

**Комбинированное управление следящего электропривода  
с компенсацией ошибки по ускорению****С. В. Стельмашук**Комсомольский-на-Амуре государственный университет,  
Комсомольск-на-Амуре, Россия

rukdpv@rambler.ru

**Аннотация.** Представлена техническая реализация корректирующего устройства второго порядка комбинированного управления следящего электропривода с настройкой контура скорости на симметричный оптимум с фильтром и контура положения на модульный оптимум. Учтено влияние токоограничения и ограничения на сигнал управления на входе силового преобразователя. Представлена формула для определения оптимального передаточного числа редуктора, обеспечивающего достижение максимального угла поворота с нулевой ошибкой по ускорению с максимально допустимым моментом двигателя. Приведена формула для вычисления требуемой мощности электродвигателя. Следящие системы с компенсацией ошибки по ускорению актуальны в области робототехники, где необходимо перемещение по сложной траектории колес или схвата, а также для локаторов наведения.

**Ключевые слова:** корректирующее устройство, передаточное число редуктора, токоограничение, типовая настройка, компенсация интегрального насыщения

**Для цитирования:** Стельмашук С. В. Комбинированное управление следящего электропривода с компенсацией ошибки по ускорению // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2024. Т. 17, № 7. С. 75–82. doi: 10.32603/2071-8985-2024-17-7-75-82.

Original article

**Combined Control of a Tracking Electric Drive with Compensation  
for Acceleration Errors****S. V. Stelmashchuk**

Komsomolsk-na-Amure State University, Komsomolsk-na-Amure, Russia

rukdpv@rambler.ru

**Abstract.** This article presents the technical implementation of a second-order corrective device for combined control of a tracking electric drive with adjustment of the speed contour to a symmetrical optimum with a filter and the position contour to a modular optimum. The effect of current limitation and limitation on the control signal at the input of the power converter is taken into account. A formula for determining the optimal gear ratio of the gearbox is presented, which ensures achievement of the maximum angle of rotation with a zero-acceleration error and the maximum permissible engine torque. A formula for calculating the required power of an electric motor is given. Tracking systems with acceleration error compensation are relevant in the field of robotics, where it is necessary to move along a complex trajectory of wheels or grips, as well as for guidance locators.

**Keywords:** correction device, gear ratio, current limitation, typical setting, anti-windup

**For citation:** Stelmashchuk S. V. Combined Control of a Tracking Electric Drive with Compensation for Acceleration Errors // LETI Transactions on Electrical Engineering & Computer Science. 2024. Vol. 17, no. 7. P. 75–82. doi: 10.32603/2071-8985-2024-17-7-75-82.

**Введение.** Существует класс технических средств, работающих в режиме слежения при максимальном быстродействии и при соблюдении условия высокоточной обработки управляющего воздействия. К таким техническим средствам относятся радиолокаторы наведения [1], мобильные роботы с движением по заданной траектории при маневрировании на местности [2], [3] или в условиях вынужденной криволинейности траектории, например движения робота в трубопроводе [4]. Также актуально применение роботов-манипуляторов в комплексах трехмерной печати [5], для обработки сложных траекторий при распылении краски с ограничением скорости и ускорения [6] или лазерной сварки сложных изделий [7]. В этом случае актуально повышение динамической точности многокоординатных следящих электроприводов (СЭП) рассматриваемых технических средств, что возможно при устранении ошибок по скорости и по ускорению контура положения СЭП.

В классической литературе эта задача решается использованием комбинированного управления, реализуемого компенсирующим каналом по управлению в контуре положения при типовых настройках остальных контуров СЭП. Корректирующее устройство компенсирующего канала реализуется дифференцирующими звеньями высокого порядка, поэтому учитывают только те производные, которые позволяют повысить лишь астатизм СЭП. В результате для компенсации только скоростной ошибки СЭП достаточно реализовать корректирующее устройство в виде идеально дифференцирующего звена первого порядка, что технически просто реализуемо. Для компенсации не только ошибки по скорости, но и по ускорению необходимо корректирующее устройство более высокого порядка, что имеет отношение к трудностям технической реализации, и возникает дополнительная проблема, связанная с помехозащищенностью.

В качестве способа решения задачи устранения не только ошибки по скорости, но и по уско-

рению предлагается использовать комбинированное управление с цифровой системой управления, которая позволяет реализовывать дифференцирование любого порядка [2]. Также предлагается использовать астатический модальный регулятор с наблюдателем, позволяющий уменьшить ошибку по скорости и по ускорению при сохранении заданного быстродействия [3]. Наиболее перспективным направлением является использование многокаскадных нечетких регуляторов [8], с помощью которых добиваются лучших динамических характеристик по сравнению с классическими регуляторами.

Помимо трудностей технической реализации компенсатора ошибки необходимо рассмотреть еще один немаловажный вопрос: поведение СЭП с учетом ограничений на ток двигателя и на сигнал управления на входе силового преобразователя. В классической литературе и в различных научных статьях этому вопросу посвящено недостаточно внимания.

