

ISSN 1817-7204 (Print)

ISSN 1817-7239 (Online)

УДК 621.313.333.2.012.8

<https://doi.org/10.29235/1817-7204-2022-60-4-406-417>

Поступила в редакцию 05.04.2022

Received 05.04.2022

М. А. Прищепов*Белорусский государственный аграрный технический университет, Минск, Республика Беларусь***РАСЧЕТ МЕХАНИЧЕСКИХ И ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ С КОРОТКОЗАМКНУТЫМ РОТОРОМ ПРИ ПЕРЕМЕННЫХ ПАРАМЕТРАХ ЕГО СХЕМЫ ЗАМЕЩЕНИЯ**

Аннотация. При расчете механических и электромеханических характеристик асинхронных двигателей (АД) используются, как правило, их Т-образные схемы замещения (СЗ). Параметры этих схем, определяемые из справочной литературы или каталогов, являются постоянными величинами и соответствуют рабочей части характеристик в области номинальной скорости или скольжения двигателей. Расчеты механических и электромеханических характеристик асинхронных двигателей при постоянных значениях параметров схемы замещения данных двигателей в широком диапазоне их скоростей или скольжений приводят к значительным погрешностям за пределами рабочей части характеристик. В статье приведена методика и алгоритм расчета механических и электромеханических характеристик асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором при переменных параметрах их схемы замещения, а также проверка совпадения результатов расчета характеристик по предложенному алгоритму с результатами расчета, полученными по другой известной методике.

Ключевые слова: асинхронный двигатель, механические и электромеханические характеристики, методика и алгоритм расчета, схема замещения, переменные параметры

Для цитирования: Прищепов, М. А. Расчет механических и электромеханических характеристик асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором при переменных параметрах его схемы замещения / М. А. Прищепов // Вестн. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. аграр. наук. – 2022. – Т. 60, № 4. – С. 406–417. <https://doi.org/10.29235/1817-7204-2022-60-4-406-417>

Mikhail A. Pryshchepau*Belarusian State Agrarian Technical University, Minsk, Republic of Belarus***CALCULATION OF MECHANICAL AND ELECTROMECHANICAL CHARACTERISTICS OF ASYNCHRONOUS MOTORS WITH A SHORT-CIRCUIT ROTOR WITH VARIABLE PARAMETERS OF ITS EQUIVALENT CIRCUIT**

Abstract. When calculating the mechanical and electromechanical characteristics of asynchronous motors (AM), as a rule, their T-shaped equivalent circuits (EC) are used. Parameters of these circuits, determined from reference literature or catalogs, are constant values and correspond to the working part of the characteristics in terms of the rated speed or motor slip. Calculations of the mechanical and electromechanical characteristics of the AM at constant values of the parameters of the EC of AM in a wide range of their speed or slips lead to significant errors outside the operating part of the characteristics. The paper presents a methodology and algorithm for calculating mechanical and electromechanical characteristics of AM with a short-circuit rotor at variable parameters of their equivalent circuit, as well as checking the coincidence of the results of calculating the characteristics according to the proposed algorithm with the calculation results obtained by another well-known method.

Keywords: asynchronous motor, mechanical and electromechanical characteristics, calculation method and algorithm, equivalent circuit, variable parameters

For citation: Pryshchepau M. A. Calculation of mechanical and electromechanical characteristics of asynchronous motors with a short-circuit rotor with variable parameters of its equivalent circuit. *Vestsi Natsyynal'nay akademii navuk Belarusi. Seryya agrarnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Agrarian series*, 2022, vol. 60, no. 4, pp. 406-417 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1817-7204-2022-60-4-406-417>

Введение. Механические и электромеханические характеристики АД являются основными характеристиками, используемыми для уточнения их мощностей при разработке ЭП рабочих машин, для выбора и наладки их пускорегулирующей и защитной аппаратуры, а также для повышения достоверности анализа статических и динамических режимов работы ЭП. При расчете указанных характеристик АД используются, как правило, их Т-образные СЗ. При этом параметры

этих схем, определяемые из справочной литературы и каталогов, являются постоянными величинами и соответствуют рабочей части характеристик в области номинальной скорости или скольжения АД [1–4]. Расчеты механических и электромеханических характеристик АД при постоянных значениях параметров СЗ АД в широком диапазоне скоростей АД от нуля и до номинальной или скольжений от единицы и до номинального приводят к значительным погрешностям за пределами рабочей части характеристик.

Цель исследования – разработать приемлемую для инженерных расчетов методику и детальный алгоритм расчета механических и электромеханических характеристик АД при переменных параметрах его СЗ, проверить совпадение результатов расчета по разработанной методике с результатами расчета других методик.

Математические модели параметров СЗ и характеристик АД. Современные АД с короткозамкнутым ротором для улучшения их пусковых свойств выполняются с глубоким пазом (при высоте стержня более 15 мм) или двойной беличьей клеткой, что приводит к проявлению эффекта вытеснения тока в стержнях обмотки ротора при пуске АД. Вызывая неравномерное распределение плотности тока по высоте стержней обмотки, этот эффект вытеснения (поверхностный эффект) приводит к уменьшению эффективного сечения стержней, увеличению эквивалентного активного сопротивления r_2 и уменьшению индуктивности рассеяния обмотки ротора x_2 , т. е. будут зависеть от частоты тока ротора и насыщения магнитной системы. При этом приведенное к обмотке статора индуктивное сопротивление ротора x'_2 обратно пропорционально скольжению s .

Изменяется также и индуктивное сопротивление рассеяния обмотки статора x_1 вследствие насыщения зубцов электротехнической стали АД от полей рассеяния [5–8]. Для повышения достоверности и точности расчета механических и электромеханических характеристик АД с короткозамкнутым ротором в широком диапазоне изменения скольжения s математическая модель (ММ) характеристик двигателя должна учитывать вышеуказанные процессы, что сопряжено со сложностью зависимостей параметров ММ от скольжения ротора АД.

