

УДК 621.314

Методика анализа электромагнитных процессов энергоподсистемы электропривода постоянного тока в режиме рекуперации

В.С. Томасов, П.А. Борисов, Н.А. Поляков

ФГБОУВПО «Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики», г. Санкт-Петербург, Российская Федерация
E-mail: borisov@ets.ifmo.ru

Авторское резюме

Состояние вопроса: При построении энергоподсистем замкнутых систем электропривода с двусторонним обменом энергией актуальными являются вопросы определения их структуры и параметров элементов, обеспечивающих эффективный способ использования энергии рекуперации.

Материалы и методы: Анализ электромагнитных и энергетических процессов в энергоподсистеме замкнутой системы электропривода ШИП-ДПТ в предельных динамических режимах работы выполнен на основе методики, использующей диаграмму нагрузки электропривода в области располагаемых моментов и скоростей. Моделирование электропривода постоянного тока проведено в пакете MATLAB/Simulink.

Результаты: Приводятся расчетные соотношения для определения энергии рекуперации в замкнутой системе электропривода при гармоническом входном сигнале и электромагнитных нагрузок на силовой фильтр при различных уровнях токоограничения в системе и соотношениях энергии, запасаемой в конденсаторе силового фильтра, и кинетической энергии вращающихся масс.

Выводы: Использование полученных результатов позволяет определить требования к конденсатору силового фильтра и всей энергоподсистеме замкнутой системы электропривода.

Ключевые слова: замкнутая система электропривода, конденсатор силового фильтра, токоограничение, электромагнитные нагрузки, энергия рекуперации, энергоподсистема.

Techniques of analysis of DC drive power subsystem electromagnetic processes in recuperation mode

V.S. Tomasov, P.A. Borisov, N.A. Polyakov

St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics,
St. Petersburg, Russian Federation
E-mail: borisov@ets.ifmo.ru

Abstract

Background: One of the most urgent problems of designing power subsystems of closed loop electric drives with a two-way energy exchange is determining their structure and component parameters ensuring effective use of recuperation energy.

Materials and methods: Analysis of power and electromagnetic processes in the power subsystem of a closed loop system of a DC drive with a PWM converter in extreme dynamic operation modes is conducted by the method using a drive load diagram within the possible speed and torque domain. The simulation of the electromechanical system was made in the MATLAB/Simulink software package.

Results: The paper describes equations for calculating the recuperation energy in the electric drive closed loop system in the harmonic wave input signal mode and the electromagnetic load on the power filter at different current limitation levels and different ratios of the energy accumulated in the power filter capacitor to the kinetic energy of gyrating mass.

Conclusions: The derived equations make it possible to determine the requirements for the power filter capacitor and other parts of a power subsystem of an electric drive closed loop system.

Key words: electric drive closed loop system, power filter capacitor, current limitation, electromagnetic loads, recuperation energy, power subsystem.

Введение. Энергоподсистема современных высокоэффективных электроприводов постоянного тока (ЭППТ) осуществляет, в зависимости от состава оборудования, одно- или двусторонний обмен энергией между источником питания и электрической машиной, определяя предельные динамические возможности электропривода. Информационная подсистема электропривода включает в себя устройство управления полупроводниковым преобразователем с информационно-измерительной ча-

стью и осуществляет реализацию заданного алгоритма регулирования координат электропривода, обеспечивая работу привода в диапазоне моментов, скоростей и ускорений, заложенных в энергоподсистеме [1].

Следует отметить, что для рассматриваемых систем электропривода с транзисторным инвертором в качестве усилителя мощности решающим фактором при расчете и выборе состава оборудования энергоподсистемы и его параметров является не требование сглажива-

ния пульсаций в выпрямленном напряжении, а прием энергии рекуперации вращающихся масс в тормозных режимах работы замкнутой системы электропривода [1–4].

Наиболее тяжелые условия работы сетевого модуля возникают в замкнутых по току и скорости следящих приводах при питании энергоподсистемы от сети переменного тока с последующим выпрямлением вследствие односторонней проводимости выпрямительных схем [2–4]. В таких системах на этапах торможения двигателя постоянного тока (ДПТ) возникают интервалы рекуперации энергии вращающихся масс в питающую сеть постоянного тока. При этом необходимо учитывать, что часть этой энергии рассеивается на сопротивлении якоря ДПТ, и чем больше сопротивление якорной обмотки ДПТ и чем меньше его противоЭДС, тем меньшее количество энергии рекуперуется в звено постоянного тока (ЗПТ).

