

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОПРИВОДА С ПРЕРЫВИСТЫМ ЗАКОНОМ ДВИЖЕНИЯ

Рассмотрен электропривод переменного тока с прерывистым законом движения вала исполнительного двигателя, который широко используется в различных областях промышленности. Целью исследования является определение способов формирования питающих напряжений или токов на регулировочные характеристики электропривода. В данной работе необходимо было определить выходные параметры: электромагнитного момента, угловой скорости и координаты подвижного элемента рабочего органа. В исследовании был применен метод математического моделирования. Результатами работы являются временные зависимости выходных параметров и регулировочные характеристики электропривода с прерывистым законом движения вала исполнительного двигателя. На основании полученных результатов можно сделать вывод, что при фазовом способе формирования питающих токов или напряжений необходимо осуществлять управление электродвигателем по одной из обмоток.

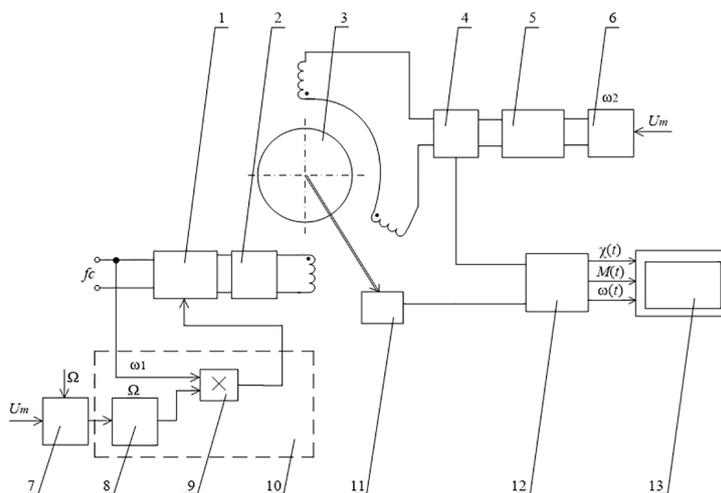
**Ключевые слова:** асинхронный электропривод переменного тока, электропривод с прерывистым законом движения вала, выходные параметры, регулировочные характеристики.

**Введение.** В различных областях науки и техники, отраслях народного хозяйства используются устройства, рабочие органы которых совершают возвратно-поступательное, возвратно-вращательное, шаговое, колебательное или периодическое движение. Область применения электроприводов с прерывистым законом движения вала широка и разнообразна [1, 2]. Например, в машиностроении в приводах подач: фрезерных, токарных, шлифовальных, зуборезных, электроэрозионных, квантово-механических и других промышленных станков используются электроприводы с различными законами движения: возвратно-поступательным, возвратно-вращательным, колебательным, шаговым и др. В электротермии рассматриваемые электроприводы применяются при перемещении загрузки, выращивании монокристаллов, вытяжке слитков, транспортировке заготовок. В атомной энергетике применяются в измерительной аппаратуре, при перемещении задвижек, клапанов в каналах потока теплоносителя; в вычислительной технике — в различных операциях интегрирования, умножения и вычисления корреляционных функций. Широкое применение электропривода с прерывистым движением вала нашли в технике измерения и контроля для дозировки, расфасовки, упаковки сыпучих пищевых продуктов, а также в сельском хозяй-

стве, например, для сортировки и уборки плодов, при вспашке, прокладке траншей и т.д. [3–6].

**Постановка задачи.** В свою очередь, необходимо обеспечить требования, предъявляемые к вышеперечисленным электроприводам: точность позиционирования рабочего органа, кратность регулирования скорости перемещения рабочего органа, шаг, оптимальное регулирование частоты, амплитуды, фазы при создании различных законов движения. Не все электроприводы способны выполнить предъявляемые к ним требования [7–12].