Изменение активного сопротивления, а также индуктивного сопротивления рассеяния обмоток, расположенных в пазах прямоугольной формы, достаточно полно изучено в работах А. Фильда, Ф. Эмде, И. Сантерса и Т. Г. Сорокера [7]. Увеличение сопротивления обмотки ротора r_2 вследствие поверхностного эффекта в работах оценивается коэффициентом увеличения активного сопротивления пазовой части обмотки ротора k_r , или коэффициентом Фильда, при этом он зависит только от высоты и числа сплошных эффективных проводников по высоте паза и не зависит от их ширины. Поэтому вычисление приведенных к обмотке статора активного r'_{2s} и индуктивного x'_{2s} сопротивлений обмотки ротора при определенном скольжении s в работах [9, 10] представлено зависимостью в виде двух составляющих:

$$r'_{2s} = r'_{2л} + k_{rs}r'_{2s}; \quad (1)$$

$$x'_{2s} = x'_{2л} + k_{ls}x'_{2s}, \quad (2)$$

где $r'_{2л}$, $x'_{2л}$ – приведенные к обмотке статора активное и индуктивное сопротивления рассеяния лобовых частей обмотки ротора, Ом; r'_{2s} , x'_{2s} – приведенные к обмотке статора активное и индуктивное сопротивления рассеяния части обмотки ротора, находящейся в стали, Ом; k_{rs}, k_{ls} – коэффициенты, учитывающие изменение соответственно активного и индуктивного сопротивлений части обмотки ротора, находящейся в стали, которые вычисляются с помощью соответствующих функций Ф. Эмде и приведенной высоты стержня ротора, являющейся функцией частоты тока статора или скольжения ротора s .

Однако практическое использование зависимостей (1) и (2) затруднительно, так как точное соотношение между сопротивлениями пазовой и лобовых частей обмоток, а также высота стержня ротора, как правило, неизвестны. Поэтому в работе [2] для определения приведенных к обмотке статора активного r'_{2s} и индуктивного x'_{2s} сопротивлений ротора при указанных неопределен-

ностях для двигательного режима АД при скольжении ротора $s = 0 \dots 1$ предложено использовать следующие зависимости:

$$r'_{2s} = \begin{cases} r'_2 & \text{при } s \leq s_H; \\ r'_2 - k_{rsH} r'_{2\Pi} + \frac{r'_{2\Pi} - r'_2}{1 - k_{rsH}} k_{rs} & \text{при } s > s_H; \end{cases} \quad (3)$$

$$x'_{2s} = \begin{cases} x'_2 & \text{при } s \leq s_H; \\ x'_2 - k_{LSH} x'_{2\Pi} + \frac{x'_{2\Pi} - x'_2}{1 - k_{LSH}} k_{LS} & \text{при } s > s_H, \end{cases} \quad (4)$$

где k_{rs}, k_{LS} – коэффициенты, учитывающие изменения соответственно активного и индуктивного сопротивлений обмотки ротора при текущем скольжении ротора s ; r'_2, x'_2 – приведенные к обмотке статора активное и индуктивное сопротивления обмотки ротора АД, Ом; $r'_{2\Pi}, x'_{2\Pi}$ – приведенные к обмотке статора активное и индуктивное сопротивления обмотки ротора АД в режиме пуска, Ом; k_{rsH}, k_{LSH} – коэффициенты, учитывающие изменения соответственно активного и индуктивного сопротивлений обмотки ротора при номинальном скольжении ротора s_H . Коэффициенты k_{rs}, k_{LS} определяются по формулам:

$$k_{rs} = \frac{0,0185s - 0,375s^2 + s^2\sqrt{s}}{0,035 + 0,612s^2\sqrt{s}}; \quad (5)$$

$$k_{LS} = \frac{0,0358s - 0,556s^2 + s^2\sqrt{s}}{0,0187 - 0,0151s^2 + 0,446s^2\sqrt{s}}. \quad (6)$$

Анализ зависимостей коэффициентов изменения активного (5) и индуктивного (6) сопротивлений ротора от его скольжения показывает, что

$$\text{при } s = 0 \quad k_{rs} = 0, \text{ а } k_{LS} = 1,91;$$

$$\text{при } s = 1 \quad k_{rs} \approx 1 \text{ и } k_{LS} \approx 1,$$

то есть при изменении скольжения ротора от режима холостого хода до режима пуска коэффициент изменения активного сопротивления ротора k_{rs} изменяется от 0 до 1, а коэффициент изменения индуктивного сопротивления ротора k_{LS} – от 1,91 до 1. Характер изменения значений коэффициентов k_{rs} и k_{LS} подтверждает, что приведенное активное сопротивление обмотки ротора АД r'_{2s} изменяется пропорционально скольжению, а приведенное индуктивное сопротивление обмотки ротора x'_{2s} обратно пропорционально скольжению s [5].

Индуктивные сопротивления рассеяния обмотки статора x_1 и ротора x'_2 зависят от токов, проходящих по обмоткам, так как при изменении тока изменяется поле потоков рассеяния и главного магнитного потока из-за насыщения магнитной системы. С увеличением тока индуктивные сопротивления рассеяния уменьшаются. Влияние насыщения цепей рассеяния на изменение индуктивного сопротивления рассеяния статора может быть учтено по методикам, изложенным в работах [11, 12]. При этом для вычисления индуктивного сопротивления рассеяния обмотки статора x_{1s} при различных токах и скольжениях ротора АД удобно использовать зависимость

$$x_{1s} = \begin{cases} x_1 & \text{при } s \leq s_H; \\ x_1 + \frac{x_{1\Pi} - x_1}{I_{1\Pi} - I_{1H}} (I_{1s} - I_{1H}) & \text{при } s > s_H, \end{cases} \quad (7)$$

где I_{1H}, I_{1s} – номинальное и текущее значения тока обмотки статора АД, А; $x_1, x_{1\Pi}$ – номинальное и пусковое значения индуктивного сопротивления обмотки статора АД, Ом; $I_{1\Pi}$ – пусковой ток обмотки статора АД (А), рассчитанный при параметрах СЗ в режиме пуска по выражениям:

$$I_{1п} = \sqrt{I_{0п}^2 + I_{2п}'^2 + 2I_{0п}I_{2п}' \sin \varphi_{2п}}; \quad (8)$$

$$I_{2п}' = \frac{U_{1п}}{\sqrt{(r_1 + r_{2п}')^2 + x_{кп}^2 + \left(\frac{r_1 r_{2п}'}{x_{\mu}}\right)^2}}; \quad (9)$$

$$I_{0п} = \frac{U_{1п}}{\sqrt{r_1^2 + (x_{1п} + x_{\mu})^2}}; \quad (10)$$

$$\sin \varphi_{2п} = \frac{x_{кп}}{\sqrt{(r_1 + r_{2п}')^2 + x_{кп}^2}}, \quad (11)$$

где $I_{0п}$ – намагничивающий ток АД в пусковом режиме, А; $I_{2п}'$ – приведенный к обмотке статора ток обмотки ротора АД в режиме пуска, А; $r_{2п}'$ – приведенное к обмотке статора активное сопротивление обмотки ротора АД в режиме пуска, Ом; $x_{кп}$ – индуктивное сопротивление обмоток статора и ротора АД для режима короткого замыкания (при неподвижном роторе АД), Ом; x_{μ} – индуктивное сопротивление ветви намагничивания АД, Ом; $\sin \varphi_{2п}$ – синус угла между вектором фазного напряжения питания обмоток статора и сопряженным вектором тока обмотки ротора в режиме пуска АД.