Для обеспечения безопасной работы всей системы электропривода и реализации эффективных режимов торможения, должен быть гарантирован отвод оставшейся части энергии торможения. Возможны несколько вариантов отвода этой энергии при различных структурах поперечной ветви энергоподсистемы [2–5]:

- возврат энергии в конденсаторы поперечных ветвей энергоподсистемы;
- преобразование электрической энергии торможения в тепло (тормозное или балластное сопротивление);
- частичный возврат энергии в конденсатор поперечной ветви энергоподсистемы и преобразование оставшейся части энергии в тепло (совместная установка конденсаторов и тормозного сопротивления);
- возврат в питающую сеть переменного тока (инвертор рекуперации на полностью управляемых приборах);
- обмен энергией при многокоординатном исполнении (использование энергии торможения электромашиной другой оси).

Ниже предлагается методика определения энергии рекуперации в замкнутой системе электропривода с обратимым инвертором напряжения в режиме гармонического входного сигнала и расчета электромагнитных нагрузок на конденсатор поперечной ветви энергоподсистемы при различных уровнях токоограничения в системе и соотношениях энергоемкостей ДПТ и конденсатора

Методика анализа электромагнитных процессов в энергоподсистеме. Режим движения следящего вала по гармоническому закону [6] – характерный режим работы систем электропривода с ШИП, при котором величина тока нагрузки может изменяться в широких пределах – от тока $I_{ст}$, обусловленного статическим моментом нагрузки на валу $M_{ст}$, до тока I_0 , определяемого величиной токоограничения.

Величина токоограничения обусловлена электромагнитными нагрузками на элементы энергоподсистемы. Это позволяет уменьшить потери в якоре машины и мощность установленного коммутирующего оборудования ШИП.

Для придания методике универсальности введем следующие базовые величины: $\Omega_B = \Omega_{XX}$ – угловая частота вращения; $E_B = U_B = c'_E \Omega_{XX}$ – напряжение; $I_B = I_{кз} = U_B / r_{я}$ – ток якоря; $M_B = c'_M I_{кз}$ – момент нагрузки; $P_B = U_B I_B$ – мощность; $W_{max} = W_B = J_{\Sigma} \Omega_B^2 / 2$ – энергия; $T_M = J_{\Sigma} \Omega_B / M_B$ – электромеханическая постоянная времени ДПТ; J_{Σ} – приведенный момент инерции ДПТ с нагрузкой; $r_{я}$ – сопротивление обмотки якоря; c'_M и c'_E – конструктивные коэффициенты ДПТ.

Для анализа энергетических процессов электропривода в предельных динамических режимах работы удобно воспользоваться методикой, использующей диаграмму нагрузки привода в области располагаемых моментов и скоростей. Диаграмма нагрузки привода – это зависимость требуемого момента на валу двигателя $M_{тр}$ от требуемой скорости $\Omega_{тр}$. Для исследования электромагнитных процессов в энергоподсистеме целесообразно перейти к диаграмме нагрузки как зависимости требуемого тока $I_{тр}$ от требуемой скорости на валу исполнительной машины $\Omega_{тр}$. В рассматриваемой нами системе эти зависимости имеют следующий вид:

$$\begin{cases} \Omega_{тр}(t) = \Omega_m \cos \omega_{3АД} t, \\ I_{тр}(t) = -I_m \sin \omega_{3АД} t, \end{cases} \quad (1)$$

где $\omega_{3АД}$ – угловая частота колебаний выходного вала, которую должен обеспечить привод. Знак минус при токе далее опускается.

Диаграммы нагрузки двух предельных режимов работы электропривода в области располагаемых токов и скоростей при отсутствии шарнирного и статического моментов, изображены на рис. 1.

Если диаграмма нагрузки лежит всеми точками внутри области располагаемых токов и скоростей, то справедливы [7] следующие выражения:

$$\Omega_{mI} \leq \Omega_{m.пред.I} = \frac{\varepsilon_{max}}{\omega_{3АД}}; \quad (2)$$

$$\Omega_{mII} \leq \Omega_{m.пред.II} = \frac{\Omega_{XX}}{\sqrt{T_M^2 \omega_{3АД}^2 + 1}}, \quad (3)$$

где $\varepsilon_{max} = \Omega_{XX} I_0 / T_M$ – максимальное ускорение следящего вала.

