



УДК 621.313.33:004

DOI: 10.31388/2220-8674-2018-2-23

РАСЧЁТ МЕХАНИЧЕСКИХ И ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ В ДВИГАТЕЛЬНОМ И ГЕНЕРАТОРНОМ РЕЖИМАХ ПРИ ЧАСТОТНОМ УПРАВЛЕНИИ

Прищепов М. А., д.т.н.,

Прищепова Е. М.,

Иванов Д. М., аспирант *

Белорусский государственный аграрный технический университет

e-mail: pma.rekt@batu.edu.by

Аннотация - в статье рассмотрены вопросы, касающиеся частотно-регулируемого асинхронного электропривода. Приведены основные статические законы частотного управления (закон постоянства потокосцепления статора, закон постоянства потокосцепления цепи намагничивания, закон постоянства потокосцепления ротора). Для наиболее широко распространённых законов стабилизации потокосцепления статора, ротора, взаимоиндукции разработаны детальные алгоритмы расчёта статических характеристик АД и проведено их сравнение. Алгоритм расчёта механических и электромеханических характеристик АД при частотном регулировании для $\Psi_2 = \text{const}$ по методике Фираго Б.И. В алгоритме расчёт характеристик АД проводится на рабочем участке механической характеристике от $2 M_n$ до $-2 M_n$, т.е. при изменении относительного момента μ от 2 до -2. Выполненные расчёты показали, что при ограничении тока статора в пределах $1 \dots 1,5 I_{1n}$ наибольший момент развивает АД, управляемый по закону $\Psi_2 = \text{const}$ за ним идёт управление по законам $\Psi_m = \text{const}$ и $\Psi_1 = \text{const}$. Для этих законов построены механические и электромеханические характеристики для номинального режима работы на примере двигателя серии АИР. Разница моментов, которые развиваются незначительна. Механические характеристики АД при одинаковом ограничении тока статора в указанном пределе практически идентичны. На этом основывается вывод что, при разработке методик расчёта частотно-регулируемого асинхронного электропривода для производственных механизмов, расчёт механических и электромеханических характеристик в пределах указанного диапазона изменения тока статора может производиться при любом законе стабилизации потока возбуждения АД.

Ключевые слова – асинхронный двигатель, частотно-регулируемый электропривод, искусственные характеристики, стабилизация потока возбуждения, алгоритм расчёта.

Постановка проблемы. 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 частотным. В настоящее время, несмотря на интенсивное развитие векторного способа управления, частотное управление довольно широко распространено, так как позволяет эффективно решать многие технические задачи. 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).

Анализ последних исследований. При частотно управлении в электроприводе реализуется один из статических законов частотного управления [1,2,3,4]:

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

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

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

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:

$$S_a = S \cdot \alpha = \text{const} \text{ или } S_a = \frac{\omega_1 - \omega}{\omega_1} \cdot \frac{\omega_1}{\omega_{1H}} = \text{const}$$

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

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

где ω_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;

ω_{1H}, f_H – номинальная угловая скорость электромагнитного поля и соответствующая ей номинальная частота питающего напряжения статора АД, Гц;

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

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

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

ω – угловая скорость ротора, рад/с;

Ψ_1, Ψ_2, Ψ_m – потокосцепления, соответственно, статора, ротора, и взаимоиндукции, В·с;

E_s, E_1, E'_2 – ЭДС, соответственно, статора, взаимоиндукции и ротора, приведенная к обмотке статора, В;

$\alpha = f_1/f_H$ – 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;

η – 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 ω

$M_c = f(\omega)$. В частности, жёсткое 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 расчёт зависимости $U_1 = f(\omega_1)$ может быть выполнен на основе статической модели АД с учётом выбранного закона частотного управления. Пока закон частотного управления не задан, задача расчёта $U_1 = f(\omega_1)$ 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 $U_1/f_1 = U_{1H}/f_H = \text{const}$) 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 (Φ), угловая скорость ротора (ω) 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 $\Psi_1 = \text{const}$, взаимоиндукции $\Psi_m = \text{const}$, ротора $\Psi_2 = \text{const}$ [5, 6]. Каждый из этих законов частотного управления обеспечивает определённые электромеханические свойства и энергетические показатели АД.