**Постановка задачи.** Структурная схема системы комбинированного управления СЭП в операторной форме преобразования Лапласа  $p$  представлена на рис. 1. Контур тока настраивается на модульный оптимум без учета влияния внутренней обратной связи двигателя. Контур скорости вала двигателя  $\omega$ , для компенсации ошибки угла вала рабочего органа  $\varphi$ , в различных источниках рассматривается с настройкой как на модульный оптимум, так и на симметричный оптимум. В рамках статьи предлагается настраивать контур скорости на симметричный оптимум с фильтром на входе контура. Такой подход при изменении момента нагрузки дает нулевую ошибку воспроизведения угла поворота рабочего органа  $e_{\text{п}}$ , определяемую как разность сигналов задания  $u_{3,\text{п}}$  и обратной связи  $u_{0,\text{п}}$  контура положения вала рабочего органа.

Тогда ПИ-регулятор скорости в линейном режиме

$$W_{\text{л.РС}}(p) = K_{\text{РС}} \frac{8T_{\mu}p + 1}{8T_{\mu}p}, \quad (1)$$

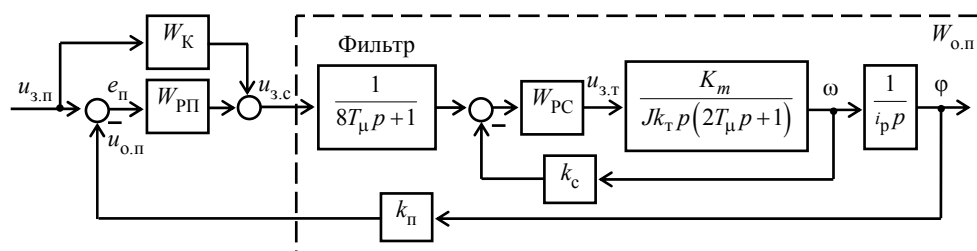


Рис. 1. Система комбинированного управления СЭП  
Fig. 1. Combined control system of the tracking electric drive

где  $K_{PC} = \frac{k_T J}{4T_\mu k_c K_m}$  – коэффициент усиления регулятора скорости;  $k_T$ ,  $k_c$  – коэффициенты усиления датчиков тока и скорости;  $T_\mu$  – некомпенсированная постоянная времени;  $J$  – суммарный момент инерции привода;  $K_m = M_H / I_H$  – коэффициент момента двигателя;  $M_H$ ,  $I_H$  – номинальные момент и ток двигателя.

ПИ-регулятор скорости действует при работе СЭП в линейном режиме. Для токоограничения на входе контура тока используется звено ограничения, а на входе силового преобразователя в контуре тока имеется естественное ограничение сигнала управления. При достижении граничных значений в одном из звеньев ограничения возникает эффект интегрального насыщения [9], которое свойственно настройке на симметричный оптимум и вызывает ухудшение динамических показателей качества СЭП. В этом случае СЭП работает в режиме насыщения.

Для устранения эффекта интегрального насыщения используются различные способы компенсации интегрального насыщения [10], связанные с изменением структуры ПИ-регулятора. В рамках статьи используется компенсация интегрального насыщения условным интегрированием, при котором выполняется запрет интегрирования в интегральном канале ПИ-регулятора скорости при достижении насыщения сигнала задания тока  $u_{3,T} = u_{y \max}$ , где  $u_{y \max}$  – максимальное значение сигнала управления. В результате на период насыщения регулятор скорости становится П-регулятором:

$$W_{H,PC}(p) = K_{PC}. \quad (2)$$

Контур положения настраивается на модульный оптимум. Тогда П-регулятор положения

$$W_{PI}(p) = K_{PI} = \frac{k_c i_p}{16T_\mu k_\Pi},$$

где  $i_p$  – передаточное число редуктора;  $k_\Pi$  – коэффициент усиления датчика положения.

Если не пренебрегать членами высокого порядка в передаточной функции контура скорости, то передаточная функция объекта управления контура положения

$$W_{o,\Pi}(p) = \frac{k_\Pi}{k_c i_p p (16T_\mu^3 p^3 + 16T_\mu^2 p^2 + 8T_\mu p + 1)}.$$

Тогда передаточная функция корректирующего устройства компенсационного канала

$$W_K(p) = \frac{1}{W_{o,\Pi}(p)} = \frac{k_c i_p}{k_\Pi} p (16T_\mu^3 p^3 + 16T_\mu^2 p^2 + 8T_\mu p + 1).$$

Таким образом, корректирующее устройство имеет четвертый порядок. Для компенсации ошибки по скорости и ускорению достаточно учитывать второй порядок

$$W_K(p) = \frac{k_c i_p}{k_\Pi} p (8T_\mu p + 1). \quad (3)$$

Определим передаточную функцию контура положения по ошибке:

$$W_e(p) = \frac{1 - W_K(p)W_{o,\Pi}(p)}{1 + W_{PI}(p)W_{o,\Pi}(p)} = \frac{256T_\mu^4 p^4 + 256T_\mu^3 p^3}{256T_\mu^4 p^4 + 256T_\mu^3 p^3 + 128T_\mu^2 p^2 + 16T_\mu p + 1}. \quad (4)$$