С увеличением амплитуды входного сигнала пропорционально увеличиваются обе полуоси эллипса нагрузки (рис. 1), который при некоторой величине задающего сигнала касается границы области располагаемых токов и скоростей. При данных параметрах ЭППТ не-

возможно обеспечить значение скорости больше $\Omega_{m.пред.}$

Интервал рекуперации начинается с момента изменения направления среднего тока в якоре ДПТ и заканчивается при выполнении условия

$$c'_E \Omega_{ТР}(t) = r_{Я} I_{ТР}(t). \quad (4)$$

В области располагаемых токов и скоростей условию (4) соответствует прямая линия, разделяющая зоны двигательного и генераторного режимов работы ДПТ, наклон которой зависит от параметров ДПТ c'_E и $r_{Я}$.

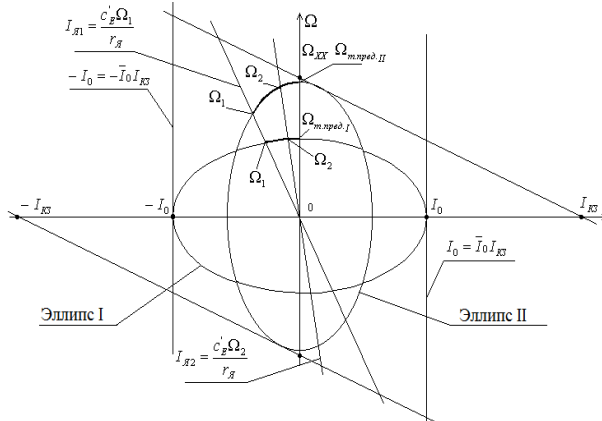


Рис. 1. Диаграмма нагрузки электропривода

Пересечение этой линии с эллипсами нагрузки определяет момент окончания интервала рекуперации, поэтому время рекуперации можно найти решением системы из уравнений (1) и (4). В результате имеем

$$c'_E \Omega_m \cos \omega_{Зад} t_{РЕК} = r_{Я} I_m \sin \omega_{Зад} t_{РЕК}. \quad (5)$$

Время рекуперации $t_{РЕК}$ соответствует углу между осью ординат Ω и прямой, удовлетворяющей условию (4), и одинаково для обеих зависимостей предельных скоростей от частоты. Следовательно, уравнение (5) достаточно решить для $\Omega_{m.пред.I}$ и $I_m = I_0$:

$$t_{РЕК} = \frac{1}{\omega_{Зад}} \arctg \frac{c'_E \Omega_{XX}}{T_M \omega_{Зад} r_{Я} I_{кз}} = \frac{1}{\omega_{Зад}} \arctg \frac{1}{T_M \omega_{Зад}}. \quad (6)$$

Обозначив $\bar{t}_{РЕК} = t_{РЕК} \omega_{Зад}$ и $\bar{\omega} = T_M \omega_{Зад}$, уравнение (6) запишем в виде

$$\bar{t}_{РЕК} = \arctg \bar{\omega}^{-1}. \quad (7)$$

Из уравнения (6) следует, что время рекуперации зависит как от параметров ДПТ, так и от частоты задающего воздействия, но не зависит от амплитуды входного сигнала, так как длины дуг эллипсов от Ω_m до Ω_k при различных амплитудах входного сигнала лежат внутри одного угла, образованного осью ординат и прямой $I_{Я} = c'_E \Omega / r_{Я}$.

Следует отметить, что для моментных машин характерны относительно высокие значения $r_{Я}$ и низкие значения c'_E . Это приводит к

уменьшению угла наклона прямой $I_{Я} = c'_E \Omega / r_{Я}$ к оси ординат Ω и, следовательно, к уменьшению $t_{РЕК}$, а иногда и полному отсутствию режима рекуперации [8].

