

УДК 621.313.33:004

## РАСЧЕТ СТАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ С КОРОТКОЗАМКНУТЫМ РОТОРОМ В ДВИГАТЕЛЬНОМ И ГЕНЕРАТОРНОМ РЕЖИМАХ ПРИ ЧАСТОТНОМ УПРАВЛЕНИИ СКОРОСТЬЮ И СТАБИЛИЗАЦИИ ПОТОКА ВОЗБУЖДЕНИЯ

**М.А. Прищепов,**

*проректор по научной работе – директор НИИМЭСХ БГАТУ, докт. техн. наук, доцент*

**Е.М. Прищепова,**

*ст. преподаватель каф. электрооборудования сельскохозяйственных предприятий БГАТУ*

**Д.М. Иванов,**

*аспирант, каф. электрооборудования сельскохозяйственных предприятий БГАТУ*

*В статье рассмотрены вопросы, касающиеся частотно-регулируемого асинхронного электропривода. Приведены основные статические законы частотного управления. Для наиболее широко распространенных законов стабилизации потокосцепления статора, ротора, взаимной индукции разработаны детальные алгоритмы расчета статических характеристик АД и проведено их сравнение.*

*Ключевые слова: асинхронный двигатель, частотно-регулируемый электропривод, искусственные характеристики, стабилизация потока возбуждения, алгоритм расчета.*

*The article deals with questions relating to variable-frequency electric drive. The main static laws of frequency control are given. For the most widespread laws of stabilization of the stator-rotor, mutual induction, detailed algorithms for calculating the static characteristics of an induction motor and their comparison have been developed and compared.*

*Keywords: induction motor, variable frequency drives, artificial characteristics, stabilization of the flow excitation, the calculation algorithm.*

### Введение

Различают два основных способа управления асинхронными электроприводами, использующими полупроводниковые преобразователи частоты: модульное или скалярное и векторное. При этом модульное или скалярное управление в литературе, как правило, называют просто частотным. В настоящее время, несмотря на интенсивное развитие векторного способа управления, частотное управление довольно широко распространено, так как позволяет решать многие технические задачи просто и эффективно. Это относится в первую очередь к приводам с малым диапазоном регулирования (диапазон регулирования скорости – не более 50) и низкими требованиями к динамике привода. Модульное или скалярное управление базируется на изменении модулей или скаляров величин, определяющих электромагнитный момент асинхронных двигателей (АД) (частоты, напряжения, токов и магнитных потоков).

### Основная часть

При частотном управлении в электроприводе реализуется один из статических законов частотного управления [1-4]:

$$1) \frac{U_1}{f_1} = \frac{U_{1H}}{f_H} = const; \quad (1)$$

$$2) \frac{U_1}{\sqrt{f_1}} = \frac{U_{1H}}{\sqrt{f_H}} = const; \quad (2)$$

$$3) \frac{U_1}{f_1^2} = \frac{U_{1H}}{f_H^2} = const; \quad (3)$$

4) оптимальный закон Костенко:

$$\frac{U_1}{U_{1H}} = \frac{f_1}{f_H} \cdot \sqrt{\frac{M_c}{M_H}}; \quad (4)$$

5) закон постоянства потокосцепления статора:

$$\Psi_1 = const; \text{ или } \frac{E_s}{f_1} = const; \text{ или } IR \text{ компенсации};$$

6) закон постоянства потокосцепления цепи намагничивания:

$$\Psi_m = const \text{ или } \frac{d\Psi_m / dt}{f_1} = const \text{ или } \frac{E_1}{f_1} = const;$$

7) закон постоянства потокосцепления ротора:

$$\Psi_2 = const \text{ или } \frac{d\Psi_2 / dt}{f_1} = const \text{ или } \frac{E_2'}{f_1} = const;$$

8) закон постоянства абсолютного скольжения:

$$s_a = s \cdot a = const \text{ или } s_a = \frac{\omega_1 - \omega}{\omega_1} \cdot \frac{\omega_1}{\omega_{1н}} = const,$$

9) минимизация тока статора  $I_1 \rightarrow min$ ;

10) закон максимальной эффективности  $\eta \rightarrow \max$  ( $P_1 \rightarrow \min$ ) и другие,

где  $\omega_1, f_1$  – синхронная угловая скорость электромагнитного поля и соответствующая ей частота питающего напряжения статора АД, рад/с, Гц;

$U_1$  – значение питающего напряжения статора АД, В;

$\omega_{1н}, f_{1н}$  – номинальная угловая скорость электромагнитного поля и соответствующая ей номинальная частота питающего напряжения статора АД, Гц;

$U_{1н}$  – номинальное напряжение питания статора, В;

$M_c$  – статический момент на рабочем валу механизма, Н·м;

$M_n$  – номинальный момент на рабочем валу механизма при номинальной угловой скорости, Н·м;

$\omega$  – угловая скорость ротора, рад/с;

$\Psi_1, \Psi_2, \Psi_m$  – потокосцепления, соответственно, статора, ротора и взаимной индукции, В·с;

$E_s, E_1, E_2$  – ЭДС, соответственно, статора, взаимной индукции и ротора, приведенная к обмотке статора, В;

$\alpha = f_1 / f_n$  – относительное значение частоты питающего напряжения;

$s$  – скольжение АД, о.е.;

$s_a$  – абсолютное скольжение АД, о.е.;

$I_1$  – текущий ток статора, А;

$P_1$  – потребляемая мощность АД, Вт;

$\eta$  – КПД двигателя.

Формирование закона может выполняться как в разомкнутом, так и в замкнутом контуре управления.

Область применения разомкнутых систем управления ограничивается механизмами с небольшим диапазоном регулирования скорости и механизмами с известной механической характеристикой, т.е. зависимостью статического момента  $M_c$  на рабочем валу механизма от угловой скорости  $\omega$   $M_c = f(\omega)$ . В частности, жесткое задание зависимости  $U_1 = f(\omega_1)$  хорошо подходит для управления механизмами насосно-вентиляторной группы.

Если механическая характеристика нагрузки  $M_c = f(\omega)$  известна, то расчет зависимости  $U_1 = f(\omega_1)$  может быть выполнен на основе статической модели АД с учетом выбранного закона частотного управления. Пока закон частотного управления не задан, задача расчета  $U_1 = f(\omega_1)$  по  $M_c = f(\omega)$  решается неоднозначно.

Если механическая характеристика нагрузки заранее неизвестна (например, имеет случайный характер), то формирование выбранного закона частотного управления (за исключением закона  $U_1 / f_1 = U_{1н} / f_{1н} = const$ ) осуществляется в замкнутом контуре с помощью введения обратных связей по переменным двигателя, хотя и

при этом динамические характеристики привода остаются невысокими.

