

УДК 621.314.262:621.313.333

РАСЧЕТ ПРЕДЕЛЬНЫХ МЕХАНИЧЕСКИХ И ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРИ ЧАСТОТНОМ РЕГУЛИРОВАНИИ СКОРОСТИ В РАЗОМКНУТОЙ СИСТЕМЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ЧАСТОТЫ- АСИНХРОННЫЙ ДВИГАТЕЛЬ

М.А. Прищепов,

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

Е.М. Прищепова,

доцент каф. электрооборудования сельскохозяйственных предприятий БГАТУ, канд. техн. наук, доцент

В статье приведены математические выражения механических и электромеханических характеристик асинхронных двигателей и алгоритм расчета предельных механических и электромеханических характеристик при частотном регулировании скорости в разомкнутой системе электропривода преобразователь частоты-асинхронный двигатель.

Ключевые слова: электропривод, преобразователь частоты, асинхронный двигатель, механическая характеристика, электромеханическая характеристика, частотное регулирование, скалярное управление.

The article presents mathematical expressions of mechanical and electromechanical characteristics of asynchronous motors and calculating algorithm for the limiting mechanical and electromechanical characteristics with frequency speed control in an open drive system of a frequency converter-asynchronous motor.

Key words: electric drive, frequency converter, asynchronous motor, mechanical characteristics, electromechanical characteristics, frequency control, scalar control.

Введение

Современный частотно-регулируемый асинхронный электропривод (ЭП) включает в себя преобразователь частоты (ПЧ), как правило, включающий звено постоянного напряжения и инвертор с широтно-импульсной модуляцией. В ПЧ встроена система управления ЭП с микропроцессорным управлением и внешним интерфейсом, обеспечивающим пользователю широкие возможности практического применения.

Набор таких аппаратных средств в сочетании со встроенным программным обеспечением позволяет реализовывать различные конфигурации ЭП – от простых разомкнутых систем до сложных замкнутых систем регулирования скорости.

Если к приводу не предъявляется жестких требований в отношении диапазона регулирования (т.е. диапазон регулирования скорости не превышает 10...20 о.е.) и точности регулирования скорости, используют простейшие скалярные системы регулирования без обратной связи по скорости, работающие по одному из наиболее распространенных статических законов частотного управления:

$$\frac{U}{f} = \text{const}; \frac{U}{\sqrt{f}} = \text{const} \text{ и } \frac{U}{f^2} = \text{const} [1-6].$$

Однако при построении таких систем ЭП необходимо учитывать, что при регулировании скорости их допустимая нагрузочная и перегрузочная способность неодинакова во всем диапазоне регулирования. Поэтому целью данной работы является определение расчетным путем предельных границ областей длительно и кратковременно допустимых нагрузок в разомкнутой системе ЭП преобразователь частоты – асинхронный двигатель (ПЧ-АД).

Основная часть

Для этого, используя Т-образную схему замещения АД (рис.1), получим математические выражения механической и электромеханической характеристик АД при изменении амплитуды и частоты питающего напряжения U_1 .

Тогда полное эквивалентное сопротивление схемы замещения АД относительно входных зажимов равно:

$$\dot{Z} = \dot{Z}_1 + \frac{\dot{Z}'_2 \dot{Z}'_\mu}{\dot{Z}'_2 + \dot{Z}'_\mu}, \quad (1)$$

где $\dot{Z}_1 = (r_1 + jx_1)$ – полное сопротивление статора, Ом;

r_1, x_1 – активное и индуктивное сопротивление обмотки статора, Ом;

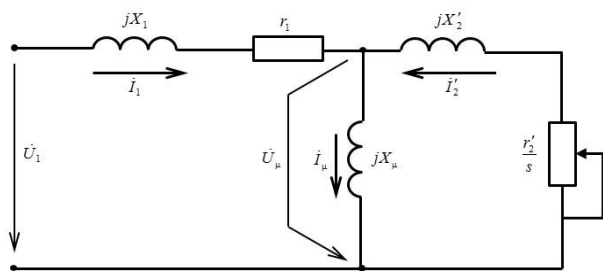


Рисунок 1. Т-образная схема замещения АД

$\dot{Z}'_2 = \frac{r'_2}{s} + jx'_2$ – полное приведенное сопротивление ротора, Ом;

r'_2, x'_2 – активное и индуктивное сопротивления обмотки ротора, приведенные к обмотке статора, Ом;
 s – скольжение АД, о.е.;

$\dot{Z}_\mu = jx_\mu$ – полное сопротивление контура намагничивания, Ом;

x_μ – индуктивное сопротивление контура намагничивания, Ом.

Тогда полное эквивалентное сопротивление в комплексном виде

$$\begin{aligned} \dot{Z} &= (r_1 + jx_1) + \frac{-x'_2 x_\mu + jx_\mu \frac{r'_2}{s}}{\left(\frac{r'_2}{s} + jx'_2\right) + jx_\mu} = \\ &= \left(\left(r_1 \frac{r'_2}{s} - x_1 x'_2 - x_\mu (x_1 + x'_2) \right) + \right. \\ &+ \left. j \left(r_1 (x'_2 + x_\mu) + \frac{r'_2}{s} (x_1 + x_\mu) \right) \right) \times \\ &\times \left(\frac{r'_2}{s} + j(x'_2 + x_\mu) \right)^{-1} = \\ &= \left(\left(r_1 \frac{r'_2}{s} - x_1 x'_2 - x_\mu (x_1 + x'_2) \right) + \right. \\ &+ \left. j \left(r_1 (x'_2 + x_\mu) + \frac{r'_2}{s} (x_1 + x_\mu) \right) \right) \times \\ &\times \left(\frac{r'_2}{s} + j(x'_2 + x_\mu) \right)^{-1}. \end{aligned} \quad (2)$$

Далее из Т-образной схемы замещения выразим приведенный ток ротора \dot{I}'_2 в комплексном виде

$$\dot{I}'_2 = \dot{U}_\mu / \dot{Z}'_2, \quad (3)$$

где $\dot{U}_\mu = \dot{U}_1 - \frac{\dot{U}_1}{\dot{Z}} \cdot \dot{Z}_1$ – напряжение контура намагничивания, В.

Тогда приведенный к статору ток ротора

$$\begin{aligned} \dot{I}'_2 &= \frac{\dot{U}_\mu}{\dot{Z}'_2} = \frac{\dot{U}_1 - \frac{\dot{U}_1}{\dot{Z}} \cdot \dot{Z}_1}{\dot{Z}'_2} = \dot{U}_1 \left(\frac{1}{\dot{Z}'_2} - \frac{\dot{Z}_1}{\dot{Z} \dot{Z}'_2} \right) = \\ &= \dot{U}_1 \left(\frac{\dot{Z} - \dot{Z}_1}{\dot{Z} \dot{Z}'_2} \right) = \dot{U}_1 \left(\frac{\dot{Z}_2 \dot{Z}_\mu}{(\dot{Z}_2 + \dot{Z}_\mu) \dot{Z} \dot{Z}'_2} \right) = \\ &= \dot{U}_1 \left(jx_\mu \left(\frac{r'_2}{s} + j(x'_2 + x_\mu) \right) \times \right. \\ &\times \left(\left(\left(\frac{r'_2}{s} + jx'_2 \right) + jx_\mu \right) \times \right. \\ &\times \left. \left(r_1 \frac{r'_2}{s} - x_1 x'_2 - x_\mu x_k \right) + \right. \\ &+ \left. j \left(r_1 (x'_2 + x_\mu) + \frac{r'_2}{s} (x_1 + x_\mu) \right) \right)^{-1} = \\ &= \dot{U}_1 jx_\mu \times \left(\left(r_1 \frac{r'_2}{s} - x_1 x'_2 - x_\mu x_k \right) + \right. \\ &+ \left. j \left(r_1 (x'_2 + x_\mu) + \frac{r'_2}{s} (x_1 + x_\mu) \right) \right)^{-1}. \end{aligned} \quad (4)$$

Соответственно, действующее значение приведенного тока ротора

$$\begin{aligned} I'_2 &= U_1 x_\mu \times \left[\left(r_1 \frac{r'_2}{s} - x_1 x'_2 - x_\mu x_k \right)^2 + \right. \\ &+ \left. \left(r_1 (x'_2 + x_\mu) + \frac{r'_2}{s} (x_1 + x_\mu) \right)^2 \right]^{-\frac{1}{2}}. \end{aligned} \quad (5)$$

Подставив полученное значение I'_2 в мощность электрических потерь в роторе

$$\Delta P_{эл.2} = 3 I'^2_2 r'_2 \quad (6)$$

предварительно, с некоторым допущением, пренебрегая потерями в стали ротора, выразим их, как разность между электромагнитной мощностью

$$P_{эм} = M \omega_0 \quad (7)$$

и механической мощностью

$$P_m = M \omega, \quad (8)$$

где M – момент АД, Н·м;
 ω_0 – синхронная угловая скорость вращающегося электромагнитного поля обмоток статора АД, с⁻¹;
 ω – угловая скорость ротора АД, с⁻¹.