Формулирование цели статьи. Изучить влияние закона стабилизации потока возбуждения АД на механические и электромеханические характеристики в пределах $1 \dots 1,5 I_{1H}$ изменения тока статора.

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

При управлении АД по закону стабилизации $\Psi_1 = \text{const}$ 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 так же называют законом управления с IR -компенсацией.

Рассматривая частотное управление АД по закону $\Psi_1 = \text{const}$ на основании общеизвестного соотношения между действующими



значениями ЭДС E , потокосцепления Ψ и угловой скорости ω_1 $E = \omega_1 \cdot \Psi$, можно записать пропорцию [5, 6]:

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

где $E_{s.H}$ – номинальное значение

Из неё же можем найти и действующее значение ЭДС статора:

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

Механическая характеристика будет выражаться параметрическим уравнением:

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

где M_k – критический момент двигателя,

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

ω_{0H} – 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, $s_a = \alpha \cdot s$;

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:

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

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 $I'_2=f(\omega)$:

$$I'_2 = \frac{E_{S.H}}{\sqrt{\left(\frac{r''_2}{s_a}\right)^2 + x'_{к.ном}{}^2}} \left. \vphantom{\frac{E_{S.H}}{\sqrt{\left(\frac{r''_2}{s_a}\right)^2 + x'_{к.ном}{}^2}}}} \right\} \omega = \omega_{0H} \cdot (\alpha - s_a) \quad (11)$$

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

$$U = \alpha \cdot E_{S.H} \cdot \frac{Z'_{AD}}{\sqrt{R^2_{B,A} + (x_1 + X_{B,A})^2}}, \quad (12)$$

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

Алгоритм расчёта характеристик АД по представленной выше методике согласно работ [5, 6] рассматривался авторами ранее в работе [7], где результаты расчёта сравнивались с аналогичными результатами полученными по методике представленной в работе [8]. При этом в обоих случаях расчёт параметров СЗ АД ($r_1, r'_2, x_1, x'_2, x_\mu$) проводился по алгоритму приведенному в работе [9]. Имеющееся несовпадение механических и электромеханических характеристик в диапазоне угловых скоростей от критической и меньших критической угловой скорости для двигательного режима и от критической и больших критической угловой скорости для генераторного режима, рассчитанных по указанным методикам, объясняется тем, что ЭДС статора $E_{SВ}$ методике [5, 6] рассчитывалась из векторной диаграммы геометрически, а в методике [8] из выражения через действующие значения её параметров.

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

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

Тогда действующее значение ЭДС взаимоиндукции:

$$E_1 = \alpha \cdot E_{1.H} \quad (14)$$

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



$$E_{1.H} = \sqrt{\left(U_H \cdot \sqrt{(1 - \cos^2 \varphi_H)} - I_{1.H} \cdot x_1 \right)^2 + \left(U_H \cdot \cos \varphi_H - I_{1.H} \cdot r_1 \right)^2}, \quad (15)$$

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

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

Критический момент будет равен:

$$M_k = \frac{3 \cdot E_{1.H}^2}{2 \cdot \omega_{0H} \cdot x'_{2.H}}, \quad (16)$$

Где $x'_{2.H}$ – индуктивное сопротивление рассеяния фазы ротора СЗ АД, при номинальной частоте, Ом.

Абсолютное критическое скольжение:

$$s_{ak} = \pm \frac{r'_2}{x'_{2.H}}, \quad (17)$$

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

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

Уравнение электромеханической характеристики $I'_2 = f(\omega)$:

$$\left. \begin{aligned} I'_2 &= \frac{E_{1.H}}{\sqrt{\left(\frac{r'_2}{s_a}\right)^2 + x'_{2.H}{}^2}} \\ \omega &= \omega_{0H} \cdot (\alpha - s_a) \end{aligned} \right\}. \quad (19)$$

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

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

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 расчёта механических и электромеханических характеристик АД при частотном регулировании для $\Psi_m = const$ по методике [5,6] представлена на рисунке 1.

