

ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ И УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ INFORMATION-MEASURING AND CONTROL SYSTEMS

УДК 681.5.034

doi:10.21685/2307-5538-2023-1-1

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ И УПРАВЛЯЮЩИХ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОПРИВОДА

М. В. Мостовской¹, В. В. Слепцов², В. П. Орлов³, С. В. Артемова⁴

^{1,2,3,4}МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, Россия

^{1,4}mvmmost@yandex.ru, ²vsleptsov@gmail.com, ³ovp403@yandex.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Предлагается методика определения метрологических характеристик электроприводов промышленного назначения на ранних стадиях проектирования. *Материалы и методы.* Приводится теоретическая методика оценки метрологических характеристик электроприводов промышленного назначения согласно требованиям, предъявляемым ГОСТ 27803-91. Подробно освещены основные этапы исследований, расчетные формулы и рекомендации к проведению практических испытаний. Разработана имитационная модель информационно-измерительной и управляющей системы электропривода с двигателем ДПУ-200-550-3-Д41. *Результаты и выводы.* Представлены результаты имитационного моделирования и практических испытаний информационно-измерительной и управляющей системы электропривода с двигателем ДПУ-200-550-3-Д41, соответствующие требованиям ГОСТ 27803-91.

Ключевые слова: электропривод, диапазон регулирования скорости, коэффициент неравномерности вращения, погрешность скорости вращения, двигатель постоянного тока, имитационная модель

Для цитирования: Мостовской М. В., Слепцов В. В., Орлов В. П., Артемова С. В. Теоретическая оценка метрологических характеристик информационно-измерительных и управляющих систем электропривода // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2023. № 1. С. 5–16. doi:10.21685/2307-5538-2023-1-1

THEORETICAL ESTIMATION METROLOGICAL CHARACTERISTICS OF INFORMATION-MEASURING AND CONTROL SYSTEMS ELECTRIC DRIVE

M.V. Mostovskoy¹, V.V. Sleptsov², V.P. Orlov³, S.V. Artemova⁴

^{1,2,3,4}MIREA – Russian Technological University, Moscow, Russia

^{1,4}mvmmost@yandex.ru, ²vsleptsov@gmail.com, ³ovp403@yandex.ru

Abstract. *Background.* Determination of the metrological characteristics of electric drives for industrial use at the early stages of design. *Materials and methods.* A theoretical method for determining the metrological characteristics of industrial electric drives in accordance with the requirements specified in GOST 27803-91 is given. The main stages of research, calculation formulas and recommendations for conducting practical tests are covered in detail. A simulation model of an information-measuring and control system of an electric drive with a DPU-200-550-3-D41 engine has been developed. *Results and conclusions.* The results of simulation modeling and practical testing of the information-measuring and control system of an electric drive with a DPU-200-550-3-D41 engine that meet the requirements of GOST 27803-91 are presented.

Keywords: electric drive, speed control range, rotation non-uniformity coefficient, rotation speed error, DC motor, simulation model

For citation: Mostovskoy M.V., Sleptsov V.V., Orlov V.P., Artemova S.V. Theoretical estimation metrological characteristics of information-measuring and control systems electric drive. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measuring. Monitoring. Management. Control.* 2023;(1):5–16. (In Russ.). doi:10.21685/2307-5538-2023-1-1

Введение

Одним из наиболее энергоемких потребителей и преобразователей электрической энергии являются электрические приводы [1]. Электрический привод (ЭП) представляет собой совокупность электромеханических и информационно-управляющих устройств, задачей которого является преобразование электрической энергии и приведение в движение исполнительных органов промышленного оборудования широкого спектра применения. Основными составляющими регулируемого электропривода являются электрический двигатель (постоянного или переменного тока), исполнительные механизмы, информационно-измерительная и управляющая система (ИИУС), включающая в себя датчики обратных связей [2].

Электрические приводы, применимые в составе промышленного оборудования, можно классифицировать по типу контролируемого параметра (скорость, положение). Так, например, в металлообрабатывающих станках основным контуром управления является замкнутый контур управления положением, который обеспечивает с заданной точностью движение рабочего органа (режущего инструмента или координатного стола) над поверхностью обрабатываемой детали. Перемещение рабочего органа в пределах рабочего пространства станка выполняет двух (X, Y) или трех (X, Y, Z) координатная механическая система, которая включает электрические приводы, систему измерения линейных и угловых перемещений и кинематическую схему. Следует отметить, что потребительские характеристики технологических машин (станков, промышленных роботов, лазерных технологических установок, робокаров и др.) во многом определяются метрологическими характеристиками входящих в их состав электроприводов.

С практической точки зрения определение метрологических характеристик разрабатываемых электроприводов технологических машин является крайне трудной задачей, требующей наличия серьезных материально-технических возможностей. Однако современные компьютерные технологии, в основе которых лежат прикладные пакеты, предоставляют возможность глубокого изучения вопросов, связанных с проектированием и исследованием ЭП на ранних стадиях проектирования. Подобные методики изложены в статье и литературе [3–5].

Материалы и методы

В статье [6] описана методика оценки метрологических характеристик регулируемого электрического привода (РЭП) методом схемотехнического моделирования. Основной концепцией методики является разработка и исследование имитационной модели разрабатываемого электропривода согласно требованиям ГОСТ 27803-91 «Электроприводы, регулируемые для металлообрабатывающего оборудования и промышленных роботов. Технические требования» на соответствие общим требованиям и расчетным формулам для определения погрешности скорости при изменении нагрузки, коэффициента неравномерности вращения и диапазона регулирования скорости, изложенным в пп. 2.4.7, 2.4.10.

Предлагаемая методика оценки метрологических характеристик регулируемых электроприводов содержит следующие пункты [6]:

- разработка или выбор математической модели исследуемого электродвигателя;
- разработка обобщенной модели разрабатываемой ИИУС ЭП;
- расчет параметров регуляторов и датчиков обратной связи;
- расчет коэффициента неравномерности k_n и диапазона регулирования скорости D ;
- проведение измерений.

