

К ВОПРОСУ О ДИАПАЗОНЕ РЕГУЛИРОВАНИЯ СКОРОСТИ И ПОТЕРЯХ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ ПРИ ВЕНТИЛЯТОРНОЙ НАГРУЗКЕ И ПАРАМЕТРИЧЕСКОМ РЕГУЛИРОВАНИИ СКОРОСТИ

М.А. Прищепов,

зав. каф. электрооборудования сельскохозяйственных предприятий БГАТУ, докт. техн. наук, доцент

В статье предложена методика расчета диапазона параметрического регулирования скорости изменением напряжения питания и потерь асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором при вентиляторной нагрузке. При этом расчет механических и электромеханических характеристик асинхронного двигателя проводится при переменных параметрах его схемы замещения.

Ключевые слова: асинхронный двигатель, схема замещения, жесткость механических характеристик, диапазон регулирования скорости, статическая устойчивость

A method for calculating the range of parametric speed control by changing the supply voltage and the losses of an asynchronous motor with a short circuit rotor under ventilation is proposed in the article. In this case the calculation of the mechanical and electromechanical characteristics of an asynchronous motor is carried out with variable parameters of its equivalent circuit.

Key words: asynchronous motor, equivalent circuit, rigidity of mechanical characteristics, speed control range, static stability.

Введение

Вентиляционные установки находят широкое применение для поддержания параметров микроклимата внутри животноводческих, птицеводческих и производственных помещений. Как правило, для привода рабочих органов вентиляторов используются асинхронные двигатели (АД) с короткозамкнутым ротором. При этом изменение подачи воздуха вентилятором наиболее эффективно осуществляется регулированием скорости вращения его рабочего органа параметрическим (изменением напряжения питания обмоток статора АД) или частотным методом, т.е. регулированием частоты и амплитуды питающего напряжения обмоток статора АД. Считается, что параметрическое регулирование скорости вентилятора является менее энергоэффективным и обладает меньшим диапазоном регулирования.

Цель данной работы – провести теоретическую оценку диапазона регулирования скорости и потерь АД при ее параметрическом методе регулирования для вентиляторной нагрузки.

Основная часть

Для определения диапазона регулирования скорости вентилятора необходимо провести расчет и построение естественных и искусственных характеристик АД с учетом эффекта вытеснения тока ротора и насыщения магнитных цепей рассеяния при изменении напряжения питания обмоток статора, а затем наложить на механические характеристики АД механическую характеристику вентилятора.

В широко используемых источниках литературы [1-4] расчет и построение характеристик АД ведется при постоянных параметрах его схемы замещения

(СЗ) адекватных для рабочего участка характеристик при скольжении ротора от 0 до номинального скольжения s_n . Поэтому участки характеристик при скольжении ротора от 1 до s_n рассчитываются со значительной погрешностью, так как в этом диапазоне изменения скольжения ротора s сказывается эффект вытеснения тока ротора и насыщения магнитных цепей рассеяния, что не дает возможности адекватно оценить реальный диапазон регулирования скорости АД при вентиляторной нагрузке.

Эффект вытеснения тока по высоте стержней обмотки (поверхностный эффект) приводит к уменьшению эффективного сечения стержней, т.е. увеличению эквивалентного активного сопротивления r_2 , последующему уменьшению индуктивности рассеяния обмотки ротора x_2 , которые в итоге будут зависеть от частоты тока ротора и насыщения магнитной системы АД. 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 магнитопровода от полей рассеяния [5-7]. Для повышения точности расчета характеристик АД с короткозамкнутым ротором в указанном диапазоне изменения скольжения s математическая модель (ММ) АД должна учитывать вышеуказанные процессы, что обусловлено сложностью зависимостей параметров ММ от скольжения ротора АД.

В работе [8] для определения приведенных к обмотке статора активного r'_2 и индуктивного x'_2 сопротивлений ротора при указанных сложностях для двигательного режима АД при скольжении ротора $s = 0...1$ предложено использовать следующие зависимости:

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

$$x'_{2s} = \begin{cases} x'_2 & \text{при } s \leq s_n; \\ \frac{x'_2 - k_{ls_n} x'_{2n}}{1 - k_{ls_n}} + \frac{x'_{2n} - x'_2}{1 - k_{ls_n}} k_{ls} & \text{при } s > s_n; \end{cases} \quad (2)$$

$$\text{где } k_{rs} = \frac{0,0185s - 0,375s^2 + s^2\sqrt{s}}{0,035 + 0,612s^2\sqrt{s}}; \quad (3)$$

$$k_{ls} = \frac{0,0358s - 0,556s^2 + s^2\sqrt{s}}{0,0187 - 0,0151s^2 + 0,446s^2\sqrt{s}}; \quad (4)$$

k_{rs}, k_{ls} – коэффициенты, учитывающие изменения, соответственно, активного и индуктивного сопротивлений обмотки ротора при текущем скольжении ротора s ;

r'_2, x'_2 – приведенное к обмотке статора активное и индуктивное сопротивление обмотки ротора АД, Ом;

r'_{2n}, x'_{2n} – приведенное к обмотке статора активное и индуктивное сопротивление обмотки ротора АД в режиме пуска, Ом;

k_{rs_n}, k_{ls_n} – коэффициенты, учитывающие изменения, соответственно, активного и индуктивного сопротивлений обмотки ротора при номинальном скольжении ротора s_n .

