



**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. Благодирова 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 схмотехническую реализацию РЭП

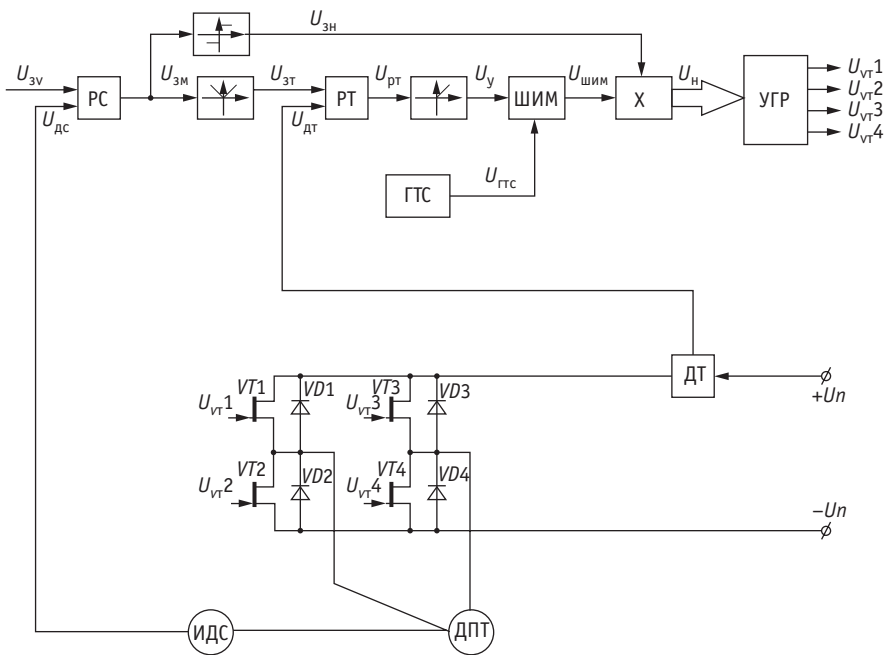


Рис. 1.

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;  $U_{3с}$ ,  $U_{3м}$  – 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

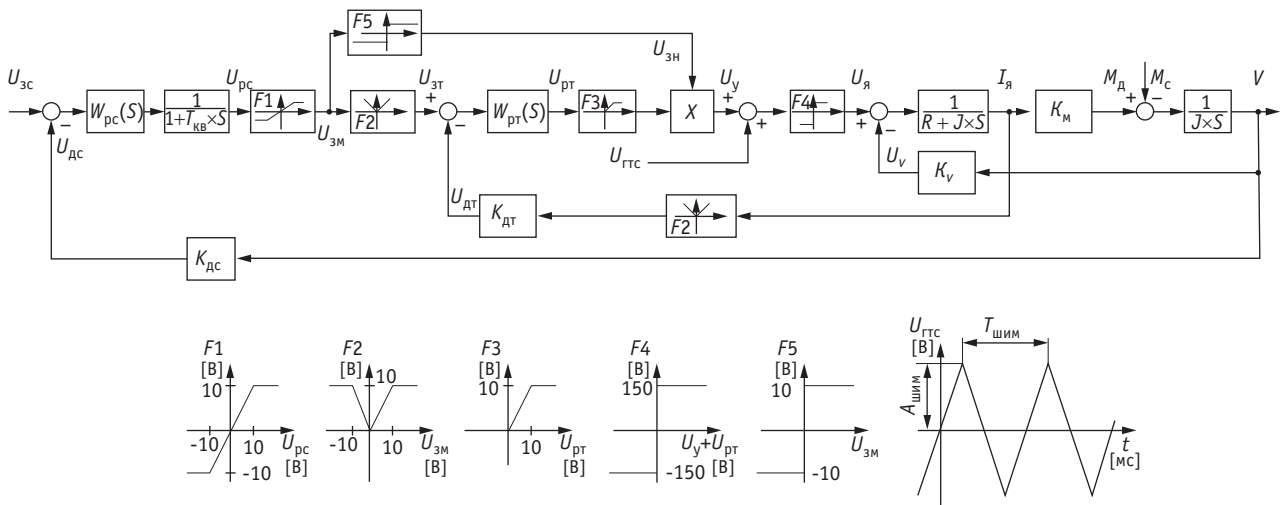


Рис. 2. Схемотехническая модель РЭП с транзисторным сервоусилителем и электродвигателем постоянного тока типа WG3929:  $W_{pc}(S)$ ,  $W_{pt}(S)$  – передаточные функции регуляторов скорости и тока;  $R$ ,  $L$  – активное сопротивление и индуктивность якорной цепи двигателя постоянного тока;  $K_m$ ,  $K_v$  – 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 – схемотехнические 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 аperiodическое 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.

