

Научная статья

УДК 681.5.034

<https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2022-2-8-13>

Регулируемый электропривод для лазерных технологических установок: оценка метрологических характеристик методом схемотехнического моделирования

Мостовской Михаил Владимирович

МИРЭА-Российский технологический университет, Москва, Россия, mvmost@yandex.ru

Аннотация. Описано актуальное направление развития станкостроения – внедрение лазерных технологических установок. Приведены способы повышения качества операций, выполняемых на лазерных установках, например операций резки листовых материалов. Показана необходимость совершенствования метода управления регулируемым электроприводом лазерных установок. Рассмотрены особенности построения информационно-измерительных и управляющих систем электропривода. Исследована работа регулируемого электропривода на базе бесколлекторного двигателя постоянного тока с оригинальной компоновкой датчиков. Методом схемотехнического моделирования численно оценены метрологические характеристики регулируемого электропривода. Достоверность полученных данных экспериментально подтверждена результатами испытаний макетного образца.

Ключевые слова: информационно-измерительные и управляющие системы, электропривод, лазерные технологические установки, бесколлекторный двигатель постоянного тока, диапазон регулирования скорости, коэффициент неравномерности вращения, схемотехническое моделирование

Для цитирования: Мостовской М. В. Регулируемый электропривод для лазерных технологических установок: оценка метрологических характеристик методом схемотехнического моделирования // Измерительная техника. 2022. № 2. С. 8–13. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2022-2-8-13>

Adjustable electric drive for laser technological installations: assessment of metrological characteristics by the method of circuit simulation

Mostovskoy Mikhail Vladimirovich

Russian Technological University, Moscow, Russia, mvmost@yandex.ru

Abstract. In this paper describes the current direction in the development of machine tool industry – the introduction of laser technological installations. Methods are given for improving the quality of operations performed on laser machines, for example, operations for cutting sheet materials. The need to improve the method of controlling the adjustable electric drive of laser systems is shown. The features of the construction of information-measuring and control systems of the electric drive are considered. The operation of an adjustable electric drive based on a brushless DC motor with an original arrangement of sensors has been studied. The metrological characteristics of an adjustable electric drive are numerically estimated by the method of circuit simulation. The reliability of the obtained data is experimentally confirmed by the results of tests of the mock-up sample.

Keywords: control system, electric drive, laser machines, brushless dc motor, speed control range, rotation unevenness coefficient, mathematical model, circuit simulation

Введение. Станкостроение – одна из передовых отраслей промышленности, целью которой является разработка и производство промышленного оборудования широкого спектра применения. Актуальное направление развития станкостроения – внедрение технологии лазерной обработки и создание станков на её основе. Станки лазерной обработки широко используются для сварки, упрочнения, резки, маркировки, гравировки, сверления и др.

Порядка 80 % всех лазерных технологических установок (далее – лазерных установок), применяемых на производствах Европы, России и стран СНГ, выполняют операции

резки листовых материалов и крупногабаритных изделий. Технология лазерной резки заключается в расплавлении обрабатываемой поверхности сфокусированным лазерным лучом и дальнейшем выдувании продуктов разрушения из канала реза сжатыми инертными газами [1].

Широкое применение лазерных установок обусловлено рядом преимуществ: отсутствием механического воздействия на обрабатываемый материал; выполнением сложного контурного раскроя в материалах любой твёрдости, плотности и толщины; чистотой среза обрабатываемой заготовки и отсутствием внутренних механических напряжений;

высокой точностью позиционирования; безотходностью; высокой производительностью. Качество операции резки листовых материалов можно повышать за счёт совершенствования кинематических и координатных систем лазерных установок, оригинальной компоновки датчиков, применением современных линейных и ротационных двигателей, а также электроприводов на их основе.

Современный электропривод состоит из электродвигателя и информационно-измерительной и управляющей системы, высокое качество работы которой обеспечивается путём совершенствования функциональных схем электропривода. В статье [2] определены технические требования к указанной системе электропривода лазерных установок: минимально необходимый диапазон регулирования скорости электрического привода не менее 8650; допустимая полоса пропускания частот контура скорости не менее 123 Гц; коэффициент неравномерности вращения $K_{0,001} \leq 0,25$.