Для определения величины рекуперированной энергии вращающихся масс необходимо знать значения скоростей на начало и конец интервала рекуперации для двух зависимостей предельных скоростей от частоты задающего воздействия (2) и (3). Суммарная энергия, рассеиваемая в якорной цепи машины и рекуперированная в емкость силового фильтра (СФ) на интервале торможения, определяется из соотношений:

$$W_{пред.I} = \frac{J_{\Sigma} (\Omega_{m.пред.I}^2 - \Omega_{кI}^2)}{2}; \quad (8)$$

$$W_{пред.II} = \frac{J_{\Sigma} (\Omega_{m.пред.II}^2 - \Omega_{кII}^2)}{2}, \quad (9)$$

где

$$\Omega_{кI} = \Omega_{m.пред.I} \cos(\bar{t}_{РЕК}); \quad (10)$$

$$\Omega_{кII} = \Omega_{m.пред.II} \cos(\bar{t}_{РЕК}). \quad (11)$$

Если энергию рекуперации отнести к максимально возможному ее значению W_B , то с учетом (7), (10), (11) и того, что при положительных аргументах $\arctg(a) = \arcsin(a / \sqrt{1+a^2})$ и $\sin(\arcsin(a)) = a$, уравнения (8) и (9) можно переписать в следующем виде:

$$\bar{W}_{пред.I} = \frac{\bar{I}_0^2}{(\bar{\omega}^2 + 1) \cdot \bar{\omega}^2}, \quad (12)$$

$$\bar{W}_{пред.II} = \frac{1}{(\bar{\omega}^2 + 1)^2}. \quad (13)$$

Кинетическая энергия вращающихся масс за время рекуперации рассеивается в якорной цепи машины и заряжает емкость силового фильтра, т.е. является суммой двух составляющих в соответствии с выражением

$$W_{РЕК} = W_{ЯК} + W_C, \quad (14)$$

где

$$W_C = \left(\frac{C_{\Phi} U_{Cmax}^2}{2} - \frac{C_{\Phi} U_0^2}{2} \right) = \frac{C_{\Phi} U_0^2}{2} \left[\left(\frac{U_{Cmax}}{U_0} \right)^2 - 1 \right], \quad (15)$$

Для первого предельного режима (рис. 1, эллипс I), когда ускорение ограничивается уставкой контура тока \bar{I}_0 и ток может достигать значения I_0 , величину рассеиваемой в цепи якоря энергии можно определить как

$$W_{ЯК.I} = \int_0^{\bar{t}_{РЕК}} r_{Я} \bar{I}_0^2 \sin^2(\omega_{Зад} t) dt = \frac{r_{Я} \bar{I}_0^2}{\omega_{Зад}} \left(\frac{\omega_{Зад} \bar{t}_{РЕК}}{2} - \frac{\sin 2\omega_{Зад} \bar{t}_{РЕК}}{4} \right). \quad (16)$$

Учитывая соотношение (6), а также то, что при положительных аргументах $\arctg(a) = \arcsin(a/\sqrt{1+a^2}) = \arccos(1/\sqrt{1+a^2})$ и $\sin(\arcsin(a)) = a$, выражение (16) приведем к виду

$$W_{ЯК.I} = \bar{I}_0^2 \frac{J_\Sigma \Omega_{XX}^2}{2} \left(\frac{\arctg \bar{\omega}^{-1}}{\bar{\omega}} - \frac{1}{\bar{\omega}^2 + 1} \right). \quad (17)$$

Вводя обозначение

$$\beta_W = \frac{J_\Sigma \Omega_{XX}^2}{C_\Phi U_0^2} = \eta_{ДПТ} \frac{T_M}{\tau_{CR}},$$

где $\tau_{CR} = r_{Я} C_\Phi$, и решая совместно уравнения (12), (14), (15), (17), получим выражение для относительного напряжения на конденсаторе СФ для первого предельного режима:

$$\bar{U}_{C_I} = \frac{U_{C_{maxI}}}{U_0} = \sqrt{\beta_W \left(\frac{1 - \bar{\omega} \arctg \bar{\omega}^{-1}}{\bar{\omega}^2} \right)} + 1. \quad (18)$$

Для второго предельного режима (рис. 1, эллипс II) ток при чисто инерционной нагрузке может быть определен из уравнения движения ДПТ:

$$J_\Sigma \frac{d(\Omega_{mII} \cos \omega_{3АД} t)}{dt} = c'_M i_{ЯII}. \quad (19)$$

Учитывая (3), получим

$$i_{ЯII} = I_{mII} \sin \omega_{3АД} t, \quad (20)$$

$$I_{mII} = \frac{J_\Sigma \Omega_{XX} \omega_{3АД}}{c'_M \sqrt{T_M^2 \omega_{3АД}^2 + 1}} = I_{кЗ} \frac{\bar{\omega}}{\sqrt{\bar{\omega}^2 + 1}}. \quad (21)$$