Далее с учетом эффекта вытеснения тока ротора и насыщения магнитных цепей потоков рассеяния, то есть с учетом изменения сопротивлений x_{1s} , x_{2s}' и r_{2s}' в СЗ АД, по известным классическим выражениям, приведенным в работах [13–21], рассчитываем естественные механические $\omega_s = f(M_s)$ и электромеханические $\omega_s = f(I_{1s})$ характеристики АД:

$$M_s = \frac{3U_{1п}^2 r_{2s}'}{\omega_{0s} \left[(x_{1s} + x_{2s}')^2 + \left(r_1 + \frac{r_{2s}'}{s}\right)^2 + \left(\frac{r_1 r_{2s}'}{sx_{\mu}}\right)^2 \right]}; \quad (12)$$

$$I_{1s} = \sqrt{I_{0s}^2 + I_{2s}'^2 + 2I_{0s}I_{2s}' \sin \varphi_{2s}}; \quad (13)$$

$$\omega_s = \omega_0 (1 - s); \quad (14)$$

где ω_0 – синхронная угловая скорость магнитного поля статора АД, рад/с; ω_s – угловая скорость ротора АД при текущем его скольжении s , рад/с;

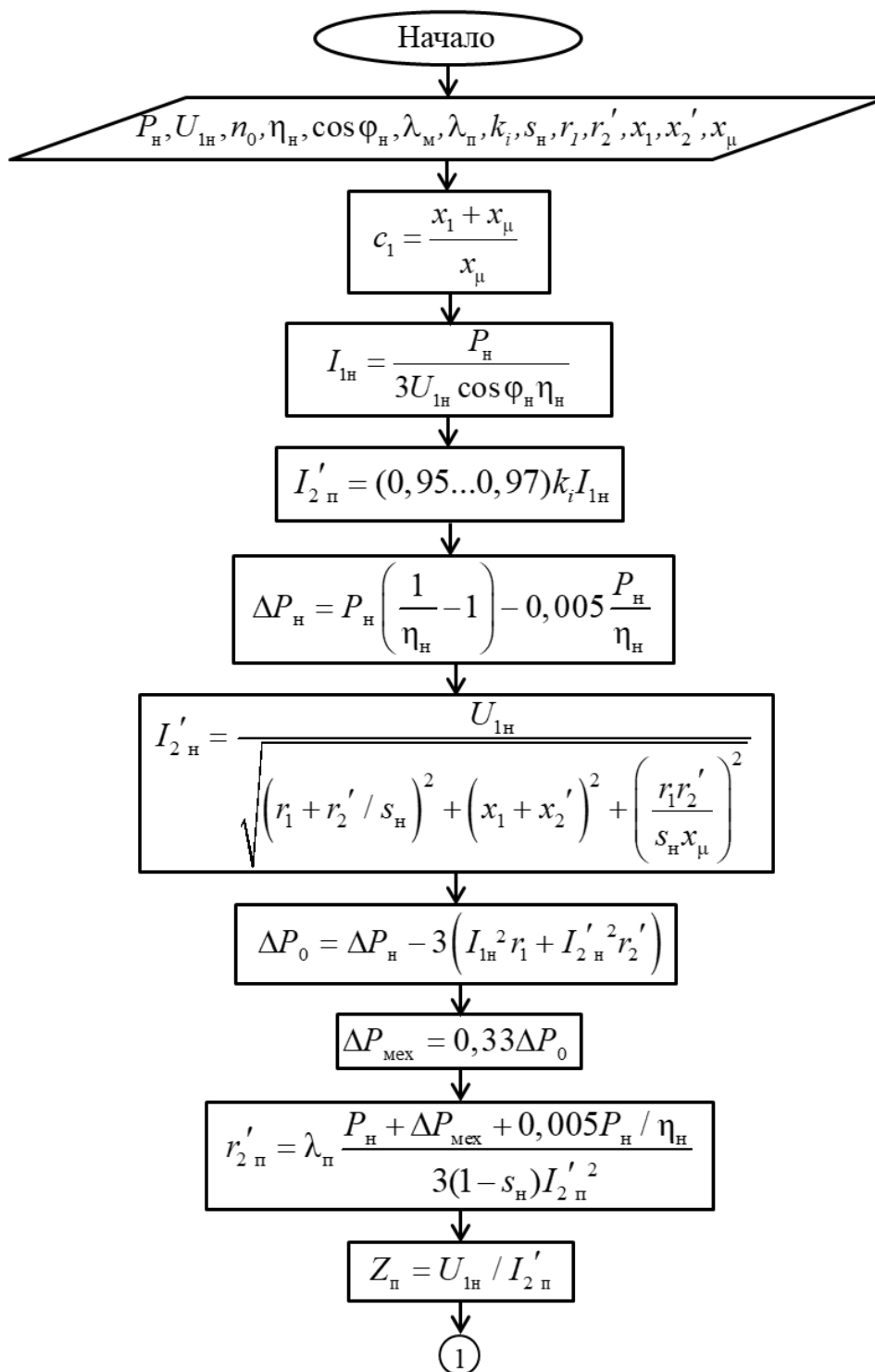
$$I_{2s}' = \frac{U_{1п}}{\sqrt{\left(r_1 + \frac{r_{2s}'}{s}\right)^2 + (x_{1s} + x_{2s}')^2 + \left(\frac{r_1 r_{2s}'}{sx_{\mu}}\right)^2}}; \quad (15)$$