Так как числитель имеет третий наименьший порядок, то установившееся значение сигнала ошибки по ускорению

$$e_\varepsilon = W_e(p) \frac{u_\varepsilon}{p^2} \Big|_{p=0} = \frac{256T_\mu^4 p^2 + 256T_\mu^3 p}{256T_\mu^4 p^4 + \dots + 1} u_\varepsilon \Big|_{p=0} = 0,$$

где  $u_\varepsilon$  – ускорение сигнала задания положения  $u_{3,\Pi}(t) = u_\varepsilon t^2$ .

Необходимо обеспечить компенсацию ошибки слежения СЭП без дифференцирования второго порядка сигнала ошибки, ограничиваясь дифференцированием первого порядка. При этом следует учесть работу СЭП в режиме насыщения.

**Решение задачи.** Передаточная функция корректирующего устройства (3) представляет собой последовательное соединение идеально-дифференцирующего звена первого порядка  $W_{KI}(p) =$

$= K_D p$  (ИД-звено), где  $K_D = \frac{k_c i_p}{k_\Pi}$  – коэффициент усиления ИД-компенсатора и пропорционально-дифференцирующего звена  $W_{ПИ}(p) = 8T_\mu p + 1$  (ПД-звено). ПД-звено представим как параллельные дифференцирующий  $8T_\mu p$  и единичный каналы.

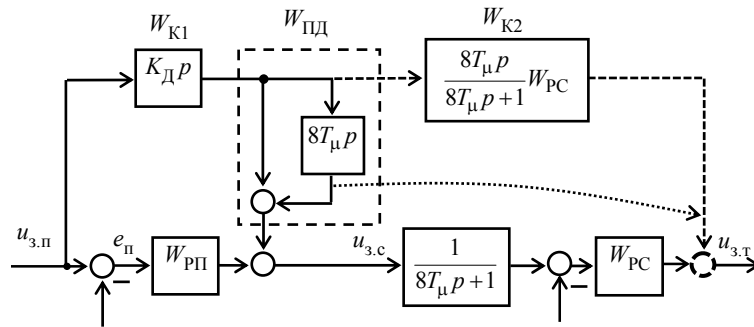


Рис. 2. Двухканальный компенсатор ошибки по скорости и по ускорению  
Fig. 2. Two-channel speed and acceleration error compensator

Для снижения порядка дифференцирования необходимо убрать дифференцирование ПД-звена. Для этого осуществим перенос сумматора дифференцирующего канала ПД-звена в место после регулятора скорости. На рис. 2 перенос сумматора указан пунктирной стрелкой. В результате получим передаточную функцию корректирующего звена нового канала (штриховая линия), влияющего на ошибку контура скорости:

$$W_{К2}(p) = 8T_{\mu}p \frac{1}{8T_{\mu}p + 1} W_{РС}(p). \quad (5)$$

В результате возникают два компенсационных канала ошибок: по скорости с корректирующим устройством  $W_{К1}(p)$  и по ускорению  $W_{К12}(p) = W_{К1}(p)W_{К2}(p)$ .

При работе СЭП в линейном режиме, т. е. когда  $W_{РС}(p) = W_{л.РС}(p)$ , передаточная функция корректирующего звена  $W_{К2}$  с учетом (1) и (4):

$$W_{л.К2}(p) = K_{РС}.$$

Таким образом, передаточная функция канала компенсации ошибки по ускорению

$$W_{л.К12}(p) = W_{К1}(p)W_{л.К2}(p) = K_{РС}K_{Д}p.$$

При работе СЭП в режиме насыщения при  $W_{РС}(p) = W_{н.РС}(p)$  с учетом (2) и (5)

$$W_{н.К2}(p) = K_{РС} \frac{8T_{\mu}p}{8T_{\mu}p + 1}.$$

Тогда передаточная функция канала компенсации ошибки по ускорению

$$\begin{aligned} W_{н.К12}(p) &= W_{К1}(p)W_{н.К2}(p) = \\ &= K_{Д}pK_{РС} \frac{8T_{\mu}p}{8T_{\mu}p + 1} \end{aligned}$$

реализуется последовательным соединением ИД-звена и реально-дифференцирующего звена (РД-звена). Техническая реализация РД-звена также не вызывает технических трудностей.

**Техническая реализация компенсатора ошибки.** Канал компенсации ошибки по ускорению  $W_{К12}$  в двух режимах работы СЭП отличается наличием РД-звена с постоянной времени  $8T_{\mu}$ . Необходимо предусмотреть подключение РД-звена при возникновении насыщения интегрального канала регулятора скорости.

