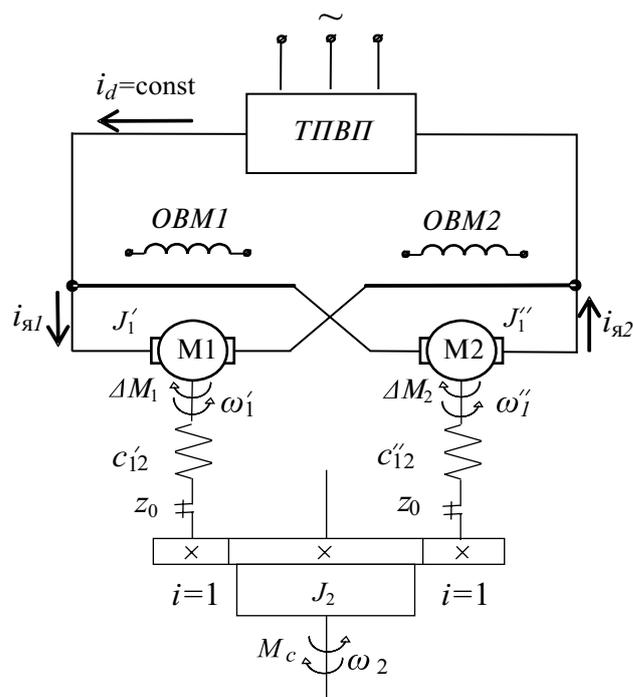


Рис. 1.

$$i_{я1} + i_{я2} = I_d = \text{const}; \quad (1)$$

$$c' \omega_1' + i_{я1} R_1 = c'' \omega_1'' + i_{я2} R_2; \quad (2)$$

$$c' i_{я1} - M_{12}' - \Delta M_1 = J_1' \frac{d\omega_1'}{dt}; \quad (3)$$

$$c'' i_{я2} - M_{12}'' - \Delta M_2 = J_1'' \frac{d\omega_1''}{dt}; \quad (4)$$

$$M_{12}' + M_{12}'' - M_c = J_2 \frac{d\omega_2}{dt}; \quad (5)$$

$$M_{12}' = c_{12}' (\varphi_1' - \varphi_2); \quad (6)$$

$$M_{12}'' = c_{12}'' (\varphi_1'' - \varphi_2), \quad (7)$$

где  $i_{я1}, i_{я2}$  – 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 (без учета внутреннего сопротивления преобразователя);  $c_{12}', c_{12}''$  – коэффициенты жесткости первого и второго валопроводов;  $J_1', J_1''$  – приведенные моменты инерции первого и второго валопроводов (якорь двигателя, соединительная муфта, промежуточный вал);  $M_{12}', M_{12}''$  – упругие моменты, создаваемые каждым из двух валопроводов;  $J_2$  – приведенный момент инерции рабочего механизма; задаваемые функции времени, связанные с возмущениями в системе электропривода:

$$\Delta M_1 = \Delta M_1(t); \quad \Delta M_2 = \Delta M_2(t) -$$

возмущающие механические воздействия на каждом валопроводе, обусловленные в основном механическими факторами: погрешностью обработки реборд колес и монтажа подкрановых рельсов; погрешностью зубчатых зацеплений в редукторах; несоосностью валов при соединении их муфтами; шероховатостью и неравномерностью 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 преобразователя).

Неизвестные переменные в уравнениях (1)–(7):  $\varphi_1', \varphi_1''$  – углы поворота вала первого и второго электродвигателей;  $\omega_1' = \frac{d\varphi_1'}{dt}$  – частота вращения первого двигателя;  $\omega_1'' = \frac{d\varphi_1''}{dt}$  – частота вращения второго двигателя;  $\varphi_2$  – угол поворота вала рабочего механизма, например приводного колеса моста крана;  $\omega_2 = \frac{d\varphi_2}{dt}$  – частота вращения вала рабочего механизма.

Преобразуем уравнения (1)–(7) к системе дифференциальных уравнений с тремя неизвестными

функциями  $M, M_{12}', M_{12}''$ , где  $M = c' i_{я1}$  – электромагнитный момент первого двигателя.