Таковыми переменными двигателя могут быть ток и ЭДС статора ( $I_1, E_s$ ), основной магнитный поток АД ( $\Phi$ ), угловая скорость ротора ( $\omega$ ) или абсолютное скольжение ( $s_a$ ). Наиболее простым и доступным сигналом является ток статора, именно он используется в большинстве приводов широкого применения при частотном управлении.

Из замкнутых систем частотного управления АД наиболее широкое распространение получили системы стабилизации потокосцепления: статора  $\Psi_1 = const$ , взаимной индукции  $\Psi_m = const$ , ротора  $\Psi_2 = const$  [5, 6]. Каждый из этих законов частотного управления обеспечивает определенные электромеханические свойства и энергетические показатели АД.

Для анализа этих свойств и показателей авторами публикации были разработаны детальные алгоритмы расчета параметров схемы замещения, механических и электромеханических характеристик АД при указанных законах стабилизации потокосцепления.

При управлении АД по закону стабилизации  $\Psi_1 = const$  непрерывно устраняется или компенсируется влияние на электромагнитные процессы в АД падения напряжения на сопротивлении статора  $r_1$  схемы замещения (СЗ) АД, поэтому этот закон частотного управления называют также законом управления с IR-компенсацией.

Рассматривая частотное управление АД по закону  $\Psi_1 = const$  на основании общеизвестного соотношения между действующими значениями ЭДС  $E$ , потокосцепления  $\Psi$  и угловой скорости  $\omega$   $E = \omega \Psi$ , можно записать пропорцию [5, 6]:

$$\frac{E_s}{\omega_1} = \frac{E_{s,н}}{\omega_{1н}} = const, \quad (5)$$

где  $E_{s,н}$  – номинальное значение ЭДС статора, В. Из нее же можем найти и действующее значение ЭДС статора:

$$E_s = E_{s,н} \cdot \frac{\omega_1}{\omega_{1н}} = \alpha \cdot E_{s,н} \quad (6)$$

Механическая характеристика будет выражаться параметрическим уравнением:

$$M = \frac{2 \cdot M_k}{\left. \begin{aligned} &\frac{s_a}{s_{ak}} + \frac{s_{ak}}{s_a} \\ &\omega = \omega_{0н} \cdot (\alpha - s_a) \end{aligned} \right\}}, \quad (7)$$

где  $M_k$  – критический момент двигателя,

$$M_k = \frac{3 \cdot E_{s,н}^2}{2 \cdot \omega_{0н} \cdot x'_{к.ном}}, \text{ Н} \cdot \text{м}; \quad (8)$$

$\omega_{0н}$  – синхронная угловая скорость магнитного поля статора АД при номинальной частоте переменного тока питающей сети, рад/с;

$x'_{к.ном}$  – индуктивное номинальное сопротивление обмоток статора и ротора АД при номинальной частоте питающего напряжения для режима короткого замыкания (при неподвижном роторе), Ом;

$s_a$  – абсолютное скольжение,  $s_a = s_n \cdot s$ ;  
 $s_{ak}$  – абсолютное критическое скольжение

$$s_{ak} = \pm \frac{r_2''}{x_{к.ном}} \quad (9)$$

$r_2''$  – активное сопротивление обмотки ротора, приведенное к обмотке статора, для Г-образной схемы замещения, Ом;

Параметрическое уравнение электромеханической характеристики  $I_1=f(\omega)$  имеет вид:

$$I_1 = \frac{E_{с.н}}{\sqrt{R_{B,A}^2 + (x_1 + X_{B,A})^2}} \left. \begin{array}{l} \\ \omega = \omega_{0н} \cdot (\alpha - s_a) \end{array} \right\} \quad (10)$$

где  $R_{B,A}$  – «внутреннее» активное сопротивление АД при номинальной частоте и данном значении абсолютного скольжения  $s_a$ , Ом;

$X_{B,A}$  – «внутреннее» индуктивное сопротивление АД при номинальной частоте и данном значении абсолютного скольжения  $s_a$ , Ом;

$x_1$  – индуктивное сопротивление рассеяния фазы статора, Ом;

Уравнение электромеханической характеристики  $I_2=f(\omega)$ :

$$I_2' = \frac{E_{с.н}}{\sqrt{\left(\frac{r_2''}{s_a}\right)^2 + x_{к.ном}'^2}} \left. \begin{array}{l} \\ \omega = \omega_{0н} \cdot (\alpha - s_a) \end{array} \right\} \quad (11)$$

При реализации этого закона частотного управления необходимо обеспечивать на обмотке статора АД напряжение:

$$U = \alpha \cdot E_{с.н} \cdot \frac{Z'_{АД}}{\sqrt{R_{B,A}^2 + (x_1 + X_{B,A})^2}} \quad (12)$$

где  $Z'_{АД}$  – полное сопротивление цепи АД при данном абсолютном скольжении  $s_a$  и относительной частоте  $\alpha$ , Ом.

Алгоритм расчета характеристик АД по представленной выше методике согласно работ [5, 6] рассматривался авторами ранее в работе [7], где результаты расчета сравнивались с аналогичными результатами, полученными по методике, представленной в работе [8]. При этом в обоих случаях расчет параметров СЗ АД ( $r_1, r_2', x_1, x_2', x_n$ ) проводился по алгоритму, приведенному в работе [9]. Имеющееся несовпадение механических и электромеханических характеристик в диапазоне угловых скоростей от критической и меньшей критической угловой скорости для двигательного режима и от критической и большей критической угловой скорости для генераторного режима, рассчитанных по указанным методикам, объясняется тем, что ЭДС статора  $E_s$  в методике [5, 6] рассчитывалась из векторной диаграммы геометрически, а в методике [8] из выражения через действующие значения ее параметров.

Для частотного управления при стабилизации потокосцепления по закону  $\Psi_m=const$ , запишем пропорцию [5, 6]:

$$\frac{E_1}{\omega_1} = \frac{E_{1.н}}{\omega_{1н}} = const \quad (13)$$

Тогда действующее значение ЭДС взаимоиндукции:  
 $E_1 = \alpha \cdot E_{1.н}$  (14)

Номинальное значение ЭДС взаимоиндукции  $E_{1.н}$  находим из выражения:

$$E_{1.н} = \sqrt{\left(U_n \cdot \sqrt{(1 - \cos^2 \varphi_n)} - I_{1н} \cdot x_1\right)^2 + \left(U_n \cdot \cos \varphi_n - I_{1н} \cdot r_1\right)^2} \quad (15)$$

где  $\cos \varphi_n$  – номинальный коэффициент мощности, о.е.

Механическая характеристика АД при частотном управлении по закону  $\Psi_m=const$  определяется параметрическим уравнением (7).