Функциональная схема электропривода с прерывистым законом движения представлена на рис. 1. Схема электропривода состоит из асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором (АД); автономных источников напряжения (АИН1, АИН2); датчиков напряжения (ДН1, ДН2); системы формирования напряжения управления (СФНУ) инвертором АИН1, включающая в себя компаратор (КМ) и аналоговый перемножитель сигналов; задающих генераторов (ЗГ1, ЗГ2); измерительного блока (ИБ) с системой преобразования аналогового сигнала в цифровой; персонального компьютера со встроенной платой ввода-вывода данных (ПК) и датчика скорости (ДС). Питание одной из обмоток АД осуществляется через инвертор ИН1 от задающего генератора ЗГ1 напряжением частоты  $\omega_1$ . Управление



**Рис. 1.** Схема электропривода с прерывистым законом движения при потенциальной фазовой модуляции: 1 — автономный источник напряжения 1 (АИН1); 2 — датчик напряжения 1 (ДН1); 3 — асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором; 4 — датчик напряжения 2 (ДН2); 5 — автономный источник напряжения 2 (АИН2); 6 — задающий генератор 2 (ЗГ2); 7 — задающий генератор 1 (ЗГ1); 8 — компаратор (КМ); 9 — аналоговый умножитель сигналов; 10 — система формирования напряжения управления АИН1 (СФНУ); 11 — датчик скорости (ДС); 12 — блок измерений (БИ); 13 — персональный компьютер (ПК)

производится сигналом разностной частоты ( $\Omega = \omega_1 - \omega_2$ ), с учетом заданного направления движения. На вторую обмотку АД от генератора ЗГ2 через инвертор напряжения АИН2 подается напряжение частоты  $\omega_2$ . Таким образом, реализуется фазовый способ формирования прерывистого режима работы. При этом электромагнитный момент в АД изменяется с угловой частотой  $\Omega$ , пропорциональной разности частот питающих токов.

Закон движения подвижного элемента описывается выражением:

$$\chi(t) = \begin{cases} \chi_n + \chi_m [\sin(\Omega t + \alpha)] - \sin \alpha, & \text{при } nT \leq t \leq nT + t_{\text{ш}}; \\ \chi_{n+1}, & \text{при } nT + t_{\text{ш}} \leq t \leq (n+1)T, \end{cases} \quad (1)$$

где  $\chi_n, \chi_{n+1}$  — начальная и конечная координаты подвижного элемента за один шаг;  $\chi_m$  — амплитудное значение координаты подвижного элемента двигателя;  $\alpha$  — начальная фаза перемещения;  $t_{\text{ш}}$  — длительность шага;  $n = 0, 1, 2, \dots$  — номер шага.

Из выражения (1) следует, что величина шага определяется амплитудным значением  $\chi_m$  и, в частности, при  $t_{\text{ш}} = T/2, |\alpha| = 90^\circ, |\chi_{\text{ш}}| = 2\chi_m$ . Регулирование величины шага можно осуществлять при заданных параметрах нагрузки за счет плавного изменения частоты одного из питающих напряжений (например, ЗГ1), либо за счет регулирования одного из фазных напряжений по амплитуде.

Такие электропривода обладают возможностью плавного регулирования частоты и амплитуды шага без применения дополнительных механических преобразовательных устройств.

**Теория.** Для схемы исследуемого электропривода функции входных сигналов при фазовом способе управления имеют вид, соответствующий формулам (2) при потенциальном питании и (3) при токовом питании.

$$\begin{aligned} U_{\text{ас}}(t) &= U_m \cdot \gamma_1 \cdot \sin(\omega_1 t + \alpha) A(t) \\ U_{\text{бс}}(t) &= U_m \cdot \gamma_2 \cdot \sin(\omega_2 t + \beta), \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} i_{\text{ас}}(t) &= I_m \cdot \sin(\omega_1 t + \alpha) A(t) \\ i_{\text{бс}}(t) &= I_m \cdot \sin(\omega_2 t + \beta), \end{aligned} \quad (3)$$

где  $U_m, I_m, \alpha, \beta, \omega_1, \omega_2$  — амплитуда напряжений и токов, фазовые сдвиги и угловые частоты фазных напряжений и токов;  $A(t) = \frac{1}{2} + \frac{2}{\pi} \left( \sum_{i=1}^{\infty} \frac{\sin(2i-1)\Omega t}{(2i-1)} \right)$  — импульсная функция;  $\Omega$  — круговая частота шага. Значения фазных токов при фазовом способе управления:

$$\begin{aligned} i_n(t) &= (-1)^{n+1} \times \\ &\times U_{m1} \left\{ \begin{aligned} &I_{1n} \cdot \sin(\omega_1 t + \alpha + \psi_{1n}) + \\ &\frac{1}{\pi} \cdot \sum_{i=1}^{\infty} (2i-1) \cdot \begin{bmatrix} I_{2ni} \cdot \sin[(\omega_1 - (2i-1)\Omega)t - \alpha + \psi_{2ni}] - \\ I_{3ni} \cdot \sin[(\omega_1 + (2i-1)\Omega)t - \alpha + \psi_{3ni}] \end{bmatrix} \end{aligned} \right\} + \\ &+ (-1)^n \cdot U_{m2} \cdot I_{4n} \cdot \sin(\omega_2 t + \beta + \psi_{2n}), \end{aligned} \quad (4)$$

где  $I_{in}, \psi_{in}$  — коэффициенты и фазовые углы, определяемые параметрами электрической машины.

Уравнение движения подвижного элемента электропривода можно представить как:

$$L_{\text{мех}} \frac{d^2 \chi}{dt^2} + R_{\text{мех}} \frac{d\chi}{dt} = M_{\text{п}}(t) + M_{\text{демф}}(t), \quad (5)$$

где  $\chi$  — координата подвижного элемента электропривода;  $L_{\text{мех}}, R_{\text{мех}}$  — коэффициенты инерционной и демфирующей сил нагрузки;  $M_{\text{п}}(t)$  — пусковая составляющая электромагнитного момента;  $M_{\text{демф}}(t)$  — демфирующая составляющая электромагнитного момента.

Выражение для электромагнитного момента выглядит следующим образом:

$$M_{\text{эм}}(t) = M_{\text{п}}(t) + M_{\text{демф}}(t),$$

где данное выражение электромагнитного момента представлено в виде ряда Маклорена по степеням скорости  $\omega$ , в окрестности  $\omega = 0$ .

Решение уравнения (5) позволяет определить искомые законы движения электропривода с прерывистым законом движения для заданных параметров электрической машины, нагрузки и функций регулирования при токовом или потенциальном питании.

Так, например, при потенциальном питании решение уравнения (5) методом гармонического баланса позволяет найти закон движения подвижного элемента двигателя:

$$\begin{aligned} \chi(t) = & \chi_{m1} \sin \Omega t + \chi_{m2} \cos \Omega t + \\ & + \frac{1}{\pi} \sum_{i=1}^{\infty} (2i-1) [\chi_{m3i} \sin 2i\Omega t + \chi_{m4i} \cos 2i\Omega t] + \\ & + \frac{1}{\pi} \sum_{i=2}^{\infty} (2i-1) [\chi_{m5i} \sin(2i-1)\Omega t + \cos(2i-1)\Omega t], \end{aligned}$$

где  $\chi_{mi}$  — амплитуды гармонических составляющих закона движения.

**Результаты экспериментов.** При исследовании электропривода с прерывистым законом движения (рис. 1) и с учётом полученных аналитических выражений были сняты выходные характеристики при потенциальной фазовой модуляции

[3] и при токовой фазовой модуляции. На рис. 2 и на рис. 3 представлены следующие характеристики от времени:

- 1 — зависимость координаты подвижного элемента электропривода  $\chi(t)$ ;
- 2 — зависимость электромагнитного момента  $M(t)$ ;
- 3 — зависимость скорости  $\omega(t)$ .

Данные характеристики исследовались при заданных параметрах: частоты шага  $f_{\text{ш}} = 2$  Гц, инерционной нагрузки  $L_{\text{мех}} = 2 \cdot 10^{-3}$  кг·м<sup>2</sup>, демпфирующей нагрузки  $R_{\text{мех}} = 0,2$  Н·м·с/рад.

**Обсуждение результатов.** Из рис. 2 и рис. 3 видно, что при фазовой модуляции питающих напряжений (рис. 2) или токов (рис. 3), амплитуда шага остаётся неизменной в течение всего периода частоты шага  $f_{\text{ш}}$  (кривая 1). Выходные характеристики 2 и 3 описывают зависимость электромагнитного момента  $M(t)$  и скорости  $\omega(t)$  подвижного элемента асинхронного двигателя.

В табл. 1 приведены результаты исследований электропривода с прерывистым законом движения.