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 [9, 10]. При этом для вычисления индуктивного сопротивления рассеяния обмотки статора x_{1s} при различных токах и скольжениях ротора АД удобно использовать зависимость

$$x_{1s} = \begin{cases} x_1 & \text{при } s \leq s_n; \\ x_1 + \frac{x_{1n} - x_1}{I_{1n} - I_{1s}} (I_{1s} - I_{1n}) & \text{при } s > s_n; \end{cases} \quad (5)$$

где I_{1n}, I_{1s} – номинальное и текущее значение тока обмотки статора АД, А;

x_1, x_{1n} – номинальное и пусковое значение индуктивного сопротивления обмотки статора АД, Ом;

I_{1n} – пусковой ток обмотки статора АД (А), рассчитанный при параметрах СЗ в режиме пуска по выражениям:

$$I_{1n} = \sqrt{I_{0n}^2 + I_{2n}'^2 + 2I_{0n}I_{2n}' \sin \varphi_{2n}}; \quad (6)$$

$$I_{2n}' = \frac{U_{1n}}{\sqrt{(r_1 + r_{2n}')^2 + x_{\kappa n}^2 + \left(\frac{r_1 r_{2n}'}{x_{\mu}}\right)^2}}; \quad (7)$$

$$I_{0n} = \frac{U_{1n}}{\sqrt{r_1^2 + (x_{1n} + x_{\mu})^2}}; \quad (8)$$

$$\sin \varphi_{2n} = \frac{x_{\kappa n}}{\sqrt{(r_1 + r_{2n}')^2 + x_{\kappa n}^2}}, \quad (9)$$

где I_{0n} – ток холостого хода АД в пусковом режиме, А;

I_{2n}' – приведенный к обмотке статора ток обмотки ротора АД в режиме пуска, А;

r_{2n}' – приведенное к обмотке статора активное сопротивление обмотки ротора АД в режиме пуска, Ом;

$x_{\kappa n}$ – индуктивное сопротивление обмоток статора и ротора АД для режима короткого замыкания при неподвижном роторе АД, Ом;

x_{μ} – индуктивное сопротивление ветви намагничивания АД, Ом;

$\sin \varphi_{2n}$ – 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 [3; 11-14], рассчитываем естественные механические $\omega_s = f(M_s)$ и электромеханические $\omega_s = f(I_s)$ характеристики АД:

$$M_s = \frac{3U_{1n}^2 r'_{2s}}{\omega_0 s \left((x_{1s} + x'_{2s})^2 + \left(r_1 + \frac{r_{2s}}{s}\right)^2 + \left(\frac{r_1 r'_{2s}}{s x_{\mu}}\right)^2 \right)}; \quad (10)$$

$$I_{1s} = \sqrt{I_{0s}^2 + I_{2s}'^2 + 2I_{0s}I_{2s}' \sin \varphi_{2s}}; \quad (11)$$

$$\omega_s = \omega_0 (1 - s), \quad (12)$$

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;

$$I'_{2s} = \frac{U_{1н}}{\sqrt{\left(r_1 + \frac{r'_{2s}}{s}\right)^2 + (x_{1s} + x'_{2s})^2 + \left(\frac{r_1 r'_{2s}}{sx_\mu}\right)^2}}; \quad (13)$$

$$I_{0s} = \frac{U_{1н}}{\sqrt{r_1^2 + (x_{1s} + x_\mu)^2}}; \quad (14)$$

$$\sin \varphi_{2s} = \frac{x_{1s} + x'_{2s}}{\sqrt{\left(r_1 + \frac{r'_{2s}}{s}\right)^2 + (x_{1s} + x'_{2s})^2}}. \quad (15)$$

В приведенных выражениях (11)...(15) индекс «s» означает, что их значение вычисляется при конкретном текущем скольжении.

Все приведенные выше выражения для расчета характеристик АД справедливы для номинального напряжения питания обмоток статора АД $U_{1н}$.

При снижении напряжения питания обмоток статора $U_1 < U_{1н}$ определяется относительное значение магнитного потока Φ , т.е. отношение магнитного потока при сниженном напряжении U_1 в магнитной системе статора к номинальному потоку при номинальном напряжении $U_{1н}$, равное

$$\Phi = \frac{U_1}{U_{1н}}. \quad (16)$$

Зная Φ , по относительной характеристике намагничивания находят относительный намагничивающий ток i , т.е. отношение намагничивающего тока I_0 к номинальному намагничивающему току $I_{1н}$ [15].

Тогда относительный намагничивающий ток i определим по относительной характеристике намагничивания, приведенной в источниках [16,17], которая описывается выражением (степенным многочленом второй степени)

$$\Phi = \alpha i^2 + \beta i + \gamma, \quad (17)$$

где $\alpha=0,229$; $\beta=0,988$; $\gamma=0,242$.

Из выражения (17) получим следующую формулу для относительного значения намагничивающего тока:

$$i = \frac{-\beta + \sqrt{\beta^2 - 4\alpha(\gamma - \Phi)}}{2\alpha}. \quad (18)$$

$$\text{Намагничивающий ток } I_0 = i \cdot I_{1н} \sin \varphi_x \approx i \cdot I_{1н}, \quad (19)$$

где $\sin \varphi_x$ – синус угла между векторами напряжения U_1 и током $I_{0s}=I_{1н}$ равен 0,966...0,996, так как угол φ_x обычно равен $75^\circ \dots 85^\circ$.

Полное сопротивление ветви намагничивания СЗ АД равно

$$Z_0 = \frac{U_1}{C_1 \cdot I_0}, \quad (20)$$

где C_1 – коэффициент приведения параметров Г-образной СЗ АД к Г-образной, о.е.

Тогда индуктивное сопротивление ветви намагничивания АД

$$X_\mu = Z_0 \sin \varphi_x. \quad (21)$$

С учетом приведенных формул на рисунке 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 начинается с расчета параметров СЗ АД в режиме пуска, а затем пошагово проводится расчет естественных характеристик при изменении скольжения. Далее, при изменении напряжения питания обмоток статора АД U_1 проводится определение относительного магнитного потока Φ , относительного намагничивающего тока i , намагничивающего тока I_0 , полного Z_0 и индуктивного X_μ сопротивлений ветви намагничивания АД, приведенного к обмотке статора тока обмотки ротора АД $I'_{2п}$ в режиме пуска при измененном напряжении питания обмоток статора U_1 . Затем процесс расчета повторяется, как и при номинальном напряжении $U_{1н}$, начиная с сопротивлений СЗ при пуске.