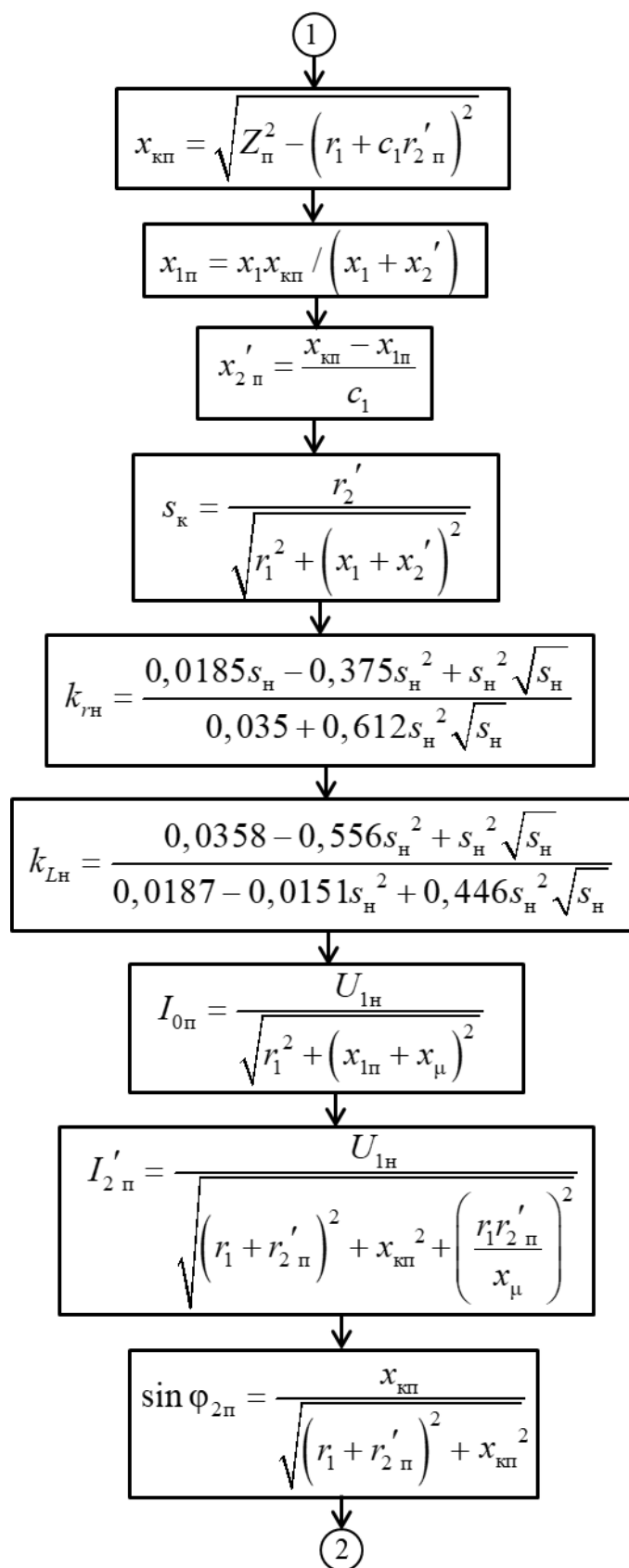
$$I_{0s} = \frac{U_{1п}}{\sqrt{r_1^2 + (x_{1s} + x_{\mu})^2}}; \quad (16)$$

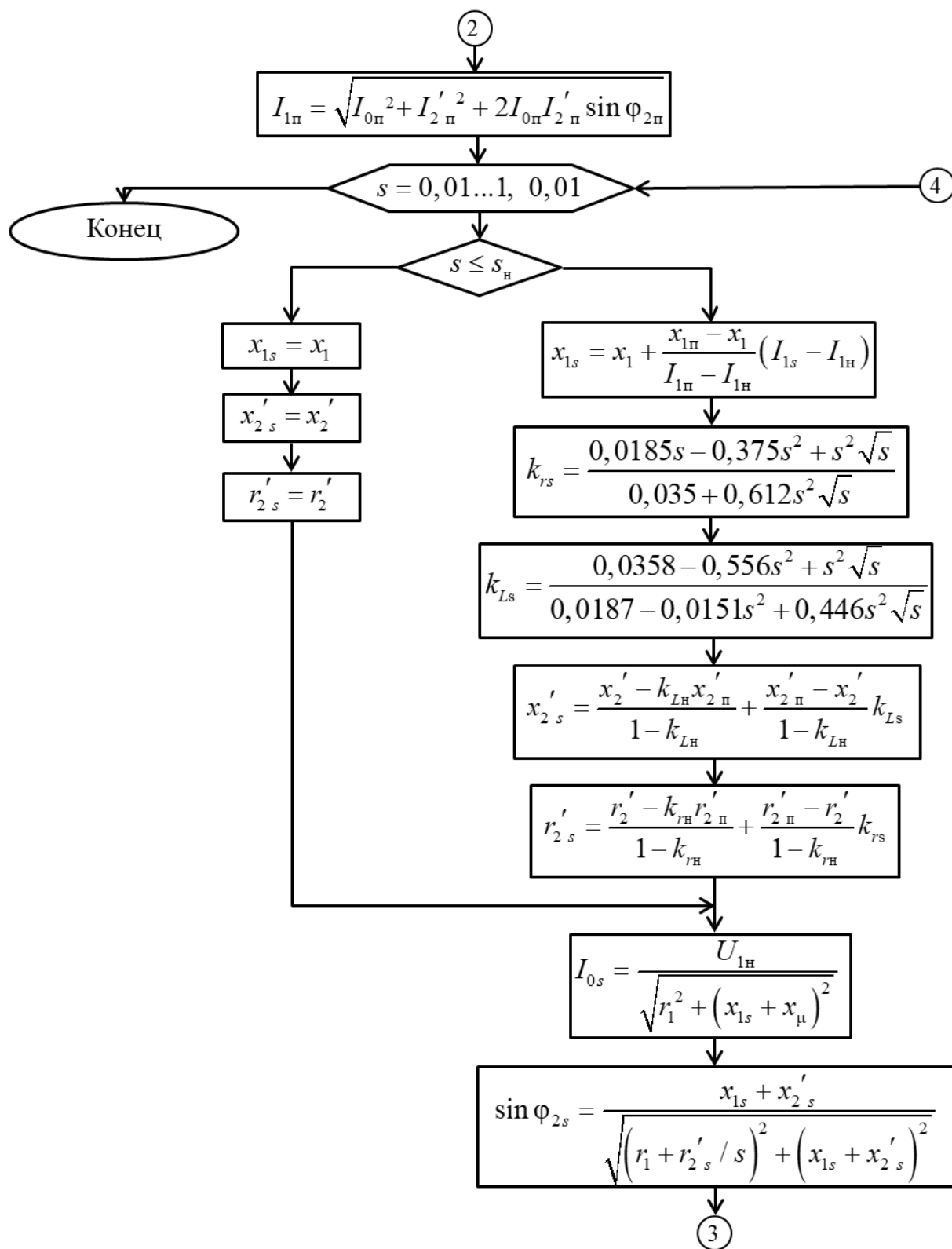
$$\sin \varphi_{2s} = \frac{x_{1s} + x_{2s}'}{\sqrt{\left(r_1 + \frac{r_{2s}'}{s}\right)^2 + (x_{1s} + x_{2s}')^2}}. \quad (17)$$

В приведенных выражениях (13)...(17) индекс s означает, что их значение вычисляется при конкретном текущем скольжении s .