Для предварительной количественной оценки метрологических характеристик проектируемых электроприводов согласно требованиям ГОСТ 27803-91 «Электроприводы, регулируемые для металлообрабатывающего оборудования и промышленных роботов. Технические требования» в [3] предложена методика схемотехнического моделирования, содержащая следующие этапы:

выбор и оценка адекватности математической модели электродвигателя, параметры математической модели должны соответствовать параметрам используемого двигателя;

разработка схемотехнической модели электропривода, соответствующей его общей структурной и электрической схемам;

расчёт передаточных функций регуляторов тока и скорости с учётом условий технического и симметричного оптимума, а также коэффициентов передачи и постоянных времени силового преобразователя, датчиков обратной связи (в рассматриваемом случае – датчиков тока и скорости);

установка ограничений относительно выходного управляющего сигнала регуляторов и схемы силового преобразователя;

численная оценка метрологических характеристик разрабатываемого электропривода (диапазона регулирования скорости, коэффициента неравномерности вращения) осуществляется путём подачи на вход схемотехнической модели сигнала задания скорости в виде ступенчатых воздействий разной амплитуды.

Для перемещения режущего инструмента в трёхкоординатных портальных кинематических схемах лазерных установок с рабочей областью более 1500 мм применяются ротационные электрические двигатели постоянного и переменного тока. В современных электроприводах лазерных установок широко используются бесколлекторные двигатели постоянного тока (БДПТ), что обусловлено их хорошими динамическими характеристиками, широким диапазоном регулирования скоростей, низкими энергетическими потерями и высокими показателями надёжности. Особенностью БДПТ является замена щёточно-коллекторного узла полупроводниковым преобразователем. Для переключения тока

в обмотках статора применяется схема преобразователя координат и датчик положения ротора, с помощью которого определяется текущее угловое положение вала двигателя. Высококачественное управление БДПТ представляет собой сложную задачу, её решение требует серьёзных исследований и расчётов с использованием математического моделирования.

Цель работы – оценка метрологических характеристик регулируемого электропривода на базе БДПТ, эксплуатируемого в составе лазерных установок.

Разработка и исследование схемотехнической модели регулируемого электропривода. В настоящее время разработано большое количество математических моделей БДПТ, однако не все пригодны для синтеза параметров проектируемого электропривода. В результате анализа математических моделей БДПТ [4–7] автором настоящей статьи выбрана модель, наиболее близко отражающая динамику объекта управления. Математическая модель представляет собой систему дифференциальных уравнений вида [8]:

$$\left. \begin{aligned} U_A \sin(Zp) &= R I_A(Z) + L \frac{dI_A(Z)}{dt} + \Phi_0 \omega \sin(Zp); \\ U_B \sin\left(Zp - \frac{2\pi}{3}\right) &= R I_B(Z) + L \frac{dI_B(Z)}{dt} + \Phi_0 \omega \sin\left(Zp - \frac{2\pi}{3}\right); \\ U_C \sin\left(Zp - \frac{4\pi}{3}\right) &= R I_C(Z) + L \frac{dI_C(Z)}{dt} + \Phi_0 \omega \sin\left(Zp - \frac{4\pi}{3}\right); \\ M_\Sigma &= \left[I_A(Z) \Phi_0 \sin(Zp) + I_B(Z) \Phi_0 \sin\left(Zp - \frac{2\pi}{3}\right) + \right. \\ &\quad \left. + I_C(Z) \Phi_0 \sin\left(Zp - \frac{4\pi}{3}\right) \right] k_{дв}; \\ J \frac{d\omega}{dt} &= M_\Sigma - M; \quad Z = Z_0 + p \int_0^t \omega dt, \end{aligned} \right\} (1)$$

где U_A, U_B, U_C и I_A, I_B, I_C – амплитуды напряжения и токи соответственно в обмотках А, В, С статора; R, L – сопротивление и индуктивность обмотки статора; Z – угол поворота ротора двигателя; p – количество пар полюсов; Φ_0 – магнитный поток; ω – угловая скорость вращения двигателя; M_Σ – электромагнитный момент; M – приведённый момент; J – момент инерции на валу двигателя; $k_{дв}$ – конструктивный коэффициент двигателя; Z_0 – начальный угол ротора двигателя; p – количество пар полюсов.