Для определения статически устойчивого диапазона регулирования скорости АД при вентиляторной нагрузке изменением напряжения питания обмоток статора АД запишем выражение механической характеристики для вентиляторной нагрузки:

$$M_c = M_0 + a_c \omega^x, \quad (22)$$

где M_0 – момент от сил трения, Н·м;

a_c – коэффициент, Н·м·с/рад;

$x=2$ – для вентиляторов;

$x=3$ – для центробежных насосов.

Из характеристики (22) очевидно, что со снижением скорости от ω_n до $\omega_0(1-s)$ момент сопротивления M_c уменьшается в квадратичной или кубической зависимости от относительного снижения скорости.

Скорости, соответствующие установившимся режимам работы электропривода (ЭП), можно определить графически по точкам пересечения механических характеристик АД $M=f(\omega)$ и вентиляторной нагрузки $M_c=f(\omega)$. Точки пересечения могут соответствовать устойчивому или неустойчивому равновесию. Критерием статической устойчивости работы ЭП является выполнение неравенства

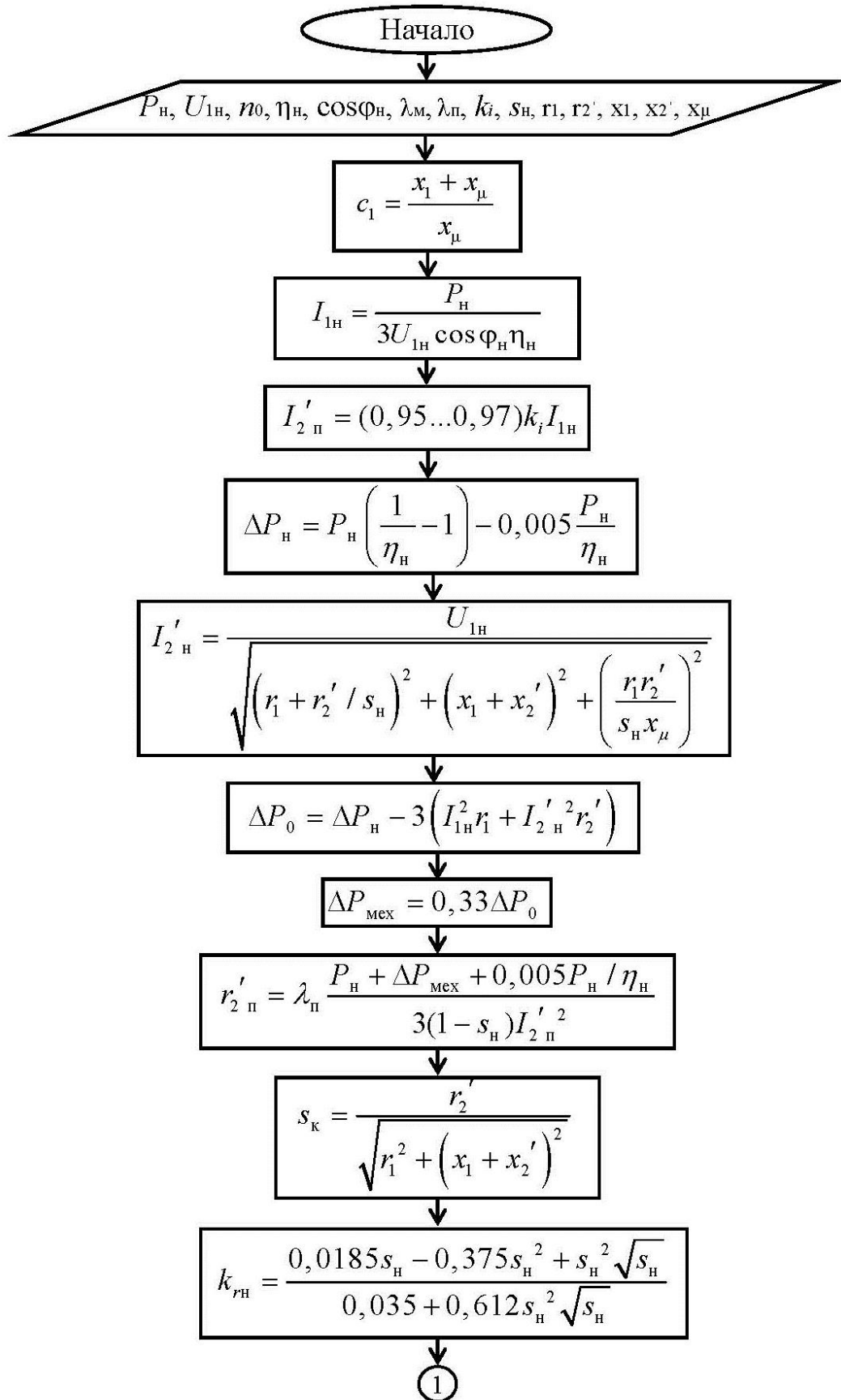
$$k_{\beta\delta} - k_{\beta c} < 0, \quad (23)$$