Подключение РД-звена реализуется тем же блоком тестирования (БТ), которое реализует условное интегрирование в ПИ-регуляторе скорости [10] (рис. 3). В линейном режиме работы СЭП, когда  $|u_{з.т}| < u_{у\max}$ , на выходе БТ логический сигнал  $u_{БТ} = \text{лог. } 1$ , который разрешает работу интегрального канала регулятора скорости. В режиме насыщения СЭП, когда действует токоограничение (ТО), сигнал  $u_{БТ} = \text{лог. } 0$ , что запрещает интегрирование в интегральном канале ПИ-регулятора скорости, и значение на выходе интегрального канала не изменяется.

Логический сигнал  $u_{БТ}$  через логическое отрицание NOT подается на вход интегратора интегрального канала РД-звена канала компенсации ошибки по ускорению. Тогда в линейном режиме, когда  $u_{БТ} = \text{лог. } 1$ , интегральный канал РД-звена закрывается и работает только пропорциональный канал компенсатора ошибки, т. е. реализуется передаточная функция  $W_{л.К12}$ . В режиме насыщения СЭП, когда  $u_{БТ} = \text{лог. } 0$ , интегральный канал РД-звена открывается и компенсационный канал по ошибке ускорения имеет передаточную функцию  $W_{н.К12}$ .

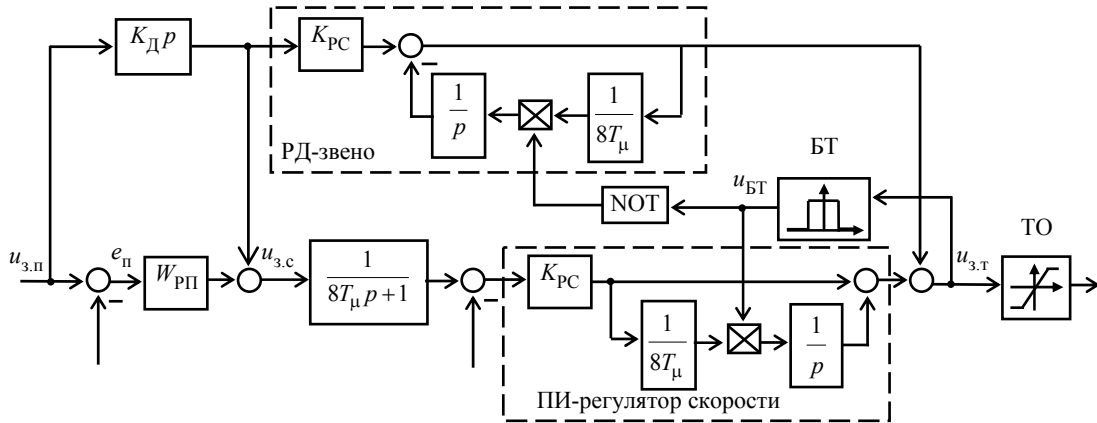


Рис. 3. Структурная схема компенсатора ошибки и ПИ-регулятора скорости  
Fig. 3. Block diagram of an error compensator and a PI speed controller

Для оценки динамических показателей качества СЭП как системы автоматического регулирования угла поворота вала рабочего органа с настройкой контура скорости на симметричный оптимум с фильтром и контура положения на модульный оптимум, а также с компенсационным каналом по управлению второго порядка определим передаточную функцию СЭП по сигналу обратной связи по положению  $u_{о.п}(t)$ , используя выражение (4):

$$W(p) = 1 - W_e(p) = \frac{128T_{\mu}^2 p^2 + 16T_{\mu} p + 1}{256T_{\mu}^4 p^4 + 256T_{\mu}^3 p^3 + 128T_{\mu}^2 p^2 + 16T_{\mu} p + 1}.$$

Переходная функция звена  $W_u$  представлена на рис. 4. Анализ переходной функции показал: перерегулирование 31% достигается в момент времени  $6.5T_{\mu}$ , время регулирования для пятипроцентной зоны установившегося значения –  $17T_{\mu}$ , а для двухпроцентной зоны –  $42.2T_{\mu}$ .

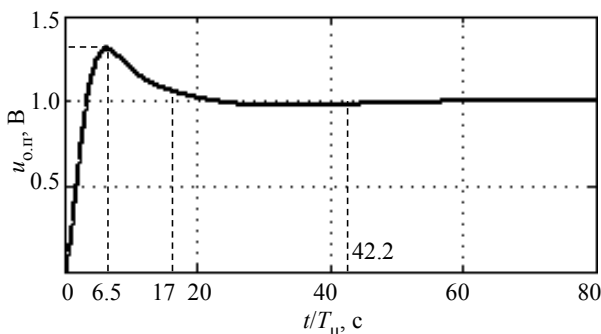


Рис. 4. Переходная функция СЭП  
Fig. 4. Transient function of the tracking electric drive

**Передаточное число редуктора.** При разгоне электромагнитный момент двигателя, а следовательно, и сигнал задания тока  $u_{3,т}$  – постоянные величины. Передаточные функции по управлению током

$$W_u(p) = \frac{\varphi(p)}{u_{3,т}(p)} = K_m(T_{я}p + 1)/k_T i_p \times \left\{ 2JT_{я}T_{\mu}p^4 + [2T_{\mu}(J + \beta T_{\mu}) + JT_{я}]p^3 + (J + 2\beta T_{\mu})p^2 \right\}$$