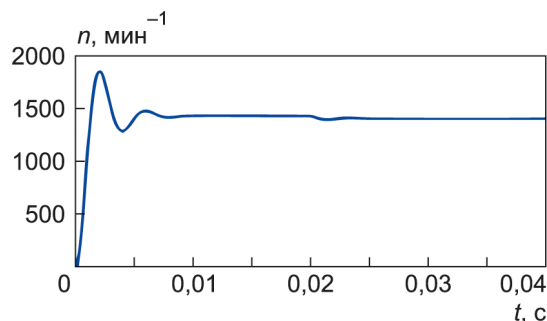


Рис. 1. Переходный процесс исследуемой модели бесколлекторного двигателя постоянного тока

Fig. 1. Transient process of the investigated BLDC model

На основе дифференциальных уравнений (1) разработана математическая модель БДПТ в пакете MatLab Simulink. Моделирование проводилось в течение 0,04 с при максимальных синусоидальных фазовых напряжениях 150 В частотой 50 Гц и приложенным моментом к валу двигателя 1 Н·м в момент времени 0,02 с. Параметры исследуемого двигателя КМ-090-32-02: $R=3$ Ом; $L=0,003$ Гн; $J=0,0002$ кг·м²; $p=4$; $k_{дв}=1$ Н·м/А. График переходного процесса исследуемой модели БДПТ представлен на рис. 1, откуда следует, что исследуемый БДПТ управляем и обладает хорошими динамическими характеристиками: время выхода на номинальную скорость 0,012 с; перерегулирование 30 %.

Для подтверждения работоспособности и оценки метрологических характеристик электропривода разработана схематехническая модель, структурная схема которой представлена на рис. 2. Структурная схема данного электропривода отличается от классических приводов с векторным управлением использованием одного подчинённого контура регулирования тока. Регулируемый электропривод работает следующим образом. Входной сигнал $U_{3с}$ постоянного либо переменного (гармонический сигнал) напряжения в диапазоне ± 10 В задаёт необходимое значение скорости вращения двигателя БДПТ. Согласно ГОСТ 27803-91 амплитуда входного напряжения задания скорости должна быть пропорциональна скорости вращения двигателя. Заданное значение скорости в виде амплитуды входного сигнала $U_{3с}$ поступает на вход блока регулятора скорости РС, где оценивается рассогласование действующего значения скорости вращения и формируется сигнал $U_{3м}$ задания момента двигателя. Регулятор скорости настраивается на симметричный оптимум.

Для устранения отрицательного знака сигнала задания скорости, возникающего при изменении направления вращения двигателя, сигнал задания момента $U_{3м}$ подаётся на вход схемы выделения модуля СВМ. В случае резкого увеличения скорости вращения или динамического изменения момента, приложенного к валу двигателя, для поддержания заданного значения скорости служит регулятор тока РТ, который настраивается на технический оптимум. В регуляторе тока происходит оценка рассогласования действующего значения тока в обмотках статора двигателя и формирование управляющего сигнала. Для задания направления вращения двигателя выходные сигналы регуляторов тока и скорости поступают на входы блока определения знака БОЗ.

После определения направления вращения в блоке БОЗ получившийся выходной сигнал поступает на вход схемы широтно-импульсной модуляции ШИМ. Частота модулирующего сигнала задается генератором пилообразных сигналов Г. Выходной сигнал блока ШИМ поступает на вход блока преобразователя координат БПК силового преобразователя СП. В БПК формируются управляющие сигналы для схемы силового преобразователя двигателя. Алгоритм работы этого блока корректируется выходным сигналом датчика положения ротора ДПР. Этот датчик выполняется на базе датчика Холла или оптического энкодера и встраивается в двигатель. Для упрощения структурной схемы датчик тока ДТ устанавливается на положительном полюсе источника питания ИП схемы силового преобразователя.

