



Ключевые слова:
регулируемый
электропривод,
полоса пропуска-
ния частот, диапа-
зон регулирования
скорости, матема-
тическая модель

РАЗРАБОТКА РЕГУЛИРУЕМЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

**Владимир СЛЕПЦОВ, Сергей СКВОРЦОВ, Алексей ОРЛОВ,
Наталья КОВАЛЕВА, Андрей РОМАНОВ, Павел ШВЕЦ**

Рассмотрены вопросы анализа технических характеристик электропри-
водов с двигателями постоянного тока на стадии проектирования.

В целом ряде технологических устройств необходи-
мы механизмы с неизменной точкой ввода
инструмента в рабочую область. В частности, они
применяются в измерительных приборах и робо-
тотехнических комплексах, предназначенных для
проведения хирургических операций, созданию
которых и посвящена предлагаемая статья.

Механизмы с постоянной точкой ввода инстру-
мента в рабочую область могут быть построены
с использованием как шарнирных параллелограм-
мов, так и ременных или зубчатых передач [1, 2],
соответствующее применение которых может обе-
спечить равенство углов поворота входного и выход-
ного звеньев.

При синтезе подобных механизмов необходимо
учитывать функциональные и технические требо-
вания, определяемые условиями тех или иных
хирургических операций в разных областях меди-
цины [3, 4]. Исходя из них выбираются кинемати-
ческая схема и структура системы управления,
содержащая регулируемые по скорости электро-
приводы (РЭП) [5] и обладающая подходящими
мощностными и динамическими характеристиками,
обеспечивающая перемещение рабочего инстру-
мента с достаточной точностью. Следует отметить,
что точностные и скоростные характеристики меха-
низмов в большой степени зависят от технических
характеристик РЭП, следовательно их анализ (осо-
бенно на этапе проектирования) является чрезвы-
чайно важным. Вместе с тем, проведение такого
анализа представляет собой серьезную задачу.

Поясним это на примере исследования разрабо-
танного в ИМАШ им. А.А. Благоднарова РЭП с элек-
тродвигателем постоянного тока типа WG3929, тран-
зисторным сервоусилителем, датчиком скорости на
базе импульсного фотоэлектрического датчика с чис-

лом импульсов 2000 импульсов/оборот. Функцио-
нальная схема РЭП представлена на рис. 1.

Эта схема отличается от традиционной [5] тем,
что в контуре тока применен датчик потребляемо-
го тока (имеющего только положительное значение
независимо от направления вращения), а не датчик
тока якоря (имеющего разнонаправленные значения
в зависимости от направления вращения). Кроме
того, регулятор скорости выполнен в цифровом виде,
а контур тока – в аналоговом.

Следует отметить, что контур тока настроен на
технический оптимум, а контур скорости – на сим-
метричный оптимум [6]. Из условий соответст-
вующей настройки определяются параметры регу-
ляторов скорости и тока.

Проведем исследование РЭП путем подачи сту-
пенчатого сигнала задания скорости U_{zc} различной
величины на вход математической модели и ана-
лиза реакции на эти сигналы.

В настоящее время в России действует
ГОСТ 27803-91 «Электроприводы регулируемые для
металлообрабатывающего оборудования и промыш-
ленных роботов. Технические требования», регла-
ментирующий основные технические характери-
стики РЭП (диапазон регулирования скорости D_c
и полосу пропускания F_c). При этом для различных
технологических машин требуется $D_c \geq 1000$ Гц,
а $F_c \geq 100$ Гц. Кроме того, при использовании линей-
ных датчиков скорости для определения D_c доста-
точно проанализировать поведение РЭП (величину
перерегулирования и пульсации) при минимальных
и максимальных скоростях.