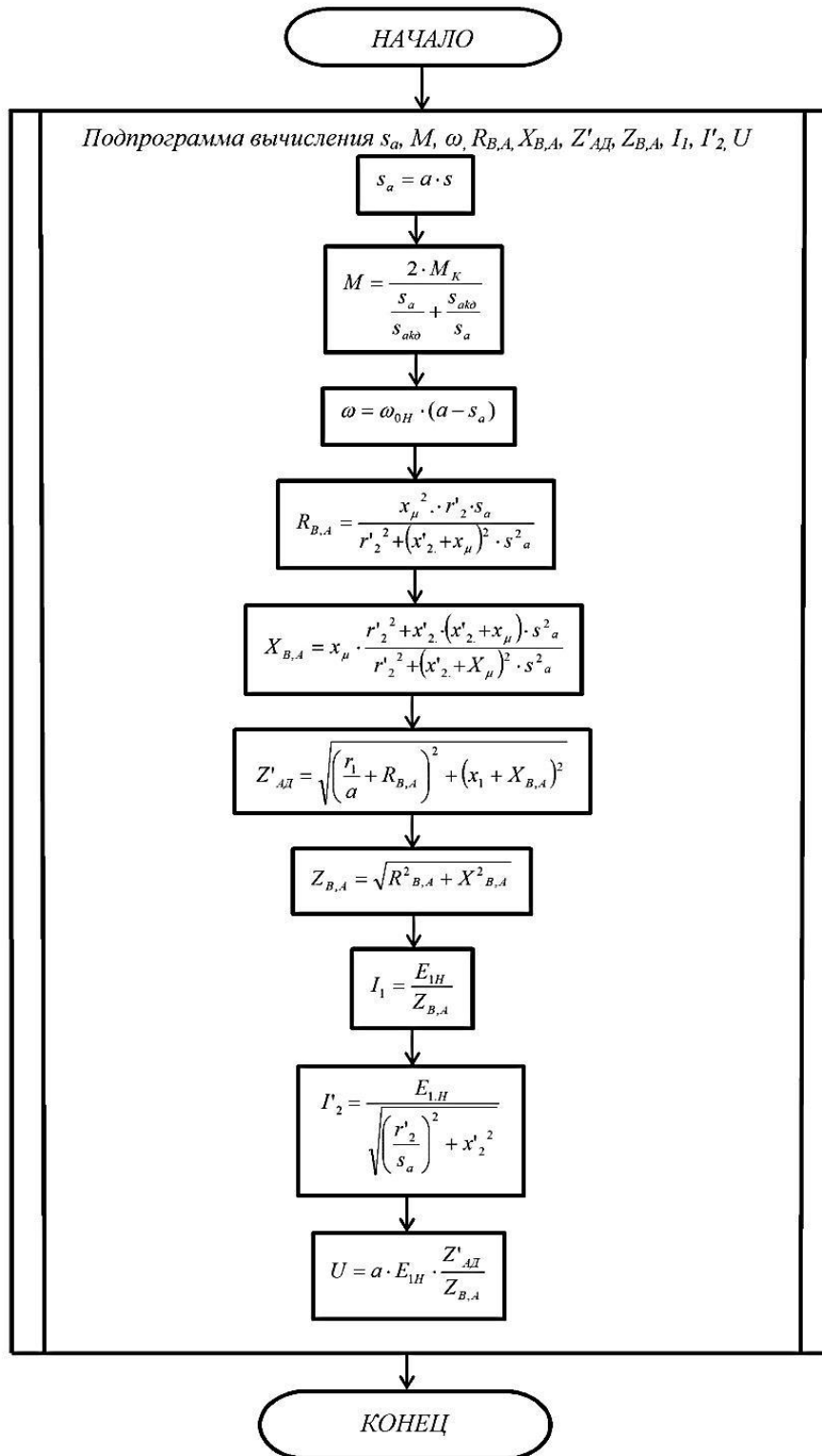


Рис. 1. Алгоритм подпрограммы вычисления параметров $s_a, M, \omega, R_{B,A}, X_{B,A}, Z'_{AD}, Z_{B,A}, I_1, I'_2, U$ в алгоритме расчёта механических и электромеханических характеристик АД при частотном регулировании для $\Psi_m = \text{const}$ по методике [5, 6]