Критический момент будет равен:

$$M_k = \frac{3 \cdot E_{1.н}^2}{2 \cdot \omega_{0н} \cdot x_{2.н}'^2} \quad (16)$$

где  $x_{2.н}'$  – индуктивное сопротивление рассеяния фазы ротора СЗ АД, при номинальной частоте, Ом.

Абсолютное критическое скольжение:

$$s_{ak} = \pm \frac{r_2''}{x_{2.н}'^2} \quad (17)$$

Уравнение электромеханической характеристики  $I_1=f(\omega)$  имеет следующий вид:

$$I_1 = \frac{E_{1.н}}{\sqrt{R_{B,A}^2 + X_{B,A}^2}} \left. \begin{array}{l} \\ \omega = \omega_{0н} \cdot (\alpha - s_a) \end{array} \right\} \quad (18)$$

Уравнение электромеханической характеристики  $I_2=f(\omega)$ :

$$I_2' = \frac{E_{1.н}}{\sqrt{\left(\frac{r_2''}{s_a}\right)^2 + x_{2.н}'^2}} \left. \begin{array}{l} \\ \omega = \omega_{0н} \cdot (\alpha - s_a) \end{array} \right\} \quad (19)$$

Необходимая величина действующего значения напряжения при частотном управлении по закону  $\Psi_m=const$ , исходя из эквивалентной СЗ АД, может быть вычислена по формуле:

$$U = \alpha \cdot E_{1.н} \cdot \frac{Z'_{АД}}{Z_{B,A}} \quad (20)$$

Алгоритм подпрограммы вычисления параметров  $s_{ak}, M, \omega, R_{B,A}, X_{B,A}, Z'_{АД}, Z_{B,A}, I_1, I_2, U$  в алгоритме расчета механических и электромеханических характеристик АД при частотном регулировании для  $\Psi_m=const$  по методике [5, 6] представлен на рисунке 1.

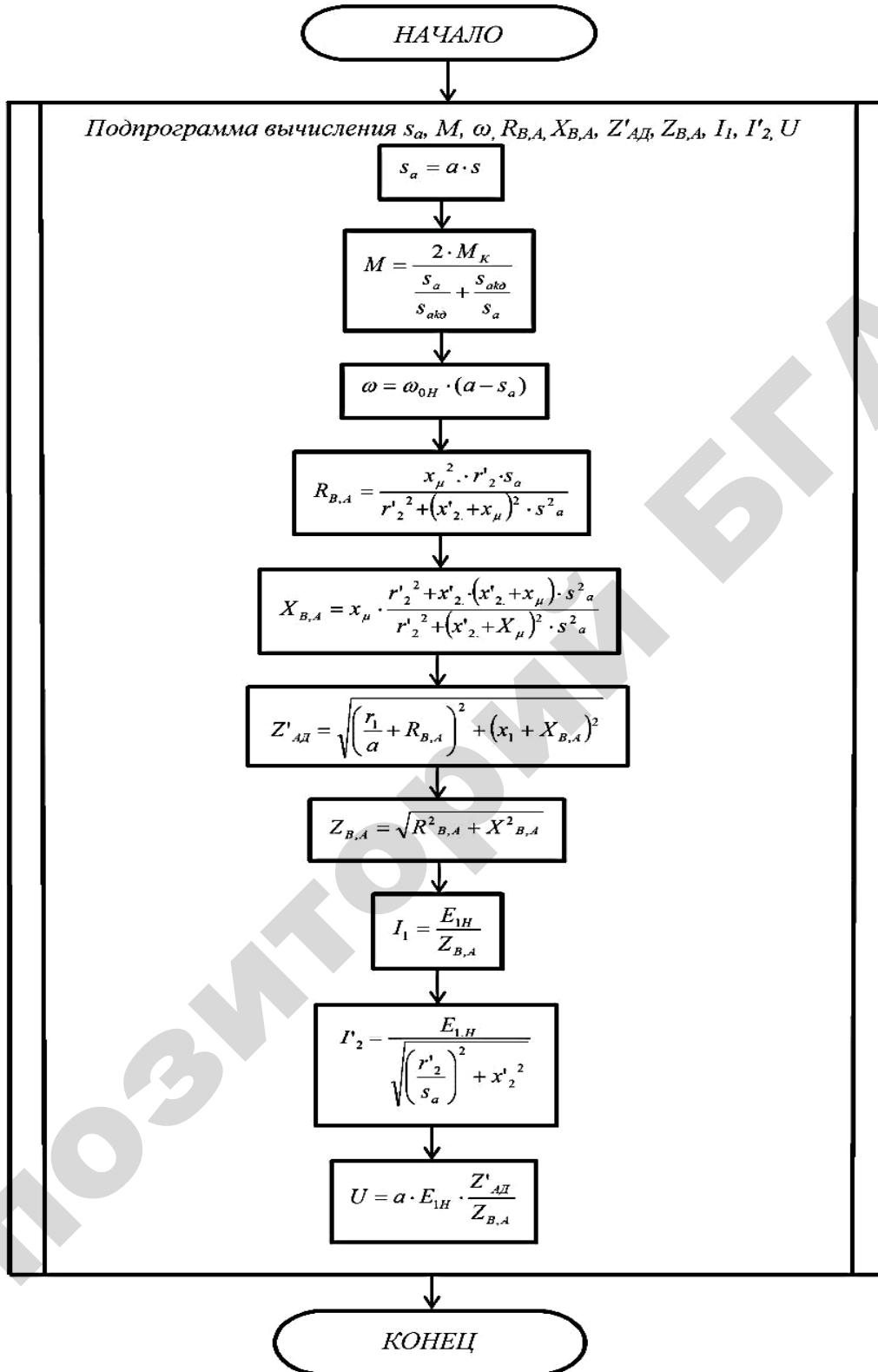


Рисунок 1. Алгоритм подпрограммы вычисления параметров  $s_a, M, \omega, R_{B,A}, X_{B,A}, Z'_{AD}, Z_{B,A}, I_1, I'_2, U$  в алгоритме расчета механических и электромеханических характеристик АД при частотном регулировании для  $\Psi_m = \text{const}$  по методике [5, 6]

Указанный алгоритм расчета механических и электромеханических характеристик АД при частотном регулировании для  $\Psi_m = const$  будет аналогичен основному алгоритму расчета, представленному на рисунке 8, при  $\Psi_l = const$  работы [7].

Для частотного управления АД при стабилизации потокосцепления по закону  $\Psi_2 = const$  запишем пропорцию:

$$\frac{E'_2}{\omega_1} = \frac{E'_{2н}}{\omega_{1н}} = const, \quad (21)$$

где  $E'_2$  – приведенное значение ЭДС, индуктированной потокосцеплением ротора, В;

$E'_{2н}$  – приведенное значение ЭДС ротора при номинальной угловой скорости  $\omega_{1н} = 2\pi f_{нн}$ , В.