Математическая модель электродвигателя

Согласно условию данного пункта математическая модель разрабатываемого электродвигателя должна представлять собой систему дифференциальных уравнений, описывающую основные электромеханические процессы, происходящие в двигателе. Основным критерием качества разработанной математической модели является соответствие переходных процессов (тахограмм) скорости вращения с тахограммами реального электрического двигателя, работающего в режиме прямого пуска. В случае разработки модели бесколлекторного двигателя постоянного тока или асинхронного двигателя сравнение тахограмм скорости осуществляется

прямым пуском с ограничением питающего напряжения. Сравнение экспериментальных данных и результатов моделирования может осуществляться в таких программных пакетах, как *Matlab Simulink*, *SimInTech*, *Scilab*, *LabVIEW* и др. При необходимости (в случае больших расхождений результатов моделирования – на практике более 10 %) математическая модель корректируется до обеспечения необходимой точности. Разработанная математическая модель служит эталоном, по которому можно сверять результаты исследований.

Рассмотрим пример реализации пункта 1 данной методики на примере регулируемого по скорости ЭП с магнитоэлектрическим двигателем постоянного тока (МДПТ) ДПУ-200-550-3-Д41, математическая модель которого, включая модель исполнительного органа, приводится в литературе [5, 7–9], а основные технические характеристики приведены в табл. 1.

Таблица 1

Характеристики двигателя ДПУ-200-550-3-Д41

Номинальная мощность электродвигателя, Вт	550
Номинальная частота вращения, об/мин	3000
Напряжение питания электродвигателя, В	92
Номинальный ток якоря электродвигателя, А	7,4
Номинальный момент, Нм	1,7
Момент инерции электродвигателя, кг·м ²	0,00005
Сопротивление обмотки якоря электродвигателя, Ом	1,2
Индуктивность обмотки якоря электродвигателя, Гн	0,001
Коэффициент передачи по моменту, Н·м/А	0,23
Коэффициент противоЭДС, В·с/рад	0,29

Система дифференциальных уравнений двигателя имеет вид

$$\begin{cases} U_{обм} = R_{обм} I_{обм} + L \frac{dI_{обм}}{dt} + k_{ЭДС} \omega; \\ J \frac{d\omega}{dt} = k_m I_{обм} - M_n, \end{cases} \quad (1)$$

где $U_{обм}$, $I_{обм}$ – напряжение и ток в обмотке статора; $R_{обм}$, $L_{обм}$ – сопротивление и индуктивность обмотки якоря; J – момент инерции двигателя; $k_{ЭДС}$, k_m – конструктивные коэффициенты электродвигателя; ω – угловая частота; M_n – момент на валу двигателя.

В свою очередь конструктивные коэффициенты ДПТ рассчитываются по выражениям

$$k_m = \frac{M_n}{I_n}; k_{ЭДС} = \frac{30(U_n - R_{обм} I_n)}{\pi n_n},$$

где n_n – номинальная скорость вращения; M_n – номинальный момент электродвигателя.

Проведем сравнительный анализ переходных процессов линейной и физической имитационных моделей МДПТ при прямом пуске (рис. 1). Моделирование будем проводить в программе *Matlab Simulink*.

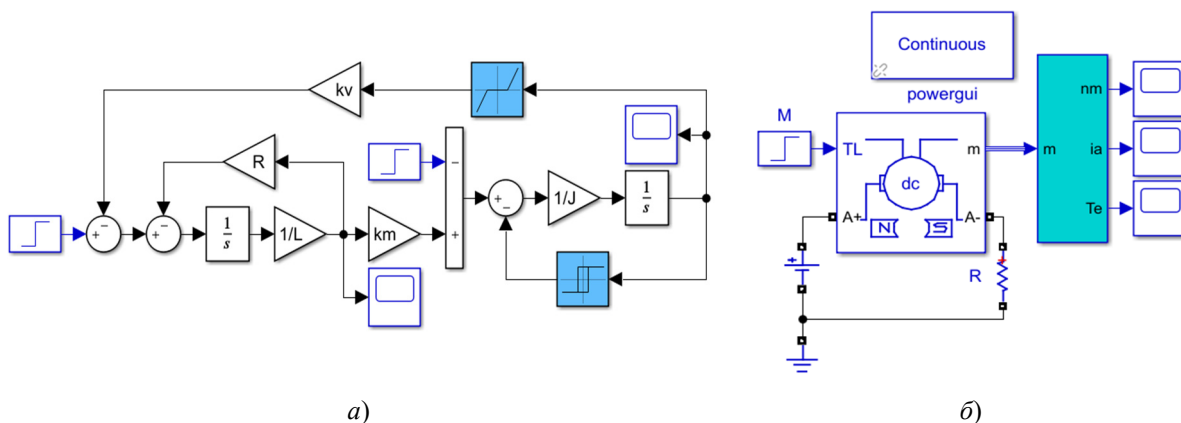


Рис.1. Линейная (а) и физическая (б) модели МДПТ в программе *Matlab Simulink*

Линейная модель МДПТ (рис. 1,а) повторяет систему дифференциальных уравнений (1) и собрана из стандартных блоков библиотеки *Matlab Simulink*, а физическая модель МДПТ представляет собой блок *DC Machine* библиотеки *Specialized Power Systems*.

Для проведения исследования подадим на вход моделей скачкообразное входное напряжение амплитудой 92 В и определим переходные процессы типа $I_{\text{обм}}(t)$, $\Omega(t)$ (рис. 2).