Следует отметить, что для получения результа-
тов моделирования, соответствующих реальному,
необходимо, чтобы математическая модель позво-
ляла учитывать схемотехническую реализацию РЭП

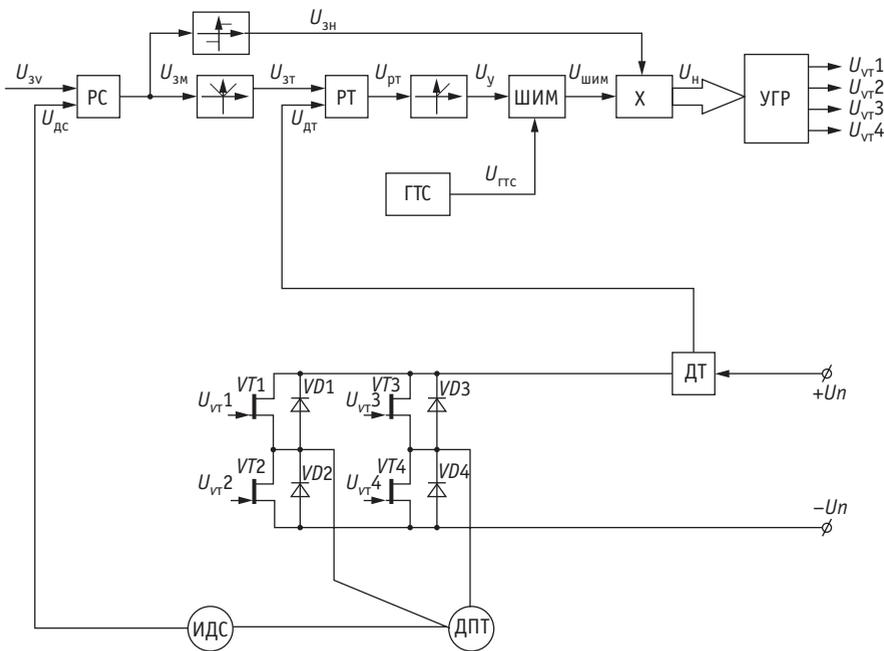


Рис. 1.

Функциональная схема РЭП: РС, РТ – соответственно регуляторы скорости и тока; ГТС – генератор треугольного сигнала; ШИМ – широтно-импульсный модулятор; УГР – устройство гальванической развязки; ДТ – датчик тока; ДПТ – двигатель постоянного тока; ИДС – импульсный датчик скорости; VT1 – VT4, VD1 – VD4 – силовые транзисторы и диоды усилителя мощности; $U_{зс}$, $U_{зт}$ – сигналы задания скорости и момента (тока) соответственно; $U_{дс}$, $U_{дт}$ – сигналы с датчика скорости и тока соответственно; $U_{гтс}$ – периодический треугольный сигнал; U_y – управляющий сигнал; $U_{шим}$ – промодулированный управляющий сигнал; U_{vt1-4} – сигналы управления силовыми транзисторами

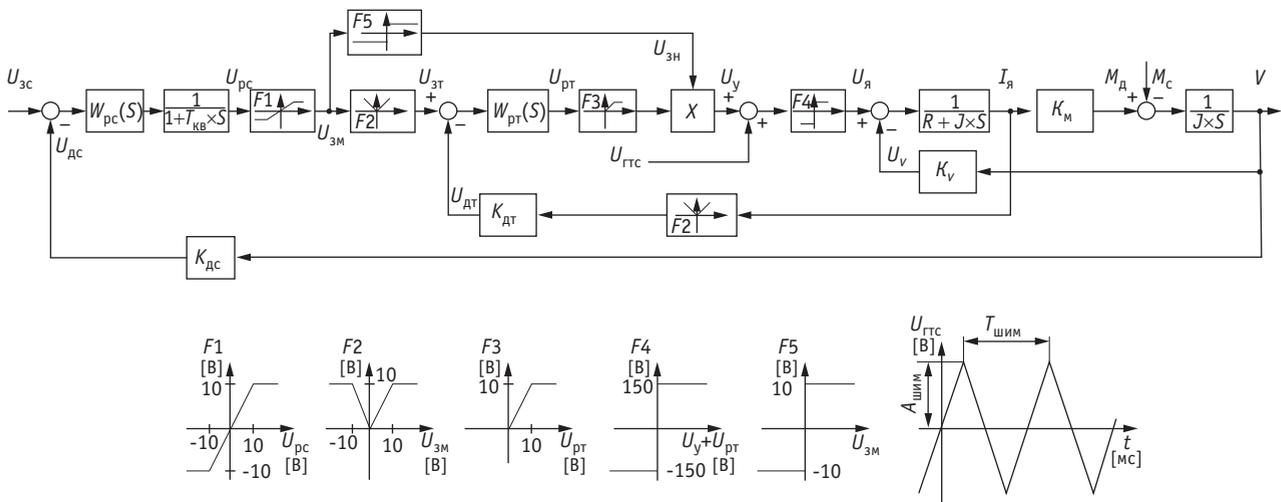


Рис. 2.