Из (1) получим  $i_{я2} = I_d - i_{я1}$ . Поскольку  $i_{я1} = M / c'$ , то  $i_{я2} = I_d - M / c'$ , тогда

$$M_2 = c'' i_{я2} = c'' \left( I_d - \frac{M}{c'} \right) = c'' I_d - \frac{c''}{c'} M. \quad (8)$$

Введем обозначения:  $M_0 = I_d c''$  – общий (суммарный) 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). Получим

$$M_2 = M_0 - aM. \quad (9)$$

Преобразуем уравнение (2):

$$\begin{aligned} c' \omega_1' + R_1 \frac{M}{c'} &= c'' \omega_1'' + R_2 \left( I_d - \frac{M}{c'} \right) \Rightarrow \\ \Rightarrow c' \omega_1' - c'' \omega_1'' + M \left( \frac{R_1 + R_2}{c'} \right) &= R_2 I_d = 0. \end{aligned}$$

Обозначим  $\frac{R_1 + R_2}{c'} = k_1$ ;  $R_2 I_d = k_2$ , получим уравнение

$$c' \omega_1' - c'' \omega_1'' + k_1 M - k_2 = 0. \quad (10)$$

Продифференцируем уравнение (10):

$$c' \frac{d\omega_1'}{dt} - c'' \frac{d\omega_1''}{dt} + k_1 \frac{dM}{dt} - \frac{dk_2}{dt} = 0. \quad (11)$$

Из (3) и (4) с учетом  $M = c' i_{я1}$ ;  $c'' i_{я2} = M_0 - aM$  получим:

$$\frac{d\omega_1'}{dt} = \frac{1}{J_1'} (M - M_{12}' - \Delta M_1); \quad (12)$$

$$\frac{d\omega_1''}{dt} = \frac{1}{J_1''} (M_0 - aM - M_{12}'' - \Delta M_2). \quad (13)$$

Подставим (12) и (13) в (11) и после преобразований получим:

$$\begin{aligned} M_{12}' \left( -\frac{c'}{J_1'} \right) + M_{12}'' \left( \frac{c''}{J_1''} \right) + M \left( \frac{c'}{J_1'} + \frac{c''}{J_1''} a \right) + k_1 \frac{dM}{dt} &= \\ = \frac{c'}{J_1'} \Delta M_1 + \frac{c''}{J_1''} (M_0 - \Delta M_2) + \frac{dk_2}{dt}. \end{aligned} \quad (14)$$

Дважды продифференцируем (6) и (7):

$$\frac{d^2 M_{12}'}{dt^2} = c_{12}' \left( \frac{d\omega_1'}{dt} - \frac{d\omega_2}{dt} \right) \quad (15)$$

$$\frac{d^2 M''_{12}}{dt^2} = c''_{12} \left( \frac{d\omega''_1}{dt} - \frac{d\omega_2}{dt} \right) \quad (16)$$

Из (5) выразим:

$$\frac{d\omega_2}{dt} = \frac{1}{J_2} (M'_{12} + M''_{12} - M_c), \quad (17)$$

Тогда уравнения (15), (16) с учетом (12), (13), (17) будут иметь вид:

$$\frac{d^2 M'_{12}}{dt^2} = c'_{12} \left[ \frac{1}{J'_1} (M - M'_{12} - \Delta M_1) - \frac{1}{J_2} (M'_{12} + M''_{12} - M_c) \right]; \quad (18)$$

$$\frac{d^2 M''_{12}}{dt^2} = c''_{12} \left[ \frac{1}{J''_1} ((M_0 - aM) - M''_{12} - \Delta M_2) - \frac{1}{J_2} (M'_{12} + M''_{12} - M_c) \right]. \quad (19)$$

После преобразования (18) и (19) с учетом (14) получим систему трех дифференциальных уравнений:

$$\begin{aligned} \frac{d^2 M'_{12}}{dt^2} + M'_{12} \left[ \frac{c'_{12}}{J'_1} + \frac{c'_{12}}{J_2} \right] + M''_{12} \left[ \frac{c'_{12}}{J_2} \right] - \frac{c'_{12}}{J'_1} M &= \\ = -\frac{c'_{12}}{J'_1} \Delta M_1 + \frac{c'_{12}}{J_2} M_c; & \\ \frac{d^2 M''_{12}}{dt^2} + M'_{12} \left[ \frac{c''_{12}}{J_2} \right] + M''_{12} \left[ \frac{c''_{12}}{J''_1} + \frac{c''_{12}}{J_2} \right] + M \left[ \frac{c''_{12}}{J''_1} a \right] &= \\ = \frac{c''_{12}}{J''_1} M_0 - \frac{c''_{12}}{J''_1} \Delta M_2 + \frac{c''_{12}}{J_2} M_c; & \end{aligned} \quad (20)$$