Тогда

$$\Delta P_{вт.2} = M(\omega_0 - \omega) = M\omega_0 s. \quad (9)$$

Далее с учетом полученных выше выражений и учитывая, что $x_1 / x_\mu \ll 1$ и $x'_2 / x_\mu \ll 1$, выразим:

$$\begin{aligned} M &= 3U_1^2 x_\mu^2 r_2' \times \left(\omega_0 s \left(\left(r_1 \frac{r_2'}{s} - x_1 x_2' - x_\mu x_k \right)^2 + \right. \right. \\ &+ \left. \left. \left(r_1 (x_2' + x_\mu) + \frac{r_2'}{s} (x_1 + x_\mu) \right)^2 \right) \right)^{-1} = \\ &= (3U_1^2 x_\mu^2 r_2') \times \left(\omega_0 s \left(\left(\left(r_1 \frac{r_2'}{s} \right)^2 - 2r_1 \times \right. \right. \right. \\ &\times \frac{r_2'}{s} x_1 x_2' + (x_1 x_2')^2 - 2r_1 \frac{r_2'}{s} x_\mu x_k + \\ &+ 2x_1 x_2' x_\mu x_k + x_\mu^2 x_k^2) + (r_1^2 (x_2'^2 + \\ &+ 2x_2' x_\mu + x_\mu^2) + \left. \left. \left(\frac{r_2'}{s} \right)^2 (x_1^2 + 2x_1 x_\mu + \right. \right. \\ &+ x_\mu^2) + 2r_1 \frac{r_2'}{s} (x_2' x_1 + x_1 x_\mu + x_2' x_\mu + x_\mu^2) \right) \right)^{-1} = \\ &= 3U_1^2 r_2' \times \left(\omega_0 s \left(x_k^2 + \left(r_1 + \frac{r_2'}{s} \right)^2 + \left(\frac{r_1 r_2'}{s x_\mu} \right)^2 \right) \right)^{-1}. \quad (10) \end{aligned}$$

Аналогичное выражение механической характеристики получено в работе [7] и широко используется также в работах [6; 8; 9; 10] для расчета механических характеристик при частотном регулировании угловой скорости в разомкнутой системе ПЧ-АД, учитывая при этом закон изменения напряжения U_1 и что индуктивные сопротивления x_1 , x_2 , x_k и x_μ схемы замещения АД, синхронная угловая скорость магнитного поля статора ω_0 изменяются пропорционально отно-

$$\text{сительной частоте } \alpha = \frac{f}{f_n},$$

где f , f_n – соответственно, текущая и номинальная частота напряжения питания обмоток статора АД, Гц.

Тогда механические характеристики в разомкнутой системе ПЧ-АД для значений частоты напряжения питания обмоток статора в интервале частот $f_{п.мин} \dots f_n$ рассчитываются по выражению:

$$M = \frac{3U_{1\phi}^2 r_2'}{(\omega_0 \alpha) s \left((x_k \alpha)^2 + \left(r_1 + \frac{r_2'}{s} \right)^2 + \left(\frac{r_1 r_2'}{s x_\mu \alpha} \right)^2 \right)}, \quad (11)$$

где $U_{1\phi} = U_n \cdot \alpha$ – фазное напряжение питания обмоток статора АД в первой зоне при законе регулирования $U_n / f_n = \text{const}$ ($U_{1\phi} = U_n \cdot \alpha^2$ – при

$$\frac{U}{f_n^2} = \text{const}; U_{1\phi} = U_n \cdot \sqrt{\alpha} \text{ – при } \frac{U}{\sqrt{f}} = \text{const}), \text{ В.}$$

В интервале частот $f_n \dots f_{п.макс}$ напряжения питания обмоток статора в приведенном выражении (11), фазное напряжение питания обмоток статора АД во второй зоне будет равно номинальному, т.е.

$$U_{1\phi} = U_n.$$

Электромеханические характеристики $\omega=f(I_1)$ разомкнутой системы ПЧ-АД рассчитываются также для первой и второй зоны в тех же диапазонах частот напряжения питания обмоток статора АД по общеизвестной формуле, вытекающей из векторной диаграммы АД:

$$I_1 = \sqrt{I_0^2 + I_2'^2 + 2I_0 I_2' \sin \varphi_2}, \quad (12)$$

где I_1 – действующее значение фазного тока обмоток статора АД, А;

$$I_2' = \frac{U_{1\phi}}{\sqrt{\left(r_1 + \frac{r_2'}{s} \right)^2 + (x_k \cdot \alpha)^2 + \left(\frac{r_1 r_2'}{s x_\mu \alpha} \right)^2}} \quad (13)$$

– приведенный к обмотке статора ток ротора, А;

$$I_0 = \frac{U_{1\phi}}{\sqrt{r_1^2 + (x_{1\sigma} + x_\mu)^2 \alpha^2}} \text{ – ток холостого}$$

хода АД, А;

$$\sin \varphi_2 = \frac{x_k \cdot \alpha}{\sqrt{\left(r_1 + \frac{r_2'}{s} \right)^2 + (x_k \cdot \alpha)^2}} \quad (15)$$

– синус угла между вектором фазного напряжения $\bar{U}_{1\phi}$ и сопряженным вектором тока ротора $-\bar{I}_2'$.

Значения угловых скоростей ω при построении механических $\omega=f(M)$ и электромеханических $\omega=f(I)$ характеристик для различных относительных частот α и скольжений s рассчитываются по формуле:

$$\omega = \omega_0 \alpha (1 - s). \quad (16)$$

На основании проведенных расчетов по выведенным формулам на рисунке 2а построены механические характеристики (характеристики 1-7), а на рисунке 2б – соответствующие электромеханические характеристики (характеристики 1-7).

Далее, аналогично, как и в работе [6], проводится определение области работы ЭП:

1. На полученных механических характеристиках $\omega=f(M)$ (рис. 2а, характеристики 1-7) наносятся

граничные характеристики нагрузки для длительного и кратковременного режимов работы привода:

- $M_{с.мин}(\omega) = \text{const}$ (т. 1-2-3);
- $M_{с.макс}(\omega) = \text{const}$ (т. 4-5-6-7);
- $M_{эп.макс}(\omega) = \text{const}$ (т. 13-14-15-16).

2. На полученное семейство электромеханических характеристик $\omega=f(I_1)$ (рис. 2б, характеристики 1-7) наносится зависимость длительно допустимого тока двигателя от скорости $I_{дв.длит.доп}(\omega)$ (т. 8-9-10-11-12):

$$I_{дв.длит.доп}(\omega) = I_{дв.н} \left(0,5 + \frac{\omega}{\omega_{дв.н}} \right) \text{ при}$$

$$\omega \leq 0,5\omega_{дв.н}; \quad (17)$$

$$I_{дв.длит.доп}(\omega) = I_{дв.н} \text{ при } \omega > 0,5\omega_{дв.н},$$

где $I_{дв.н}$, $\omega_{дв.н}$ – номинальные ток (А) и угловая скорость (c^{-1}) АД.