Схематехническая модель РЭП с транзисторным сервоусилителем и электродвигателем постоянного тока типа WG3929: $W_{pc}(S)$, $W_{pt}(S)$ – передаточные функции регуляторов скорости и тока; R , L – активное сопротивление и индуктивность якорной цепи двигателя постоянного тока; K_m , K_v – коэффициент передачи по моменту и коэффициент противоЭДС; J – момент инерции двигателя постоянного тока; $K_{дт}$, $K_{дс}$ – коэффициенты передачи датчиков тока и скорости; F1–F5 – схематехнические нелинейности

(в частности учитывать режим широтно-импульсной модуляции сервоусилителя и эффект квантования по времени регулятора скорости). Разработанная авторами математическая модель РЭП представлена на рис. 2.

Значения параметров: $a_{11} = 10$ В; $e_{11} = 10$ В; $a_{21} = 10$ В; $e_{21} = 10$ В; $R = 3,3$ Ом; $L = 0,001$ Гн; $K_m = 0,1$; $J = 0,00005$ кг; $K_{дт} = 3$; $K_v = 0,03$; $K_{дс} = 0,06$ В; $a_{31} = 12$ В;

характеристики $U_{гтс}$ – амплитуда треугольного сигнала 10 В, частота $f = 2$ кГц.

Параметры регулятора тока при настройке контура на технический оптимум определяются из следующего уравнения [7]:

$$W_{pt}(S) \times \frac{K_y}{1+K_y S} \times K_{дт} \times \frac{1}{R+LS} = \frac{1}{2 \times \tau \times S(1+\tau S)},$$

где: $\tau = T_y$; K_y и T_y – коэффициент передачи и постоянная времени линеаризованного транзисторного сервоусилителя, причем $K_y = 1,2$, $T_y = 0,0001$ с.

Откуда:

$$W_{\text{пр}}(S) = \frac{R+LS}{2 \times K_y \times K_{\text{дт}} \times T_y \times S} = \frac{4500(1 + 0,0003S)}{S}$$

Параметры линеаризованного регулятора скорости при настройке контура на симметричный оптимум определяются из следующего уравнения [5]:

$$W_{\text{пр}}(S) \times \frac{1}{K_{\text{дт}}(1+2 \times T_y S)} \times K_M \frac{1}{JS} \times K_{\text{дс}} = \frac{1+8 \times T_y S}{32 \times T_y^2 \times S^2(1+2 \times T_y S)}$$

Откуда:

$$W_{\text{пр}}(S) = \frac{J \times K_{\text{дт}}(1+8 \times T_y S)}{32 \times K_{\text{дт}} \times K_{\text{дс}} \times K_M \times T_y^2 \times S} = \frac{25000(1 + 0,0008S)}{S}$$

Необходимо отметить, что, как правило, в процессе исследования параметры регуляторов корректируют, что связано с учетом нелинейностей РЭП.

Кроме того, для учета влияния эффекта квантования регулятора скорости по времени последовательно с ним вводится аperiодическое звено с постоянной времени $T_{\text{кв}}$, равной времени расчета ПИ-алгоритма.

На рис. 3 и 4 представлены тахограммы РЭП при входных сигналах $U_{\text{зс}} = \pm 0,01$ В и $U_{\text{зс}} = \pm 10$ В.

Из рисунков видно, что на больших сигналах задания скорости влияния времени квантования $T_{\text{кв}}$ практически нет, а вот на малых оно значительно.

При $T_{\text{кв}} = 0,001$ с (что соответствует частоте расчета регулятора скорости, равной 150 Гц) РЭП практически неработоспособен, при $T_{\text{кв}} = 0,0008$ с (что соответствует частоте расчета регулятора скорости, равной 200 Гц) пульсации в тахограмме очень велики и лишь при $T_{\text{кв}} = 0,0005$ с (что соответствует частоте расчета регулятора скорости, равной 300 Гц) влиянием времени квантования можно пренебречь.