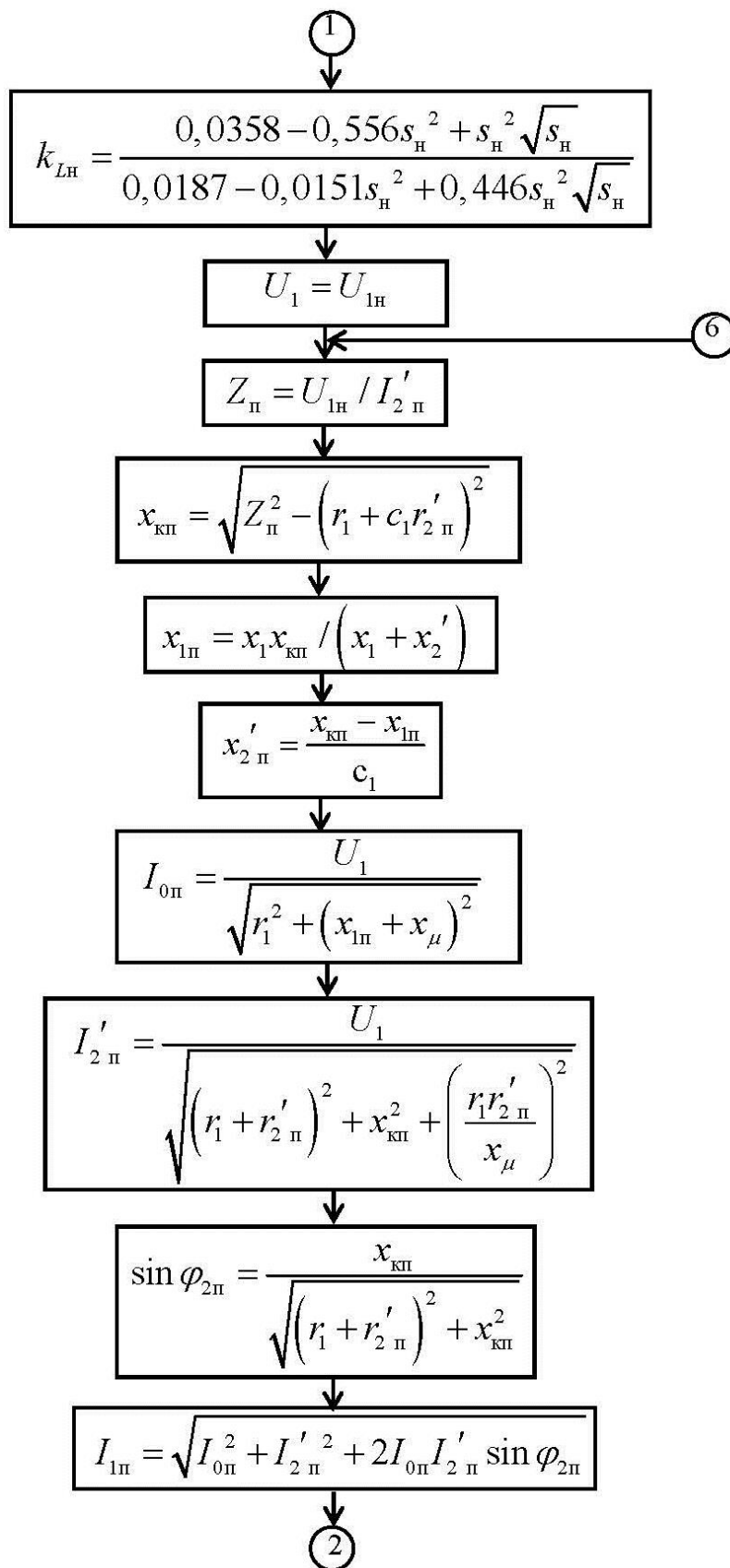
$$\text{где } k_{\beta\delta} = \frac{dM}{d\omega} \approx \frac{\Delta M}{\Delta \omega} - \text{ жесткость механической}$$

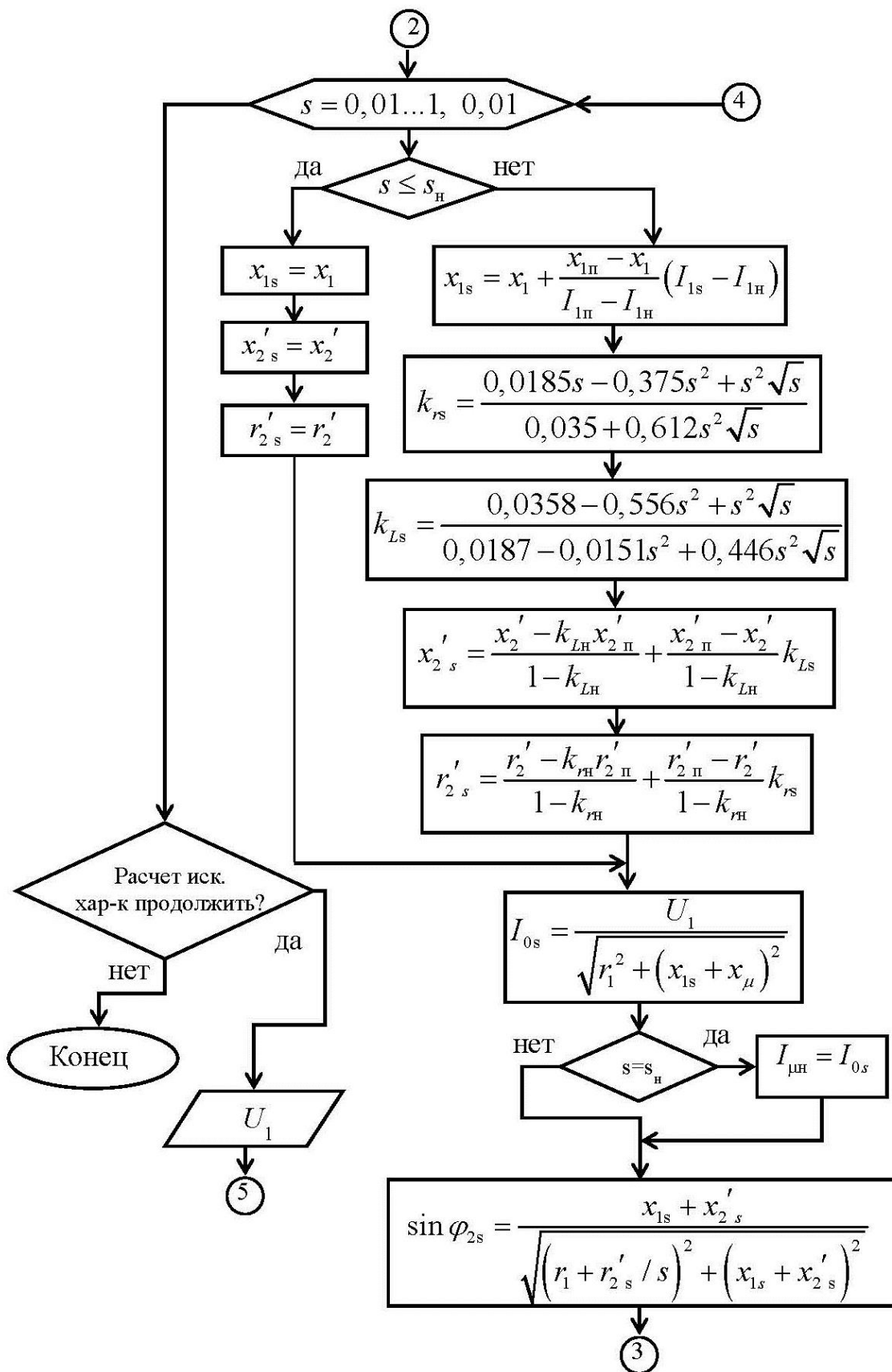
характеристики двигателя в точке установившегося режима;