Тогда

$$E'_2 = E'_{2н} \cdot \frac{\omega_1}{\omega_{1н}} = a \cdot E'_{2н}, \quad (22)$$

Принимая во внимание, что  $E'_{2н} = \omega_{1н} \cdot \Psi_{2н}$ , тогда действующее значение номинального потокосцепления ротора определим из потокосцепления взаимоиндукции  $\Psi_{mn}$  при максимальной нагрузке:

$$\Psi_{2н} = \Psi_{mn} \cdot \cos \varphi_2 = \Psi_{mn} \cdot \frac{s_{ак}}{\sqrt{s_{ак}^2 + s_n^2}}, \quad (23)$$

где  $s_{ак} = \frac{r'_2}{x'_2}$  – абсолютное критическое скольжение, о.е.

Соответственно

$$\Psi_{mn} = \frac{E_{1н}}{\omega_{1н}} \quad (24)$$

Значение тока статора:

$$I_1 = E'_{2н} \cdot \sqrt{s_a^2 \cdot \left[ \frac{1}{r_2'^2} + \frac{1}{(x_\mu' \cdot s_{ак})^2} + \frac{2}{x_\mu' \cdot s_{ак} \cdot r_2'} \right] + \frac{1}{x_\mu'^2}} \quad (25)$$

ротора:

$$I'_2 = s_a \cdot \frac{E'_{2н}}{r_2'} \quad (26)$$

Тогда электромагнитный момент трехфазного АД:

$$M = \frac{3 \cdot I_2'^2 \cdot r_2'}{\omega_0 \cdot s} = \frac{3 \cdot I_2'^2 \cdot r_2'}{\omega_{0н} \cdot s_a} \quad (27)$$

Выразив из выражения приведенного тока ротора  $I'_2$  абсолютное скольжение  $s_a$  и подставив его в выражение электромагнитного момента, получим:

$$M = 3 \cdot \frac{E'_{2н}}{\omega_{0н}} \cdot I'_2 \quad (28)$$

Учитывая, что  $\omega_{0н} = \frac{\omega_{1н}}{p}$ , а  $\frac{E'_{2н}}{\omega_{1н}} = \Psi_{2н}$ ,

получим

$$M = 3 \cdot p \cdot \Psi_{2н} \cdot I'_2 = c \cdot I_2', \quad (29)$$

где;

$p$  – число пар полюсов обмотки статора.

Подставив в выражение момента  $M$  (28) выражение тока ротора  $I'_2$  (26), получим:

$$M = 3 \cdot p \cdot \Psi_{2н} \cdot \frac{E'_{2н}}{r_2'} \cdot s_a = 3 \cdot p \cdot \Psi_{2н} \cdot \frac{E'_{2н}}{r_2'} \cdot \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_{0н}} = 3 \cdot p \cdot \Psi_{2н} \cdot \frac{E'_{2н}}{r_2'} \cdot \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_{1н}} \cdot p = \frac{3 \cdot (p \cdot \Psi_{2н})^2}{r_2'} \cdot (\omega_0 - \omega) \quad (30)$$

Обозначив  $\beta = \frac{3 \cdot (p \cdot \Psi_{2н})^2}{r_2'}$  и выразив  $\omega_0 = \alpha \cdot \omega_{0н}$ ,

получим окончательное уравнение механической характеристики АД при частотном управлении по закону  $\Psi_2 = const$ :

$$\omega = \alpha \cdot \omega_{0н} - \frac{M}{\beta}, \quad (31)$$

где  $\beta$  – модуль жесткости механической характеристики.

При постоянной жесткости  $\beta$ , механическая характеристика АД становится линейной, аналогичной двигателю постоянного тока с независимым возбуждением (ДПТ НВ) и ограничивается режимом насыщения магнитопровода ( $\approx 1,5 \dots 2 M_n$ ).

Необходимая величина действующего значения напряжения, подаваемого на фазную обмотку статора АД, при частотном управлении по закону  $\Psi_2 = const$  рассчитывается из эквивалентной Т-образной СЗ АД по формуле:

$$U = \omega_{1н} \cdot \Psi_{2н} \cdot \frac{s_a}{r_2'} \cdot \sqrt{R^2(\alpha, s_a) + X^2(\alpha, s_a)}, \quad (32)$$

где

$$R(\alpha, s) = \frac{r_1}{k_r} + \frac{\alpha \cdot r_2'}{k_s \cdot s_a} \quad \text{– активное сопротивление АД при данном абсолютном скольжении } s_a \text{ и относительной частоте } \alpha, \text{ Ом;}$$

индуктивное сопротивление АД при данном абсолютном скольжении  $s_a$  и относительной частоте  $\alpha$ , Ом;

$$X(\alpha, s_a) = \alpha \cdot \left( x'_{к.ном} + \frac{x'_{к.ном}}{x_\mu} \right) - \frac{r_1}{x_\mu} \cdot \frac{r_2'}{s_a}$$

– коэффициент магнитной связи ротора;