и возмущению

$$W_m(p) = \frac{\varphi(p)}{M_c(p)} = - \left[ 2T_{я}T_{\mu}p^2 + (T_{я} + 2T_{\mu})p + 1 \right] / i_p \left\{ 2JT_{я}T_{\mu}p^4 + [2T_{\mu}(J + \beta T_{\mu}) + JT_{я}]p^3 + (J + 2\beta T_{\mu})p^2 \right\}.$$

Найдем значение ускорения угла поворота вала рабочего органа  $\varphi(p) = \frac{\varepsilon}{p^3}$ :

$$\varepsilon = p^3 \left( W_u(p) \frac{u_{3,т}}{p} + W_m(p) \frac{M_c}{p} \right) \Bigg|_{p=0} = \frac{K_m u_{3,т} - k_T M_c}{k_T i_p (J + 2\beta T_{\mu})},$$

где  $\beta$  – жесткость механической характеристики двигателя СЭП;  $T_{я}$  – электромагнитная постоянная времени двигателя СЭП.

Если принять, что  $k_T = \frac{K_m}{M_{раз}} u_{3,т}$ , где  $M_{раз}$  –

электромагнитный момент при равнопеременном вращении двигателя (момент разгона), то ускорение угла поворота вала рабочего органа СЭП

$$\varepsilon = \frac{M_{раз} - M_c}{i_p (J + 2\beta T_{\mu})}.$$

Выразим момент разгона  $M_{\text{раз}}$  через момент нагрузки на рабочем органе  $M_{\text{р.о}} = \eta_{\text{р}} i_{\text{р}} M_{\text{с}}$  и момент инерции рабочего органа  $J = J_{\text{я}} + \frac{J_{\text{р.о}}}{i_{\text{р}}^2}$ :

$$M_{\text{раз}} = \frac{M_{\text{р.о}}}{\eta_{\text{р}} i_{\text{р}}} + \left( J_{\text{я}} + J_{\text{р.о}} / i_{\text{р}}^2 + 2\beta T_{\mu} \right) i_{\text{р}} \varepsilon,$$

где  $M_{\text{р.о}}$  – момент нагрузки на рабочем органе;  $J_{\text{р.о}}$  – момент инерции рабочего органа;  $\eta_{\text{р}}$  – КПД редуктора;  $J_{\text{я}}$  – момент инерции якоря двигателя.

В соответствии с [11] определим оптимальное передаточное число редуктора для заданного ускорения  $\varepsilon_3$ :

$$i_0 = \sqrt{\frac{M_{\text{р.о}} + \varepsilon_3 J_{\text{р.о}}}{\varepsilon_3 (J_{\text{я}} + 2\beta T_{\mu})}}. \quad (6)$$

Для расчета требуемой мощности двигателя примем, что вал рабочего органа достигает заданного максимального угла  $\varphi_{\text{max}}$ , до того как разгонится до установившейся скорости вращения  $\omega_{\text{po}} = \sqrt{2\varepsilon_3 \varphi_{\text{max}}}$ . При этом время разгона до  $\varphi_{\text{max}}$  составит  $t_{\text{раз}} = \sqrt{\frac{2\varphi_{\text{max}}}{\varepsilon_3}}$ . Тогда требуемая мощность двигателя, необходимая для вращения рабочего органа с требуемым ускорением [11],

$$P = 1.1 \frac{M_{\text{р.о}} + \varepsilon_3 J_{\text{р.о}}}{\eta_{\text{р}}} \sqrt{2\varepsilon_3 \varphi_{\text{max}}}. \quad (7)$$

**Пример расчета СЭП.** Исходные данные рабочего органа: момент нагрузки  $M_{\text{р.о}} = 5000 \text{ Н} \cdot \text{м}$ ; момент инерции  $J_{\text{р.о}} = 400 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ ; заданное ускорение  $\varepsilon_3 = 2 \text{ с}^{-2}$ ; заданный максимальный угол поворота вала  $\varphi_{\text{max}} = \pi$ . Для расчета требуемой мощности двигателя зададим  $\eta_{\text{р}} = 0.95$ . По (7) требуемая мощность составит  $P = 23.8 \text{ кВт}$ .

Выберем двигатель П72 мощностью 25 кВт с параметрами  $J_{\text{я}} = 1.6 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ ,  $\beta = 21.4$ . Время разгона составит примерно  $t_{\text{раз}} \approx 1.8 \text{ с}$ . Примем за малую постоянную времени инерционность преобразователя напряжения  $T_{\mu} = 0.005 \text{ с}$ . По (6) рассчитаем оптимальное передаточное число редуктора  $i_0 = 40$ . Тогда суммарный момент инерции  $J = 1.85 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ . Результат расчета параметров системы регулирования:  $k_{\text{т}} = 0.038$ ;  $k_{\text{с}} = 0.06$ ;  $k_{\text{п}} = 3.18$ ;  $K_{\text{РС}} = 43.5$ ;  $K_{\text{рП}} = 9.5$ ;  $K_{\text{Д}} = 0.76$ . Результаты моделирования СЭП представлены на рис. 5.