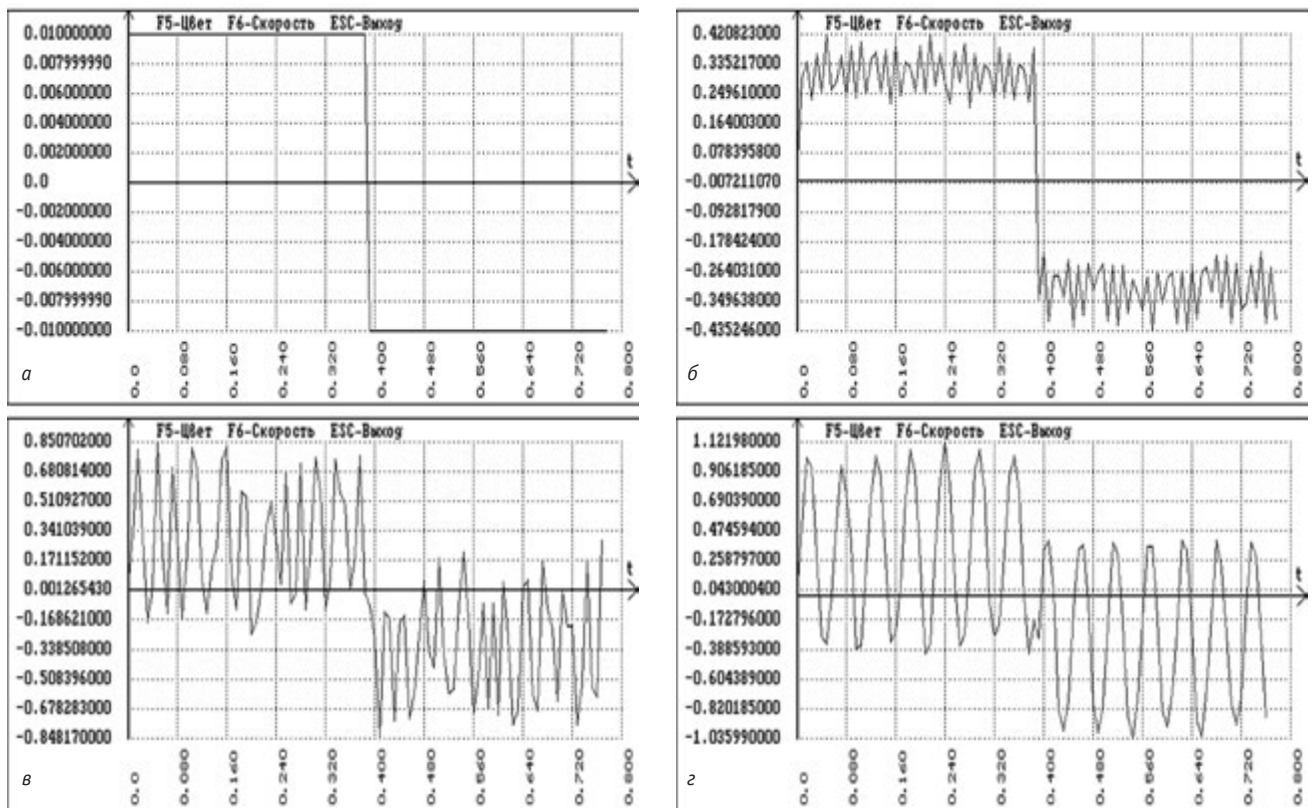


Рис. 3. Входной сигнал  $U_{\text{зс}} = \pm 0,01$  В (а) и тахограммы в схемотехнической модели РЭП при  $T_{\text{кв}} = 0,0005$  с (б),  $T_{\text{кв}} = 0,0008$  с (в),  $T_{\text{кв}} = 0,001$  с (з)