3. Далее рассчитывается и наносится на механические характеристики $\omega=f(M)$ зависимость длительно допустимого момента АД от скорости $M_{дв.длит.доп}(\omega)$, соответствующая характеристике $I_{дв.длит.доп}(\omega)$ (рис. 2а, т. 8-9-10-11-12):

- при $\omega \leq 0,5\omega_{дв.н}$ необходимо для ряда значений относительной частоты

$$\alpha = \frac{f_{н.мин}}{f_n} \dots 0,5 \text{ найти значения}$$

скольжения s , соответствующие решению системы нелинейных уравнений (где $f_{н.мин}$ соответствует минимальной угловой скорости ЭП $\omega_{эп.мин}$)

$$I_1 = I_{дв.н} \left(0,5 + \alpha \frac{1-s}{1-s_n} \right); \quad (18)$$

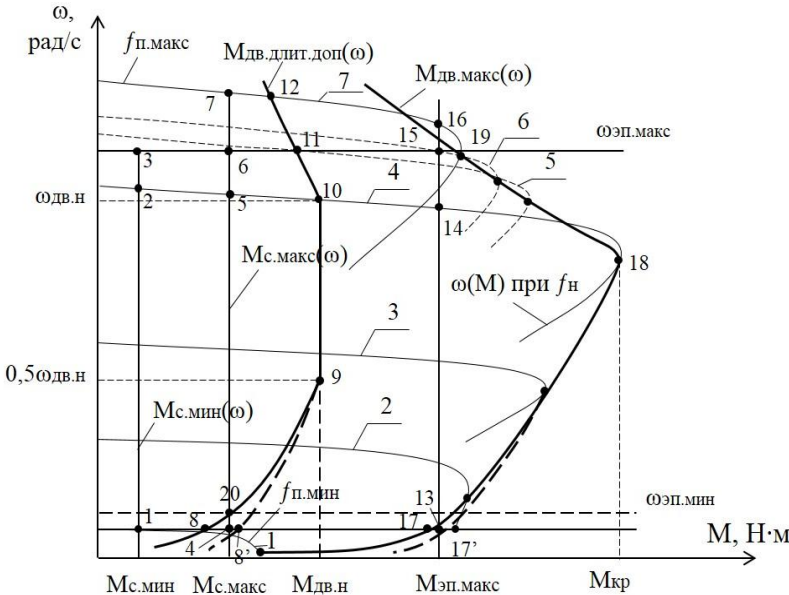
$$I_1 = \sqrt{I_0^2 + I_2'^2 + 2I_0I_2' \sin \varphi_2},$$

Учитывая, что практически все параметры I_1 , I_0 , I_2' , $\cos \varphi_2$ являются функцией относительной частоты α и скольжения s (кроме I_0), то решить эту систему нелинейных уравнений аналитически затруднительно. Следовательно, будем решать ее численно. Для этого из первого уравнения системы выразим искомое скольжение s_1 :

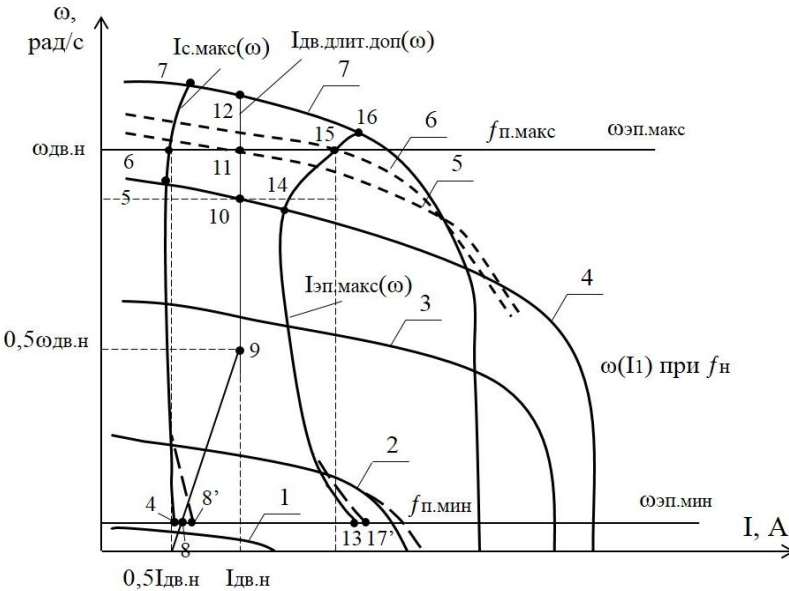
$$s_1 = 1 - \frac{(1-s_n) \left(\frac{I_1}{I_{дв.н}} - 0,5 \right)}{\alpha}. \quad (19)$$

Затем процесс вычислений организуют следующим образом. Для определенного значения относительной части, задавшись некоторым начальным значением s , вычисляют I_0 , $\sin \varphi_2$, I_2' , I_1 и s_1 . Затем сравнивают значения s_1 и s , и если они не совпадают, то значение s изменяют с шагом Δs до тех пор, пока s_1 и s не совпадут. Поиск значения s представлен в блок-схеме алгоритма расчета механических и электромеханических характеристик разомкнутой системы ПЧ-АД (рис. 3).

Для найденных значений скольжения s по выражению (11) рассчиты-



а



б

Рисунок 2. Характеристики разомкнутой системы электропривода

ПЧ-АД при скалярном управлении по закону $\frac{U_1}{f_1} = \text{const}$:

а – механические характеристики; б – электромеханические характеристики

ваются значения момента M :

$$M_{\text{ов.длит.дон}}(\omega) = M \quad (\text{рис. 2а, т. 8-9}); \quad (20)$$

– аналогично, при $\omega > \omega_{\text{дв.н}}$ необходимо для ряда

значений относительной частоты $\alpha = 1 \dots \frac{f_{\text{н.макс}}}{f_{\text{н}}}$ найти

значения скольжений s , при которых $I_1 = I_{1.н}$ и по выражению (11) рассчитать значения момента M и

$$M_{\text{ов.длит.дон}}(\omega) = M \cdot \frac{\omega_{\text{ов.н}}}{\omega} \quad (\text{рис. 2а, т. 10-11-12}). \quad (21)$$

4. В последующем рассчитывается и на механические характеристики $\omega = f(M)$ наносится зависимость максимального допустимого момента электродвигателя $M_{\text{ов.макс}} = M_{\text{к}}(\omega)$ (рис. 2а, т. 17-18-19).

Выражения критических скольжений и момента получим согласно общему правилу нахождения экстремума функции, для чего необходимо выражение (11) про дифференцировать и полученное выражение приравнять к нулю.

Тогда после решения этого уравнения получим:

$$s_{\text{к}} = r_2' \sqrt{\frac{1 + \left(\frac{r_1'}{x_{\mu} \alpha}\right)^2}{r_1^2 + (x_{\text{к}} \alpha)^2}}. \quad (22)$$

Подставив $s_{\text{к}}$ в выражение (11), получим

$$M_{\text{к}} = \frac{3U_{1\phi}^2}{2\omega_0 \alpha \left(r_1 + \sqrt{\left(r_1^2 + (x_{\text{к}} \alpha)^2 \right) \cdot \left(1 + \left(\frac{r_1'}{x_{\mu} \alpha} \right)^2 \right)} \right)}. \quad (23)$$

Угловая критическая скорость будет определяться, соответственно, по формуле:

$$\omega_{\text{к}} = \omega_0 \alpha (1 - s_{\text{к}}). \quad (24)$$

5. Далее рассчитывается и наносится на электро-механические характеристики $\omega = f(I_1)$ зависимость $I_{\text{с.макс}}(\omega)$, соответствующая длительной максимальной нагрузке $M_{\text{с.макс}}(\omega) = \text{const}$ (рис. 2б, т. 4-5-6-7). Для этого необходимо для ряда значений частоты от минимальной до максимальной $\alpha = \frac{f_{\text{н.мин}}}{f_{\text{н}}} \dots \frac{f_{\text{н.макс}}}{f_{\text{н}}}$ опре-

делить соответствующие $M_{\text{с.макс}}$ значения скольжения, решив относительно s уравнение (11), т.е.

$$M_{\text{с.макс}} = \frac{3U_{1\phi}^2 r_2'}{(\omega_0 \alpha) s \left((x_{\text{к}} \alpha)^2 + \left(r_1 + \frac{r_2'}{s} \right)^2 + \left(\frac{r_1 r_2'}{s x_{\mu} \alpha} \right)^2 \right)}. \quad (25)$$