В СЭП в ПИ-регуляторах тока и скорости были использованы компенсация насыщения интегральных каналов. Сигналом задания положения служит квадратично изменяющаяся функция с коэффициентом  $\varepsilon_3 k_{\text{п}}$ . За время разгона 1.8 с скорость двигателя  $\omega$  достигает установившегося значения (рис. 5, а). При этом угол поворота вала рабочего органа  $\varphi$  успевает достичь максимального значения  $\varphi_{\text{max}}$  (рис. 5, б).

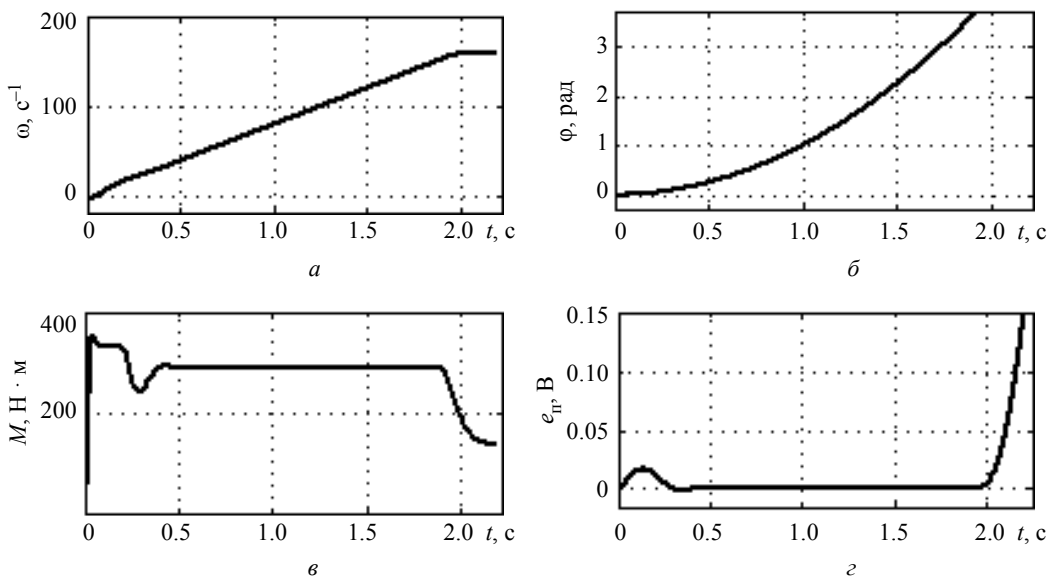


Рис. 5. Графики результатов моделирования СЭП: а – скорости двигателя; б – угла вала рабочего органа; в – момента двигателя; г – сигнала ошибки контура положения  
Fig. 5. Simulation results of a tracking electric drive: а – motor speed; б – shaft angle of actuator; в – motor torque; г – error signal of position loop

На графике (рис. 5, в) изменения электромагнитного момента двигателя  $M$  видно, что на начальном этапе, который длится примерно 0.25 с, СЭП работает с максимально допустимым моментом  $M_{\max}$ . Это означает, что на этом этапе вал рабочего органа «догоняет» задающее воздействие и СЭП работает в режиме насыщения. На следующем этапе (до 1.8 с) двигатель разгоняется с разгонным моментом  $M_{\text{раз}}$ . При этом вал рабочего органа вращается с нулевой ошибкой по ускорению  $e_{\text{п}} = 0$  (рис. 5, з). СЭП работает в линейном режиме. После момента времени 1.8 с, скорость двигателя устанавливается, и угол поворота вала рабочего органа возрастает линейно (не квадратично). При этом ошибка по ускорению стремится к бесконечности. В дальнейшем сигнал задания положения должен измениться.

**Выводы.** СЭП, обеспечивающий нулевую скоростную ошибку и ошибку по ускорению с учетом интегрального насыщения в ПИ-регуляторах скорости и тока, возможен при двухканальном корректирующем устройстве второго порядка. Для этого необходимо обеспечить ком-

пенсацию интегрального насыщения ПИ-регуляторов и РД-звена компенсатора ошибки необязательно условным интегрированием. Существуют другие способы компенсации интегрального насыщения [10]. Следует иметь в виду, что рассмотренный подход к технической реализации компенсатора ошибки по ускорению применим, только если контур положения настроен на модульный оптимум, а контур скорости – на симметричный оптимум с фильтром.

Также следует учесть, что оценка времени разгона  $t_{\text{раз}}$  приближенная, это связано с тем, что передаточная функция СЭП имеет высокий порядок и при оценке динамических показателей качества во время разгона любое пренебрежение даже малыми постоянными времени дает существенную погрешность. Данный недостаток можно устранить, если для контура тока применить методики синтеза, основанные на нечеткой модели Такаги–Сугено [12], которые позволяют улучшить качество динамики нелинейной системы для объектов высокого порядка.