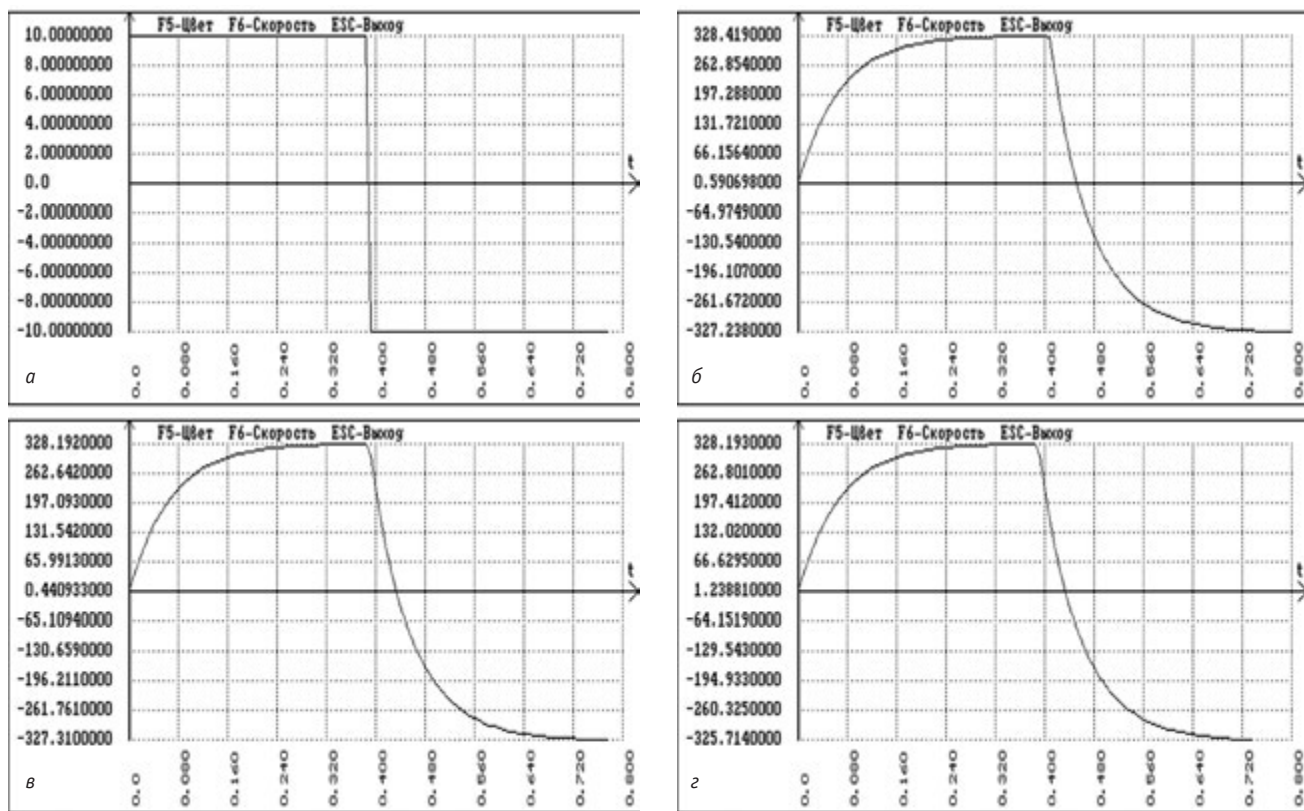


Рис. 4. Входной сигнал  $U_{зс} = \pm 10$  В (а) и тахограммы в схмотехнической модели РЭП при  $T_{кв} = 0,0005$  с (б),  $T_{кв} = 0,0008$  с (в),  $T_{кв} = 0,001$  с (г)