Блок преобразователя координат генерирует серию выходных импульсов, которые поступают на вход силового преобразователя, преобразующего входные импульсы в напряжение на обмотках статора двигателя.

Вал двигателя начинает вращаться с некоторой угловой скоростью и в определённом направлении в соответствии с амплитудой и полярностью сигнала задания скорости $U_{3с}$. Скорость вращения и перемещение вала двигателя измеряются датчиком скорости ДС. Зависимость потребляемого двигателем тока от изменения скорости вращения или момента на валу измеряется с помощью ДТ.

Схематехнически блок определения знака может быть основан на микросхеме AD633JN. Для определения знака перемножаются выходные сигналы регуляторов скорости и тока. Схема силового преобразователя базируется на IGBT-транзисторах с защитными диодами. Схема преобразователя ток/напряжение состоит из генератора пилообразных импульсов, схемы формирователя, преобразователя

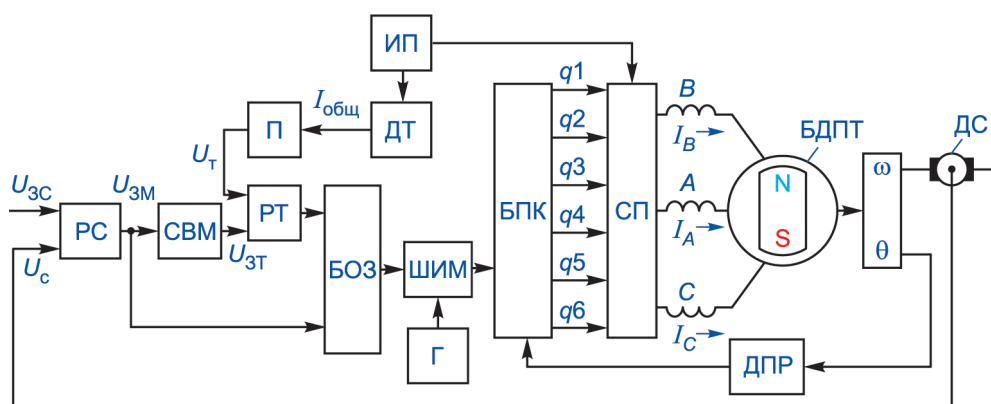


Рис. 2. Структурная схема регулируемого электропривода:

РС – регулятор скорости; СВМ – схема выделения модуля; РТ – регулятор тока; БОЗ – блок определения знака; ШИМ – блок широтно-импульсной модуляции; Г – генератор пилообразных импульсов; БПК – блок преобразователя координат; СП – силовой преобразователь; БДПТ – бесколлекторный двигатель постоянного тока; ДПР, ДС, ДТ – датчики соответственно положения ротора, скорости и тока; П – преобразователь ток/напряжение; ИП – источник питания

Fig. 2. Block diagram of variable electric drive:

SC – speed controller; MSS – module selection scheme; CR – current regulator; BDS – block for determining the sign; PWM; PG – pulse generator; CCB – coordinate converter block; PC – power converter; BDCM – brushless DC motor; SPR, SS, SC – sensors, respectively, of the position of the rotor, speed and current; C – current/voltage converter; PS – power supply