#### Список литературы

1. Корнюшин Ю. П. Синтез регуляторов нелинейных следящих радиотехнических систем // Электромагнитные волны и электронные системы. 2019. Т. 24, № 6. С. 59–63. doi: 10.18127/j15604128-201906-08.
2. Ермоленко А. И. Компенсация скоростной ошибки и ошибки по ускорению цифровой следящей системы при низком темпе вычисления рассогласования // Сб. тр. XX конф. молодых ученых «Навигация и управление движением» / науч. ред. О. А. Степанов; под общ. ред. В. Г. Пешехонова. СПб.: Концерн «ЦНИИ „Электроприбор“», 2018. С. 196–198.
3. Харченко А. П., Слепокуров Ю. С., Каревская Ю. Н. Исследование следящей системы с астатическим модальным регулятором в MatLab // Вестн. Воронежского гос. техн. ун-та. 2019. Т. 15, № 1. С. 35–41. doi: 10.25987/VSTU.2019.15.1.005.
4. Лямин М. А., Черный С. П. Система совместного управления электроприводами мотор-колесо робототехнического транспортного комплекса для магистральных трубопроводов // Уч. зап. Комсомольского-на-Амуре гос. техн. ун-та. 2023. № 7(71). С. 66–73. doi: 10.17084/20764359-2023-71-66.
5. Лепехина С. Ю., Сухоруков С. И., Давыдов Ю. А. Комплекс алгоритмов работы системы управления роботизированного комплекса трехмерной печати // Уч. зап. Комсомольского-на-Амуре гос. техн. ун-та. 2023. № 1(65). С. 68–75. doi: 10.17084/20764359-2023-65-68.
6. Бабич М. В., Добрынин Н. В., Змеу К. В. Оптимизация траектории распылительного инструмента при роботизированной обработке поверхностей сложного профиля // Уч. зап. Комсомольского-на-Амуре гос. техн. ун-та. 2022. № 7(63). С. 14–22. doi: 10.17084/20764359-2022-63-14.
7. Концепция формирования управляющей программы для роботизированного комплекса лазерной сварки / С. И. Сухоруков, С. П. Черный, А. С. Мешков, Д. А. Киба // Уч. зап. Комсомольского-на-Амуре гос. техн. ун-та. 2020. № 7(47). С. 26–33.
8. Максимова Н. А., Черный С. П., Сухоруков С. И. Особенности моделирования развитых нечетких систем с алгоритмом вывода Мамдани для управления электроприводами постоянного тока // Уч. зап. Комсомольского-на-Амуре гос. техн. ун-та. 2021. № 1(49). С. 37–50. doi: 10.17084/20764359\_2021\_49\_37.
9. Автомонов С. А., Стельмащук С. В. Windup-явления и способы их устранения // Сб. тр. IV Всерос. нац. науч. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых «Молодежь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований», в 4 ч. Ч. 2. Комсомольск-на-Амуре: Комсомольский-на-Амуре гос. ун-т, 2021. С. 4–6.
10. Автомонов С. А., Стельмащук С. В. Системы автоматического регулирования с компенсацией интегрального насыщения // Сб. тр. V Всерос. нац. науч. конф. молодых ученых «Молодежь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований», в 4 ч. Ч. 1. Комсомольск-на-Амуре: Комсомольский-на-Амуре гос. ун-т, 2022. С. 4–6.
11. Каданов А. В., Третьяков В. М. Оптимизация параметров редукторов следящего привода // Вестн. компьютерных и информационных технологий. 2011. № 7(85). С. 30–36.

12. Моделирование нечеткой системы управления электроприводом постоянного тока на основе векторно-матричного описания / С. П. Черный, А. В. Бузикаева,

А. И. Годяев, Ю. А. Давыдов // Уч. зап. Комсомольско-го-на-Амуре гос. техн. ун-та. 2023. № 3(67). С. 35–41. doi: 10.17084/20764359-2023-67-35.

#### Информация об авторе

**Стельмашук Сергей Валерьевич** – канд. техн. наук, доцент кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок» КнАГУ, пр. Ленина, 27, Комсомольск-на-Амуре, 681013, Россия.

E-mail: rukdpsv@rambler.ru

<https://orcid.org/0000-0002-8336-7275>

#### References

1. Kornjushin Ju. P. Sintez reguljatorov nelinejnyh sledjashhij radiotekhnicheskijh sistem // Jelektromagnitnye volny i jelektronnye sistemy. 2019. T. 24, № 6. S. 59–63. doi: 10.18127/j15604128-201906-08. (In Russ.).