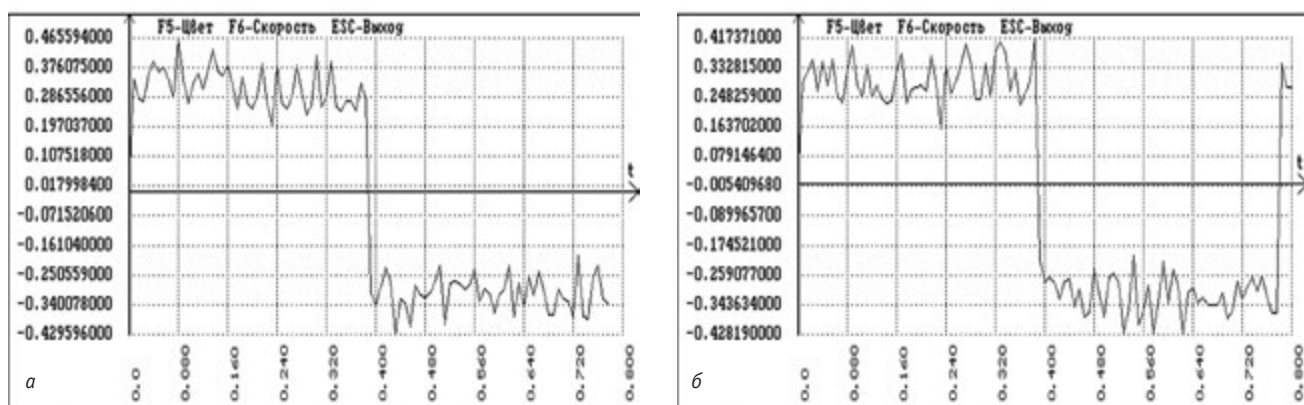


Рис. 5. Тахограммы в схмотехнической модели РЭП при  $U_{зс} = 0,01$  В: а –  $f = 1000$  Гц, б –  $f = 500$  Гц

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  $30^\circ$ , 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.



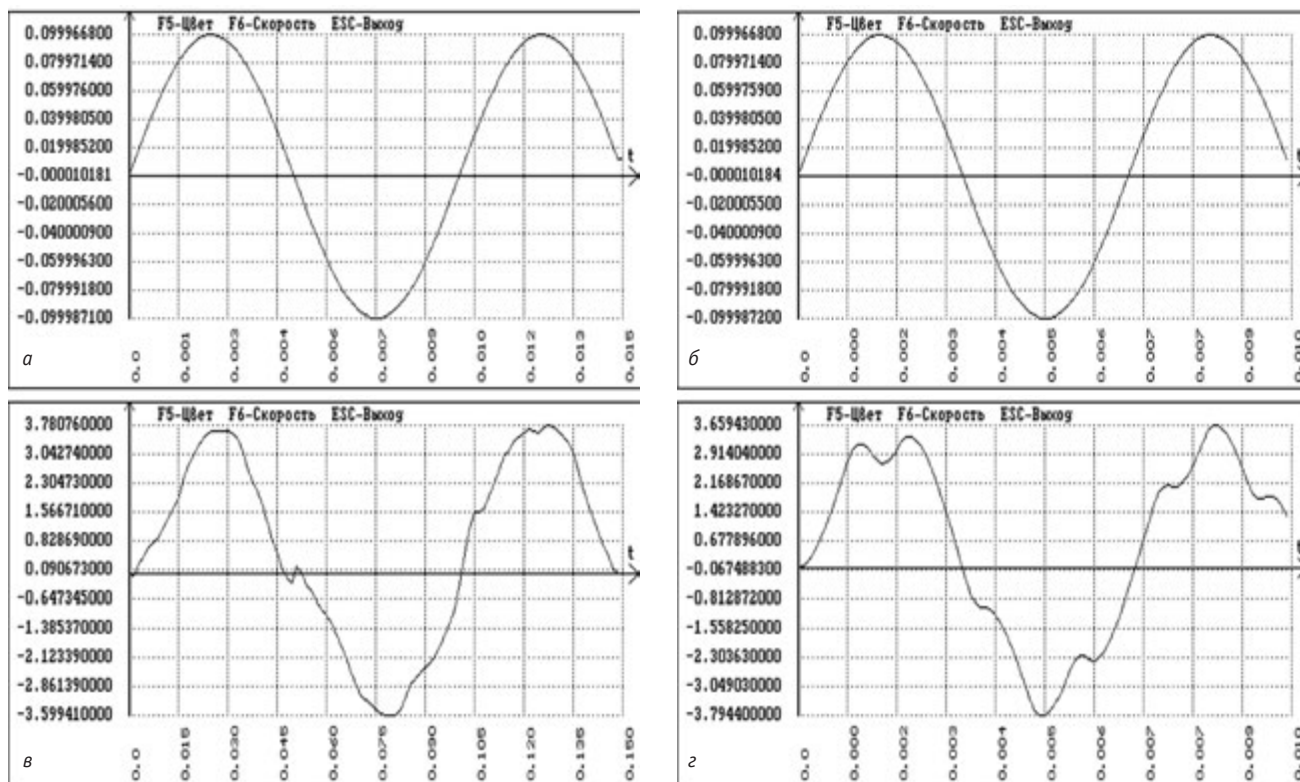


Рис. 6. Входные сигналы: а –  $U_{zc} = 0,1 \times \sin(62t)$ , б –  $U_{zc} = 0,1 \times \sin(620t)$ , в и г – тахограммы в схемотехнической модели РЭП

- 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](http://www.rusweld-expo.ru)

Организатор

При поддержке

Под патронатом



Реклама 12+