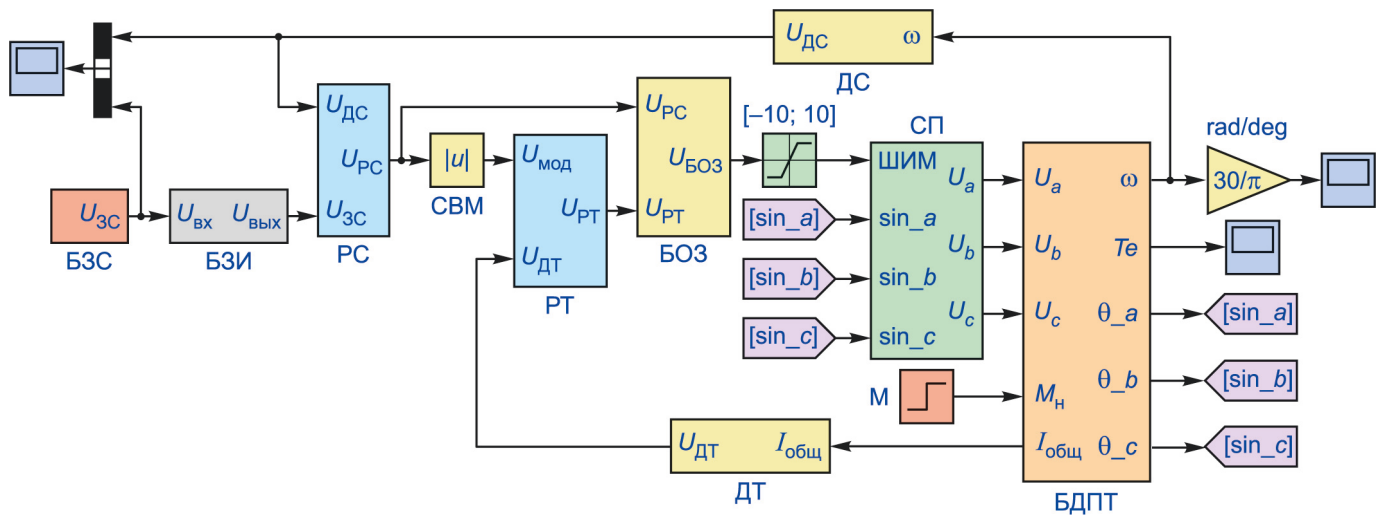


Рис. 3. Схематическая модель регулируемого электропривода:
БЗС, БЗИ – блоки задания соответственно сигнала и интенсивности; М – приведённый момент; Те – крутящий момент;
U_{мод} – выходной сигнал блока выделения модуля; остальные блоки те же, что на рис. 2

Fig. 3. Schematic model variable electric drive:
SB – setting blocks; IB – intensity block; M – reduced moment; Te – torque; U_{mod} – signal block selection module;
the other designations are the same as in fig. 2

широтно-импульсной модуляции и схемы согласования, выполненной на биполярном транзисторе и оптопаре. Выходной сигнал схемы преобразователя ток/напряжение U_T варьируется в диапазоне ± 10 В.

Плата управления разрабатываемого электропривода может быть реализована как на аналоговой, так и на цифровой элементной базе.

Предварительно расчёт параметров регуляторов тока и скорости электропривода проводится методом замены БДПТ эквивалентным магнитоэлектрическим двигателем постоянного тока [9, 10]. Математическое описание магнитоэлектрического двигателя постоянного тока имеет вид

$$\left. \begin{aligned} U_{обм} &= RI_{обм} + L \frac{dI_{обм}}{dt} + e; \\ J \frac{d\omega}{dt} &= M - M_H; \\ e &= k_e \omega; \\ M &= k_n I_{обм}, \end{aligned} \right\}$$

где $U_{обм}$ – напряжение на обмотке статора; $I_{обм}$ – ток, протекающий в обмотке статора; e – противоэлектродвижущая (ПЭДС) сила якоря двигателя; M_H – номинальный момент двигателя; k_n – электромеханический коэффициент передачи; k_e – коэффициент передачи ПЭДС.

В теории линейных систем принято условно описывать схему силового преобразователя передаточной функцией вида

$$W_{СП}(s) = k_{СП} / (1 + T_{СП}s),$$

где $k_{СП}$, $T_{СП}$ – коэффициент передачи ($k_{СП}=15$) и постоянная времени силового преобразователя.

В упрощённом виде передаточную функцию датчика тока опишем в виде усилительного звена

$$W_{ДТ}(s) = k_{ДТ},$$

где $k_{ДТ}$ – коэффициент передачи датчика тока.

Коэффициент передачи датчика тока рассчитаем по выражению

$$k_{ДТ} = U_{РТ} / (2i_{я}^H),$$

где $U_{РТ}$ – максимальное выходное напряжение регулятора тока ($U_{РТ}=10$ В); $i_{я}^H$ – номинальный ток якоря БДПТ ($i_{я}^H=2,5$ А).