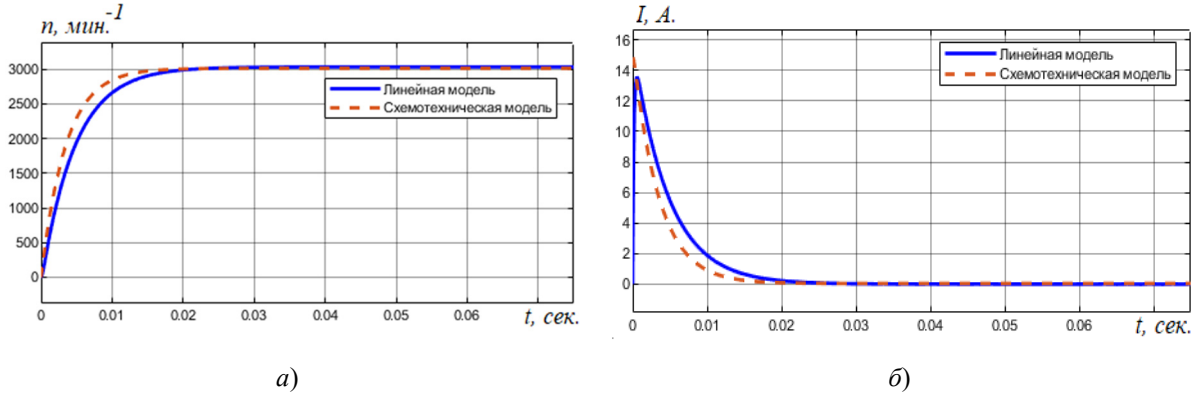


Рис. 2. Переходные процессы в имитационных моделях

Из рисунка видно, что переходные процессы для линейной и физической модели практически совпадают (расхождение по скорости не превышает 10 %).

Разработка общей имитационной модели ЭП

Данный пункт заключается в разработке имитационной модели ИИУС электропривода согласно структурной и функциональной схемам и отражает основные особенности разрабатываемого электропривода. Как правило, обобщенная виртуальная имитационная модель ЭП содержит модели электрических двигателей, исполнительных устройств, регуляторов, датчиков обратных связей, преобразователей координат, широтно-импульсных модуляторов (ШИМ), силовых преобразователей и других и имеет вид, представленный на рис. 3.

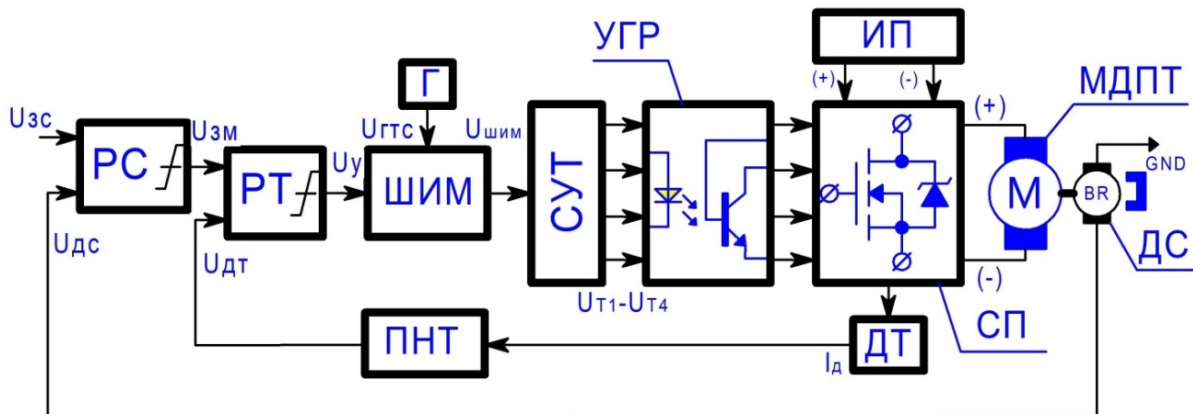


Рис. 3. Функциональная схема ЭП с преобразователем типа ПРШ-102, электродвигателем ДПУ-200-550 и тахогенератором ТП-50: РС, РТ – регуляторы скорости и тока; ГТС – генератор треугольного сигнала; ШИМ – широтно-импульсный модулятор; СУТ – схема управления транзисторами; УГР – устройство гальванической развязки; СП – силовой преобразователь; ДПТ – двигатель постоянного тока; ПНТ – преобразователь ток/напряжение; ДТ – датчик тока; ДС – датчик скорости

Линейная имитационная модель ИИУС ЭП содержит модели электрического двигателя, исполнительных устройств, регуляторов, датчиков обратных связей, силовых преобразователей и т.д. и имеет вид, представленный на рис. 4.

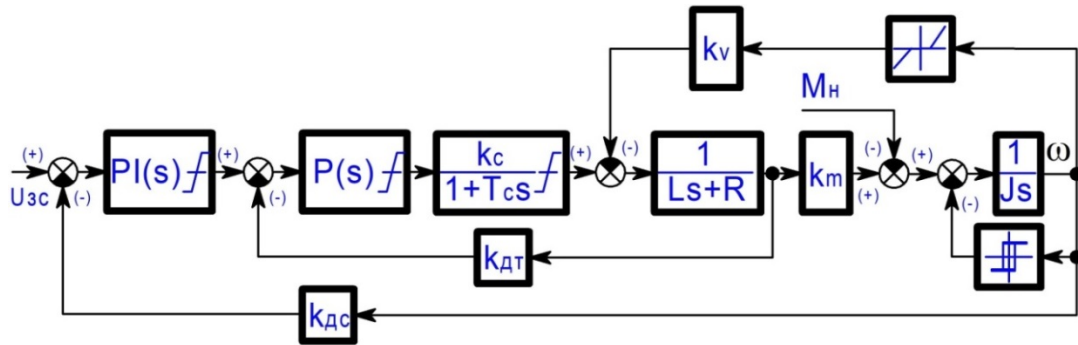


Рис. 4. Линейная имитационная модель ИИУС ЭП

Коэффициенты передачи датчика тока [10], датчика скорости и силового преобразователя можно рассчитать по выражениям (2), (3) и (4) соответственно:

$$k_{дт} = \frac{U_{рт}}{2i_{я}^н}, \tag{2}$$

где $U_{рт}$ – максимальное выходное напряжение регулятора тока; $i_{я}^н$ – номинальный ток якоря двигателя;

$$k_{дс} = \frac{U_{рс}}{\omega_{max}}, \tag{3}$$

где $U_{рс}$ – максимальное выходное напряжение регулятора скорости; ω_{max} – максимальная угловая скорость двигателя;

$$k_{сп} = \frac{U_{пит}}{U_{y.max}}, \tag{4}$$

где $U_{пит}$ – максимальное напряжение питания силового преобразователя; $U_{y.max}$ – максимальное управляющее напряжение.