Рассмотрим теперь реакцию РЭП на входной сигнал 0,01 В при частоте ШИМ 1000 и 500 Гц. На рис. 5 приведены соответствующие тахограммы.

Из рисунка видно, что пульсации скорости с уменьшением частоты ШИМ увеличиваются по сравнению с рис. 3б на 20 и 40% соответственно. В разрабатываемом РЭП выбрана $f = 300$ Гц.

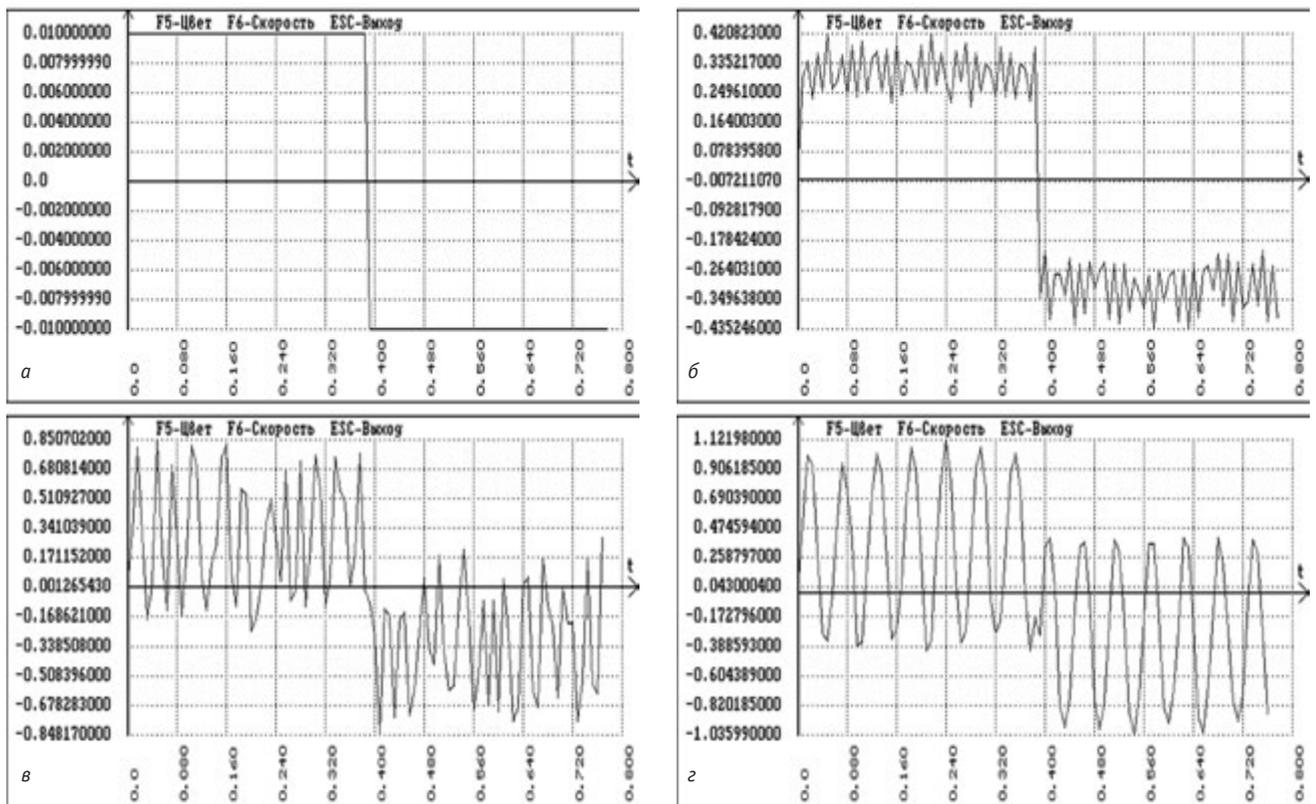


Рис. 3. Входной сигнал $U_{\text{зс}} = \pm 0,01$ В (а) и тахограммы в схемотехнической модели РЭП при $T_{\text{кв}} = 0,0005$ с (б), $T_{\text{кв}} = 0,0008$ с (в), $T_{\text{кв}} = 0,001$ с (з)