После преобразований получим квадратное уравнение относительно скольжения s :

$$\left(x_{\text{к}}^2 \alpha^2 + r_1^2 \right) s^2 + \left(-\frac{3U_{1\phi}^2 r_2'}{\omega_0 \alpha M_{\text{с.макс}}} + 2r_1 r_2' \right) s + \left(r_2'^2 + \frac{r_1^2 r_2'^2}{x_{\mu}^2 \alpha^2} \right) = 0, \quad (26)$$

где коэффициенты квадратного уравнения:

$$a = \left(x_{\text{к}}^2 \alpha^2 + r_1^2 \right) \quad (27)$$

$$b = \left(2r_1 r_2' - \frac{3U_{1\phi}^2 r_2'}{\omega_0 \alpha M_{\text{с.макс}}} \right); \quad (28)$$

$$c = \left(r_2'^2 + \frac{r_1^2 r_2'^2}{x_{\mu}^2 \alpha^2} \right). \quad (29)$$

Тогда из физических соображений, т.к. $s = 0 \dots 1$, для двигательного режима:

$$s = \frac{-b - \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}. \quad (30)$$

Далее, после получения значений скольжения s , по выражению (12) рассчитываются значения тока $I_{\text{с.макс}}$, а также значения скорости $\omega = \omega_0 \alpha (1 - s)$ (рис. 2б, т. 4-5-6-7).

6. Затем рассчитывается и наносится на электро-механические характеристики $\omega = f(I_1)$ зависимость $I_{\text{эп.макс}}(\omega)$, соответствующая максимальному моменту $M_{\text{эп.макс}}(\omega) = \text{const}$ (рис. 2б, т. 13-14-15-16). Расчет проводится аналогично, как и в предыдущем пункте, при $M_{\text{с.макс}}$ по тем же выражениям, но вместо $M_{\text{с.макс}}$ и $I_{\text{с.макс}}$ у них используется, соответственно, $M_{\text{эп.макс}}$ и $I_{\text{эп.макс}}$.

Для уточнения значения максимальной частоты инвертора $f_{\text{н.макс}}$ следует дополнительно рассчитать механическую характеристику, проходящую через т.15, соответствующую скорости электропривода $\omega_{\text{эп.макс}}$ при моменте $M_{\text{эп.макс}}$. Для этого необходимо найти соответствующее этим уравнениям значение относительной частоты $\alpha_{\text{макс}}$, вычислив при этом $s_{\text{макс}}$ и $\omega_{\text{эп.макс}}$, а затем новое значение скольжения s , выразив его из формулы:

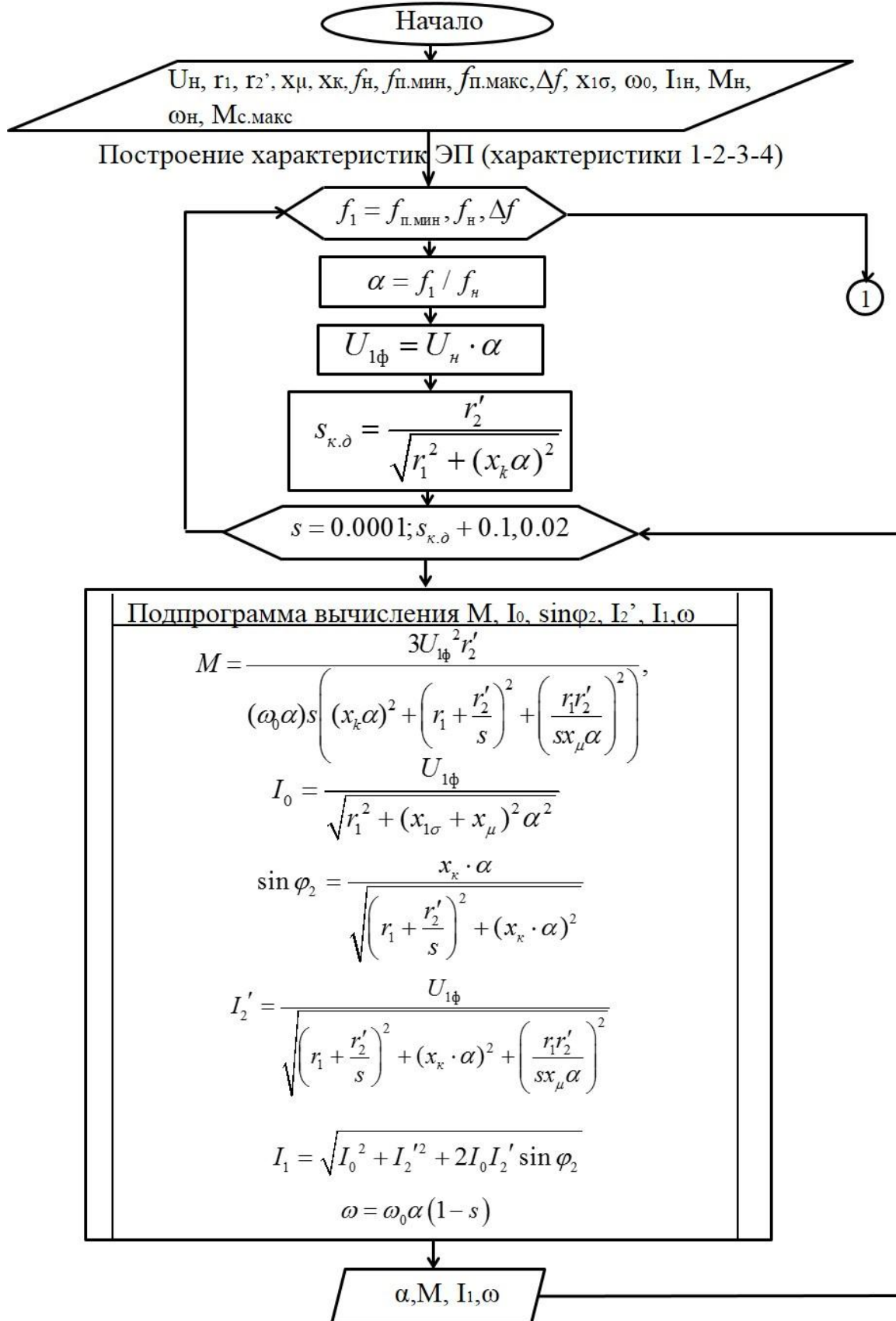
$$\omega_{\text{эп.макс}} = \omega_0 \alpha_{\text{макс}} (1 - s), \quad (31)$$