Расчет параметров регуляторов

Исходя из классической теории электропривода синтез корректирующих устройств (регуляторов положения, скорости, тока) осуществляется согласно условию настройки контуров на технический и симметричный оптимум [11].

Используя стандартную математическую модель двигателя постоянного тока, передаточную функцию силового преобразователя и коэффициент передачи схемы включения датчика тока, можно определить передаточную функцию регулятора тока исходя из условия настройки контура тока на технический оптимум:

$$W_{рт}(s) = \frac{R}{2T_{сп}k_{сп}k_{дт}} = k_{рт}, \tag{5}$$

где $k_{сп}$ – коэффициент передачи силового преобразователя; $T_{сп}$ – постоянная времени, равная частоте ШИМ; R – сопротивление якорной обмотки двигателя; L – индуктивность якорной обмотки статора; $k_{дт}$ – коэффициент передачи схемы включения датчика тока.

Передаточная функция регулятора скорости при настройке контура скорости на симметричный оптимум имеет вид

$$W_{рс}(s) = \frac{Jk_{дт}(8T_{сп}s + 1)}{32k_{м}T_{сп}^2k_{дс}s} = k_{рс} \frac{T_{рс1}s + 1}{T_{рс2}s + 1}, \tag{6}$$

где J – момент инерции на валу двигателя; $k_{м}$ – электромеханический коэффициент передачи; $k_{дс}$ – коэффициент передачи датчика скорости; $T_{рс1}$, $T_{рс2}$ – постоянные времени регулятора.

**Расчет коэффициента неравномерности k_n
и диапазона регулирования скорости D**

Для определения коэффициента неравномерности вращения k_n и диапазона регулирования скорости D проведем исследование схемотехнической модели с обратной связью по скорости, подав на ее вход сигналы задания скорости в виде скачкообразных импульсов амплитудой от 10 до 0,001 В.

Коэффициент неравномерности вращения (погрешности вращения) определяется максимальным мгновенным значением скорости в установившемся режиме по формуле

$$k_n = 2 \frac{n'_{\max} - n'_{\min}}{n'_{\max} + n'_{\min}},$$

где n'_{\max} , n'_{\min} – максимальное и минимальное значения мгновенной скорости двигателя.

Диапазон регулирования скорости электропривода определяется по формуле

$$D = \frac{\omega_{\max}}{\omega_{\min}} = \frac{n_{\max}}{n_{\min}},$$

где ω_{\max} , ω_{\min} – максимальная и минимальная угловая скорость электрического двигателя соответственно; n_{\max} , n_{\min} – максимальная и минимальная мгновенная скорость электрического двигателя соответственно.

Далее вычисляется абсолютная погрешность скорости при изменении нагрузки (принимают большее из Δ_{H1} и Δ_{H2}) для электроприводов подачи и промышленных роботов согласно выражениям

$$\Delta_{H1} = \frac{|n_{0,15M_d} - n_{0,5M_d}|}{n_{0,5M_d}} \cdot 100\%; \quad \Delta_{H2} = \frac{|n_{M_d} - n_{0,5M_d}|}{n_{0,5M_d}} \cdot 100\%.$$

Для электроприводов главного движения

$$\Delta_{H1} = \frac{|n_{M_d} - n_{0,6M_d}|}{n_{0,6M_d}} \cdot 100\%; \quad \Delta_{H2} = \frac{|n_{0,2M_d} - n_{0,6M_d}|}{n_{0,6M_d}} \cdot 100\%.$$

где n , $n_{0,15}$, $n_{0,2}$, $n_{0,5}$, $n_{0,6}$ – значения скорости соответственно при моментах нагрузки M_d , $0,15 M_d$, $0,2 M_d$, $0,5 M_d$, $0,6 M_d$.

Получившиеся результаты проверяются на соответствие ГОСТ 27803-91.

Результаты измерений

Исходя из ранее полученных результатов [6], ясно, что факторами, значительно влияющими на погрешность скорости электропривода, являются частота ШИМ силового преобразователя и мгновенное значение нагрузки. В случае технической реализации и проведения циклов испытаний электроприводов как на двигателях постоянного, так и переменного токов становится понятно, что предлагаемая методика и используемая модель имеют ряд существенных недостатков:

– регулирующие элементы модели электропривода заданы в виде идеальных передаточных функций (дифференциальных уравнений в области преобразования Лапласа). Известно, что около 60 % выпускаемых электроприводов на базе двигателей постоянного тока промышленного применения (как в России, так и за рубежом) выполнены на аналоговой элементной базе. В случае аналогового исполнения регулирующих элементов в имитационной модели необходимо учесть технические характеристики операционных усилителей, а также влияние погрешностей пассивных элементов схемы;

– коэффициенты передачи датчиков обратной связи взяты без учета схемы их включения;

– логическая схема управления и усилитель мощности представлены в виде блока суммирования (сигнала задания регулятора тока и генератора пилообразных импульсов) и двухпозиционного реле. В данной схеме отсутствует учет влияния параметров пассивных элементов и силовых транзисторов на работу схемы;

– отсутствие исследований, описывающих влияние метода интегрирования и необходимого шага интегрирования на результаты моделирования. Правильный выбор метода интегрирования гарантирует достоверность результатов моделирования, высокую скорость расчетов и соответствие реальным испытаниям.

На основании выявленных недостатков были внесены изменения в схемотехническую модель исследуемого электропривода, согласно которым разрабатываемая имитационная модель должна полностью соответствовать принципиальной электрической схеме электропривода.