Тогда величина энергии, рассеиваемой в якорной цепи, определится как

$$W_{ЯК.II} = \int_0^{t_{РЕК}} r_{Я} I_{mII}^2 \sin^2(\omega_{3АД} t) dt = \frac{r_{Я} I_{mII}^2}{\omega_{3АД}} \left(\frac{\omega_{3АД} t_{РЕК}}{2} - \frac{\sin 2\omega_{3АД} t_{РЕК}}{4} \right). \quad (22)$$

Учитывая соотношение (6), а также то, что при положительных аргументах $\arctg(a) = \arcsin(a/\sqrt{1+a^2}) = \arccos(1/\sqrt{1+a^2})$ и $\sin(\arcsin(a)) = a$, выражение (22) приведем к виду

$$W_{ЯК.II} = \frac{J_\Sigma \Omega_{XX}^2}{2} \left(\frac{\bar{\omega} \cdot \arctg \bar{\omega}^{-1} (\bar{\omega}^2 + 1) - \bar{\omega}^{-2}}{(\bar{\omega}^2 + 1)^2} \right). \quad (23)$$

Решая совместно уравнения (13), (14), (15), (23), получим выражение для относительного напряжения на конденсаторе СФ для второго предельного режима:

$$\bar{U}_{C_{II}} = \frac{U_{C_{maxII}}}{U_0} = \sqrt{\beta_W \left(\frac{1 - \bar{\omega} \cdot \arctg \bar{\omega}^{-1}}{\bar{\omega}^2 + 1} \right)} + 1. \quad (24)$$

Построив на одной диаграмме зависимости (18), (24), получим результирующую зависимость $\bar{U}_C = f(\bar{\omega}, \beta_W)$ при различных уровнях ограничения тока в системе \bar{I}_0 (рис. 2).

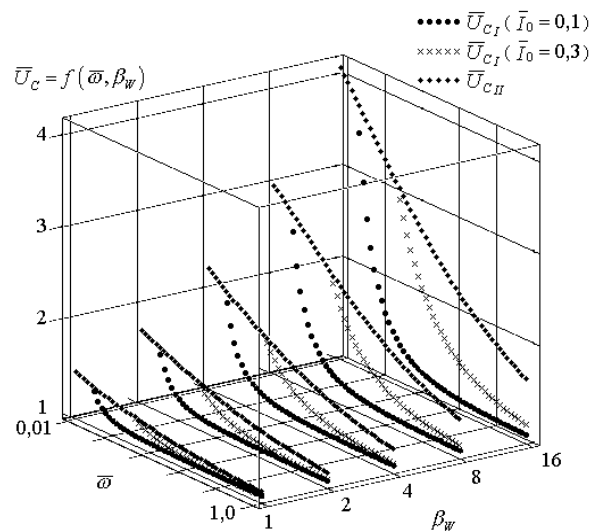


Рис. 2. Диаграмма зависимости относительных значений напряжения на конденсаторе СФ от параметров системы электропривода

Выражения (18), (24) позволяют удовлетворить требования к условиям эксплуатации конденсатора СФ и определить предельное напряжение, на которое его необходимо выбрать.

Отметим, что при любых уровнях токоограничения и соотношениях между энергоемкостью ДПТ и конденсатора СФ за частотой $\bar{\omega} = 1$ величина относительного напряжения на конденсаторе СФ практически равна единице.

У современных машин постоянного тока, управляемых по цепи якоря от транзисторных ШИП, электромеханическая постоянная времени лежит в пределах 0,005–0,1 с. При $\bar{\omega} = 1$ абсолютное значение частоты изменения входного сигнала $\omega_{3АД}$ лежит в пределах 200–10 рад/с.

Поскольку частота низкочастотной составляющей тока питания вдвое превышает частоту входного воздействия, то на конденсатор СФ в реальных системах воздействует ток питания с частотой 400–20 рад/с ($f = 60$ –3 Гц), и определять допустимый уровень пульсаций на конденсаторе поперечной ветви СФ необходимо на этих частотах. Расчет регуляторов скоростной системы подчиненного регулирования производится по известным методикам [1, 7]

Для моделирования выбран двигатель серии ПБВ-100М со следующими основными техническими данными: номинальный момент $M_H = 7,16$ Н·м; номинальная частота вращения $n = 1000$ об/мин; частота вращения холостого хода $n_{XX} = 1083$ об/мин; напряжение питания $U_H = 52$ В; номинальный ток $I_H = 18$ А; сопротивление обмотки якоря $r_{Я} = 0,22$ Ом; $c'_E = 0,46$; $c'_M = 0,4$. Принято: $T_M = 0,01$ с, $f_{3АД} = 2,5$ Гц, $\omega_{3АД} = 15,71$ рад/с, $\bar{\omega} = 0,157$. Тогда, согласно (8), $t_{РЕК} = 0,09$ с.