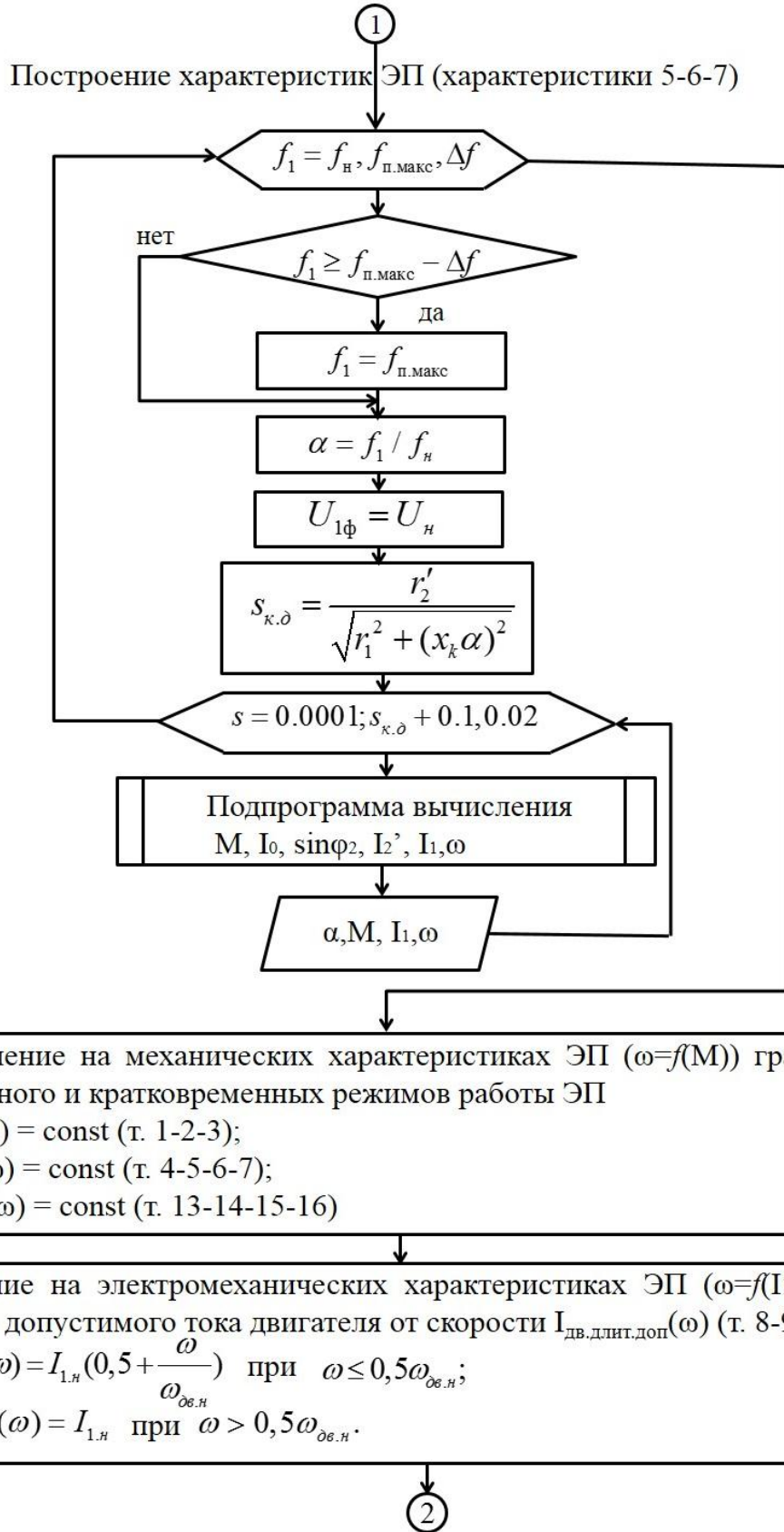
при известных $\omega_{\text{эп.макс}}$ и $\alpha_{\text{макс}}$, то есть

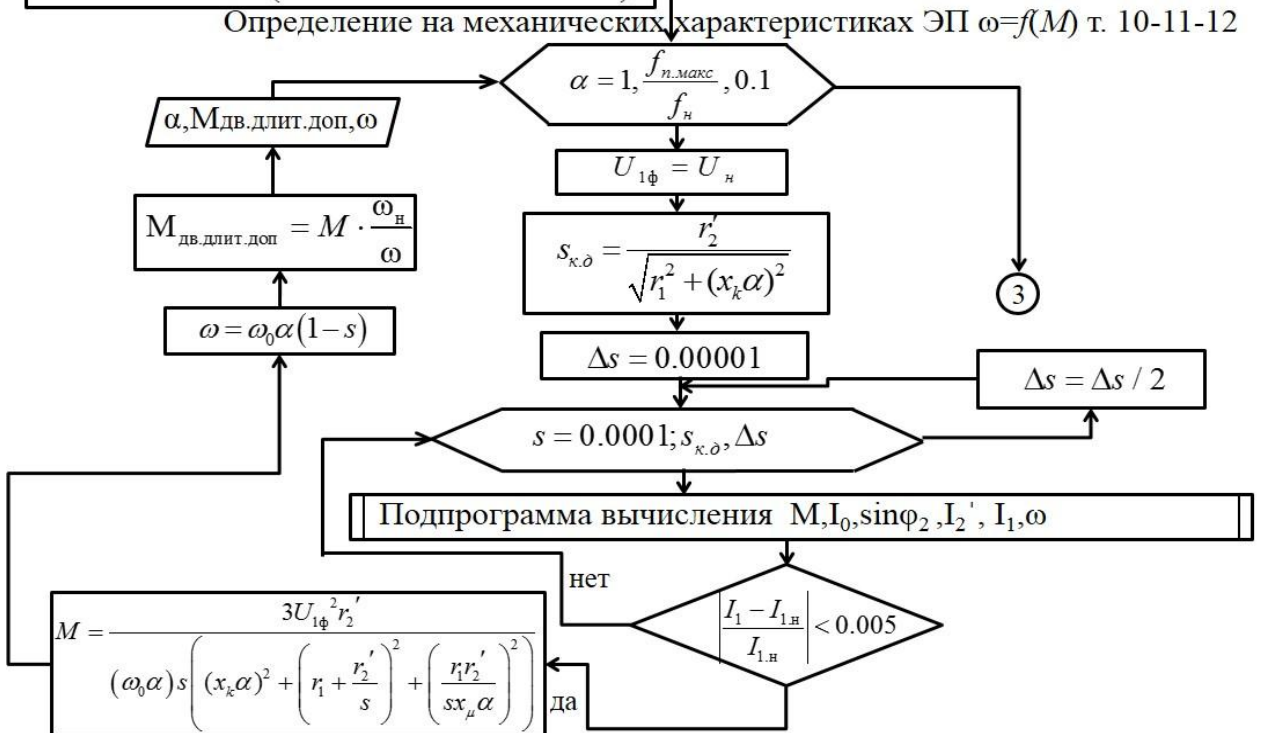
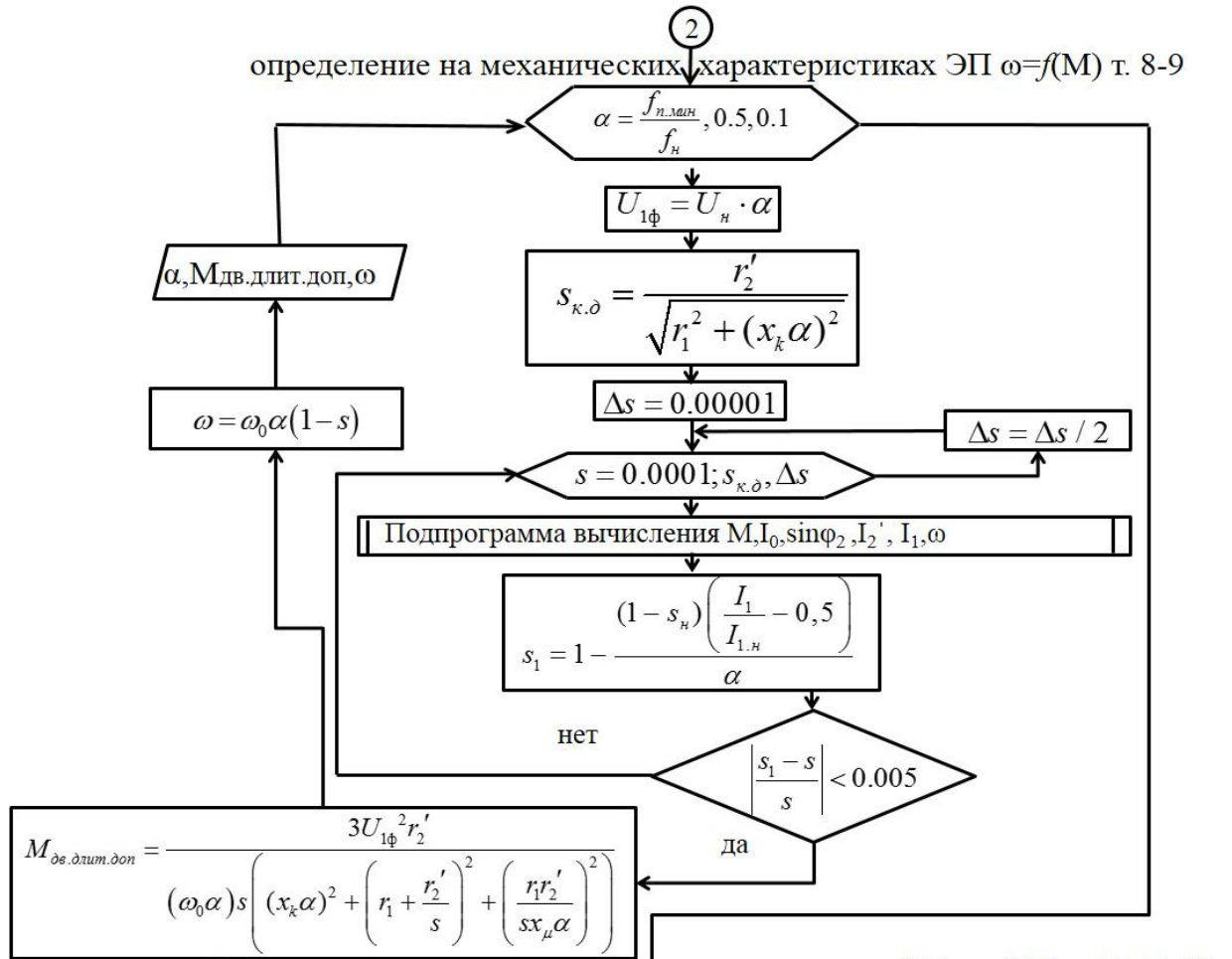
$$s = 1 - \frac{\omega_{\text{эп.макс}}}{\omega_0 \alpha_{\text{макс}}}. \quad (32)$$