$$\begin{aligned} M'_{12} \left( -\frac{c'}{J'_1} \right) + M''_{12} \left( \frac{c''}{J''_1} \right) + M \left( \frac{c'}{J'_1} + \frac{c''}{J''_1} a \right) + k_1 \frac{dM}{dt} &= \\ = \frac{c'}{J'_1} \Delta M_1 + \frac{c''}{J''_1} (M_0 - \Delta M_2) + \frac{dk_2}{dt}. & \end{aligned}$$

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

$$\begin{aligned} M'_{12}(p)(p^2 + \alpha_1 + \beta_1) + M''_{12}(p)\beta_1 - M(p)\alpha_1 &= \\ = -\alpha_1 \Delta M_1(p) + \beta_1 M_c(p); & \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} M'_{12}(p)\beta_2 + M''_{12}(p)(p^2 + \alpha_2 + \beta_2) + M(p)\alpha_2 a &= \\ = \alpha_2 (M_0(p) - \Delta M_2(p)) + \beta_2 M_c(p); & \end{aligned} \quad (21)$$

$$\begin{aligned} M'_{12}(p)(-\gamma_1) + M''_{12}(p)\gamma_2 + M(p)(\gamma_1 + \gamma_2 a + k_1 p) &= \\ = \gamma_1 \Delta M_1(p) + \gamma_2 M_0(p) - \Delta M_2(p) + pk_2(p), & \end{aligned}$$

где  $\alpha_1 = \frac{c'_{12}}{J'_1}$ ;  $\beta_1 = \frac{c'_{12}}{J_2}$ ;  $\alpha_2 = \frac{c''_{12}}{J''_1}$ ;  $\beta_2 = \frac{c''_{12}}{J_2}$ ;  $\gamma_1 = \frac{c'}{J'_1}$ ;  
 $\gamma_2 = \frac{c''}{J''_1}$ .

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

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

где числители и знаменатели дробей представляют собой многочлены, найденные с помощью определителей.

Характеристическое уравнение данной системы дифференциальных уравнений определяется как  $Q(p)=0$ . Анализ корней этого уравнения с помощью 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 электропривода.

Исследуем данную модель более подробно при идентичности валопроводов и электродвигателей:  $c' = c'' = c$ ;  $c'_{12} = c''_{12} = c_{12}$ ;  $J'_1 = J''_2 = J$ ;  $R_{я1} = R_{я2} = R_{я}$ . тогда  $a = \frac{c''}{c'} = 1$ ;  $M_0 = I_d c$ ;  $M_2 = M_0 - M$ ;  $k_1 = \frac{2R_{я}}{c}$ ;  $k_2 = R_{я} I_d$ ;  $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha$ ;  $\beta_1 = \beta_2 = \beta$ ;  $\gamma_1 = \gamma_2 = \gamma$ .

Решим характеристическое уравнение:

$$Q(p) = 0 \Rightarrow p(p^2 + \alpha + 2\beta)(k_1 p^2 + 2\gamma p + k_1 \alpha) = 0. \quad (22)$$

Запишем его корни:

$$p_1 = 0; \quad p_{2,3} = \pm i \sqrt{\alpha + 2\beta}; \quad p_{4,5} = -\frac{\gamma}{k_1} \pm \sqrt{\frac{\gamma^2}{k_1^2} - \alpha}.$$

Оценим подкоренное выражение:

$$\frac{\gamma^2}{k_1^2} - \alpha = \frac{c^2 c^2}{J^2 4R_{я}^2} - \frac{c_{12}}{J} = \frac{c^4 - 4R_{я}^2 J c_{12}}{4R_{я}^2 J^2}.$$

Поскольку для данного типа системы электропривода числитель  $c^4 - 4R_{я}^2 J c_{12} < 0$ , то корни  $p_{4,5}$  будут комплексными:

$$p_{4,5} = -\frac{\gamma}{k_1} \pm i \sqrt{\alpha - \frac{\gamma^2}{k_1^2}}. \quad (23)$$