Согласно полученным данным (табл. 1), амплитудные значения скорости  $\omega_{m'}$ , электромагнитного момента  $M_{m'}$ , координаты подвижного элемента рабочего органа  $\chi_m$  исследуемого электропривода при потенциальной фазовой модуляции превышают

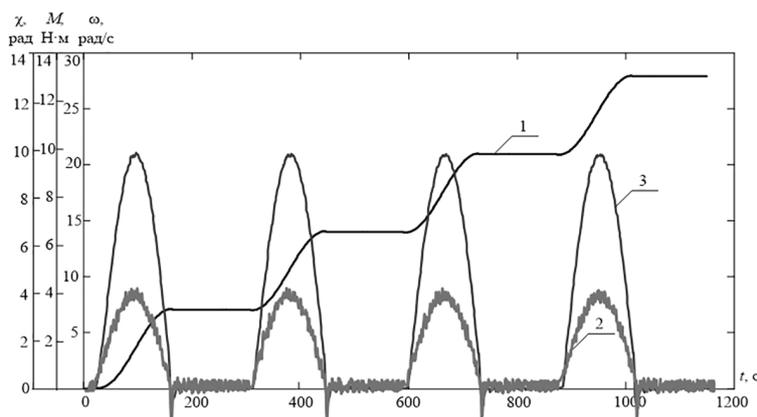


Рис. 2. Выходные параметры исследуемого электропривода при потенциальной фазовой модуляции: 1 — изменение координаты подвижного элемента электропривода  $\chi(t)$ , 2 — изменение электромагнитного момента  $M(t)$ , 3 — изменение скорости  $\omega(t)$

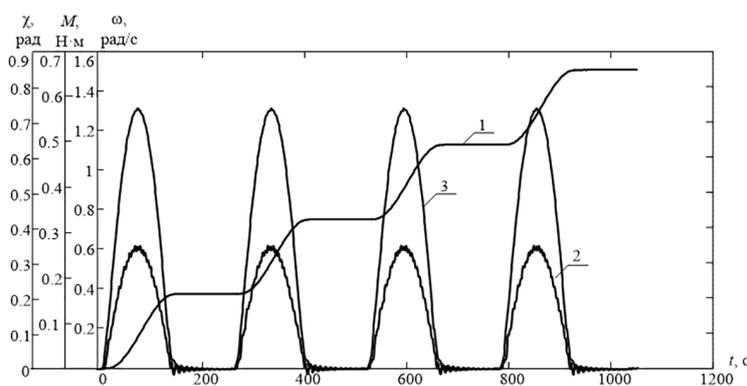
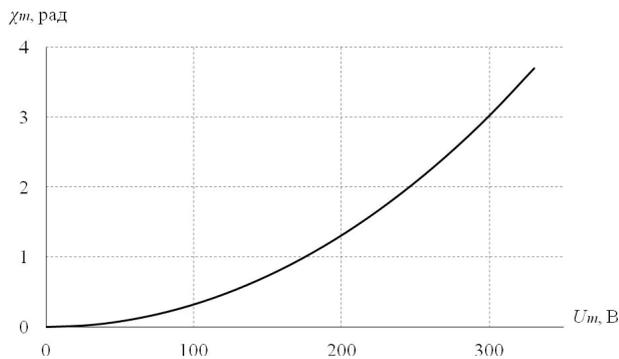
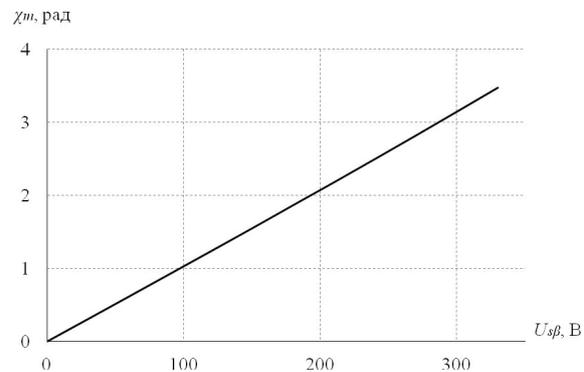
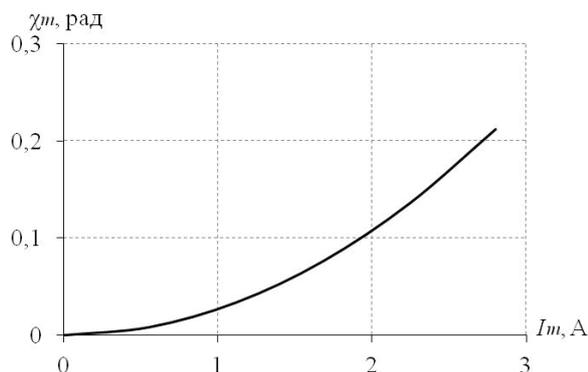
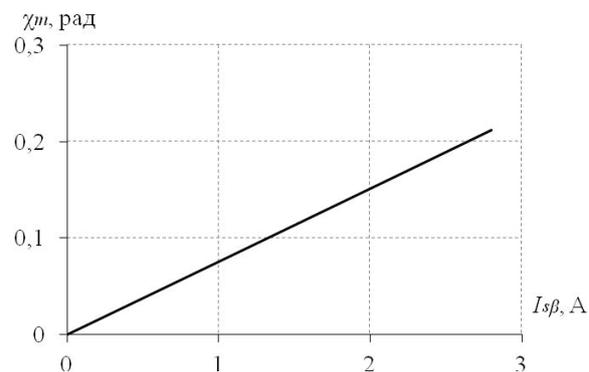