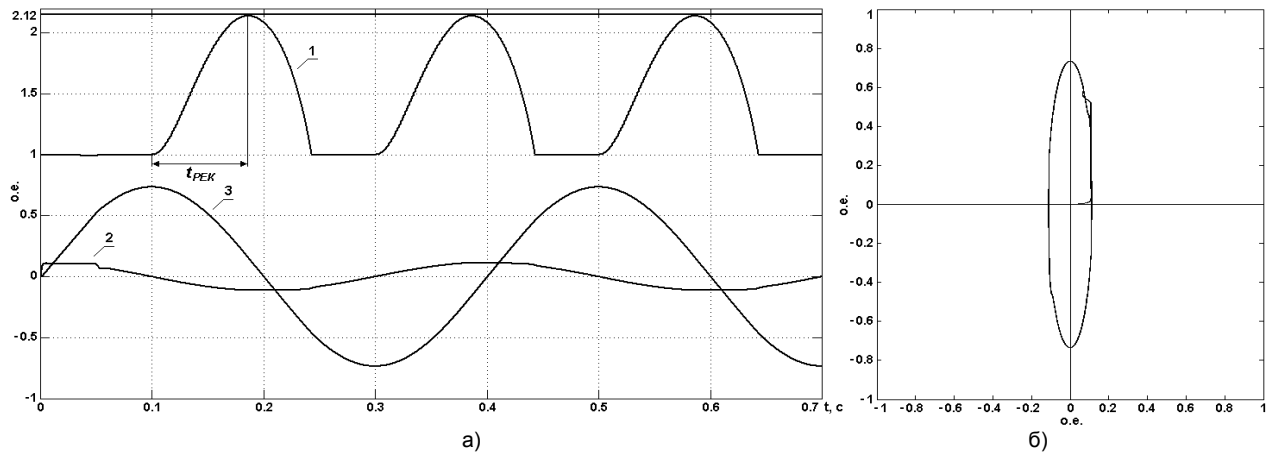


Рис. 3. Результаты моделирования ЗС ЭППТ с ШИП на базе машины ПБВ для первого предельного режима: а – осциллограммы (о.е.): 1 – напряжения на конденсаторе СФ ЗПТ \bar{u}_C ; 2 – тока якоря $\bar{i}_Я$; 3 – скорости $\bar{\Omega}$ в ЗС ЭППТ; б – диаграмма нагрузки электропривода (о.е.): по оси абсцисс – ток якоря $\bar{i}_Я$; по оси ординат – скорость $\bar{\Omega}$