С учетом приведенных формул на рис. 1 представлена блок-схема детального алгоритма расчета механических и электромеханических характеристик АД с короткозамкнутым ротором. При этом расчет АД с учетом эффекта вытеснения тока ротора и насыщения магнитных цепей потоков рассеяния необходимо начинать с расчета параметров СЗ АД в режиме пуска, а затем пошагово проводить расчет характеристик при изменении скольжения согласно разработанному алгоритму расчета.







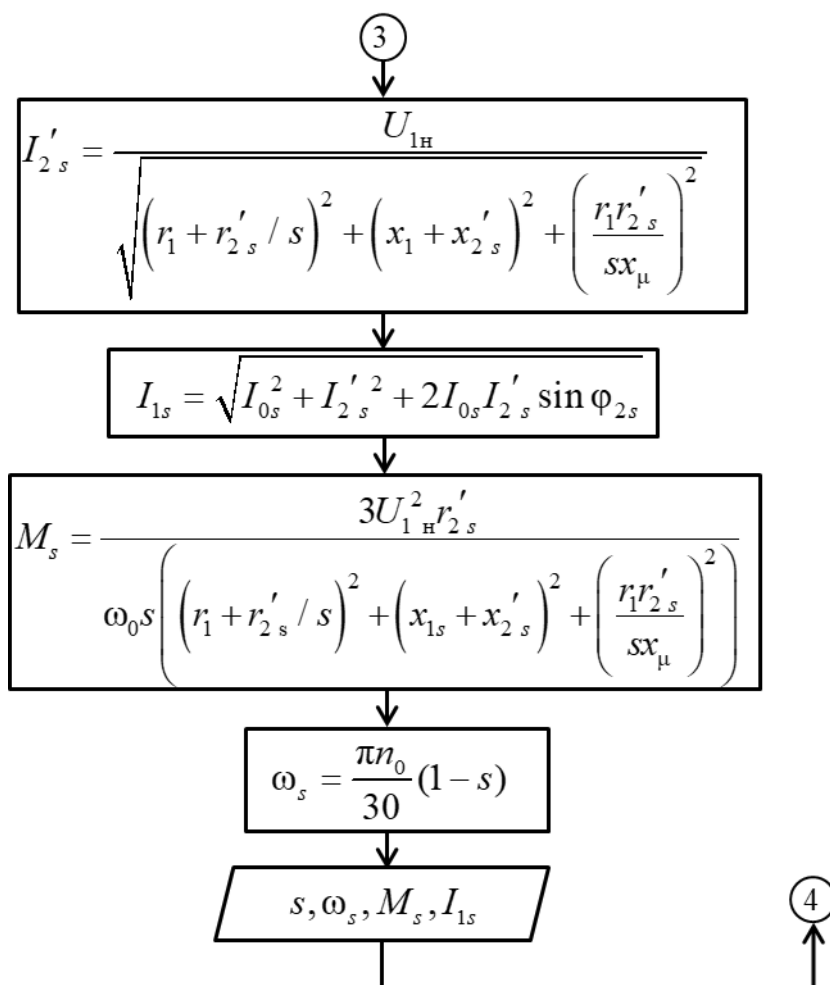


Рис. 1. Блок-схема алгоритма расчета механических и электромеханических характеристик АД при переменных параметрах его схемы замещения

Fig. 1. Block diagram of the algorithm for calculating the mechanical and electromechanical characteristics of AM with variable parameters of its equivalent circuit

Для проверки достоверности приведенного выше обоснования изменения параметров СЗ АД проведем расчет характеристик АД с короткозамкнутым ротором типа 4АН200L4 при постоянных и переменных параметрах. Его каталожные данные: $P_H = 55$ кВт; $U_H = 220$ В; $n_0 = 1500$ об/мин; $s_H = 0,017$; $\eta_H = 0,92$; $\cos \varphi_H = 0,89$; $\lambda_M = 2,5$; $\lambda_H = 1,3$; $k_i = 6,5$. Расчетные параметры Т-образной схемы: $r_1 = 0,0823$ Ом; $x_1 = x'_2 = 0,214$ Ом; $r'_2 = 0,04$ Ом; $x_\mu = 7,15$ Ом; $x_k = 0,428$ Ом.

Не приведенные выше обозначения, используемые в блок-схеме алгоритма: P_H – номинальная мощность АД, Вт; n_0 – синхронная частота вращения магнитного поля статора АД, об/мин; η_H – номинальный коэффициент полезного действия АД, о.е.; $\cos \varphi_H$ – номинальный коэффициент мощности АД, о.е.; λ_M – кратность максимального момента относительно номинального, о.е.; λ_H – кратность пускового момента относительно номинального, о.е.; k_i – коэффициент кратности пускового тока относительно номинального, о.е.; c_1 – коэффициент приведения параметров Т-образной схемы замещения АД к Г-образной, о.е.; r_1, x_1 – активное и индуктивное сопротивления обмотки статора АД при номинальном скольжении ротора s_H , Ом; r'_2, x'_{2s} – приведенные к обмотке статора активное и индуктивное сопротивления обмотки ротора АД при номинальном скольжении s_H , Ом; I_{1H} – номинальный ток обмотки статора АД, Ом; ΔP_H – суммарные номинальные потери АД, Вт; ΔP_0 – постоянные потери АД, Вт; $\Delta P_{\text{мех}}$ – механические потери АД, Вт; Z_H – полное сопротивление ротора АД в режиме пуска, Ом; s_k – критическое скольжение ротора АД, о.е.; k_{rH}, k_{lH} – коэффициенты изменения соответственно активного и индуктивного сопротивлений

обмотки ротора при номинальном скольжении ротора АД s_H , о.е.; k_{rS}, k_{LS} – коэффициенты изменения соответственно активного и индуктивного сопротивлений обмотки ротора при текущем скольжении ротора АД s , о.е.; M_s – момент АД при скольжении ротора s , Н·м.

Для указанного АД в работе [5] по авторской методике также проведен расчет характеристик АД как при постоянных, так и переменных параметрах, где приведенное активное сопротивление обмотки ротора r'_2 изменяется по линейному закону, а индуктивное сопротивление обмоток статора и ротора АД для режима короткого замыкания $x_k = x_1 + x'_2$ – по гиперболическому закону в зависимости от скольжения ротора s .

Результаты расчета характеристик АД при постоянных и переменных параметрах СЗ по предложенной методике и изложенной в работе [5] представлены в табл. 1 и 2, а также графически на рис. 2 и 3.