Рис. 3. Выходные параметры исследуемого электропривода при токовой фазовой модуляции: 1 — изменение координаты подвижного элемента электропривода  $\chi(t)$ , 2 — изменение электромагнитного момента  $M(t)$ , 3 — изменение скорости  $\omega(t)$

Амплитудные значения исследуемых величин

Методы модуляции	Амплитудные значения		
	$M_m$ , Н·м	$\omega_m$ , рад/с	$\chi_m$ , рад
Потенциальная фазовая модуляция	4,2	21,6	3,68
Токовая фазовая модуляция	0,26	1,35	0,23

Рис. 4. Регулировочная характеристика исследуемого электропривода при потенциальной фазовой модуляции  $U_{su} = U_{\phi} = \text{var}$ Рис. 6. Регулировочная характеристика исследуемого электропривода при потенциальной фазовой модуляции  $U_{\phi} = \text{var}$ Рис. 5. Регулировочная характеристика исследуемого электропривода при токовой фазовой модуляции  $U_{su} = U_{\phi} = \text{var}$ Рис. 7. Регулировочная характеристика исследуемого электропривода при токовой фазовой модуляции  $U_{\phi} = \text{var}$ 

в 16 раз амплитудные значения, полученные при токовой фазовой модуляции.

В результате проведенных исследований были построены регулировочные характеристики исследуемого электропривода, а именно зависимость амплитудного значения координаты подвижного элемента электропривода с прерывистым законом движения  $\chi_m$  от амплитуды напряжений  $U_m$ , а также зависимость амплитудного значения координаты подвижного элемента электропривода с прерывистым законом движения  $\chi_m$  от амплитуды токов  $I_m$ .

На рис. 4 и рис. 5 представлены регулировочные характеристики электропривода с прерывистым законом движения при регулировании по двум обмоткам напряжений или токов пропорционально. Из рисунков видно, что при одновременном изменении напряжений или токов по обеим обмоткам,

координата подвижного элемента рабочего органа электропривода с прерывистым законом движения изменяется по параболическому закону.

На рис. 6 и рис. 7 представлены линейный закон изменения координаты подвижного элемента рабочего органа электропривода при изменении напряжения или тока по одной из обмоток двигателя.

**Вывод.** Анализ выходных характеристик электропривода с прерывистым законом движения показал, что при фазовой модуляции питающих напряжений или же токов амплитуда шага остаётся неизменной в течение всего периода частоты шага.

В электроприводе с прерывистым законом движения линейный закон изменения координаты подвижного элемента рабочего органа электропривода (при  $U_{\phi} = \text{var}$  или  $I_{\phi} = \text{var}$ ) выполняется за счет регулирования напряжения или тока только по одной из обмоток двигателя.