Указанный алгоритм расчёта механических и электромеханических характеристик АД при частотном



регулюванні для $\Psi_m = const$ будет аналогічен основному алгоритму расчёта, представленному на рисунке 8 при $\Psi_1 = const$ 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 $\omega_{1н} = 2\pi \cdot f_n$, 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 $\Psi_{mн}$ при максимальной нагрузке:

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

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

Соответственно

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

Значение тока статора:

$$I_1 = E'_{2н} \cdot \sqrt{s_a^2 \cdot \left[\frac{1}{r'^2_2} + \frac{1}{(x_\mu \cdot s_{ак})^2} + \frac{2}{x_\mu \cdot s_{ак} \cdot r'_2} \right] + \frac{1}{x_\mu}}, \quad (25)$$

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:



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

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

$$M = 3 \cdot p \cdot \Psi_{2H} \cdot I'_{2.} = c \cdot I'_{2.}, \quad (29)$$

где $c = 3 \cdot p \cdot \Psi_{2H}$;

p – число пар полюсов обмотки статора.

Подставив в выражение момента $M(28)$ выражение тора ротора $I'_{2.}$ (26) получим:

$$\begin{aligned} M &= 3 \cdot p \cdot \Psi_{2H} \cdot \frac{E'_{2H}}{r'_{2.}} \cdot s_a = 3 \cdot p \cdot \Psi_{2H} \cdot \frac{E'_{2H}}{r'_{2.}} \cdot \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_{0H}} = \\ &= 3 \cdot p \cdot \Psi_{2H} \cdot \frac{E'_{2H}}{r'_{2.}} \cdot \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_{1H}} \cdot p = \frac{3 \cdot (p \cdot \Psi_{2H})^2}{r'_{2.}} \cdot (\omega_0 - \omega). \end{aligned} \quad (30)$$

Обозначив $\beta = \frac{3 \cdot (p \cdot \Psi_{2H})^2}{r'_{2.}}$ и выразив $\omega_0 = \alpha \cdot \omega_{0H}$, тогда

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

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

где β – модуль жёсткости механической характеристики.

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

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:

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

где $R(\alpha, s) = \frac{r_1}{k_r} + \frac{\alpha \cdot r'_{2.}}{k_s \cdot s_a}$ – активное сопротивление АД при данном абсолютном скольжении s_a и относительной частоте α , Ом;

$X(\alpha, s_a) = \alpha \cdot \left(x'_{к.ном} + \frac{x'_{к.ном}}{x_\mu} \right) - \frac{r_1}{x_\mu} \cdot \frac{r'_{2.}}{s_a}$ индуктивное

сопротивление АД при данном абсолютном скольжении s_a и относительной частоте α , Ом;



$$k_r = \frac{x_\mu}{x'_2 + x_\mu} - \text{коэффициент магнитной связи ротора};$$

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

$$x'_{\text{к.ном}} = x_1 + x'_2.$$

Алгоритм расчёта механических и электромеханических характеристик АД при частотном регулировании для $\Psi_2 = \text{const}$ по методике [5, 6] представлен на рисунке 2. В алгоритме расчёт характеристик АД проводится на рабочем участке механической характеристике от $2 M_n$ до $-2 M_n$, т.е. при изменении относительного момента μ от 2 до -2.