Т а б л и ц а 1. Расчетные характеристики АД типа 4АН200L4 при постоянных параметрах СЗ

Table 1. Calculated characteristics of AM type 4AN200L4 at constant parameters of EC

s , о.е.	ω , рад/с	I_{1s} , А			M_s , Н·м		
		по предлаг. методике	по методике [5]	несовпад., %	по предлаг. методике	по методике [5]	несовпад., %
0	157,08	29,9	31,0	-3,5	0	0	0
$s_H = 0,017$	$\omega_H = 154,41$	98,5	94,0	4,8	355,9	354,5	0,8
$s_k = 0,092$	$\omega_k = 142,63$	347,3	332,3	4,5	890,8	890,7	0
0,1	141,37	348,1	345,9	0,6	869,5	888,0	-2,0
0,2	125,66	453,7	434,8	4,3	701,4	703,2	-0,3
0,4	94,25	499,7	480,3	4,0	425,7	427,4	-0,4
0,6	62,83	512,8	493,3	4,0	299,0	300,3	-0,4
0,8	31,42	518,8	498,9	4,0	229,5	230,5	-0,4
1,0	0	518,9	501,0	3,6	183,6	186,8	-1,7

Т а б л и ц а 2. Расчетные характеристики АД типа 4АН200L4 при переменных параметрах СЗ

Table 2. Calculated characteristics of AM type 4AN200L4 at variable parameters of EC

s , о.е.	ω , рад/с	I'_{2s} , А			I_{1s} , А			M_s , Н·м		
		по предлаг. методике	по методике [5]	несовпад., %	по предлаг. методике	по методике [5]	несовпад., %	по предлаг. методике	по методике [5]	несовпад., %
0	157,08	0	0	0	30,03	33,76	-11,0	0	0	0
$s_H = 0,017$	154,41	88,78	88,78	0	98,45	94,85	3,8	354	356	-0,5
0,03	152,37	148,46	148,32	0	159,65	157,71	1,2	563	563	0
0,06	147,65	255,24	253,56	0,7	270,63	259,36	4,3	835	832	0,6
$s_k = 0,092$	142,63	335,43	327,45	2,4	354,29	328,67	7,8	947	916	3,4
0,2	125,66	460,94	444,65	3,7	484,37	445,32	8,8	869	810	7,3
0,4	94,25	547,93	527,71	3,8	573,67	528,0	8,6	669	613	9,1
0,6	62,83	576,82	579,15	-0,4	603,63	579,36	4,2	549	525	4,6
0,8	31,42	580,12	622,75	-6,8	607,59	623,08	-2,5	472	485	-2,3
1,0	0	588,50	663,32	-11,3	616,0	663,42	-7,1	422	467	-9,6

Выводы. 1. Результаты расчетов механической и электромеханической характеристик АД с короткозамкнутым ротором при постоянных и переменных параметрах СЗ показывают хорошую их сходимость на рабочей части характеристик и значительное расхождение при скольжении ротора АД в интервале от s_k до 1.

2. Результаты расчетов по предложенной методике показывают их хорошее совпадение с результатами, полученными по методике, указанной в работе [5], что свидетельствует о достоверности приведенного в статье обоснования изменения параметров СЗ АД.

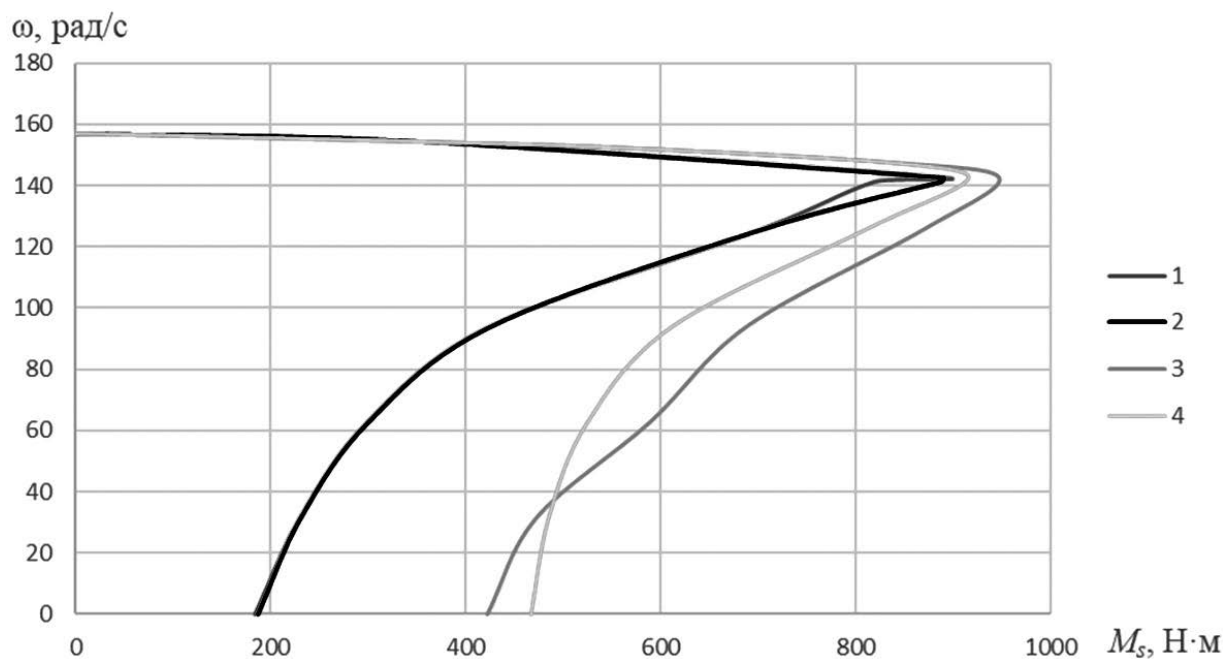


Рис. 2. Механические характеристики АД типа 4АН200L4 при постоянных и переменных параметрах СЗ: 1 – при постоянных параметрах по предложенной методике; 2 – при постоянных параметрах по методике, предложенной в работе [5]; 3 – при переменных параметрах по предложенной методике; 4 – при переменных параметрах по методике, изложенной в работе [5]

Fig. 2. Mechanical characteristics of AM type 4AN200L4 at constant and variable parameters of EC: 1 – at constant parameters according to the proposed method; 2 – at constant parameters according to the method proposed in [5]; 3 – at variable parameters according to the proposed method; 4 – at variable parameters according to the method described in [5]