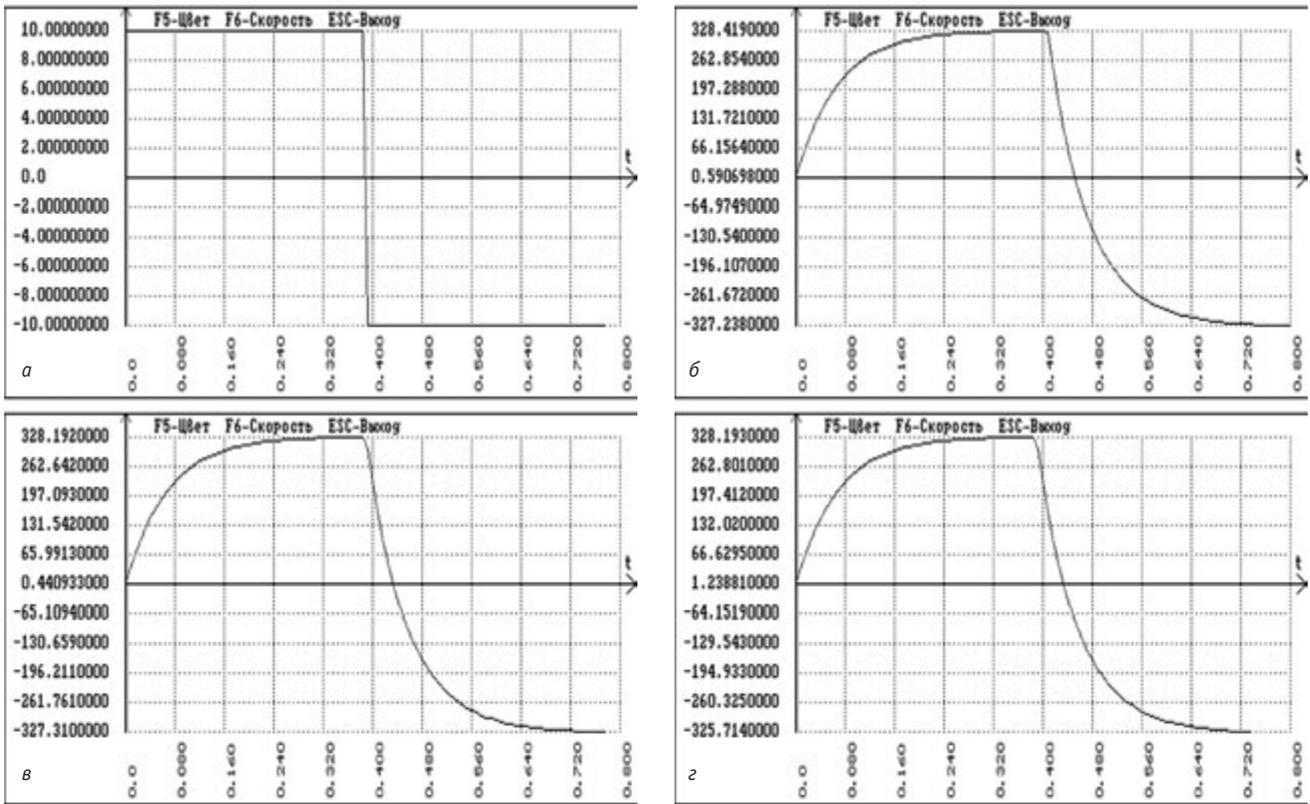


Рис. 4. Входной сигнал $U_{зс} = \pm 10$ В (а) и тахограммы в схмотехнической модели РЭП при $T_{кв} = 0,0005$ с (б), $T_{кв} = 0,0008$ с (в), $T_{кв} = 0,001$ с (г)