$$k_r = \frac{x_\mu}{x_2 + x_\mu}$$

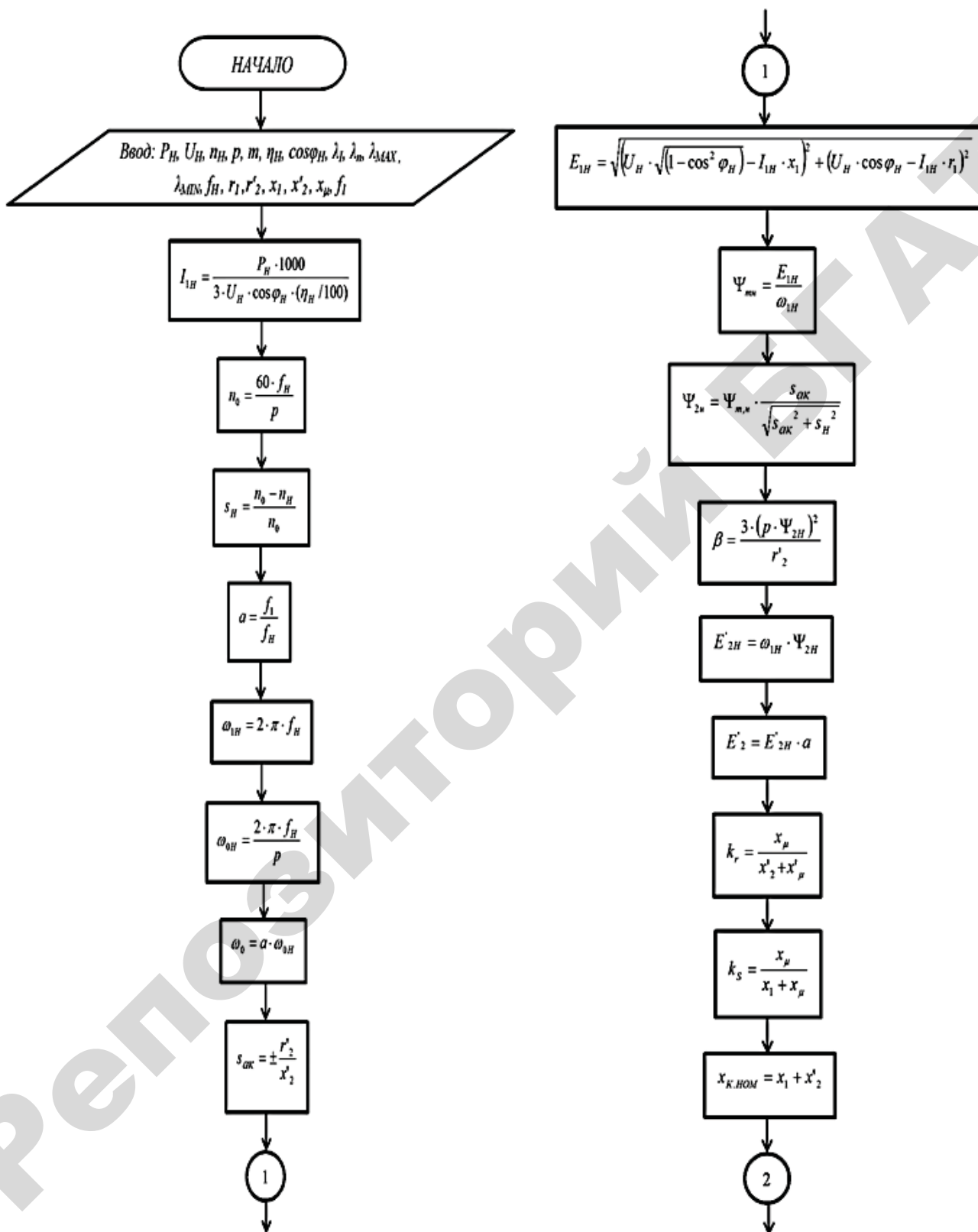
$$k_s = \frac{x_\mu}{x_1 + x_\mu} \quad \text{– коэффициент магнитной связи статора;}$$

$$x'_{к.ном} = x_1 + x_2'$$

Алгоритм расчета механических и электромеханических характеристик АД при частотном регулировании для  $\Psi_2 = const$  по методике [5, 6] представлен на

рисунке 2. В алгоритме расчет характеристик АД проводится на рабочем участке механической харак-

теристики от  $2 M_H$  до  $-2 M_H$ , т.е. при изменении относительного момента  $\mu$  от 2 до  $-2$ .



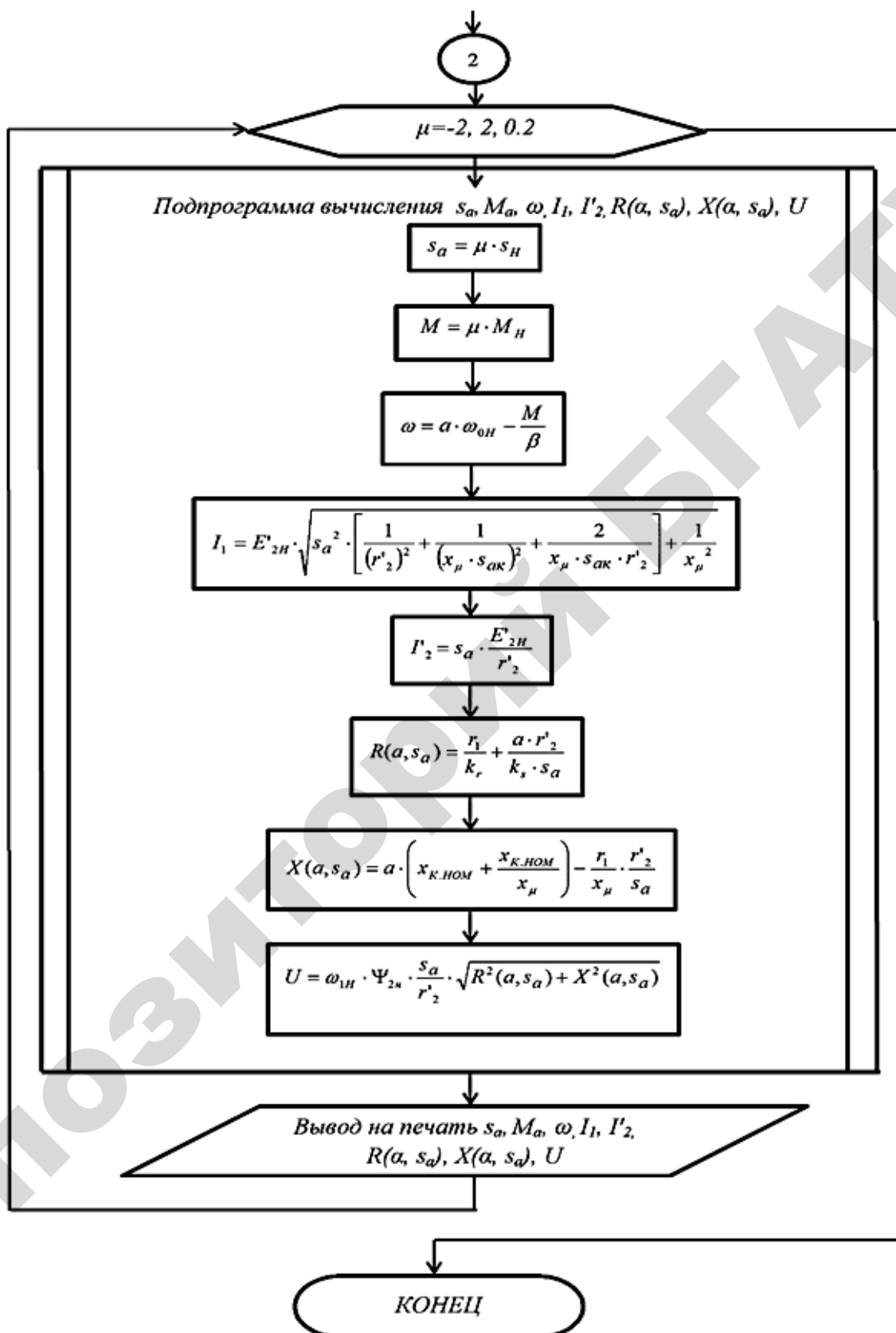


Рисунок 2. Алгоритм расчета механических и электромеханических характеристик АД при частотном регулировании для  $\Psi_2 = \text{const}$  по методике [5, 6]