Передаточную функцию датчика скорости, как и датчика тока, опишем усилительным звеном

$$W_{ДС}(s) = k_{ДС},$$

где $k_{ДС}$ – коэффициент передачи датчика скорости.

Коэффициент передачи датчика скорости определим в виде отношения максимального выходного напряжения регулятора скорости к максимальной угловой частоте вращения двигателя $\omega_{max}=160$ рад/с:

$$k_{ДТ} = U_{РТ} / \omega_{max}.$$

Передаточную функцию регулятора тока найдём из общего требования настройки контура системы управления на технический оптимум:

$$W_{РТ}(s) \frac{k_{СП}}{1 + T_{СП}s} (R + Ls)^{-1} k_{ДТ} = [2T_{СП}s(1 + T_{СП}s)]^{-1}.$$

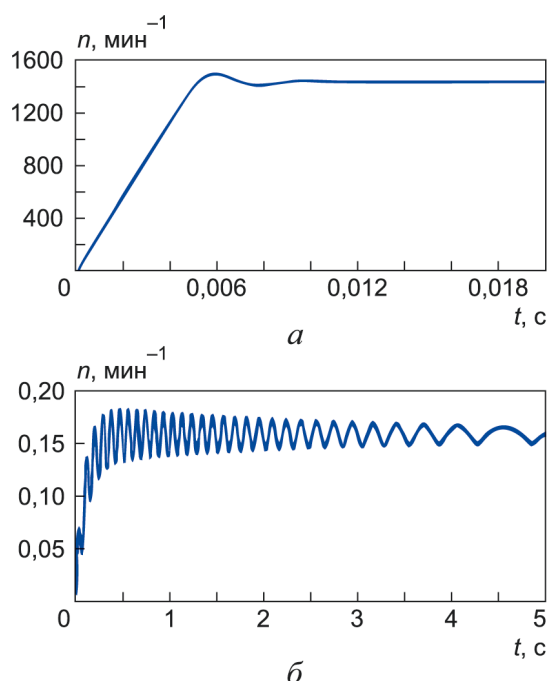


Рис. 4. Выходные тахограммы (зависимости скорости вращения n двигателя от времени t) модели электропривода при входном напряжении 10 и 0,001 В – а, б соответственно

Fig. 4. Output tachograms electric drive models at input voltage 10 (a) and 0.001 (b) V

Определим передаточную функцию регулятора скорости из условия симметричного оптимума:

$$W_{PC}(s) = \frac{1}{k_{ДТ}(1+2T_{СП} s)} \cdot \frac{p}{Js} k_{ДС} k_n = \frac{1+8T_{СП} s}{32T_{СП}^2 s^2 (1+2T_{СП} s)}.$$

В конечном итоге передаточные функции регуляторов тока и скорости примут вид

$$W_{РТ}(s) = k_{РТ}; \quad W_{РС}(s) = k_{РС} \frac{1+T_{РС1} s}{1+T_{РС2} s},$$

где $k_{РТ}=50$; $k_{РС}=5 \cdot 10^5$; $T_{РС1}$, $T_{РС2}$ – постоянные времени, $T_{РС1}=0,5$ с; $T_{РС2}=10$ с.

Для устранения перерегулирования сигнал задания скорости поступает на вход схемотехнической модели через блок задания интенсивности. Блок задания интенсивности представляет собой аperiодическое звено первого порядка, постоянная времени которого определяется при анализе выходных тахограмм:

$$W_{ЗИ}(s) = k_{ЗИ} / (1+T_{ЗИ} s),$$

где $k_{ЗИ}$, $T_{ЗИ}$ – коэффициент передачи и постоянная времени блока задания интенсивности, $k_{ЗИ}=1$; $T_{ЗИ}=0,0005$ с.

На основании результатов теоретических вычислений проанализирована схемотехническая модель электропривода (рис. 3) в программном пакете MatLab Simulink. Параметры

модели: $k_{ДТ}=2$ В/А; $k_{ДС}=0,06$ В·с/рад; значения остальных параметров указаны в тексте ранее. Напряжение на обмотках статора БДПТ $U_{обм}=\pm 150$ В, частота генератора широтно-импульсной модуляции $f_r=60$ кГц. Модель электропривода исследована методом интегрирования Рунге-Кутты.