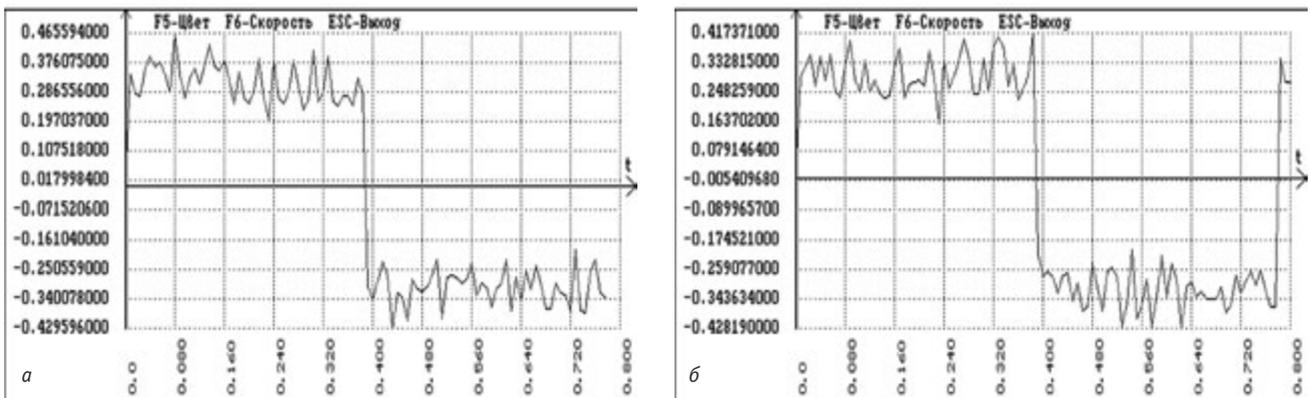


Рис. 5. Тахограммы в схмотехнической модели РЭП при $U_{зс} = 0,01$ В: а – $f = 100$ Гц, б – $f = 500$ Гц

С целью проверки полосы пропускания рассмотрим теперь реакцию РЭП на синусоидальные входные сигналы. На рис. 6 приведены графики входных сигналов и тахограммы РЭП.

Из рисунка видно, что в диапазоне частот до 100 Гц тахограммы по сравнению со входными сигналами обладают несущественными искажениями (сдвиг по фазе не превышает 30° , падения по амплитуде не наблюдается).

Проведенные исследования позволяют сделать следующие выводы:

1. Разработанный электропривод обладает хорошими техническими характеристиками: $D_c \geq 1000$ Гц и $F_c \geq 100$.
2. При исследовании электроприводов прецизионных технологических машин необходимо учитывать работу усилителей мощности в режиме широтно-импульсной модуляции, вызывающей пульсации в переходных процессах.
3. Для уменьшения пульсаций скорости до допустимого уровня (5% от минимальной скорости) следует выбрать частоту ШИМ f_{2000} Гц.