где  $P_H$  – номинальная мощность двигателя, кВт;  
 $U_H$  – номинальное напряжение питания (фазное), В;  
 $n_H$  – номинальная частота вращения, об/мин;  
 $\cos\varphi_H$  – номинальный коэффициент мощности, о.е;  
 $\eta_H$  – номинальный коэффициент полезного действия двигателя, %;

$\lambda_{MAX}$  – кратность максимального момента к номинальному, о.е;

$\lambda_{II}$  – кратность пускового момента к номинальному, о.е;

$\lambda_I$  – кратность пускового тока к номинальному, о.е;

$\lambda_{MIN}$  – кратность минимального момента к номинальному, о.е;

$f_H$  – номинальная частота переменного тока питающей сети, Гц;

$r_1$  – активное сопротивление обмотки статора, Ом;

$r'_2$  – активное сопротивление обмотки ротора, приведенное к обмотке статора, Ом;

$x_1$  – индуктивное сопротивление рассеяния фазы статора, Ом;

$x'_2$  – индуктивное сопротивление рассеяния фазы ротора, приведенное к обмотке статора, Ом;

$x_u$  – индуктивное сопротивление ветви намагничивания, Ом;

$f_1$  – текущая частота переменного тока питающей сети, Гц;

$I_{IH}$  – номинальный фазный ток статора, А;

$n_0$  – синхронная частота вращения магнитного поля статора, мин<sup>-1</sup>;

$s_H$  – номинальное скольжение АД, о.е;

$\alpha$  – относительная частота питающего напряжения, о.е;

$\omega_{IH}$  – номинальная угловая скорость переменного тока питающей сети, рад/с;

$\omega_{OH}$  – синхронная угловая скорость АД при номинальной частоте  $f_H$  переменного тока питающей сети, рад/с;

$\omega_0$  – синхронная угловая скорость АД при текущей частоте  $f_1$  питающей сети, рад/с;

$s_{кк}$  – абсолютное критическое скольжение при законе управления  $\Psi_m$ ;

$E_{IH}$  – значение номинальной ЭДС взаимоиנדукции, В;

$\Psi_{mн}$  – номинальное значение потокосцепления взаимоиנדукции, В·с;

$\Psi_{2н}$  – номинальное значение потокосцепления ротора, В·с;

$\beta$  – модуль жесткости механической характеристики;

$E'_{2H}$  – значение номинальной ЭДС, индуцируемой потокосцеплением ротора при номинальной частоте питающего напряжения, В;

$E'_2$  – значение ЭДС, индуцируемой потокосцеплением ротора при текущей частоте  $f_1$  питающего

напряжения, В;

$k_r$  – коэффициент магнитной связи ротора;

$k_s$  – коэффициент магнитной связи статора;

$x_{KHOM}$  – индуктивное номинальное сопротивление обмоток статора и ротора АД при номинальной частоте питающего напряжения для режима короткого замыкания (при неподвижном роторе), Ом;

$s_a$  – абсолютное скольжение;

$\mu$  – относительный момент механической характеристики АД, о.е.;

$M$  – расчетный момент механической характеристики АД, Н·м;

$\omega$  – текущее значение угловой скорости ротора АД, с<sup>-1</sup>.

$I_1$  – расчетный ток статора АД электромеханической характеристики, А;

$I_2$  – расчетный ток ротора, приведенный к обмотке статора, А;

$R(\alpha, s_a)$  – активное сопротивление АД при данном абсолютном скольжении  $s_a$  и относительной частоте  $\alpha$ , Ом.

$X(\alpha, s_a)$  – индуктивное сопротивление АД при данном абсолютном скольжении  $s_a$  и относительной частоте  $\alpha$ , Ом.

$U$  – изменяемое напряжение питания на обмотках статора АД при частотном регулировании для  $\Psi_2 = \text{const}$ , В.

Рассматривая эти законы регулирования, построим для каждого из законов механические и электромеханические характеристики, вначале для номинального режима ( $f_H=50$ Гц) на примере двигателя серии АИР с техническими характеристиками, приведенными в (табл. 1).

Из полученных характеристик, рассчитанных и построенных при номинальной частоте сети 50Гц (рис.3...рис.5), видно, что критический момент АД при частотном управлении по закону  $\Psi_1 = \text{const}$  близок к критическому моменту двигателя на естественной характеристике, то же самое можно сказать и про ток. При законе  $\Psi_m = \text{const}$  критический момент значительно превышает критический момент на естественной механической характеристике. При частотном управлении по закону  $\Psi_2 = \text{const}$  критический момент на механической характеристике отсутствует, характеристика линейна и может строиться только для рабочей части характеристики, т.е до момента, равного 1,5...2 Мн, так как дальнейшее увеличение момента невозможно реализовать из-за значительного увеличения тока обмоток статора.

Для того чтобы проанализировать характеристики при изменении частоты  $f_1$  питающего напряжения  $U_1$  для двигателя АИР160S2, построим искусственные характеристики (рис.6...рис.8) при значениях частот напряжений обмотки статора 50, 25, 10 и 5 Гц.

Таблица 1. Технические характеристики электродвигателя [10]

Тип	P, кВт	$n_H$ , мин <sup>-1</sup>	КПД, %	cosφ	$\lambda_i = \frac{I_{II}}{I_H}$	$\lambda_{II} = \frac{M_{II}}{M_H}$	$\lambda_{MAX} = \frac{M_K}{M_H}$	$\lambda_{MIN} = \frac{M_{MIN}}{M_H}$
АИР160S2	15	2930	88,7	0,89	7,0	2,1	3,0	2,0



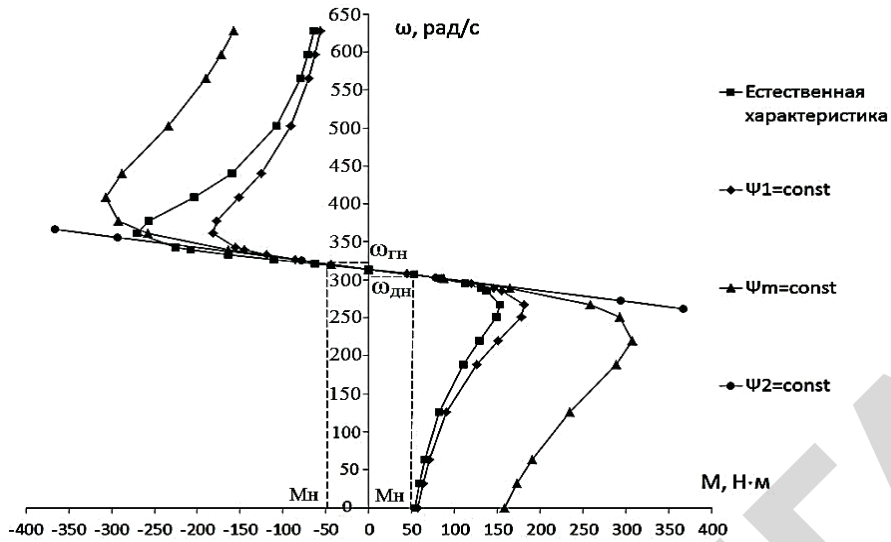


Рисунок 3. Механические характеристики  $M=f(\omega)$  (естественная,  $\psi_1 = \text{const}$ ,  $\psi_m = \text{const}$ ,  $\psi_2 = \text{const}$ ) для двигателя АИР160S2