Проанализируем адекватность работы модели: подадим на её вход скачкообразные импульсы напряжения амплитудой 0,001–10 В и снимем получившиеся выходные тахограммы (рис. 4). Тахограммы демонстрируют адекватность модели и правильность выполненных расчётов. Модель является устойчивой и имеет перерегулирование менее 40 %, что позволяет сделать следующие выводы:

при максимальном входном сигнале 10 В скорость n вращения ротора двигателя составляет 1436 мин⁻¹ см. рис. 4, а), при минимальном сигнале 0,001 В – 0,152 мин⁻¹ (см. рис. 4, б). Тогда согласно ГОСТ 27803-91 диапазон регулирования скорости исследуемой модели электропривода составит

$$K_D = \frac{n_{\max}}{n_{\min}} = \frac{\omega_{\max}}{\omega_{\min}} = \frac{1436}{0,152} \approx 9450,$$

где $n_{\max}$, $n_{\min}$, $\omega_{\max}$, $\omega_{\min}$ – максимальные и минимальные значения соответственно мгновенных и угловых скоростей вращения двигателя;

для входного сигнала амплитудой 0,001 В коэффициент неравномерности вращения

$$K_{0,001} = 2 \frac{n'_{\max} - n'_{\min}}{n'_{\max} + n'_{\min}} = 2 \frac{0,17 - 0,14}{0,17 + 0,14} \approx 0,194,$$

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

Рассчитанные значения диапазона регулирования скорости и коэффициента неравномерности вращения соответствуют требованиям ГОСТ 27803-91.

Экспериментальное подтверждение результатов исследования. Для проверки работоспособности и подтверждения результатов схемотехнического моделирования изготовлен макетный образец предлагаемого электропривода. Испытания проводили с электродвигателем КМ-090-32-02.

Для оценки полосы пропускания частот на вход информационно-измерительной и управляющей системы электропривода подавали сигналы синусоидальной формы различной частоты и постоянной амплитуды 0,1 В. При замкнутом контуре регулирования скорости полоса пропускания частот электропривода определяется при выполнении одного из двух условий:

уменьшение амплитуды выходного сигнала датчика скорости составляет не менее 70,7 % (более 3 дБ) относительно сигнала задания;

сдвиг фазы выходного сигнала датчика скорости относительно входного сигнала задания не превышает 90°.

По результатам выполненных испытаний полоса пропускания частот контура скорости реального электропривода составила 123 Гц, диапазон регулирования скорости около 9000, коэффициент неравномерности вращения примерно 0,16.

Заключение. Предварительное схемотехническое моделирование предложенного регулируемого электропривода с одним подчинённым контуром тока доказало полную работоспособность электропривода. Изменение совокупности связей в структурной схеме регулируемого электропривода и отсутствие необходимости применения трёхконтурной схемы (векторного управления) управления током в обмотках БДПТ дало возможность упростить схему регулируемого электропривода и повысить его надёжность. Метрологические характеристики схемотехнической модели и макетного образца электропривода (диапазон регулирования скорости и коэффициент неравномерности вращения) имеют значения с отклонениями в пределах $\pm 10\%$. Полученные метрологические характеристики разработанного электропривода соответствуют требованиям ГОСТ 27803-91, что позволяет рекомендовать данный электропривод для использования в составе кинематических систем лазерных установок и промышленных роботов.