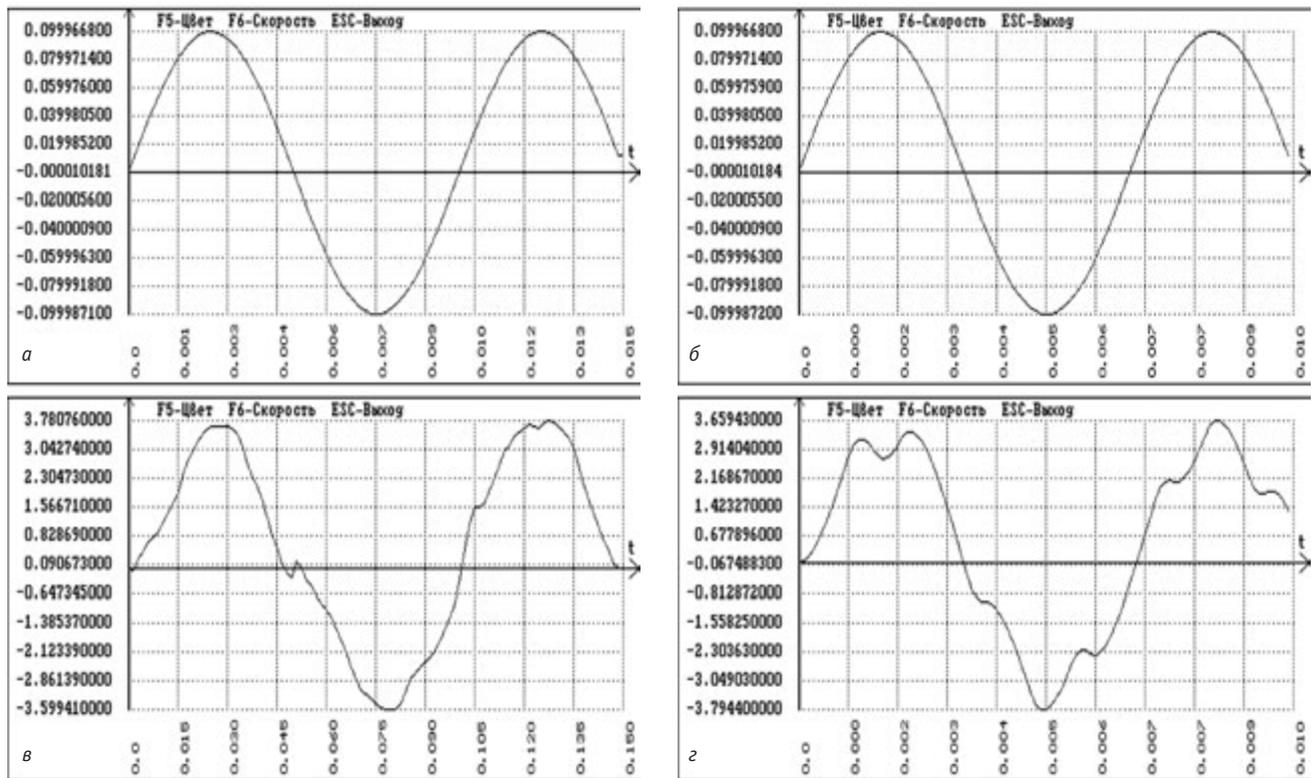


Рис. 6. Входные сигналы: а – $U_{zc} = 0,1 \times \sin(62t)$, б – $U_{zc} = 0,1 \times \sin(620t)$, в и г – тахограммы в схемотехнической модели РЭП

- Для уменьшения пульсаций скорости до допустимого уровня следует обеспечить частоту расчета ПИ-алгоритма регулятора скорости не менее 300 Гц.
- Афонин В.Л. и др.** Обрабатывающее оборудование нового поколения. Концепция проектирования / Под ред. В.Л. Афолина. М.: Машиностроение, 2001. 256 с.
- Справочник по автоматизированному электроприводу / Под ред. В.А. Елисеева и А.В. Шинянского. М.: 1983. 616 с.

ЛИТЕРАТУРА

- Крайнев А.Ф.** Словарь – справочник по механизмам / 2-е изд. М.: Машиностроение. 1987. 560 с.
- Чернецов Р., Велиев Е., Глазунов В., Скворцов С., Ковалева Н.** Определение числа степеней свободы механизмов с постоянной точкой ввода инструмента // СТАНКОИНСТРУМЕНТ. 2019. № 4 (017). С. 80–83.
- Велиев Е.И., Ганиев Р.Ф., Глазунов В.А., Филиппов Г.С., Терехова А.Н.** Разработка и решение задачи о положениях механизма параллельно-последовательной структуры для хирургических операций как альтернативы роботу Da Vinci // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2019. № 4. С. 3–13.
- Краснопольский В.И., Попов А.А., Мананникова Т.Н., Федоров А.А., Слободянюк В.А., Коваль А.А., Мироненко К.В.** Робот-ассистированная хирургия в онкогинекологии // Онкогинекология. 2014. № 3. С. 23.
- Терехов В.М.** Системы управления электроприводов: Учебник для студентов высших учебных заведений. М.: Издательский центр «Академия», 2005. 304 с.

СЛЕПЦОВ Владимир Владимирович – доктор технических наук, главный научный сотрудник ИМАШ им. А.А. Благонравова РАН

СКВОРЦОВ Сергей Александрович – кандидат технических наук, старший научный сотрудник ИМАШ им. А.А. Благонравова РАН

ОРЛОВ Алексей Викторович – программист ИМАШ им. А.А. Благонравова РАН

КОВАЛЕВА Наталья Львовна – кандидат технических наук, старший научный сотрудник ИМАШ им. А.А. Благонравова РАН

РОМАНОВ Андрей Александрович – инженер ИМАШ им. А.А. Благонравова РАН

ШВЕЦ Павел Александрович – аспирант ИМАШ им. А.А. Благонравова РАН

RUS WELD

Россия, Москва, ЦВК «ЭКСПОЦЕНТР»

18-21.10.21



Международная специализированная выставка
«Оборудование, технологии и материалы
для процессов сварки и резки»

www.rusweld-expo.ru

Организатор

При поддержке

Под патронатом



Реклама 12+