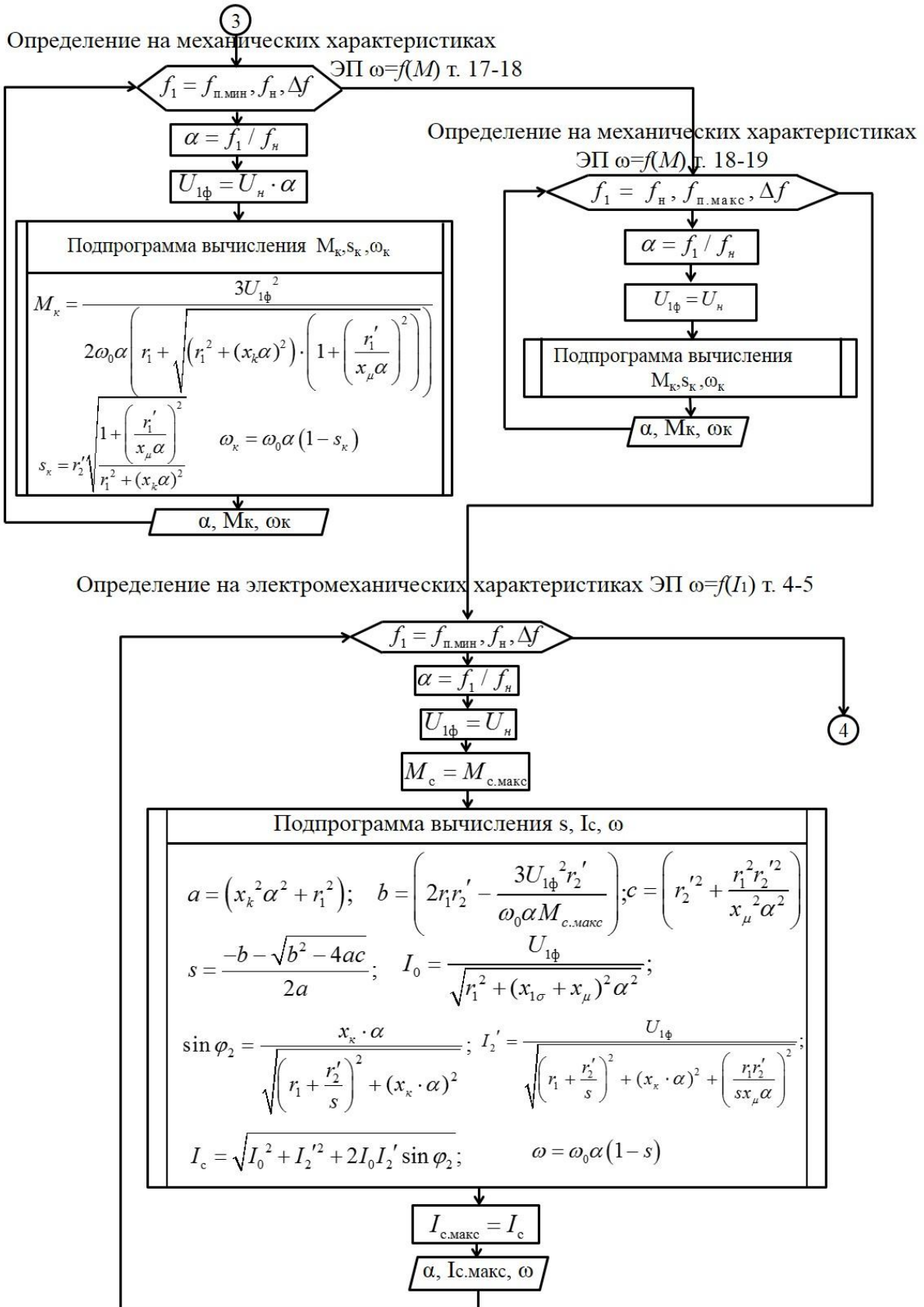
Этот процесс продолжается до тех пор, пока значения $s_{\text{макс}}$ и s не совпадут. После этого продолжают вычисления $f_{\text{н.макс}} = \alpha_{\text{макс}} f_{\text{н}}$, $M_{\text{эп.макс}}$, $I_{\text{эп.макс}}$ и $\omega_{\text{эп.макс}}$ по вышеприведенным формулам в т.15 (рис. 2).

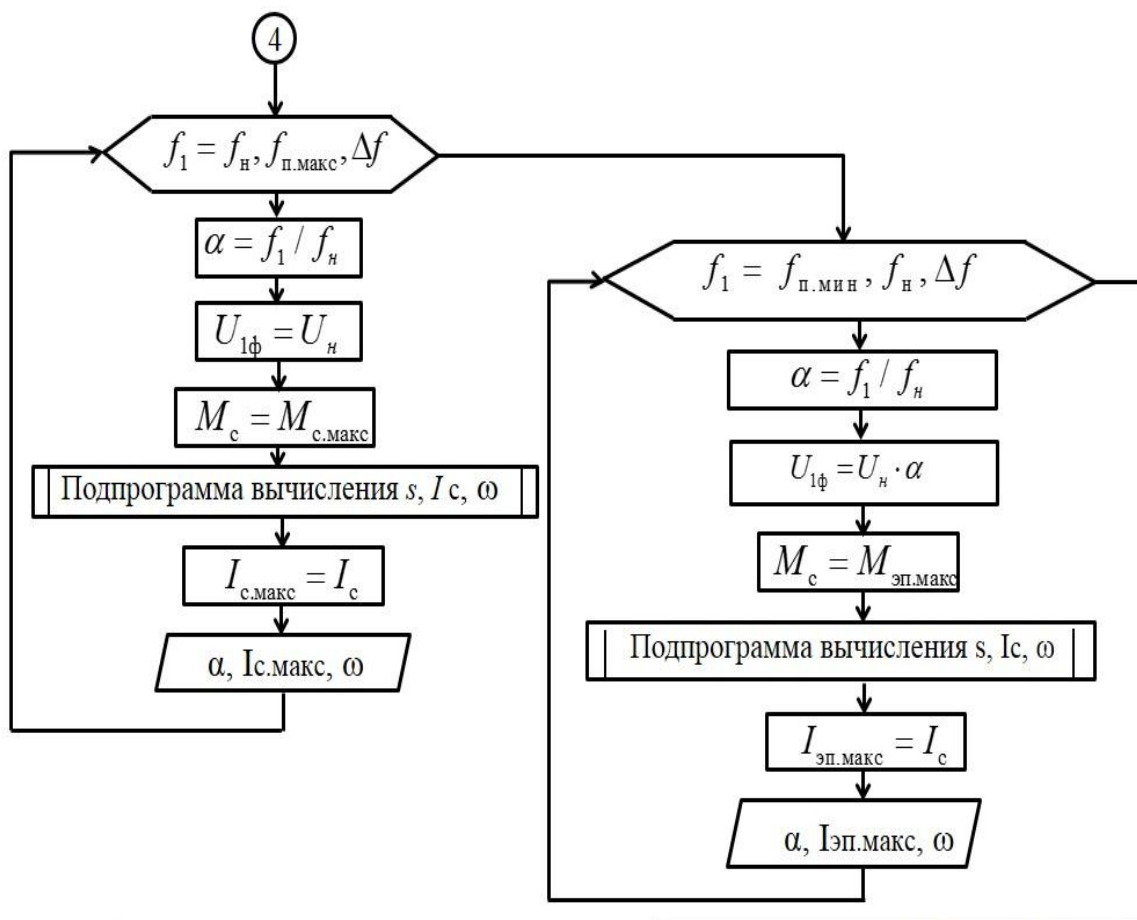
Детальный алгоритм расчета механических и электро-механических характеристик разомкнутой системы ЭП ПЧ-АД при скалярном управлении по закону $U_1 / f_1 = \text{const}$ представлен на рисунке 3.