$$k_{\beta c} = \frac{dM_c}{d\omega} - \text{ жесткость механической характе-}$$

ристики механизма в точке установившегося режима.







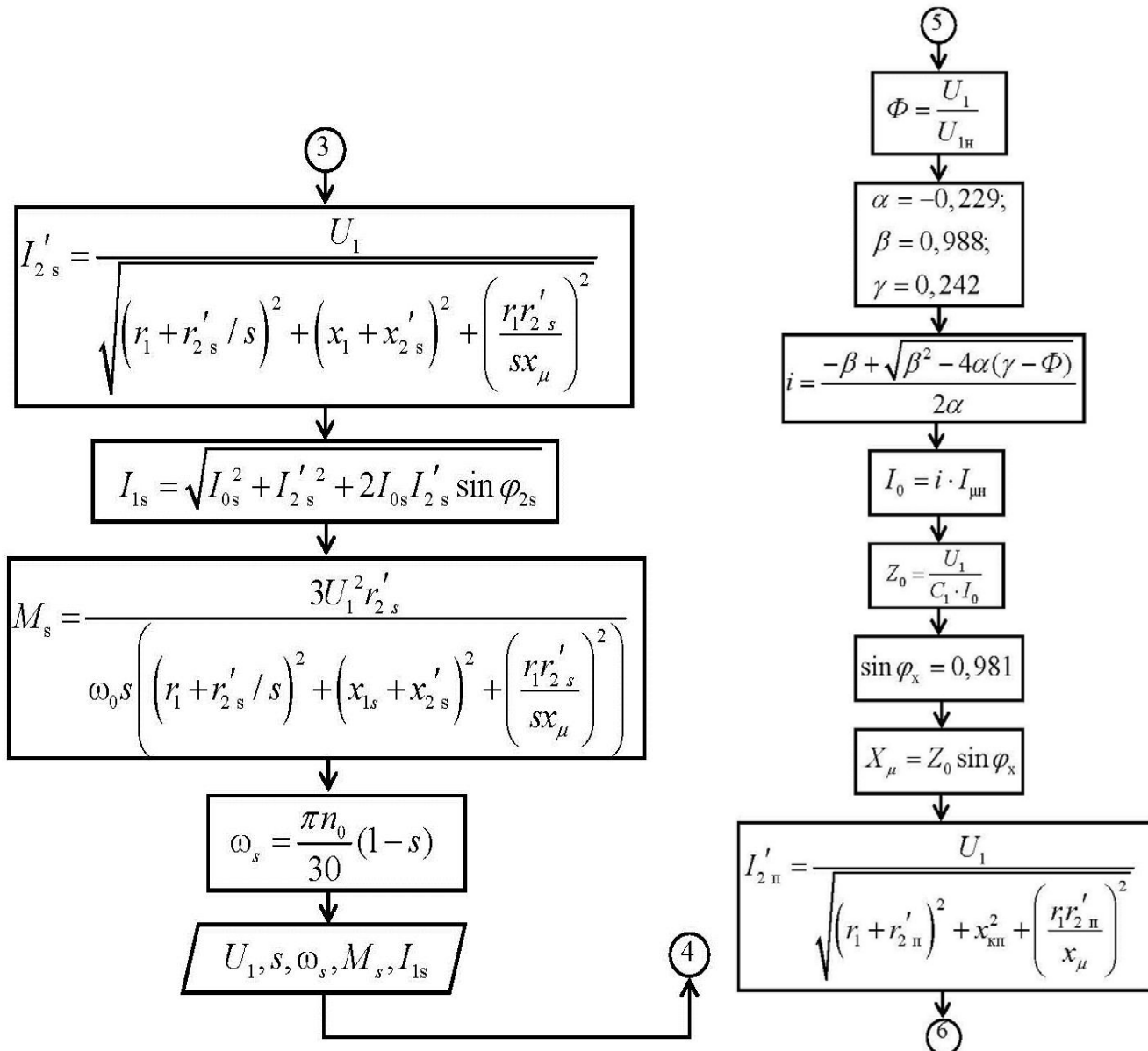


Рисунок 1. Блок-схема алгоритма расчета механических и электромеханических характеристик АД с короткозамкнутым ротором: P_n – номинальная мощность АД, Вт; n_0 – синхронная частота вращения магнитного поля статора АД, об/мин; η_n – номинальный КПД АД, о.е.; $\cos\varphi_n$ – номинальный косинус угла активной мощности АД, о.е.; λ_m – кратность максимального момента относительно номинального, о.е.; λ_n – кратность пускового момента относительно номинального, о.е.; k_i – кратность пускового тока АД, о.е.; s_k – критическое скольжение АД, о.е.; Z_n – полное сопротивление ротора АД в режиме пуска, Ом.