2. Ermolenko A. I. Kompensacija skorostnoj oshibki i oshibki po uskoreniju cifrovij sledjashhej sistemy pri nizkom tempe vychislenija rassoglasovanija // Sb. tr. XX konf. molodyh uchenykh «Navigacija i upravlenie dvizheniem» / nauch. red. O. A. Stepanov; pod obshh. red. V. G. Peshehonova. SPb.: Koncern «CNII «Jelektropribor», 2018. S. 196–198. (In Russ.).

3. Harchenko A. P., Slepokurov Ju. S., Karevskaja Ju. N. Issledovanie sledjashhej sistemy s astaticeskim modal'nym reguljatorom v MatLab // Vestn. Voronezhskogo gos. tehn. un-ta. 2019. T. 15, № 1. S. 35–41. doi: 10.25987/VSTU.2019.15.1.005. (In Russ.).

4. Ljamin M. A., Chernyj S. P. Sistema sovmestnogo upravlenija jelektroprivodami motor-koleso robototekhnicheskogo transportnogo kompleksa dlja magistral'nyh truboprovodov // Uch. zap. Komsomol'skogo-na-Amure gos. tehn. un-ta. 2023. № 7(71). S. 66–73. doi: 10.17084/20764359-2023-71-66. (In Russ.).

5. Lepehina S. Ju., Suhorukov S. I., Davydov Ju. A. Kompleks algoritmov raboty sistemy upravlenija robotizirovannogo kompleksa trjohmernoj pečati // Uch. zap. Komsomol'skogo-na-Amure gos. tehn. un-ta. 2023. № 1(65). S. 68–75. doi: 10.17084/20764359-2023-65-68. (In Russ.).

6. Babich M. V., Dobrynin N. V., Zmeu K. V. Optimizacija traektorii raspjylitel'nogo instrumenta pri robotizirovannoj obrabotke poverhnostej slozhnogo profilja // Uch. zap. Komsomol'skogo-na-Amure gos. tehn. un-ta. 2022. № 7(63). S. 14–22. doi: 10.17084/20764359-2022-63-14. (In Russ.).

7. Koncepcija formirovanija upravljajushhej programmy dlja robotizirovannogo kompleksa lazernoj svarki / S. I. Suhorukov, S. P. Chernyj, A. S. Meshkov, D. A. Kiba // Uch. zap. Komsomol'skogo-na-Amure gos. tehn. un-ta. 2020. № 7(47). S. 26–33. (In Russ.).

8. Maksimova N. A., Chernyj S. P., Suhorukov S. I. Osobennosti modelirovanija razvityh nechjotkih sistem s algoritmom vyvoda Mamdani dlja upravlenija jelektroprivodami postojannogo toka // Uch. zap. Komsomol'skogo-na-Amure gos. tehn. un-ta. 2021. № 1(49). S. 37–50. doi: 10.17084/20764359\_2021\_49\_37. (In Russ.).

9. Avtomonov S. A., Stel'mashhuk S. V. Windup-javlenija i sposoby ih ustraneniya // Sb. tr. IV Vseros. nac. nauch. konf. studentov, aspirantov i molodyh uchenykh «Molodezh' i nauka: aktual'nye problemy fundamental'nyh i prikladnyh issledovanij», v 4 ch. Ch. 2. Komsomol'sk-na-Amure: Komsomol'skij-na-Amure gos. un-t, 2021. S. 4–6. (In Russ.).

10. Avtomonov, S. A., Stel'mashhuk S. V. Sistemy avtomaticheskogo regulirovanija s kompensaciej integral'nogo nasjshhenija // Sb. tr. V Vseros. nac. nauch. konf. molodyh uchenykh «Molodezh' i nauka: aktual'nye problemy fundamental'nyh i prikladnyh issledovanij», v 4 ch. Ch. 1. Komsomol'sk-na-Amure: Komsomol'skij-na-Amure gos. un-t, 2022. S. 4–6. (In Russ.).

11. Kadanov A. V., Tret'jakov V. M. Optimizacija parametrov reduktorov sledjashhego privoda // Vestn. komp'juternykh i informacionnykh tehnologij. 2011. № 7(85). S. 30–36. (In Russ.).

12. Modelirovanie nechjotkoj sistemy upravlenija jelektroprivodom postojannogo toka na osnove vektornommatrichnogo opisanija / S. P. Chernyj, A. V. Buzikaeva, A. I. Godjaev, Ju. A. Davydov // Uch. zap. Komsomol'skogo-na-Amure gos. tehn. un-ta. 2023. № 3(67). S. 35–41. doi: 10.17084/20764359-2023-67-35. (In Russ.).

#### Information about the author

**Sergey V. Stelmashchuk** – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department «Electric Drive and Automation of Industrial installations», Komsomolsk-na-Amure State University, Lenin av., 27, Komsomolsk-na-Amure, 681013, Russia.

E-mail: rukdpsv@rambler.ru

<https://orcid.org/0000-0002-8336-7275>

Статья поступила в редакцию 14.03.2024; принята к публикации после рецензирования 04.06.2024; опубликована онлайн 30.09.2024.

Submitted 14.03.2024; accepted 04.06.2024; published online 30.09.2024.