Примеры схемотехнической реализации регулятора скорости и тока в программе *Matlab Simulink* с применением библиотеки *Simscape* представлены на рис. 5.

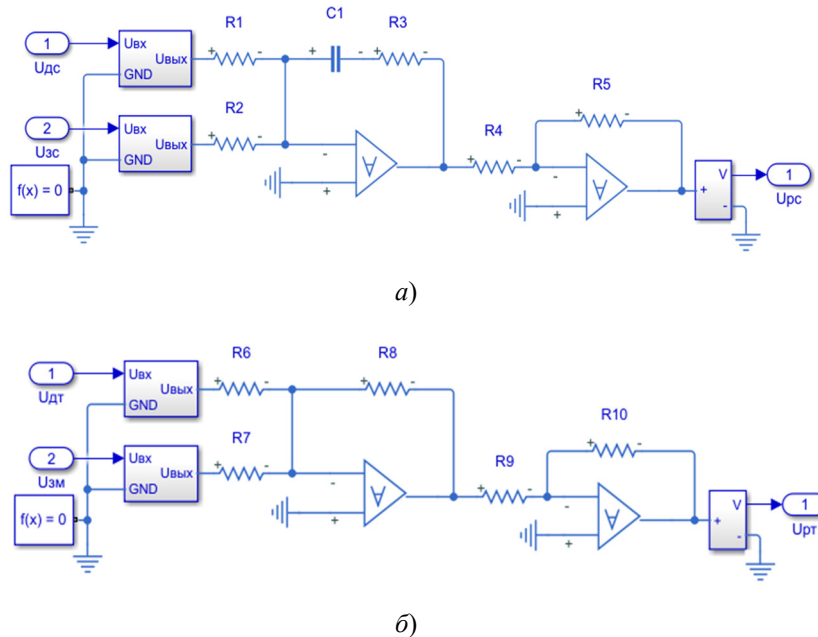


Рис. 5. Схема регулятора скорости (а) и тока (б) в программе *Matlab Simulink*

Регулятор скорости (рис. 5,а) представляет собой пропорционально-интегральный (ПИ) регулятор, выполненный на двух операционных усилителях *Op-Amp_1* и *Op-Amp_2*. Регулятор скорости, собранный на *Op-Amp_1*, определяет рассогласование между входным воздействием и сигналом датчика скорости и вырабатывает управляющие воздействия на регулятор тока. Схемотехнически регулятор скорости построен на базе инвертирующего сумматора с частотно-зависимой обратной связью и имеет два входа: вход задания скорости и вход с датчика скорости (тахогенератора). Пропорциональный и интегральный коэффициенты регулятора формируются последовательным соединением конденсатора C_1 и резистора R_3 , а также входным сопротивлением регулятора, равным сопротивлению R_1 и R_2 . Устранение инверсии выходного управляющего сигнала осуществляется инвертирующим усилителем *Op-Amp_2* с коэффициентом усиления, который определяется путем анализа выходных тахограмм.

После преобразования выражения (3) относительно схемы (рис. 5,а) расчетные формулы для регулятора примут вид

$$k_{pc} = -\frac{R_3}{R_1} \approx -\frac{J_1 k_{дт}}{32 k_m k_{дс} T_{сп}^2}; T_{pc1} \approx 8C_1,$$

где R_1, R_3 – сопротивление постоянных резисторов; C_1 – электрическая емкость конденсатора.

Схема регулятора тока (рис 5,б) представляет собой пропорциональный регулятор, выполненный на двух операционных усилителях *Op-Amp_3* и *Op-Amp_4*. Входными сигналами регулятора тока являются выходные сигналы регулятора скорости (сигнал определяет величину тока на обмотках двигателя) и преобразователя ток/напряжение. Схемотехнически регулятор скорости построен на базе инвертирующего сумматора *Op-Amp_3*. Пропорциональный коэффициент регулятора определяется резисторами обратной связи R_8 и резисторами R_6, R_7 .

Устранение инверсии выходного управляющего сигнала осуществляется инвертирующим усилителем с единичным коэффициентом усиления $Op-Amp_4$.

После преобразования выражения (2) относительно схемы (рис. 5,б) расчетные формулы регулятора тока примут вид

$$k_{pc} = -\frac{R_8}{R_7} \approx \frac{R}{2T_{сп}k_{сп}k_{дт}},$$

где R_8, R_7 – сопротивление постоянных резисторов.

Далее рассмотрим общую схемотехническую модель ИИУС электропривода на базе ДПТ с обратной связью по скорости (рис. 6). В электроприводе применяется ДПТ ДПУ-200-550-3-Д41, частота ШИМ 5 кГц.