Жесткость механической характеристики вентиляторного механизма можно найти аналитически

$$k_{\beta c} = \frac{dM_c}{d\omega} = \frac{d(M_0 + a_c \omega^x)}{d\omega} = x \cdot a_c \omega. \quad (24)$$

Как следует из выражения (24), жесткость характеристики вентиляторного механизма линейно увеличивается с ростом его скорости.

Для определения жесткости механической характеристики АД $k_{\beta\delta}$ необходимо аппроксимировать естественную и искусственные механические харак-

теристики АД прямой и параболой, как показано на рисунке 2.

Прямая $M(\omega) = k_{\beta\delta}(\omega - \omega_0)$ соответствует работе двигателя на рабочем устойчивом участке естественной механической характеристики и проходит через точки идеального холостого хода ω_0 и номинальной скорости ω_n . В этом случае приращение момента для естественной механической характеристики АД ΔM равно номинальному моменту с отрицательным знаком $-M_n$ ($\Delta M = -M_n$), а скорости $\Delta\omega = \omega_0 - \omega_n$. Тогда

$$k_{\beta\delta} = \frac{\Delta M}{\omega_0 - \omega_n}, \quad (25)$$

а прямая $M(\omega) = k_{\beta\delta}(\omega_0 - \omega_n)$ (рис. 2) соответствует рабочему устойчивому участку механической характеристики АД.

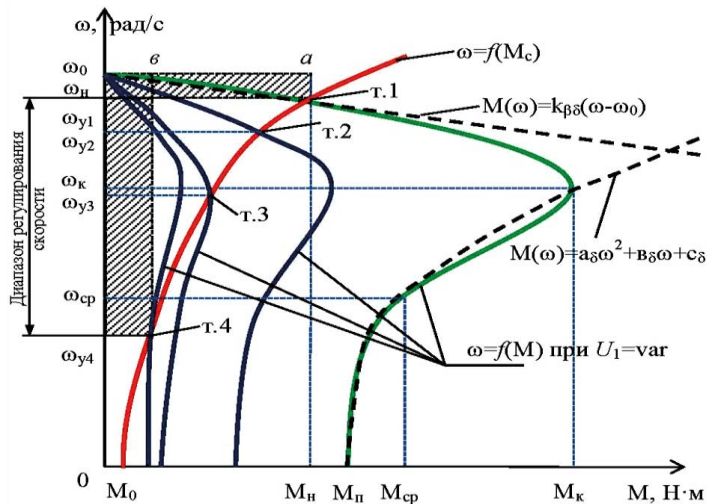


Рисунок 2. Естественные и искусственные механические характеристики АД $\omega=f(M)$ при различных напряжениях обмоток статора U_1 и механическая характеристика вентиляторной нагрузки $\omega=f(M_c)$

Для искусственной механической характеристики АД при напряжении питания обмоток статора $U_1 < U_{1н}$ значение ΔM будет равно значению момента $-M$ ($\Delta M = -M$) при угловой скорости $\omega = \omega_n$ на соответствующей искусственной характеристике.

Парабола $M(\omega) = a_\delta \omega^2 + \epsilon_\delta \omega + c_\delta$ соответствует неустойчивому участку механической характеристики АД и проходит через три точки: пускового момента M_n при $\omega_n = 0$, критического момента M_k при $\omega_k = \omega_0(1-s_k)$ и точку момента M_{cp} при средней скорости между критической скоростью ω_k и скоростью

пуска ω_n АД $\omega_{cp} = \omega_0 \left(\frac{1-s_k}{2} \right)$. Определение мо-

ментов M_n, M_k, M_{cp} и соответствующих угловых скоростей $\omega_n, \omega_k, \omega_{cp}$ для различных напряжений обмоток статора АД U_1 проводят по каталожным данным или расчетным путем по алгоритму, приведенному на рисунке 1.

Далее, решая систему уравнений, записанную для трех указанных точек, определяют коэффициенты уравнения параболы $a_\delta, \epsilon_\delta, c_\delta$ при различных напряжениях питания обмоток статора АД U_1 :

$$\begin{aligned} M_n &= a_\delta \omega_n^2 + \epsilon_\delta \omega_n + c_\delta; \\ M_{cp} &= a_\delta \omega_{cp}^2 + \epsilon_\delta \omega_{cp} + c_\delta; \\ M_k &= a_\delta \omega_k^2 + \epsilon_\delta \omega_k + c_\delta. \end{aligned} \quad (26)$$

Тогда коэффициент жесткости механической характеристики АД для неустойчивого участка

$$\begin{aligned} k_{\beta\delta} &= \frac{dM}{d\omega} = \frac{d(a_\delta \omega^2 + \epsilon_\delta \omega + c_\delta)}{d\omega} = \\ &= \epsilon_\delta + 2a_\delta \omega. \end{aligned} \quad (27)$$

После определения коэффициентов $a_c, a_\delta, \epsilon_\delta, c_\delta$ механических характеристик и коэффициентов жесткости вентиляторной нагрузки $k_{\beta c}$ устойчивого и неустойчивого участков естественных и искусственных механических характеристик АД $k_{\beta\delta}$ определяют точки пересечения механической характеристики вентиляторной нагрузки $M_c=f(\omega)$ с механическими характеристиками АД $M=f(\omega)$ (т.1, т.2, т.3, т.4), представленные на рисунке 2. При этом параметры механических характеристик $M_c=f(\omega)$ и их коэффициентов жесткости $k_{\beta c}$ для вентиляторной нагрузки не изменяются, а аналогичные параметры характеристик $M=f(\omega)$ АД и их коэффициентов жесткости $k_{\beta\delta}$ будут изменяться с изменением напряжения обмоток его статора U_1 .