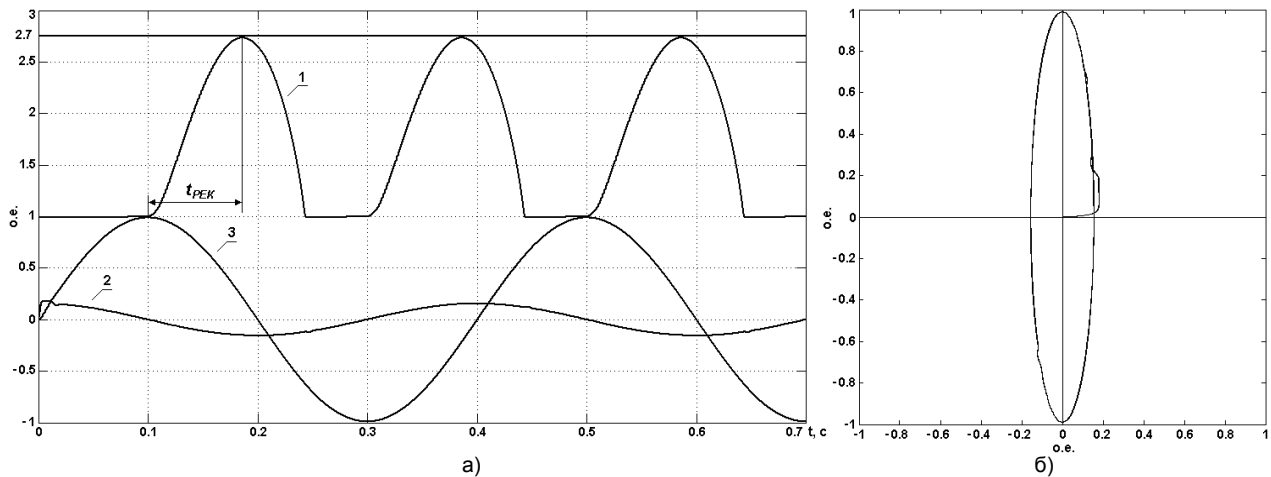


Рис. 4. Результаты моделирования ЗС ЭППТ с ШИП на базе машины ПБВ-100М для второго предельного режима: а – осциллограммы (о.е.): 1 – напряжения на конденсаторе СФ ЗПТ \bar{u}_C ; 2 – тока якоря $\bar{i}_Я$; 3 – скорости $\bar{\Omega}$ в ЗС ЭППТ; б – диаграмма нагрузки электропривода (о.е.): по оси абсцисс – ток якоря $\bar{i}_Я$; по оси ординат – скорость $\bar{\Omega}$

Исходя из условия обеспечения высоко-частотных коммутационных процессов в широтно-импульсном преобразователе выберем значение емкости конденсатора СФ = 0,0047 Ф, тогда β_W составит 8,32.

Зададим уровень ограничения тока якоря $I_0 = 1,5I_H$ для первого предельного режима (рис. 1, эллипс I), когда ускорение ограничивается уставкой контура тока $\bar{i}_0 = 0,115$. В этом случае максимальная амплитуда сигнала задания для контура скорости, согласно (2), $\Omega_{ml} = 83,24$ рад/с или в о.е. $\bar{\Omega}_{ml} = 0,734$. При выбранном значении емкости конденсатора СФ и β_W , согласно (18), $\bar{U}_{C_I} = 2,12$. Для второго предельного режима (рис. 1, эллипс II) амплитуда сигнала задания для контура скорости, согласно (3), $\Omega_{mlII} = 112,06$ рад/с или в о.е. $\bar{\Omega}_{mlII} = 0,988$, а $\bar{U}_{C_{II}} = 2,7$ согласно (24). При этом уровень ограничения тока якоря должен быть не менее

$I_0 = 2,05I_H$ или в о.е. $\bar{i}_0 = 0,16$, иначе ЗС электропривода не обеспечит заданный режим работы.

Результаты моделирования ЗС ЭППТ с ШИП в пакете MATLAB/Simulink на базе машины ПБВ-100М при движении следящего вала по гармоническому закону с токоограничением приведены в виде осциллограмм электро-механических и электромагнитных процессов и диаграмм нагрузки электропривода (относительно базовых величин): на рис. 3 – для первого предельного режима; на рис. 4 – для второго предельного режима. В моделируемом ДПТ в предельных режимах на участке рекуперации напряжения на конденсаторе в ЗПТ составляют $2,12U_B$ и $2,7U_B$.

Заключение

Для определения электромагнитных нагрузок на элементы энергоподсистемы электропривода постоянного тока на базе транзисторного широтно-импульсного преобразова-

теля может быть применена методика, использующая диаграмму нагрузки привода в области располагаемых моментов и скоростей. Предлагаемая методика позволяет на основании оценки величины перенапряжений на конденсаторе в двух предельных режимах работы электропривода при гармоническом входном сигнале и различных уровнях токоограничения в системе определить требования к конденсатору СФ и всей энергоподсистеме из условия неперевышения на нем допустимого уровня пульсаций во всем диапазоне частот, воспроизводимых током питания ШИП.