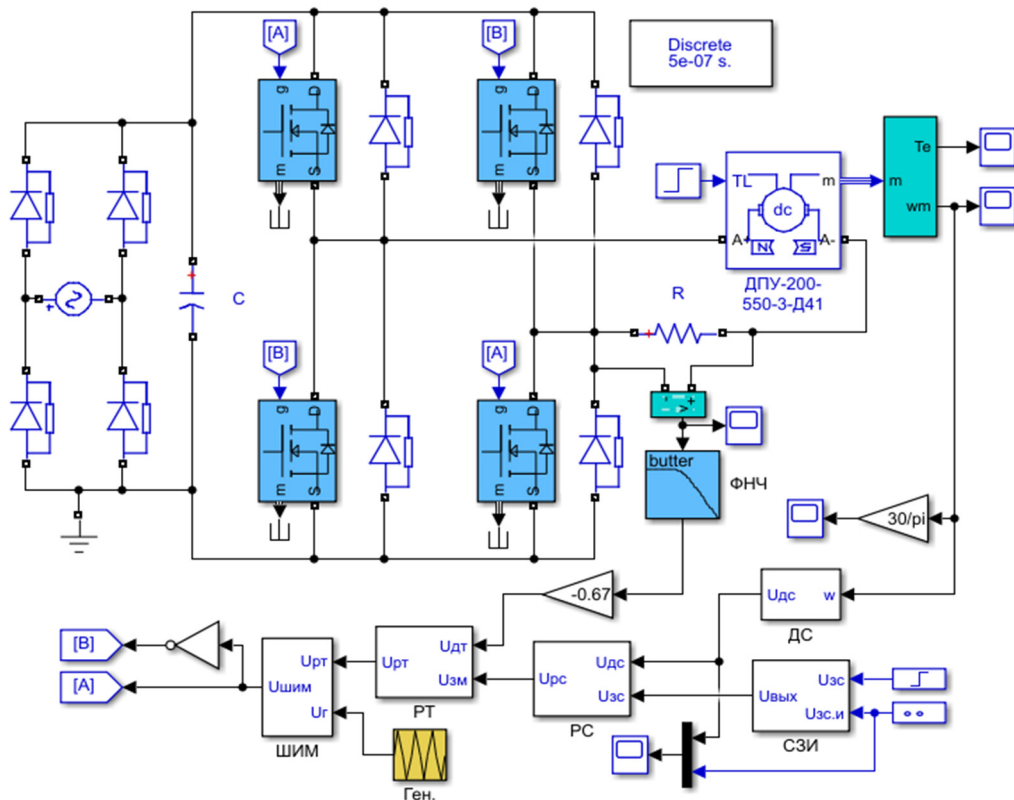


Рис. 6. Имитационная модель ИИУС электропривода в программе *Matlab Simulink*

Подадим на вход имитационной модели ИИУС электропривода (рис. 6) сигналы задания скорости амплитудой 10 и 0,002 В и рассчитаем диапазон регулирования скорости. Результаты моделирования представлены на рис. 7.

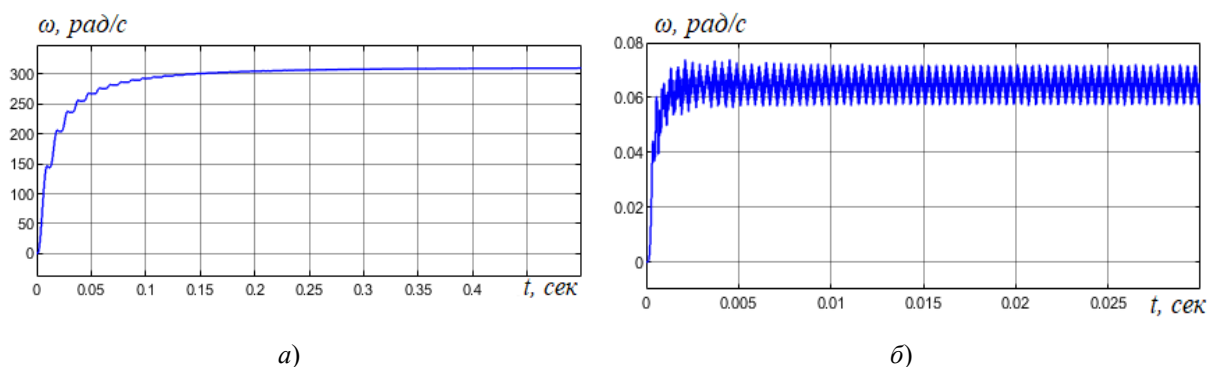


Рис. 7. Тахограммы при входных сигналах амплитудой 10 В (а) и 0,002 В (б)

Из рисунков видно, что поведение электропривода при больших и малых сигналах задания скорости сильно отличается:

- при входном сигнале амплитудой 0,002 В наблюдается перерегулирование в тахограмме примерно на 5 %, что обусловлено настройкой контура регулирования скорости на симметричный оптимум;

- при входном сигнале амплитудой 10 В в тахограмме перерегулирование отсутствует, что обусловлено действием ограничений сигналов регуляторов, усилителя мощности.

Исследования проводились на базе преобразователя типа ПРШ-102 с электродвигателем ДПУ-200-550 и тахогенератором ТП-50. Блок-схема (а) и общий вид (б) лабораторного стенда представлены на рис. 8. Испытания проводились в соответствии с методиками, предложенными в работе [12].

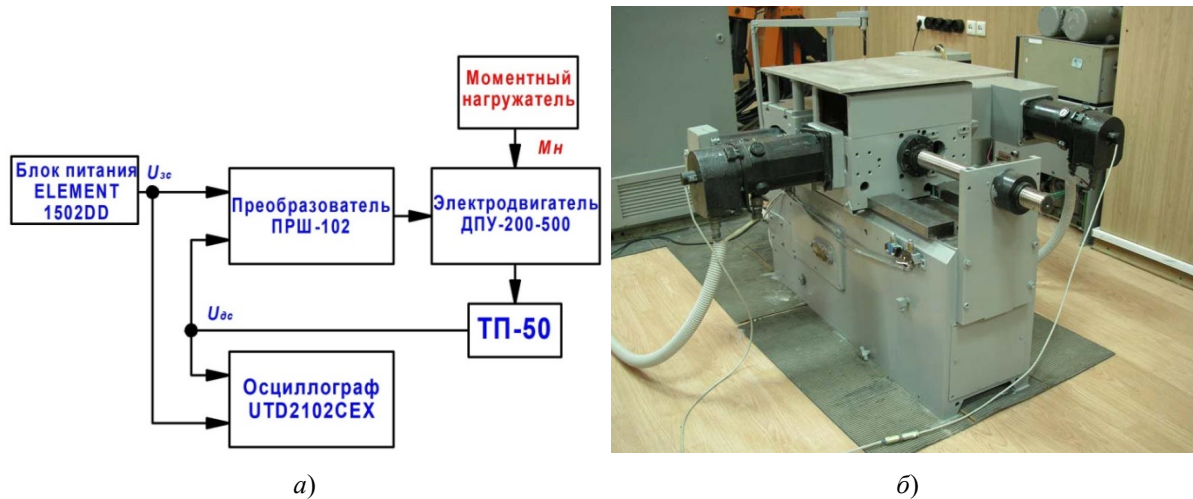


Рис. 8. Блок-схема и общий вид лабораторного стенда

Сравним получившиеся диапазоны регулирования скорости имитационной модели и лабораторного стенда

$$D = \frac{n_{\max}}{n_{\min}}; D_{\text{и.м.}} = \frac{310}{0,062} = 5000; D_{\text{л.с.}} = \frac{310}{0,0621} = 4990,$$

где $D_{\text{и.м.}}$ – диапазон регулирования скорости имитационной модели; $D_{\text{л.с.}}$ – диапазон регулирования скорости лабораторного стенда.