Запишем решение в изображениях:

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

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

Используя вторую теорему разложения [3], перейдем к оригиналам:

$$M(t) = \frac{A(p_4)}{B'(p_4)} e^{p_4 t} + \frac{A(p_5)}{B'(p_5)} e^{p_5 t} = 2 \operatorname{Re} \left[ \frac{A(p_4)}{B'(p_4)} e^{p_4 t} \right]; \quad (24)$$

$$\begin{aligned} M_{12}(t) &= \frac{P_{12}(0)}{Q'(0)} + \frac{P_{12}(p_2)}{Q'(p_2)} e^{p_2 t} + \frac{P_{12}(p_3)}{Q'(p_3)} e^{p_3 t} + \\ &+ \frac{P_{12}(p_4)}{Q'(p_4)} e^{p_4 t} + \frac{P_{12}(p_5)}{Q'(p_5)} e^{p_5 t} = \\ &= \frac{P_{12}(0)}{Q'(0)} + 2 \operatorname{Re} \left[ \frac{P_{12}(p_2)}{Q'(p_2)} e^{p_2 t} \right] + 2 \operatorname{Re} \left[ \frac{P_{12}(p_4)}{Q'(p_4)} e^{p_4 t} \right]. \quad (25) \end{aligned}$$

Анализ выражений (24) и (25) показывает:

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

б) функция  $M_{12}(t)$  может иметь незатухающий колебательный характер, что объясняется наличием чисто мнимых корней  $p_{2,3} = \pm j\sqrt{\alpha + 2\beta}$  в знаменателе  $M_{12}(p)$ . Исследование подкоренного выражения  $\alpha + 2\beta = c_{12} / J_1 + 2c_{12} / J_2$  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 аналогичными частотами при последовательном соединении двигателей и питании от ИН [4], то имеет место увеличение частоты электромеханических колебаний системы в  $\sqrt{1 + 2(\Omega_1 / \Omega_0)^2}$  раза. Это указывает на возможность получения лучших динамических качеств ВЭП с питанием от ИТ в сравнении с питанием от ИН. Следовательно, он способен обрабатывать более «мелкие» возмущения со стороны механического оборудования, например мостового крана, что позволяет точнее согласовать движение сторон крана и, как следствие, уменьшить износ этого оборудования.

Под «мелкими» возмущениями подразумеваются моменты сопротивления, возникающие 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. Устранить воздействие указанных механических возмущений на электромеханическую систему невозможно, однако уменьшить их влияние на срок службы оборудования крана можно, если электропривод будет работать в какой-то мере инвариантно к указанным возмущениям.

Система должна самоподстраиваться под возмущения, и чем ниже будет уровень возмущающих моментов  $\Delta M_1$  и  $\Delta M_2$ , которые способен обрабатывать ВЭП, тем лучше. Указанные возмущения могут быть нейтрализованы при изменении электромагнитного момента каждого двигателя, который в случае питания привода от ИТ можно считать независимой функцией управления через ослабленный коэффициент электромеханической связи  $k_{эс}$  – комплексный коэффициент, связывающий электромеханические процессы изменения момента двигателя с механическими процессами в валопроводе. Для определения коэффициента были выявлены факторы, влияющие на появление незатухающих колебаний в  $M_{12}$ .

Чем меньше значение  $k_{эс}$ , тем слабее связаны между собой указанные выше процессы. Равенство же нулю этого коэффициента, конечно в случае идеального ИТ, позволяет считать, что увеличение собственной (свободной) частоты колебаний каждого канала электромеханической системы снижает степень электромеханической 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 усиливает электромеханическую связь (обмен энергией между инерционностями двигателя и механическими массами), а при питании от ИТ, наоборот, резко падает жесткость механической характеристики и колебания скорости не влияют на колебания момента (он зависит только от управлений). Электромеханическую связь ИТ делает предельно слабой, поэтому колебания, возникающие в механической части ВЭП ( $M'_{12}$ ,  $M''_{12}$ ), не вызывают существенных колебаний выходного тока  $i_d$  ТПВП, а лишь перераспределяют его между якорными цепями двигателей. Поглощение энергии механических колебаний каждого валопровода якорными цепями приводных двигателей, а тем более отвод ее в питающую сеть через нерегулируемый ТПВП практически отсутствует, следовательно, демпфирование колебаний электроприводами ослабляется до пренебрежимо малой степени, т.е. система получает возможность самоподстраиваться не за счет внутрен-

него перераспределения колебательной энергии между отдельными электроприводами (которая иногда приводит даже к «раскачиванию» системы), а за счет принудительного подавления этих колебаний энергией источника (преобразователя) тока.