Список литературы

1. **Сабинин Ю.А.** Позиционные и следящие электромеханические системы: учеб. пособие для вузов. – СПб.: Энергоатомиздат, 2001. – 208 с.
2. **Глазенок Т.А., Томасов В.С.** Состояние и перспективы применения полупроводниковых преобразователей в приборостроении // Изв. вузов. Приборостроение. – СПб.: СПбГУ ИТМО, 1996. – Т. 39. – № 3. – С. 5–10.
3. **Синицын В.А., Томасов В.С.** Энергоподсистема следящих приводов измерительных телескопов // Изв. вузов. Приборостроение. – СПб.: СПбГУ ИТМО, 2009. – Т. 51. – № 6. – С. 12–17.
4. **Томасов В.С., Серебряков С.А., Борисов П.А.** Электромагнитные процессы в силовой цепи источника питания транзисторного ШИП, работающего в замкнутой системе электропривода // Изв. вузов. Приборостроение. – СПб.: СПбГУ ИТМО, 2002. – Т. 45. – № 6. – С. 42–50.
5. **SEW Eurodrive.** Практика приводной техники. – 1996. – Т. 7.
6. **Глазенок Т.А., Томасов В.С.** Особенности расчета силовых фильтров следящих систем электропривода ШИП-ДПТ // Электропривод и автоматизация в машиностроении: межвуз. сб. – М., 1976. – С. 30–38.
7. **Л.В. Рабинович, Б.И. Петров, В.Г. Терсков и др.** – М.: Машиностроение, 1969. – 500 с.
8. **Томасов В.С., Синицын В.А., Борисов П.А.** Исследование электромагнитных процессов в энергетическом

канале замкнутой системы электропривода постоянного тока // Изв. вузов. Приборостроение. – СПб.: СПбГУ ИТМО, 2004. – Т. 47. – № 11.

References

1. Sabinin, Yu.A. *Pozitsionnye i sledyashchie elektromekhanicheskie sistemy* [Positioning and tracking electromechanical systems]. Saint-Petersburg, Energoatomizdat, 2001. 208 p.
2. Glazenko, T.A., Tomasov, V.S. *Sostoyanie i perspektivy primeneniya poluprovodnikovyykh preobrazovateley v priborostroenii* [Results and prospects of applying semiconductor converters in instrument making industry]. *Izvestiya vuzov. Priborostroenie*. Saint-Petersburg, SPbGU ITMO, 1996, vol. 39, no. 3, pp. 5–10.
3. Sinitsyn, V.A., Tomasov, V.S. *Energopodsystema sledyashchikh privodov izmeritel'nykh teleskopov* [Power sub-systems of measuring telescope servodrives]. *Izvestiya vuzov. Priborostroenie*. Saint-Petersburg, SPbGU ITMO, 2009, vol. 51, no. 3, pp. 12–17.
4. Tomasov, V.S., Serebryakov, S.A., Borisov, P.A. *Elektromagnitnye protsessy v silovoy tsepi istochnika pitaniya tranzistornogo SHIP, rabotayushchego v zamknutoy sisteme elektroprivoda* [Electromagnetic processes in the power supply circuit of the transistor PWM converter operating in an electrical drive closed loop system]. *Izvestiya vuzov. Priborostroenie*. Saint-Petersburg, SPbGU ITMO, 2002, vol. 45, no. 3, pp. 42–50.
5. SEW Eurodrive. *Praktika privodnoy tekhniki* [Drive Engineering], 1996, vol. 7.
6. Glazenko, T.A., Tomasov, V.S. *Osobennosti rascheta silovykh fil'trov sledyashchikh sistem elektroprivoda SHIP-DPT* [Power filter calculation for PWM DC servodrive systems]. *Mezhvuzovskiy sbornik «Elektroprivod i avtomatizatsiya v mashinostroenii»* [The interuniversity collection «Electric Drives and Automation in Mechanical Engineering»]. Moscow, 1976, pp. 30–38.
7. Rabinovich, L.V., Petrov, B.I., Terskov, V.G. *Proektirovanie sledyashchikh sistem* [Servodrive design]. Moscow, Mashinostroenie, 1969. 500 p.
8. Tomasov, V.S., Sinitsyn, V.A., Borisov, P.A. *Issledovanie elektromagnitnykh protsessov v energeticheskom kanale zamknutoy sistemy elektroprivoda postoyannogo toka* [The study of electromagnetic processes in the energy channels of closed-loop DC drive systems]. *Izvestiya vuzov. Priborostroenie*. Saint-Petersburg, SPbGU ITMO, 2004, vol. 47, no. 11.

Томасов Валентин Сергеевич,

Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики,
кандидат технических наук, заведующий кафедрой электротехники и прецизионных электромеханических систем,
телефон (812) 233-83-36,
e-mail: tomasov@ets.ifmo.ru

Борисов Павел Александрович,

Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики,
кандидат технических наук, доцент кафедры электротехники и прецизионных электромеханических систем,
телефон (812) 232-50-96,
e-mail: borisov@ets.ifmo.ru

Поляков Николай Александрович,

Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики,
аспирант кафедры электротехники и прецизионных электромеханических систем,
телефон (812) 232-50-96,
e-mail: polyakov.n.a@gmail.com