Относительную погрешность диапазона регулирования скорости относительно полученных результатов рассчитаем по формуле

$$\Delta_D = \frac{|D_{\text{л.с.}} - D_{\text{и.м.}}|}{D_{\text{и.м.}}} \cdot 100\%; \Delta_D = 0,2 \%$$

Зная минимально возможную скорость, сравним получившиеся результаты относительно коэффициента неравномерности вращения имитационной модели и лабораторного стенда

$$k_n = 2 \frac{n'_{\max} - n'_{\min}}{n'_{\max} + n'_{\min}}; k_{\text{и.м.}} = 0,161; k_{\text{л.с.}} \approx 0,176,$$

где $k_{\text{и.м.}}$ – коэффициент неравномерности имитационной модели; $k_{\text{л.с.}}$ – коэффициент неравномерности лабораторного стенда.

Тогда относительная погрешность коэффициента неравномерности вращения

$$\Delta_k = \frac{|k_{\text{л.с.}} - k_{\text{и.м.}}|}{k_{\text{и.м.}}} \cdot 100\%; \Delta_k = 8,5 \%$$

Получившиеся результаты измерений соответствуют требованиям ГОСТ 27803-91 и демонстрируют правильность работы имитационной модели.

Определим реакцию системы (лабораторного стенда и имитационной модели) на кратковременное изменение нагрузки. Результаты изменения скорости (тахограммы) в одном из направлений при скорости 140 об/мин и кратковременном действии внешнего момента 0,8 Нм представлены на рис. 9.

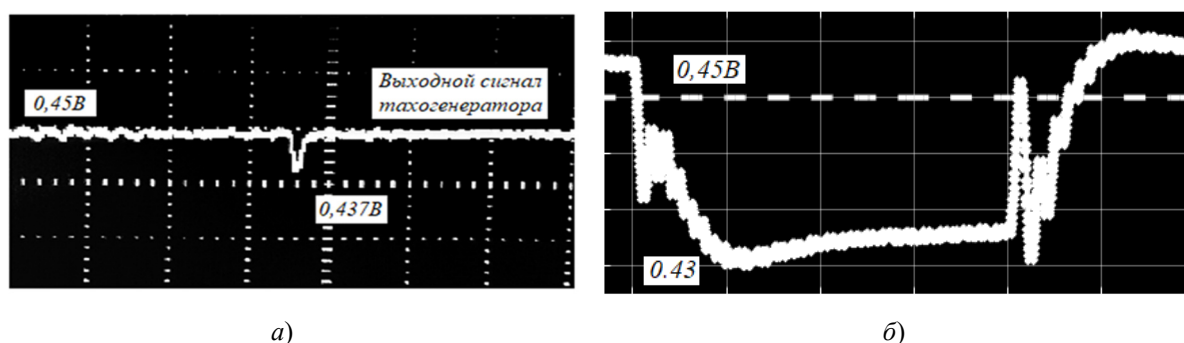


Рис. 9. Тахограмма реакции системы на внешний момент лабораторного стенда (а) и имитационной модели (б) (одна клетка соответствует 0,05 с)

Из рис. 9 видно, что при набросе внешнего возмущающего момента в обеих тахограммах наблюдается сначала провал скорости примерно на 2 %, а затем за время, равное 0,1 с, практически полное восстановление скорости. Кроме того, математическое моделирование более полно фиксирует переходные процессы. Аналогичные эксперименты проводились во всем диапазоне регулирования скорости на соответствие ГОСТ 27803-91. Было подтверждено, что диапазон регулирования скорости электропривода составляет ≈ 5000 .

Заключение

На основании вышеизложенного материала можно сделать следующие выводы:

- предлагаемая методика позволяет уточнить, а в некоторых случаях определить отдельные характеристики электроприводов (диапазон регулирования, коэффициент неравномерности и пр.);
- предварительный синтез регуляторов контуров управления проектируемых ИИУС электропривода целесообразно проводить с использованием линейных моделей для обеспечения их настройки на технический и симметричный оптимумы;
- анализ ИИУС электропривода следует проводить с использованием их нелинейных моделей и программных пакетов *Matlab Simulink*, *SimInTech*, *Scilab*, *LabVIEW* и др.;
- для обеспечения минимальной погрешности расчетов целесообразно использовать программу *Matlab Simulink* с библиотекой *Simscape*.

Список литературы

1. Терехов В. М. Системы управления электроприводов : учебник для студентов высших учебных заведений. М. : Академия, 2005. 304 с.
2. Елисеев В. А., Шинянский А. В. Справочник по автоматизированному электроприводу. М. : Энергоатомиздат, 1983. 616 с.
3. Высоцкий В. Е., Воронин С. М., Горшков Р. Г. Имитационное моделирование электромагнитных и электромеханических процессов вентильного двигателя // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. 2011. № 1. С. 1–4.
4. Герман-Галкин С. Г. *Matlab & Simulink*. Проектирование мехатронных систем на ПК. СПб. : КОРОНА-Век, 2008. 368 с.
5. Герман-Галкин С. Г. Компьютерное моделирование полупроводниковых систем в *Matlab 6.0* : учеб. пособие. СПб. : Корона Принт, 2017. 320 с.
6. Слепцов В. В., Мостовской М. В. Методика оценки метрологических характеристик регулируемого электропривода методом схематехнического моделирования // Законодательная и прикладная метрология. 2021. № 1. С. 22–26.
7. Анучин А. С. Системы управления электроприводов : учебник для вузов. М. : Изд. дом МЭИ, 2015. 373 с.
8. Karpagavalli P., Ebenezer Jeyakumar A. PID controller based full bridge DC-DC converter for closed loop DC motor with unipolar voltage switching // U.P.B. Sci. Bull., Series C. 2015. Vol. 77, iss. 1.