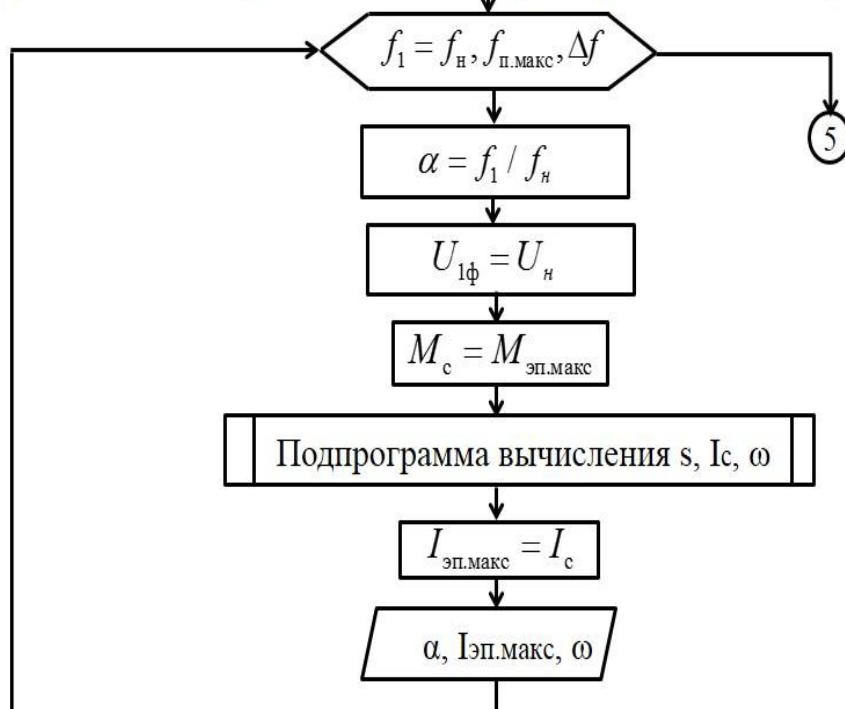








Определение на электро механических характеристиках ЭП $\omega=f(I)$ т. 14-15-16



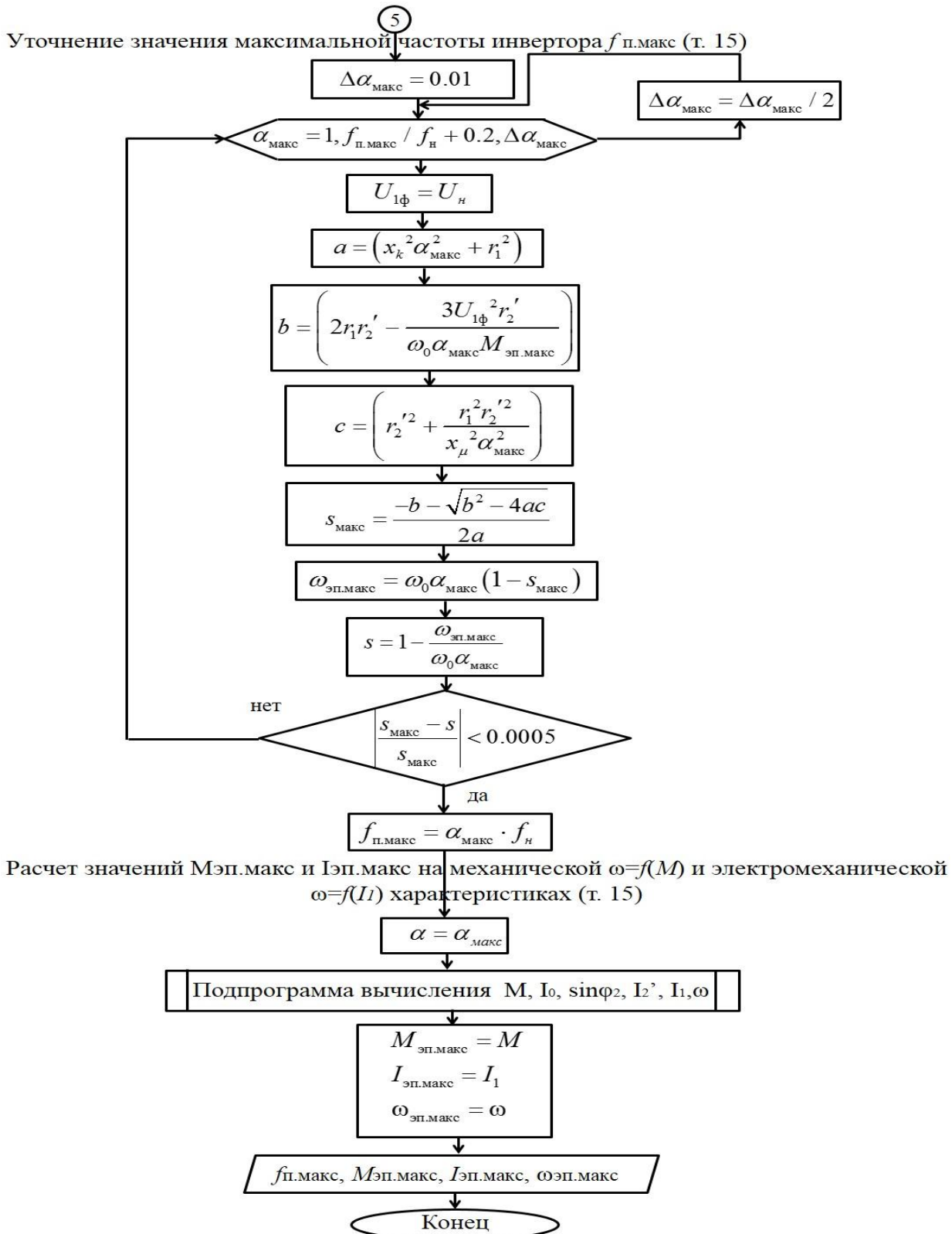


Рисунок 3. Блок-схема алгоритма расчета механических и электромеханических характеристик разомкнутой системы электропривода ПЧ-АД и определение области работы ЭП при

скалярном управлении по закону $\frac{U_1}{f_1} = \text{const}$

По результатам построения механических характеристик ЭП $\omega=f(M)$ и нагрузки (рис. 2а) проверяется правильность выбора АД по моменту:

$$\left. \begin{aligned} M_{\text{дв.длит.доп}}(\omega) &\geq M_{\text{с.макс}} \\ M_{\text{дв.макс}}(\omega) &\geq M_{\text{эл.макс}} \end{aligned} \right\} \quad (33)$$

По результатам построения электромеханических характеристик ЭП $\omega=f(I_1)$ (рис. 2б) проверяется правильность выбора АД по току:

$$I_{\text{дв.длит.доп}}(\omega) \geq I_{\text{с.макс}} \quad (34)$$

В случае невыполнения этих условий только на высоких или только на низких угловых скоростях диапазона регулирования, меняют передаточное число механической передачи рабочей машины для смещения диапазона регулирования в сторону, где условия выполняются. При невозможности обеспечения этих условий изменением передаточного числа, по возможности сужают диапазон регулирования скорости ЭП, например, от $\omega_{\text{эл.мин}}$ до $\omega_{\text{т.20}}$ (рис. 2а), либо используют другие более эффективные способы управления в системе ПЧ-АД с коррекцией вольт-частотной характеристики.