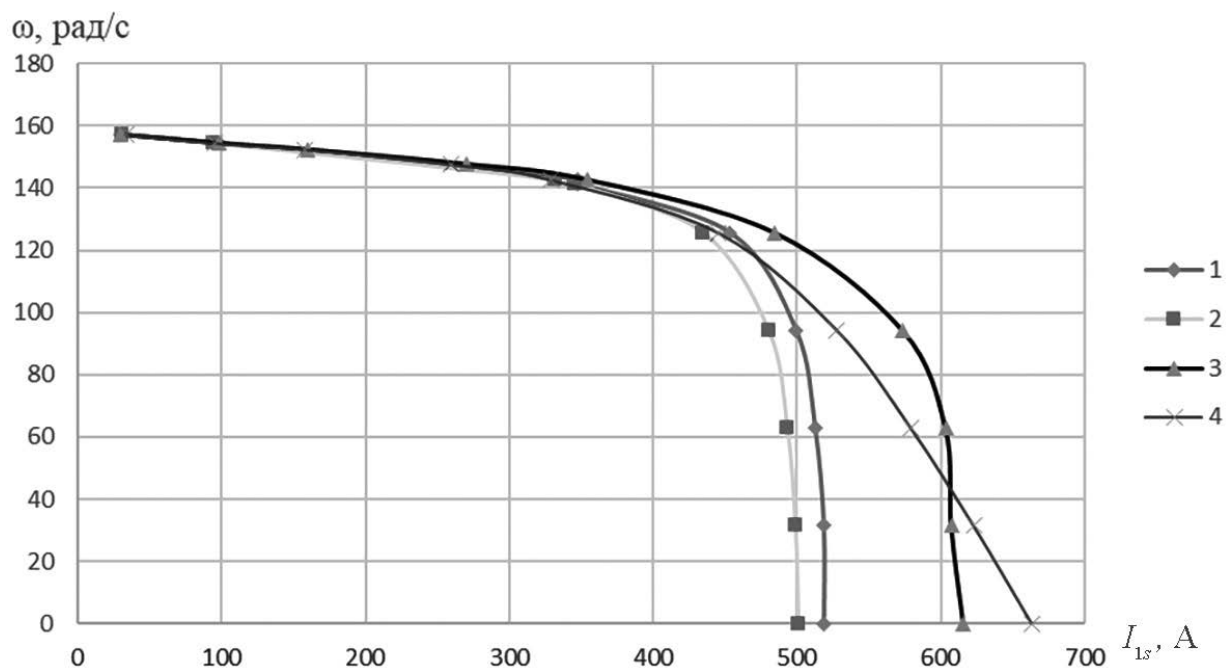


Рис. 3. Электромеханические характеристики АД типа 4АН200L4 при постоянных и переменных параметрах СЗ: 1 – при постоянных параметрах по предложенной методике; 2 – при постоянных параметрах по методике, предложенной в работе [5]; 3 – при переменных параметрах по предложенной методике; 4 – при переменных параметрах по методике, предложенной в работе [5]

Fig. 3. Electromechanical characteristics of AM type 4AN200L4 at constant and variable parameters of EC: 1 – at constant parameters according to the proposed method; 2 – at constant parameters according to the method proposed in [5]; 3 – at variable parameters according to the proposed method; 4 – at variable parameters according to the method proposed in [5]

3. Предложенная методика расчета механических и электромеханических характеристик АД при переменных параметрах СЗ хорошо вписывается в общеизвестную методику расчета характеристик при постоянных параметрах, приведенную в работах [13–21], что способствует ее простому восприятию.

4. Точность расчета характеристик АД по приведенной блок-схеме детального алгоритма будет зависеть от шага изменения скольжения s в детерминированном цикле, так как при вычислении индуктивного сопротивления обмотки статора x_{1s} используется значение тока обмотки статора I_{1s} с предыдущего шага расчета. Чем меньше шаг изменения скольжения s , тем выше точность расчета.

Список использованных источников

1. Фираго, Б. И. Регулируемые электроприводы переменного тока / Б. И. Фираго, Л. Б. Павлячик. – Минск: Техноперспектива, 2006. – 363 с.
2. Мошинский, Ю. А. Определение параметров схемы замещения асинхронной машины по каталожным данным / Ю. А. Мошинский, В. Я. Беспалов, А. А. Кирякин // *Электричество*. – 1998. – № 4. – С. 38–42.
3. Гридин, В. М. Расчет параметров схемы замещения асинхронных двигателей по каталожным данным / В. М. Гридин // *Электричество*. – 2012. – № 5. – С. 40–44.
4. Прищепов, М. А. Расчет параметров схемы замещения асинхронных двигателей по каталожным данным и построение их естественных механических и электромеханических характеристик / М. А. Прищепов, Е. М. Прищепова, Д. М. Иванов // *Агропанорама*. – 2016. – № 5. – С. 20–32.
5. Фираго, Б. И. Расчеты по электроприводу производственных машин и механизмов: учеб. пособие / Б. И. Фираго. – Минск: Техноперспектива, 2012. – 640 с.
6. Фираго, Б. И. Учебно-методическое пособие к курсовому проектированию по теории электропривода для студентов специальности 1-53 01 05 «Автоматизированные электроприводы» / Б. И. Фираго. – Минск: БНТУ, 2005. – 125 с.
7. Иванов-Смоленский, А. В. Электрические машины: учебник / А. В. Иванов-Смоленский. – М.: Энергия, 1980. – 927 с.
8. Вольдек, А. И. Электрические машины: учебник / А. И. Вольдек. – 2-е изд., перераб. и доп. – Л.: Энергия, 1974. – 839 с.
9. Шрейнер, Р. Т. Математическое моделирование электроприводов переменного тока с полупроводниковыми преобразователями частоты / Р. Т. Шрейнер. – Екатеринбург: УрО РАН, 2000. – 654 с.
10. Сыромятников, И. А. Режимы работы асинхронных и синхронных двигателей / И. А. Сыромятников; под ред. Л. Г. Мамиконянца. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 240 с.
11. Баклин, В. С. Математическая модель частотно-регулируемого асинхронного двигателя / В. С. Баклин, А. С. Гимпельс // *Изв. Том. политехн. ун-та*. – 2005. – Т. 308, № 7. – С. 148–153.
12. Копылов, И. П. Математическое моделирование электрических машин: учебник / И. П. Копылов. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 2001. – 328 с.
13. Основы автоматизированного электропривода: [учеб. пособие для вузов] / М. Г. Чиликин [и др.]. – М.: Энергия, 1974. – 567 с.
14. Дементьев, Ю. Н. Автоматизированный электропривод: учеб. пособие / Ю. Н. Дементьев, А. Ю. Чернышев, И. А. Чернышев. – Томск: Том. политехн. ун-т, 2009. – 224 с.
15. Чернышев, А. Ю. Электропривод переменного тока: учеб. пособие / А. Ю. Чернышев, Ю. Н. Дементьев, И. А. Чернышев. – Томск: Том. политехн. ун-т, 2011. – 213 с.
16. Мальцева, О. П. Системы управления электроприводов: учеб. пособие / О. П. Мальцева, Л. С. Удут, Н. В. Кояин. – Томск: Изд-во Том. политехн. ун-та, 2007. – 82 с.
17. Прищепов, М. А. Расчет статических характеристик асинхронных электродвигателей с короткозамкнутым ротором в двигательном и генераторном режимах при частотном управлении скоростью и стабилизации потока возбуждения / М. А. Прищепов, Е. М. Прищепова, Д. М. Иванов // *Агропанорама*. – 2017. – № 2. – С. 26–36.
18. Прищепов, М. А. Расчет предельных механических и электромеханических характеристик при частотном регулировании скорости в разомкнутой системе преобразователь частоты – асинхронный двигатель / М. А. Прищепов, Е. М. Прищепова // *Агропанорама*. – 2021. – № 5. – С. 15–27.
19. Удут, Л. С. Проектирование и исследование автоматизированных электроприводов / Л. С. Удут, О. П. Мальцева, Н. В. Кояин. – Томск: Изд-во Том. политехн. ун-та, 2009. – Ч. 8: Асинхронный частотно-регулируемый электропривод. – 448 с.
20. Ключев, В. И. Теория электропривода: [учеб. для вузов] / В. И. Ключев. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 560 с.
21. Чиликин, М. Г. Теория автоматизированного электропривода: [учеб. пособие для вузов] / М. Г. Чиликин, В. И. Ключев, А. С. Сандлер. – М.: Энергия, 1979. – 615 с.