9. Krause P. C., Wasynczuk O., Sudhoff S. D. Analysis of electric machinery and drive systems. EEE Press, 2002. 613 p.
10. Терехин В. Б. Компьютерное моделирование систем электропривода в Simulink. М. : Юрайт, 2018. 306 с.
11. Коновалов Б. И. Теория автоматического управления : учеб. пособие для вузов. 5-е изд., стер. СПб. : Лань, 2020. 220 с.
12. Слепцов В. В., Шмелева А. Г., Галемина А. А. Разработка стенда для определения технических характеристик регулируемых по скорости электроприводов // Приборы. 2017. № 4. С. 26–32.

References

1. Terekhov V.M. *Sistemy upravleniya elektroprivodov: uchebnyk dlya studentov vysshikh uchebnykh zavedeniy = Control systems of electric drives : textbook for students of higher educational institutions*. Moscow: Akademiya, 2005:304. (In Russ.)
2. Eliseev V.A., Shinyanskiy A.V. *Spravochnik po avtomatizirovannomu elektroprivodu = Handbook of automated electric drive*. Moscow: Energoatomizdat, 1983:616. (In Russ.)
3. Vysotskiy V.E., Voronin S.M., Gorshkov R.G. Simulation modeling of electromagnetic and electromechanical processes of a valve engine. *Vestnik Ivanovskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta = Bulletin of the Ivanovo State Power Engineering University*. 2011;(1):1–4. (In Russ.)
4. German-Galkin S.G. *Matlab & Simulink. Proektirovanie mekhatronnykh sistem na PK = Matlab & Simulink. Designing mechatronic systems on a PC*. Saint Petersburg: KORONA-Vek, 2008:368. (In Russ.)
5. German-Galkin S.G. *Komp'yuternoe modelirovanie poluprovodnikovyykh sistem v Matlab 6.0: ucheb. posobie = Computer modeling of semiconductor systems in Matlab 6.0 : textbook*. Saint Petersburg: Korona Print, 2017:320. (In Russ.)
6. Sleptsov V.V., Mostovskoy M.V. Methodology for assessing metrological characteristics of a regulated electric drive by the method of circuit modeling. *Zakonodatelnaya i prikladnaya metrologiya = Legislative and applied metrology*. 2021;(1):22–26. (In Russ.)
7. Anuchin A.S. *Sistemy upravleniya elektroprivodov: uchebnyk dlya vuzov = Control systems of electric drives : textbook for universities*. Moscow: Izd. dom MEI, 2015:373. (In Russ.)
8. Karpagavalli P., Ebenezer Jeyakumar A. PID controller based full bridge DC-DC converter for closed loop DC motor with unipolar voltage switching. *U.P.B. Sci. Bull., Series C*. 2015;77(1).
9. Krause P.C., Wasynczuk O., Sudhoff S.D. *Analysis of electric machinery and drive systems*. EEE Press, 2002:613.
10. Terexhin V.B. *Komp'yuternoe modelirovanie sistem elektroprivoda v Simulink = Computer modeling of electric drive systems in Simulink*. Moscow: Yurayt, 2018:306. (In Russ.)
11. Konovalov B.I. *Teoriya avtomaticheskogo upravleniya: ucheb. posobie dlya vuzov. 5-e izd., ster. = Theory of automatic control : textbook. manual for universities. 5th ed.* Saint Petersburg: Lan', 2020:220. (In Russ.)
12. Sleptsov V.V., Shmeleva A.G., Galemina A.A. Development of a stand for determining the technical characteristics of speed-controlled electric drives. *Pribory = Devices*. 2017;(4):26–32. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Михаил Владимирович Мостовской
старший преподаватель кафедры приборов
и информационно-измерительных систем,
МИРЭА – Российский
технологический университет
(Россия, г. Москва, пр-т Вернадского, 78)
E-mail: mvmost@yandex.ru

Mikhail V. Mostovskoy
Lecturer of the sub-department of instruments
and information and measurement systems,
MIREA – Russian Technological University
(78 Vernadsky avenue, Moscow, Russia)

Владимир Владимирович Слепцов
доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры приборов
и информационно-измерительных систем,
МИРЭА – Российский
технологический университет
(Россия, г. Москва, пр-т Вернадского, 78)
E-mail: vsleptsov@gmail.com

Vladimir V. Sleptsov
Doctor of technical sciences, professor,
professor of the sub-department of instruments
and information and measurement systems,
MIREA – Russian Technological University
(78 Vernadsky avenue, Moscow, Russia)

Валерий Павлович Орлов

кандидат технических наук,
доцент кафедры приборов
и информационно-измерительных систем,
МИРЭА – Российский
технологический университет
(Россия, г. Москва, пр-т Вернадского, 78)
E-mail: ovpr403@yandex.ru

Valery P. Orlov

Candidate of technical sciences,
associate professor of the sub-department
of instruments and information
and measurement systems,
MIREA – Russian Technological University
(78 Vernadsky avenue, Moscow, Russia)

Светлана Валерьевна Артемова

доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры информатики,
МИРЭА – Российский
технологический университет
(Россия, г. Москва, пр-т Вернадского, 78)
E-mail: mvmost@yandex.ru

Svetlana V. Artemova

Doctor of technical sciences, professor,
professor of the sub-department of informatics,
MIREA – Russian Technological University
(78 Vernadsky avenue, Moscow, Russia)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /

The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию/Received 24.10.2022

Поступила после рецензирования/Revised 24.11.2022

Принята к публикации/Accepted 23.12.2022