Для проверки вышеприведенных теоретических выводов было выполнено моделирование двухдвигательного ВЭП с использованием компьютерной среды Matlab / SimPowerSystems: модель с питанием от ИТ (ПИТ с шестипульсным выпрямителем на выходе); модель ВЭП с теми же параметрами, но при питании от ИН (регулируемого тиристорного преобразователя с задатчиком интенсивности пуска); упругие связи и люфтовые соединения в механической части ВЭП были смоделированы подсистемой Mechanizm.

На рис. 2 и 3 показаны диаграммы скорости  $\omega$ , тока якоря  $I_{я}$  и момента  $M$  первого и второго двигателей с независимым возбуждением типа Д-32 (12 кВт; 220 В;  $\omega_H = 80,6$  рад/с;  $I_{яH} = 65$  А;  $I_{вH} = 1,6$  А) на этапе пуска ВЭП при питании, соответственно, от ИТ и ИН. При моделировании была принята реактивная возмущающая нагрузка, изменяющаяся по синусоидальному закону (положительный полупериод), с частотой 12 Гц и амплитудой  $\Delta M_1 = \Delta M_2 = 0,5M_H = 75$  Н·м, прилагаемая поочередно к каждому валопроводу. Механические параметры обеих систем приняты следующими: люфт от  $-0,08$  до  $+0,08$ , коэффициент жесткости  $c_{12} = 5 \cdot 10^9$ .

На рис. 2 начальные низкочастотные затухающие колебания обусловлены переходными процессами в LC-цепях параметрического ИТ при его подключении к сети, а на рис. 3 начальные колебания тока и момента сравнительно высокой частоты связаны с режимом разрывных токов собственно тиристорного преобразователя (Subsystem) со сглаживающим реактором (Series RLC Branch 1) в цепи постоянного тока. Система привода разомкнута,

поэтому в момент времени  $t = 1$  с при снятии задания на напряжение преобразователя наблюдается излом на диаграммах тока и момента.

Следует отметить, что участок начального колебания момента (рис. 2) при питании от ИТ может быть полностью устранен за счет незначительной задержки (несколько секунд) подачи напряжения на обмотки возбуждения двигателей при первом включении ВЭП. При питании же от ИН устранить начальные колебания момента невозможно, так как режим разрывных токов в тиристорном преобразователе при больших углах регулирования, как известно, наблюдается всегда. Указанное обстоятельство является дополнительным недостатком традиционной системы питания ВЭП по сравнению с токовой.

Для получения количественных характеристик изменения коэффициента электромеханической связи в зависимости от частоты возмущающих воздействий, а также для оценки значения упругих моментов в ВЭП, выполненном на базе наиболее часто применяющихся в краностроительной промышленности двигателей средней мощности типа Д-32 (16 кВт, 220 В, 85 А, 1230 об/мин), рассчитаем указанную двухмассовую систему с питанием от ИН и ИТ с использованием компьютерной программы Matcad-2000 при значениях коэффициентов жесткости и люфта, указанных выше. Значения коэффициентов электромеханической связи определяем в диапазоне частот 0–3 Гц механических возмущений, в основном преобладающих, например, в ЭП перемещения моста крана из-за трения-качения и трения-скольжения в различных узлах кинематической цепи привода.

Расчеты показывают, что при питании от ИН модуль упругого момента  $M$  в валопроводе плавно снижается за счет демпфирования колебаний электроприводом, при питании же от ИТ такое демпфирование отсутствует.