References

1. Firago B. I., Pavlyachik L. B. *Adjustable AC drives*. Minsk, Tekhnoperspektiva Publ., 2006. 363 p. (in Russian).
2. Moshchinskii Yu. A., Bepalov V. Ya., Kiryakin A. A. Determination of the parameters of the equivalent circuit of an asynchronous machine using catalog data. *Elektrichestvo*, 1998, no. 4, pp. 38–42 (in Russian).

3. Gridin V. M. Calculating the induction motors equivalent circuit parameters by catalogue data. *Elektrichestvo*, 2012, no. 5, pp. 40–44 (in Russian).
4. Prishchepov M. A., Prishchepova E. M., Ivanov D. M. Calculation of the parameters of the equivalent circuit of asynchronous motors according to catalogue data and the construction of their main mechanical and electromechanical characteristics. *Agropanorama*, 2016, no. 5, pp. 20–32 (in Russian).
5. Firago B. I. *Calculations for the electric drive of industrial machines and mechanisms*. Minsk, Tekhnoperspektiva Publ., 2012. 640 p. (in Russian).
6. Firago B. I. *Training manual for course design on the theory of electric drive for students of the specialty 1-53 01 05*. Minsk, Belarusian National Technical University, 2005. 125 p. (in Russian).
7. Ivanov-Smolenskii A. V. *Electric machinery*. Moscow, Energiya Publ., 1980. 927 p. (in Russian).
8. Vol'dek A. I. *Electrical machines*. 2nd ed. Leningrad, Energiya Publ., 1974. 839 p. (in Russian).
9. Shreiner R. T. *Mathematical modeling of AC electric drives with semiconductor frequency converters*. Yekaterinburg, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 2000. 654 p. (in Russian).
10. Syromyatnikov I. A. *Operating modes of asynchronous and synchronous motors*. 4th ed. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1984. 240 p. (in Russian).
11. Baklin V. S., Gimpel's A. S. Mathematical model of a frequency-controlled induction motor. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta = Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2005, vol. 308, no. 7, pp. 148–153 (in Russian).
12. Kopylov I. P. *Mathematical modeling of electrical machines*. 3rd ed. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 2001. 328 p. (in Russian).
13. Chilikin M. G., Sokolov M. M., Terekhov V. M., Shinyanskiy A. V. *Fundamentals of an automated electric drive*. Moscow, Energiya Publ., 1974. 567 p. (in Russian).
14. Dement'ev Yu. N., Chernyshev A. Yu., Chernyshev I. A. *Electric motor drive*. Tomsk, Tomsk Polytechnic University, 2009. 224 p. (in Russian).
15. Chernyshev A. Yu., Dement'ev Yu. N., Chernyshev I. A. *Alternating current electric drive*. Tomsk, Tomsk Polytechnic University, 2011. 213 p. (in Russian).
16. Mal'tseva O. P., Udut L. S., Koyain N. V. *Control systems for electric drives*. Tomsk, Publishing house of the Tomsk Polytechnic University, 2007. 82 p. (in Russian).
17. Prishchepov M. A., Prishchepova E. M., Ivanov D. M. Calculation of the static characteristics of short-circuit induction motors in motor and generator modes with frequency controlled speed and stabilization of the excitation flow. *Agropanorama*, 2017, no. 2, pp. 26–36 (in Russian).
18. Prishchepov M. A., Prishchepova E. M. Calculation of limiting mechanical and electromechanical characteristics with frequency control of speed in an open system frequency converter-asynchronous engine. *Agropanorama*, 2021, no. 5, pp. 15–27 (in Russian).
19. Udut L. S., Mal'tseva O. P., Koyain N. V. *Design and study of automated electric drives. Part 8. An asynchronous frequency-controlled electric drive*. Tomsk, Publishing house of the Tomsk Polytechnic University, 2009. 448 p. (in Russian).
20. Klyuchev V. I. *Electric drive theory*. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1985. 560 p. (in Russian).
21. Chilikin M. G., Klyuchev V. I., Sandler A. S. *Theory of an automated electric drive*. Moscow, Energiya Publ., 1979. 615 p. (in Russian).

Информация об авторе

Прищепов Михаил Александрович – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры электрооборудования сельскохозяйственных предприятий, Белорусский государственный аграрный технический университет (пр. Независимости, 99, 220023, Минск, Республика Беларусь). E-mail: pma.eshp@gmail.com. <https://orcid.org/0000-0002-5359-3861>

Information about the author

Mikhail A. Pryshchepau – D. Sc. (Engineering), Associate Professor, Professor of the Department of Electrical Equipment of Agricultural Enterprises, Belarusian State Agrarian Technical University (99, Nezavisimosti Ave., 220023, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: pma.eshp@gmail.com. <https://orcid.org/0000-0002-5359-3861>