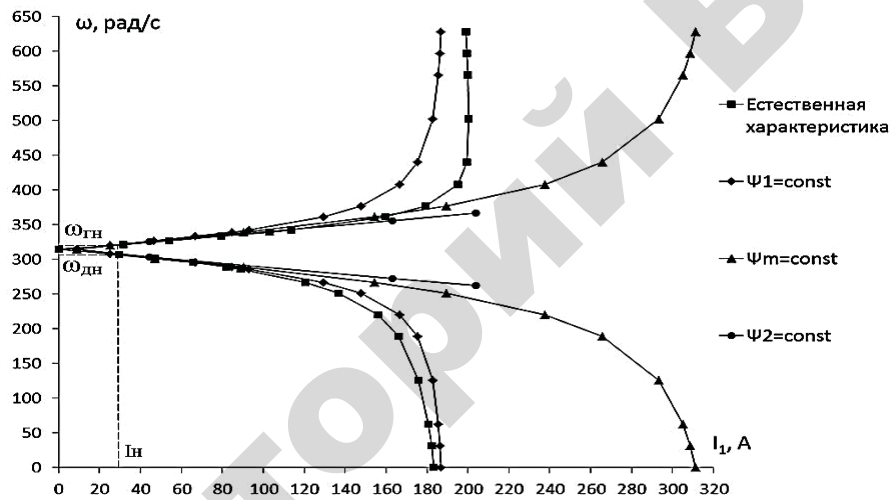


Рисунок 4. Электромеханические характеристики  $I_1=f(\omega)$  (естественная,  $\psi_1 = \text{const}$ ,  $\psi_m = \text{const}$ ,  $\psi_2 = \text{const}$ ) для двигателя АИР160S2

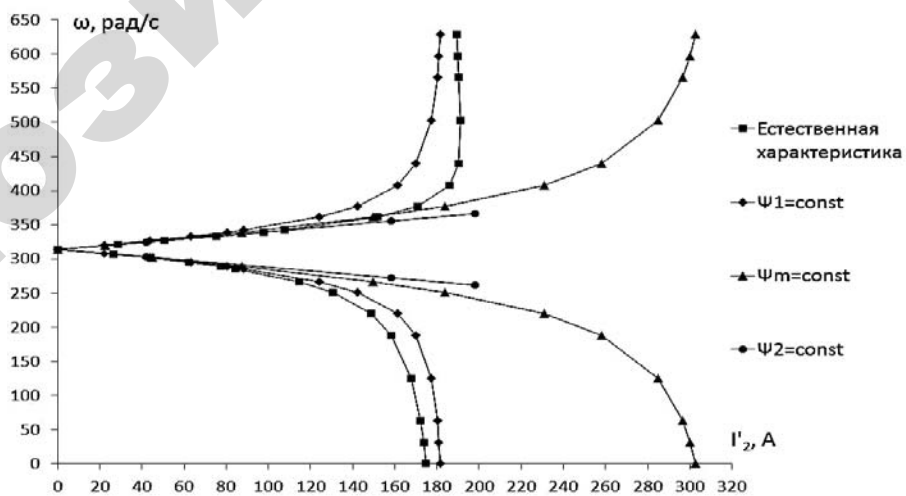


Рисунок 5. Электромеханические характеристики  $I'_2=f(\omega)$  (естественная,  $\psi_1 = \text{const}$ ,  $\psi_m = \text{const}$ ,  $\psi_2 = \text{const}$ ) для двигателя АИР160S2

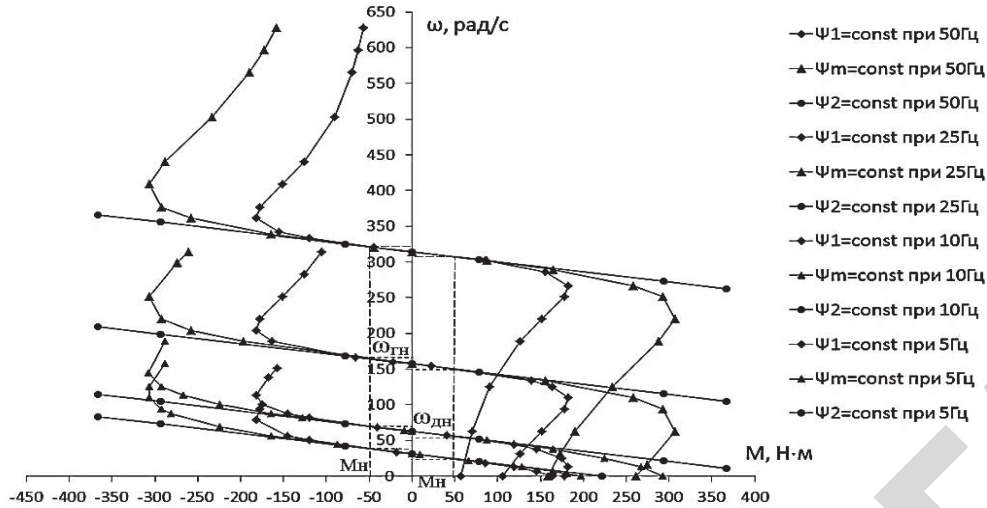


Рисунок 6. Механические характеристики при разных значениях частот напряжений обмотки статора  $M=f(\omega)$  ( $\Psi_1 = \text{const}$ ,  $\Psi_m = \text{const}$ ,  $\Psi_2 = \text{const}$ ) для двигателя АИР160S2