Из рисунка 2а очевидно, что условие проверки не выполняется по длительно допустимому моменту $M_{\text{дв.длит.доп}}$ на низких угловых скоростях из-за необходимости снижения тока АД $I_{\text{дв.длит.доп}}$ по причине ухудшения охлаждения при угловой скорости $\omega \leq 0,5\omega_{\text{дв.н}}$. Об этом также свидетельствует и резкое падение момента критического АД $M_{\text{кр}}$ в этом диапазоне скоростей. Это обусловлено значительным снижением потока возбуждения статора АД на низких скоростях из-за падения напряжения на обмотках статора. Расширение диапазона регулирования может быть достигнуто настройкой вольт-частотной характеристики ПЧ, т.е. повышением напряжения питания обмоток статора АД при малых частотах или скоростях.

Для расчета повышения напряжения питания обмоток статора при малых скоростях воспользуемся методиками, приведенными в работах [5; 11], обеспечивающими расчет параметров и характеристик систем ЭП при частотном управлении и стабилизации потокосцепления статора $\psi_1 = \text{const}$, взаимной индукции $\psi_m = \text{const}$ и ротора $\psi_2 = \text{const}$.

По указанным методикам были разработаны детальные алгоритмы расчета параметров схемы замещения, механических и электромеханических характеристик АД при указанных законах стабилизации потокосцепления [12, 13].

Приведенные расчеты показали, что корректировка стандартной вольт-частотной характеристики $U_n/f_n = \text{const}$ необходима в большей степени на низких частотах и практически не нужна при частоте 25 Гц и выше, так как от вольт-частотной характеристики $U_n/f_n = 220/50 = 4,4 = \text{const}$ при частоте 25 Гц вычисленное среднеарифметическое значение напряжения при стабилизации потокосцепления и номинальном токе нагрузки АД только на 3 % превышает стандартную характеристику, при 10 Гц на 14 % и

при 5 Гц на 33 %, соответственно. Таким образом, для частот напряжения питания статора от $0,5f_n$ до f_n целесообразно использовать закон управления $U_n/f_n = 220/50 = 4,4 = \text{const}$ и соответственно фазное напряжение при этих частотах вычислять по формуле $U_{1\phi} = U_n \cdot \alpha$. При частотах напряжения от 0 до $0,5f_n$ целесообразно использовать закон управления $U_1/f_1 = 4 = \text{const}$, а фазное напряжение при этом вычислять по формуле:

$$U_{1\phi} = (U_n - 2U_0) \cdot \alpha + U_0, \quad (35)$$

где U_0 – напряжение питания обмоток статора при его нулевой частоте (В), которое можно определить из уравнения прямой и вычисленных значений напряжения U_1 для соответствующей частоты f_1 :

$$U_1 = a \cdot f_1 + U_0, \quad (36)$$

где $a = \frac{U_1}{f_1} = 4$, тогда для точки пересечения

вольт-частотных характеристик с координатами $(0,5f_n, 0,5U_n)$ запишем равенство:

$$110 = 4 \cdot 25 + U_0.$$

Откуда $U_0 = 110 - 100 = 10$ В.

Далее, для скорректированной вольт-частотной характеристики ПЧ аналогично, т. 8-9 при $\omega \leq 0,5\omega_{\text{дв.н}}$ для ряда значений относительной частоты

$a = \frac{f_{\text{н.мин}}}{f_n} \dots 0,5$, находим значение скольжения s , со-

ответствующее решению системы нелинейных уравнений (18), где при вычислениях значений I_0, I_2' и соответственно I_1 используется уже формула (35) для вычисления фазного напряжения.

Анализ выражений I_0, I_2' и I_1 показывает, что при использовании скорректированной вольт-частотной характеристики ПЧ, ток I_1 возрастет, что в свою очередь приведет к снижению скольжения s , повышению угловой скорости ротора АД ω и свидетельствует о повышении нагрузочной способности АД по моменту $M_{\text{дв.длит.доп}}$ и $M_{\text{дв.макс}}$ на низких угловых скоростях и расширению диапазона регулирования его скорости (рис. 2а и 2б, т. 8'-9 и т. 17'-18).

Заключение

1. Анализ полученных искусственных механических и электромеханических характеристик показывает (рис. 2), что зоны длительно допустимых нагрузок ($M_{\text{дв.длит.доп}}(\omega), I_{\text{дв.длит.доп}}(\omega)$) и кратковременно допустимых нагрузок ($M_{\text{дв.макс}}(\omega), I_{\text{эл.макс}}(\omega)$) имеют весьма сложную форму из-за снижения нагрузочной способности ЭП при угловых скоростях ниже $0,5\omega_{\text{дв.н}}$ и выше $\omega_{\text{дв.н}}$.

2. Диапазон регулирования угловой скорости в разомкнутой системе ЭП ПЧ-АД может быть расширен при низких скоростях корректировкой вольт-частотной характеристики ПЧ.

3. Расчет и построение зон длительно и кратковременно допустимых нагрузок позволяет выбрать оптимальное передаточное число механической передачи

между АД и рабочей машиной, позволяющее максимально использовать приводной АД по мощности, что повышает энергоэффективность проектируемого ЭП.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Виноградов, А.Б. Векторное управление электроприводами переменного тока / А.Б. Виноградов. – Иваново: ГОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина», 2008. – 98 с.

2. Булгаков, А.А. Частотное управление асинхронными двигателями / А.А. Булгаков. – М.: Энергоиздат, 1982. – 216 с.

3. Сабинин, Ю.А. Частотно-регулируемые асинхронные электроприводы / Ю.А. Сабинин, В.Л. Грузов. – Л.: Энергоатомиздат, 1985. – 126 с.

4. Эпштейн, И.И. Автоматизированный электропривод переменного тока / И.И. Эпштейн. – М.: Энергоиздат, 1982. – 192 с.

5. Фираго, Б.И. Теория электропривода: учеб. пособие / Б.И. Фираго, Л.Б. Павлячик. – Мн.: Техноперспектива, 2004. – 527 с.

6. Мальцева, О.П. Системы управления электроприводов: учеб. пособие / О.П. Мальцева, Л.С. Удут, Н.В. Кояин. – Томск: Издательство Томского политехнического университета, 2007. – 82 с.

7. 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.

8. 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.

9. Удут, Л.С. Проектирование и исследование автоматизированных электроприводов: 4.8. Асинхронный частотно-регулируемый электропривод: учеб. пособие / Л. С. Удут, Н.В. Кояин, О.П. Мальцева. – Томск: Издательство Томского политехнического университета, 2009. – 354 с.

10. Дементьев, Ю.Н. Автоматизированный электропривод: учеб. пособие / Ю.Н. Дементьев, А.Ю. Чернышев, И.А. Чернышев. – Томск: ТПУ, 2009. – 224 с.

11. Фираго, Б.И. Регулируемые электроприводы переменного тока / Б.И. Фираго, Л.Б. Павлячик. – Мн.: Техноперспектива, 2006. – 363 с.

12. Прищепов, М.А. Расчет статических характеристик асинхронных электродвигателей с короткозамкнутым ротором в двигательном и генераторном режимах при частотном регулировании скорости и стабилизации потока возбуждения статора / М.А. Прищепов, Д.И. Иванов, Е.М. Прищепова // Агропанорама. – 2016. – № 6 (118). – С. 20-30.

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.

ПОСТУПИЛА В РЕДАКЦИЮ 27.09.2021

Радиоволновой влагомер зерна

Предназначен для непрерывного измерения влажности зерна в процессе сушки на зерносушильных комплексах.

Влагомер обеспечивает непрерывный контроль влажности зерна в потоке и обеспечивает автоматическую коррекцию результатов измерения при изменении температуры материала, имеет аналоговый выход 4-20 мА, а также интерфейс RS-485.



Основные технические данные

Диапазон измерения влажности зерна	от 9 до 25%
Основная абсолютная погрешность	не более 0,5%
Температура контролируемого материала	от +5 до +65°C
Цена деления младшего разряда блока индикации	0,1%
Напряжение питания	220 В 50Гц,
Потребляемая мощность	30ВА