Список источников

1. Вакс Е. Д., Миленький М. Н., Сапрыкин Л. Г. Практика прецизионной лазерной обработки. Москва: Техносфера, 2013. 696 с.
2. Слепцов В. В., Мостовской М. В. Определение технических требований для систем управления электрическим приводом в станках лазерного раскроя металла // Законодательная и прикладная метрология. 2019. № 6 (6). С. 27–29.
3. Слепцов В. В., Мостовской М. В. Методика оценки метрологических характеристик регулируемого электропривода методом схемотехнического моделирования // Законодательная и прикладная метрология. 2021. № 1 (6). С. 22–26.
4. Овчинников И. Е. Вентильные электрические двигатели и приводы на их основе (курс лекций). СПб.: КОРОНА-Век, 2016. 336 с.
5. Герман-Галкин С. Г. Matlab & Simulink. Проектирование мехатронных систем на ПК. СПб.: КОРОНА-Век, 2008. 368 с.
6. Tashakori A., Ektesabi M., Hosseinzadeh N., Modeling of BLDC Motor with Ideal BackEMF for Automotive Applications, *Proceedings of the World Congress on Engineering WCE 2011*, London, U.K., July 6–8, 2011, vol. II, pp. 1504–1508.
7. Mehmet Çunkas, Omer Aydoğdu, *Mathematical and Computational Applications*, 2010, vol. 15, no. 2, pp. 218–229. <https://doi.org/10.3390/mca15020218>
8. Герман-Галкин С. Г. Многовариантный анализ вентильного электропривода с бесконтактным двигателем постоянного тока // Силовая электроника. 2017. № 4. С. 72–79.

9. Герман-Галкин С. Г. Компьютерное моделирование полупроводниковых систем в Matlab 6.0: Учебное пособие. СПб.: Корона Принт, 2017. 320 с.

10. Высоцкий В. Е., Воронин С. М., Горшков Р. Г. Имитационное моделирование электромагнитных и электромеханических процессов вентильного двигателя // Вестник ИГЭУ. 2011. № 1. С. 1–4.

11. Richard Crowder, *Electric Drives and Electromechanical Systems*, Elsevier, 2006, 309 p.

References

1. Vaks E. D., Milenkiy M. N., Saprykin L. G., *Practice of precision laser processing*, Moscow, Technosphere Publ., 2013, 696 p. (In Russ.)
2. Sleptsov V. V., Mostovskoy M. V., Determination of technical requirements for electric drive control systems in metal laser cutting machine, *Zakonodatel'naya i prikladnaya metrologiya*, 2019, no. 6 (6), pp. 27–29. (In Russ.)
3. Sleptsov V. V., Mostovskoy M. V., Methods for assessing the metrological characteristics of a controlled electric drive by the method of circuit simulation, *Zakonodatel'naya i prikladnaya metrologiya*, 2021, no. 1 (6), pp. 22–26. (In Russ.)
4. Ovchinnikov I. E., *Valve electric motors and drives based on them* (course of lectures), St. Petersburg, KORONA-Vek Publ., 2016, 336 p. (In Russ.)
5. German-Galkin S. G., *Matlab & Simulink. Designing mechatronic systems on a PC*, St. Petersburg, KORONA-Vek Publ., 2008, 368 p. (In Russ.)
6. Tashakori A., Ektesabi M., Hosseinzadeh N., Modeling of BLDC Motor with Ideal BackEMF for Automotive Applications, *Proceedings of the World Congress on Engineering WCE 2011*, London, U.K., July 6–8, 2011, vol. II, pp. 1504–1508.
7. Mehmet Çunkas, Omer Aydoğdu, *Mathematical and Computational Applications*, 2010, vol. 15, no. 2, pp. 218–229. <https://doi.org/10.3390/mca15020218>
8. German-Galkin S. G., Multivariate analysis of a valve drive with a non-contact DC motor, *Silovaya elektronika*, 2017, no. 4, pp. 72–79. (In Russ.)
9. German-Galkin S. G., *Computer modeling of semiconductor systems in Matlab 6.0: Textbook*, St. Petersburg, Korona Print Publ., 2017, 320 p. (In Russ.)
10. Vysotsky V. E., Voronin S. M., Gorshkov R. G., Simulation modeling of electromagnetic and electromechanical processes of a valve motor, *Vestnik IGEU*, 2011, no. 1, pp. 1–4. (In Russ.)
11. Richard Crowder, *Electric Drives and Electromechanical Systems*, Elsevier, 2006, 309 p.

Статья поступила в редакцию 27.10.2021; одобрена после рецензирования 27.12.2021; принята к публикации 30.12.2021.
The article was submitted 27.10.2021; approved after reviewing 27.12.2021; accepted for publication 30.12.2021.