Определение точки пересечения механических характеристик укажет, при какой установившейся скорости $\omega_{y,i}$ будет работать АД для условия равенства моментов $M(\omega_{y,i}) = M_c(\omega_{y,i})$. Тогда, для устойчивого участка естественных и искусственных механических характеристик АД, установившаяся скорость $\omega_{y,i}$ определится из равенства

$$M_0 + a_c \omega_{y,i}^2 = k_{\beta\delta} (\omega_{y,i} - \omega_0). \quad (28)$$

Откуда

$$\omega_{y,i} = \frac{k_{\beta\delta} \pm \sqrt{k_{\beta\delta}^2 - 4a_c(M_0 + k_{\beta\delta}\omega_0)}}{2a_c}. \quad (29)$$

При этом в полученном выражении (29) знак выбирается таким образом, чтобы установившаяся скорость $\omega_{y,i}$ находилась на отрезке скоростей $\omega_0 \dots \omega_k$.

На устойчивом участке механических характеристик АД $M=f(\omega)$ ЭП будет всегда устойчив, так как будет выполняться условие (23).

В случае, когда полученная по выражению (29) установившаяся скорость ЭП $\omega_{y,i}$ будет меньше критической скорости АД ω_k , аналогично определяют точку пересечения механической характеристики вентиляторной нагрузки $M_c=f(\omega)$ с неустойчивыми участками искусственных механических характеристик АД $M=f(\omega)$ при пониженном напряжении питания обмоток статора U_1 из равенства

$$M_0 + a_c \omega_{y,i}^2 = a_\delta \omega_{y,i}^2 + \epsilon_\delta \omega_{y,i} + c_\delta. \quad (30)$$

Тогда

$$\omega_{y,i} = \frac{-\epsilon_\delta \pm \sqrt{\epsilon_\delta^2 - 4(a_\delta - a_c)(c_\delta - M_0)}}{2(a_\delta - a_c)}. \quad (31)$$

При этом знак в выражении (31) выбирается таким, чтобы установившаяся скорость $\omega_{y,i}$ находилась на отрезке скоростей $0 \dots \omega_k$.

После определения установившейся скорости $\omega_{y,i}$ по выражению (31) определяют коэффициент жесткости $k_{\beta\delta}$ и далее по критерию (23) определяют устойчивость ЭП. Если ЭП будет статически устойчив при полученной установившейся скорости $\omega_{y,i}$, то далее повторяют расчет при более низком напряжении питания обмоток статора АД U_1 до тех пор, пока будет существовать установившаяся скорость $\omega_{y,i}$ и выполняться критерий устойчивости (23). Последняя, определенная таким образом скорость $\omega_{y,i}$, при которой будет выполняться критерий устойчивости (23), и будет являться минимальной скоростью диапазона ее регулирования ЭП для вентиляторной нагрузки (рис. 2).

Анализ рассчитанных графических зависимостей (рис. 3) по предложенной выше методике показывает, что условие (23) выполняется во всем диапазоне регулирования скорости, соответственно, вращение вентилятора во всем диапазоне скоростей будет устойчивым.

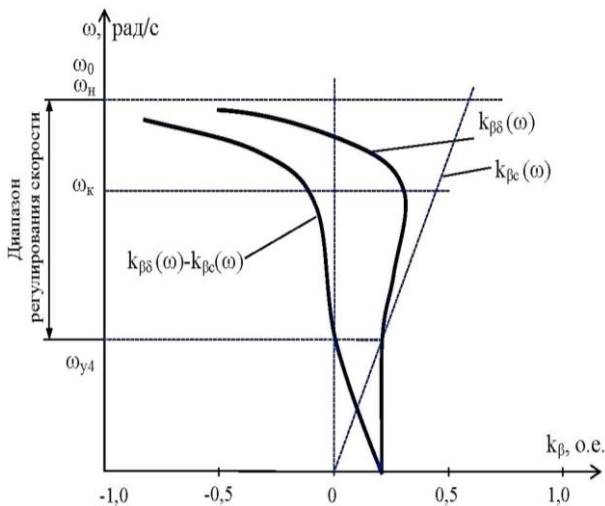


Рисунок 3. Зависимости коэффициентов жесткости асинхронного двигателя $k_{\beta\delta}$ и вентиляторной нагрузки $k_{\beta\epsilon}$ при регулировании скорости ω изменением напряжения обмоток статора

Однако работа ЭП в широком диапазоне скоростей, т.е. с большим скольжением вызывает значительные потери в роторе АД (рис. 2). Потери в обмотке ротора при номинальной скорости ω_n , соответствующей номинальному напряжению питания обмоток статора $U_{1н}$, будет выражаться площадью прямоугольника $\omega_0 - \omega_n - \Gamma.1-a$, а потери в обмотке ротора при скорости $\omega_{y,4}$, соответствующей пониженному напряжению U_1 , – площадью прямоугольника $\omega_0 - \omega_{y,4} - \Gamma.4-b$.

Полные же электромагнитные потери в АД

$$\Delta P_{эм} = \Delta P_{м1} + \Delta P_{м2} + \Delta P_{с1}, \quad (32)$$

где $\Delta P_{м1}$ – потери в меди статора, Вт;

$\Delta P_{м2}$ – потери в меди ротора, Вт;

$\Delta P_{с1}$ – потери в стали статора, Вт.

При работе АД на естественной характеристике, согласно [3;17], эти потери определяются выражениями:

$$\Delta P_{м1} = \left(\frac{I_{\mu n}}{I_{1н}} + \left(1 - \frac{I_{\mu n}}{I_{1н}} \right) \mu_c^2 \right) \Delta P_{м1н}; \quad (33)$$

$$\Delta P_{м2} = \mu_c^2 \Delta P_{м2н}; \quad (34)$$

$$\Delta P_{с1} = \left[B + (1 - B) \mu_c^2 \right] \Delta P_{с1н}, \quad (35)$$

где $\Delta P_{м1н} = 3I_{1н}^2 r_1'$ – номинальные потери в меди статора, Вт;

$\Delta P_{м2н} = 3(I_{2н}')^2 r_2'$ – номинальные потери в обмотке ротора, Вт;

$$\Delta P_{с1н} = \Delta P_{н} -$$

$\left(\Delta P_{м1н} + 1,5 \cdot 10^{-2} P_{н} + 10^{-2} \frac{P_{н} s_{н}}{1 - s_{н}} \right)$ – номинальные потери в стали статора, Вт;

$$\Delta P_{н} = \frac{P_{н}(1 - \eta_{н})}{\eta_{н}} \text{ – суммарные потери в АД, Вт;}$$

$$\mu_c = \frac{M_c}{M_{н}} \text{ – относительное значение момента}$$

статической нагрузки, о.е.;

B – конструктивный коэффициент, зависящий от серии АД, о.е. ($B=0,96-0,98$ – для серии АД 4А).