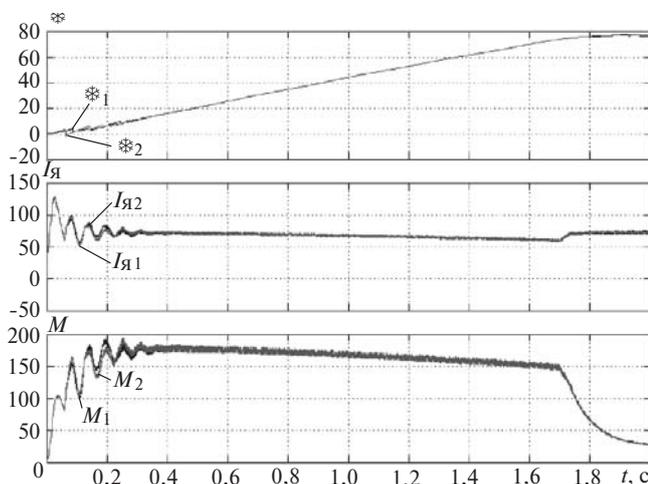


Рис. 2

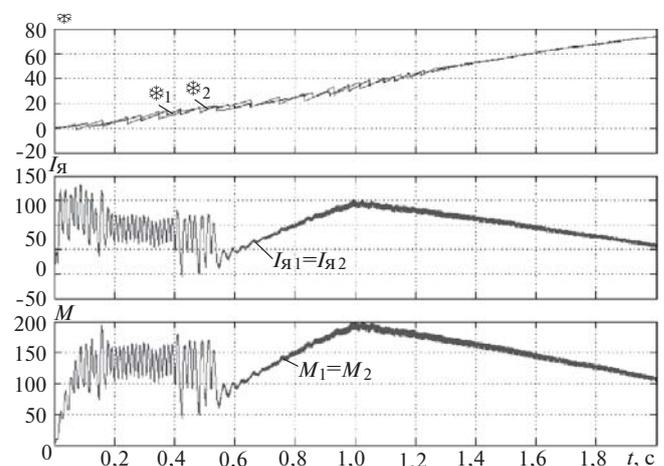


Рис. 3

При этом в начальный момент времени отношение амплитуд упругих моментов в ЭМС с питанием от ИН примерно в 6 раз больше, чем при питании от ИТ. Это объясняется увеличением частоты упругих колебаний валопроводов примерно в 1,5 раза.

**Выводы.** 1. Диаграммы скорости свидетельствуют о том, что частота электромеханических колебаний ВЭП при питании от ИТ выше, чем при питании от ИН, а их амплитуда существенно ниже. При любых других механических параметрах системы наблюдается та же тенденция. Это указывает на возможность получения более качественного согласования скоростей во взаимосвязанном через механическое оборудование двигателем электроприводе.

2. Приведенные в статье теоретические результаты обосновывают новую концепцию построения электроприводов согласованного вращения, позволяющую полностью исключить контуры обратных связей по скорости или положению с целью коррекции траектории движения при воздействии возмущений. Для этого указанный класс электроприводов должен получать питание от одного преобразователя с «токовой» внешней характеристикой, при этом согласование скоростей электродвигателей осуществляется за счет мощности преобразователя, подводимой к каждому двигателю, что обеспечивается благодаря автоматическому и достаточно быстрому перераспределению якорных токов.

3. Восьмилетний опыт практической эксплуатации ВЭП механизма перемещения мостового крана с питанием двигателей от преобразователя на базе параметрического ИТ, работающего в одном из прокатных цехов ОАО «Алчевский металлургический комбинат», показал межремонтный цикл по ходовой части крана возрос почти в 2 раза. Увеличение ресурса различных узлов кинематической цепи ВЭП объясняется существенным снижением амплитуд упругих моментов, что обязательно приводит к уменьшению рывков и ударов в механических узлах привода.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гарцман С.Д., Жуков А.А., Каретный З.П., А.А.Филатов А.А. Снижение динамических нагрузок и повышение долговечности мостовых кранов. – Сталь, 1999, № 3.
2. Лабунцов В.А., Обухов С.Г., Чаплыгин Е.Е., Мендыбаев А.А. Токопараметрические вентильные преобразователи. – Электротехническая промышленность. Преобразовательная техника, 1980, вып.1 (120).
3. Жевержеев В.Ф., Кальницкий Л.А., Сапогов Н.А. Специальный курс математики для вузов. – М.: Высшая школа, 1970.
4. Ключев В.И. Ограничение динамических нагрузок электропривода. – М.: Энергия, 1971.

[06.07.11]

Автор: *Калюжный Сергей Владимирович* окончил в 1997 г. факультет «Автоматизация производ-

ственных процессов» ДонГТУ (Украина, г. Алчевск). Аспирант кафедры «Автоматизированные электро-механические системы» ДонГТУ.