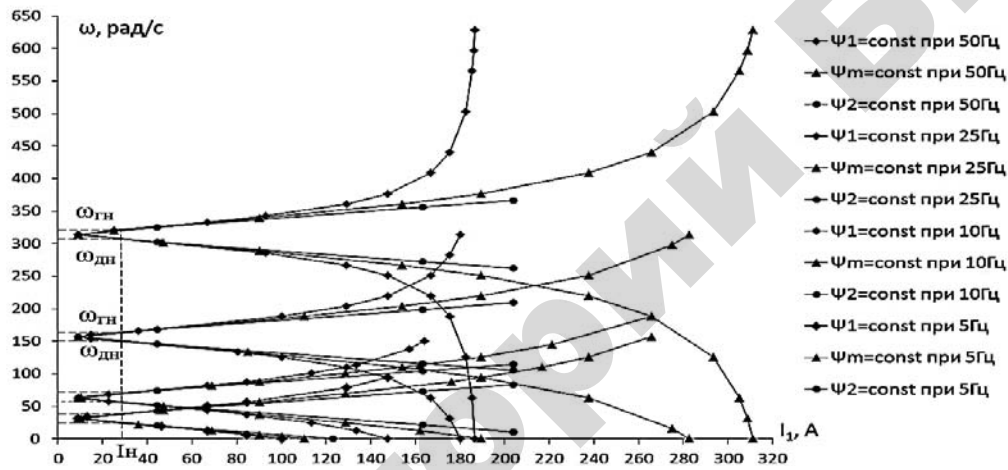


Рисунок 7. Электромеханические характеристики при разных значениях частот напряжений обмотки статора  $I_1=f(\omega)$  ( $\Psi_1 = \text{const}$ ,  $\Psi_m = \text{const}$ ,  $\Psi_2 = \text{const}$ ) для двигателя АИР160S2

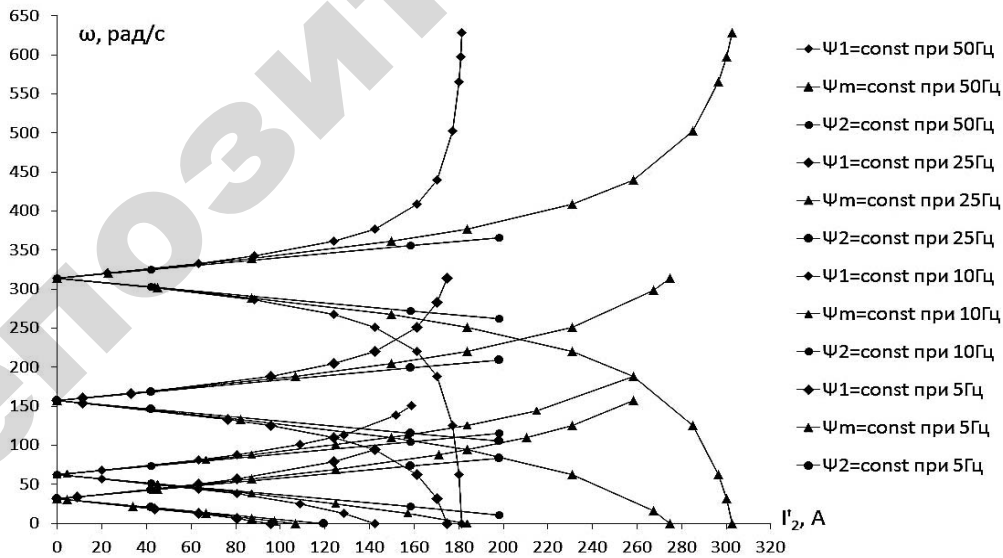


Рисунок 8. Электромеханические характеристики при разных значениях частот напряжений обмотки статора  $I_2=f(\omega)$  ( $\Psi_1 = \text{const}$ ,  $\Psi_m = \text{const}$ ,  $\Psi_2 = \text{const}$ ) для двигателя АИР160S2

Как видим из полученных характеристик (рис.6...рис.8), при изменении частоты напряжения обмотки статора, механические характеристики смещаются параллельно, т.е. жесткость механических характеристик остается неизменной для всего диапазона относительных частот  $\alpha$ , поэтому все характеристики подобны (конгруэнтны). Из расчетов критических моментов выражения (8) (16) видно, что они не зависят от частоты статора и одинаковы, как в двигателе, так и генераторном режиме.

**Заключение**

Проведенные расчеты показывают, что при ограничении тока статора в пределах  $1...1,5 I_{1н}$  наибольший момент развивает АД, управляемый по закону  $\Psi_2 = const$ , за ним идет управление по законам  $\Psi_m = const$  и  $\Psi_1 = const$ , хотя следует признать, что разница в развиваемых моментах при этом незначительна. Механические характеристики АД при одинаковом ограничении тока статора в указанном пределе практически совпадают друг с другом, т.е. идентичны. Следовательно, при разработке методик расчета частотно-регулируемого асинхронного электропривода для производственных механизмов расчет механических и электромеханических характеристик в пределах указанного диапазона изменения тока статора может производиться при любом законе стабилизации потока возбуждения АД.

**СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ  
ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Виноградов, А. Б. Векторное управление электроприводами переменного тока / ГОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В. И. Ленина». – Иваново, 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 / Б.И. Фираго, Л.Б. Павлячик. – М.: Техноперспектива, 2007. – 588 с.

6. Фираго, Б.И. Расчеты по электроприводу производственных машин и механизмов: учеб. пос. / Б.И. Фираго. – Минск: Техноперспектива, 2012. – 639 с.

7. 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, Е.М. Прищепова, Д.М. Иванов // Агропанорама, 2016. – № 6. – С. 20-30.

8. Чернышев, А.Ю. Электропривод переменного тока: учеб. пос. / Ю.А. Чернышев, Ю.Н. Дементьев, И.А. Чернышев. – Томск: Изд-во Томского Политехнического университета, 2011. – 203 с.

9. 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.

10. Асинхронные двигатели. Каталог ОАО «Могилевский завод «Электродвигатель» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.mez.by>. – Дата доступа: 16.03.2017 г.

ПОСТУПИЛА В РЕДАКЦИЮ 21.03.2017

**Малогабаритная система очистки рабочих жидкостей гидравлических систем**

*Предназначена* для профилактической очистки рабочих жидкостей гидравлических приводов мобильной сельскохозяйственной техники.



**Основные технические данные**

Производительность	Не менее 24 л/мин
Давление на входе в блок центрифугирования	0,8 МПа
Давление на входе в блок фильтрования	0,2-0,3 МПа
Давление на выходе из блока фильтрования	0,15 МПа
Тонкость очистки	15-40 мкм

Применение системы позволяет при обкатке двигателей расходовать масло без остатка, не снижать качество повторно используемого моторного масла, постоянно добавляя в него свежее товарное масло (гомогенизировать), полностью устранить расход электроэнергии, необходимой для подогрева масла, отказаться от необходимости хранения и утилизации масла. Она может применяться на ремонтно-обслуживающих предприятиях, а также непосредственно в хозяйствах для технического обслуживания машинно-тракторного парка.