При работе АД на искусственных механических характеристиках $\omega=f(M)$, полученных путем снижения напряжения питания обмотки статора U_1 , составляющие полных электромагнитных потерь в АД согласно [3; 17], определяются по выражениям:

$$\Delta P_{м1} = 1,1 \mu_c^2 \left(\frac{I_0 s_{н}}{I_{1н} s} + \left(1 - \frac{I_0}{I_{1н}} \right) \frac{s_{н}}{s} \right) \Delta P_{м1н}; \quad (36)$$

$$\Delta P_{м2} = 1,1 \mu_c^2 \left(\frac{s}{s_{н}} \right) \Delta P_{м2н}; \quad (37)$$

$$\Delta P_{с1} = \mu_c^2 \left[B \frac{s_{н}}{s} + (1 - B) \frac{s}{s_{н}} \right] \Delta P_{с1н}. \quad (38)$$

Анализ выражений (36)...(38) показывает, что при работе АД на искусственных механических характеристиках при пониженном напряжении питания обмоток статора U_1 увеличиваются потери в обмотке ротора $\Delta P_{м2}$ за счет увеличения отношения скольжений $s/s_{н}$, но уменьшаются потери в меди статора $\Delta P_{м1}$ и в стали статора $\Delta P_{с1}$ за счет уменьшения отношения скольжений $s_{н}/s$. При этом их суммарное соотноше-

ние таково, что общие электромагнитные потери $\Delta P_{эм}$ при работе на искусственных характеристиках оказываются меньшими, чем при работе на естественной характеристике.

Заключение

1. Особенность механической характеристики вентиляторной нагрузки позволяет работать ЭП на участке искусственных механических характеристик при пониженном напряжении питания обмоток статора АД U_1 со скольжениями s , большими критического s_k , что невозможно для других видов нагрузки. Однако работа с большими скольжениями вызывает и большие потери в роторе АД.

2. Расчет механических характеристик АД при переменных параметрах СЗ позволяет наиболее достоверно определить допустимый диапазон регулирования скорости ЭП при вентиляторной нагрузке.

3. Анализ литературных источников и проведенных расчетов при параметрическом регулировании скорости АД изменением напряжения питания обмоток статора U_1 для вентиляторной нагрузки показывает, что электромагнитные потери снижаются в 1,5-2 раза. При этом они будут уменьшаться с уменьшением статического момента вентиляторной нагрузки по сравнению с номинальным моментом АД, т.е. чем с большей недогрузкой работает АД.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Фираго, Б.И. Регулируемые электроприводы переменного тока / Б.И. Фираго, Л.Б. Павлячик. – Минск: Техноперспектива, 2006. – 363 с.
2. Гридин, В.М. Расчет характеристик асинхронных двигателей по каталожным данным / В.М. Гридин // *Электричество*, 2018. – № 3. – С. 44-48.
3. Дементьев, Ю.Н. Автоматизированный электропривод: учеб. пособие / Ю.Н. Дементьев, А.Ю. Чернышев, И.А. Чернышев. – Томск: ТПУ, 2009. – 224 с.
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. – 639 с.
6. Иванов-Смоленский, А.В. Электрические машины: учеб. для вузов / А.В. Иванов-Смоленский. – М.: Энергия, 1980. – 928 с.
7. Вольдек, А.И. Электрические машины: учеб. для вузов / А.И. Вольдек. – 2-е изд.; перераб. и доп. – Л.: Энергия, 1974. – 840 с.
8. Мощинский, Ю.А. Определение параметров схемы замещения асинхронной машины по каталожным данным / Ю.А. Мощинский, В.Я. Беспалов, А.А. Кириякин // *Электричество*, 1998. – № 4. – С. 38-42.
9. Баклин, В.С. Математическая модель частотно-регулируемого асинхронного двигателя / В.С. Баклин, А.С. Гимпельс // *Известия Томского политехнического университета [Известия ТПУ]*. – 2005. – Т. 308. – № 7. – С. 148-153.
10. Копылов, И.П. Математическое моделирование электрических машин: учеб. для вузов / И. П. Копылов. – М.: Высшая школа, 2001. – 327 с.
11. Чиликин, М.Г. Основы автоматизированного электропривода: учеб. пособие для вузов / М.Г. Чиликин, М.М. Соколов, В.М. Терехов, А.В. Шинянский. – М.: Энергия, 1974. – 568 с.
12. Чернышев, А.Ю. Электропривод переменного тока: учеб. пособие / А.Ю. Чернышев, Ю.Н. Дементьев, И.А. Чернышев. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2011. – 213 с.
13. Прищепов, М.А. Расчет статических характеристик АД 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 (120). – С. 26-36.
14. 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 (147). – С.15-27.
15. Гридин, В.М. Расчет характеристик асинхронных двигателей по каталожным данным / В.М. Гридин // *Электричество*, 2018. – № 9. – С. 44-48.
16. Гридин, В.М. Расчет характеристик двигателей постоянного тока по каталожным данным / В.М. Гридин // *Электричество*, 2018. – № 3. – С. 38-43.
17. Сыромятников, И.А. Режимы работы асинхронных и синхронных двигателей / И.А. Сыромятников; под ред. Л.Г. Мамиконяна. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 240 с.

ПОСТУПИЛА В РЕДАКЦИЮ 31.05.2022