## Библиографический список

1. Аристов А. В., Воронина Н. А. Анализ точности позиционирования двухфазного асинхронного двигателя в режиме прерывистого движения // Известия Томского политехнического университета. 2013. Т. 322, № 4. С. 116–120.
2. Karaliūnas B. Computer modeling of the dynamic processes for stepping motor // Elektronika ir Elektrotechnika. 2008. Vol. 83, no. 3. P. 81–84.
3. Патент 88874 Российская Федерация, МПК Н 02 Р 7/00. Устройство для управления двухфазным асинхронным двигателем в режиме прерывистого движения / Аристов А. В., Воронина Н. А. № 2009125766/22; заявл. 06.07.09; опубл. 20.11.09, Бюл. № 32.
4. Payuk L. A., Voronina N. A., Galtseva O. V. Energy Characteristics of Electric Drive of Oscillatory Motion at the Shock-Free Start // IOP Conf. Series: Journal of Physics. 2016. Vol. 671. 012044. DOI: 10.1088/1742-6596/671/1/012044.
5. Воронина Н. А. Влияние параметров источников питания на кинематические характеристики электропривода с периодическим законом движения // Современные техника и технологии: сб. тр. конф. В 3 т. Томск: Изд-во ТПУ, 2012. Т. 1. С. 351–352.
6. Аристов А. В., Эккерт И. А. Анализ предельных характеристик асинхронного электропривода для вибрационного перемешивания сыпучих веществ // Электромеханические преобразователи энергии: сб. тр. конф. Томск: Изд-во ТПУ, 2015. С. 188–193.
7. Payuk L. A., Grechko O. A., Voronina N. A. Grid Wind Power Plant with Compensation of Active and Reactive Power // Applied Mechanics and Materials. 2015. Vol. 792. P. 379–385. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.792.379.
8. Ohne Schrittwverlust // Mechatronik. 2005. Vol. 113, no. 11-12. P. 33.
9. Mizumaki M. Stepping motor. US Patent 7183676; filed September 13th, 2005; published March 16th, 2006.
10. 2-Phasen High Torque Schrittmotoren // MaschinenMarkt. 2004. Nr. 47. S. 19.
11. Schrittmotoren ergdnen das Antriebsprogramm // Blech InForm. 2006. Nr. 3. S. 62.
12. Vibrationsarme Mikroschritte // Industry Magazine 2007. No. 4. P. 42.

**ВОРОНИНА Наталья Алексеевна**, кандидат технических наук, доцент отделения «Электроэнергети-

ка и электротехника» Томского политехнического университета (ТПУ), г. Томск.

SPIN-код: 3176-9091

AuthorID (РИНЦ): 790645

ORCID: 0000-0001-9327-6441

AuthorID (SCOPUS): 57159363700

ResearcherID: I-9992-2018

Адрес для переписки: voronina@tpu.ru

**УМУРЗАКОВА Анара Даукеновна**, кандидат технических наук, старший преподаватель отделения «Электроэнергетика и электротехника» ТПУ, г. Томск.

SPIN-код: 8079-5187

AuthorID (РИНЦ): 834837

AuthorID (SCOPUS): 56485976200

Адрес для переписки: granat\_72@mail.ru

**ПАЮК Любовь Анатольевна**, кандидат технических наук, старший преподаватель отделения «Электроэнергетика и электротехника» ТПУ, г. Томск.

SPIN-код: 3333-1750

AuthorID (РИНЦ): 555556

AuthorID (SCOPUS): 57160434900

Адрес для переписки: pla@tpu.ru

**ХАЦЕВСКИЙ Константин Владимирович**, доктор технических наук, доцент (Россия), профессор кафедры «Электрическая техника» Омского государственного технического университета, г. Омск.

SPIN-код: 7219-6033

AuthorID (РИНЦ): 465857

ORCID: 0000-0001-9504-1312

AuthorID (SCOPUS): 56503931800

ResearcherID: A-4002-2016

Адрес для переписки: xkv-post@rambler.ru

## Для цитирования

Воронина Н. А., Умурзакова А. Д., Паюк Л. А., Хацевский К. В. Исследование электропривода с прерывистым законом движения // Омский научный вестник. 2020. № 2 (170). С. 47–51. DOI: 10.25206/1813-8225-2020-170-47-51.

Статья поступила в редакцию 27.01.2020 г.

© Н. А. Воронина, А. Д. Умурзакова, Л. А. Паюк, К. В. Хацевский