На рисунке 2 приняты следующие обозначения:

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;

η_H – номинальный коэффициент полезного действия двигателя, %;

λ_{MAX} – кратность максимального момента к номинальному, о.е;

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

λ_i – кратность пускового тока к номинальному, о.е;

λ_{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_μ – индуктивное сопротивление ветви намагничивания, Ом;

f_1 – текущая частота переменного тока питающей сети, Гц;

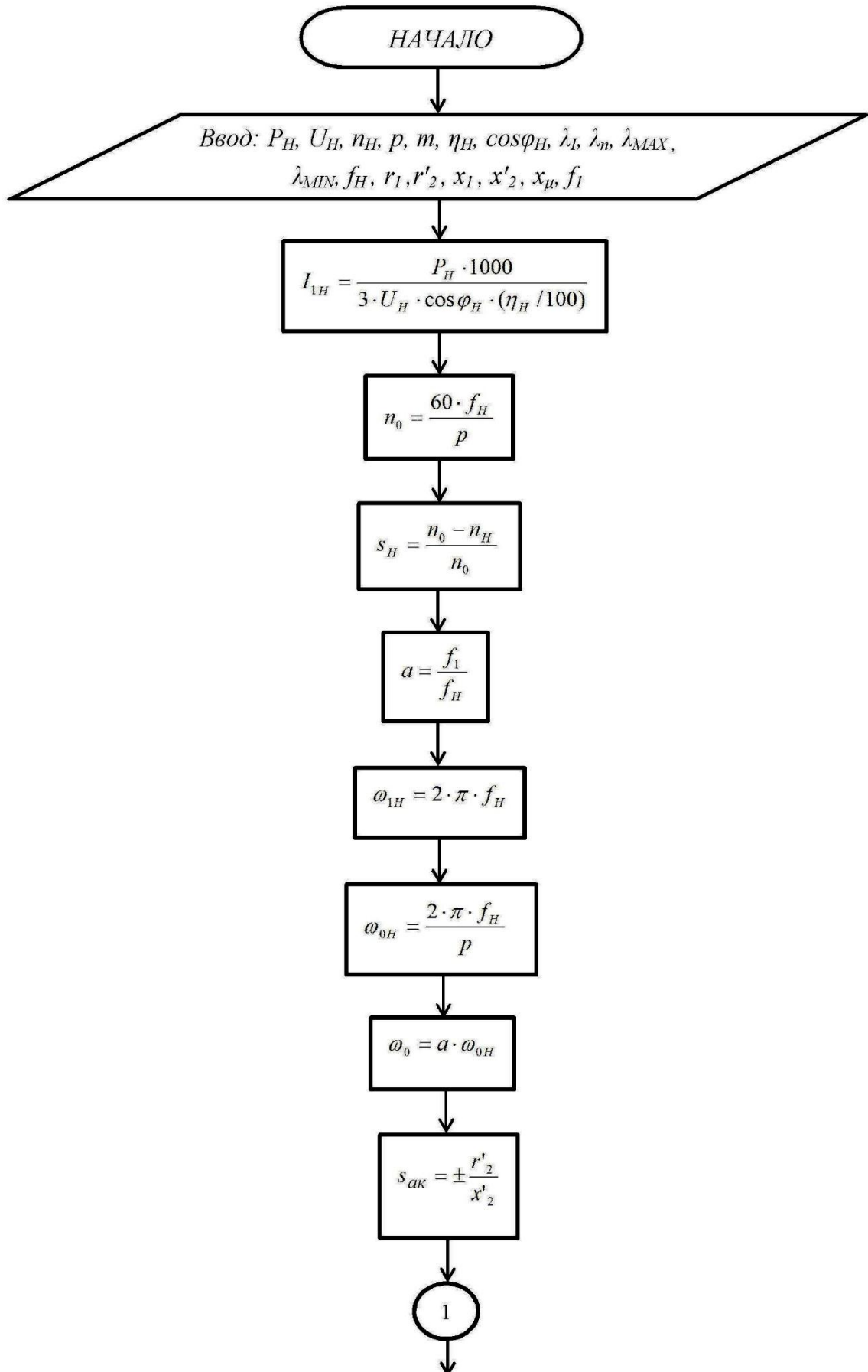
I_{1H} – номинальный фазный ток статора, А;

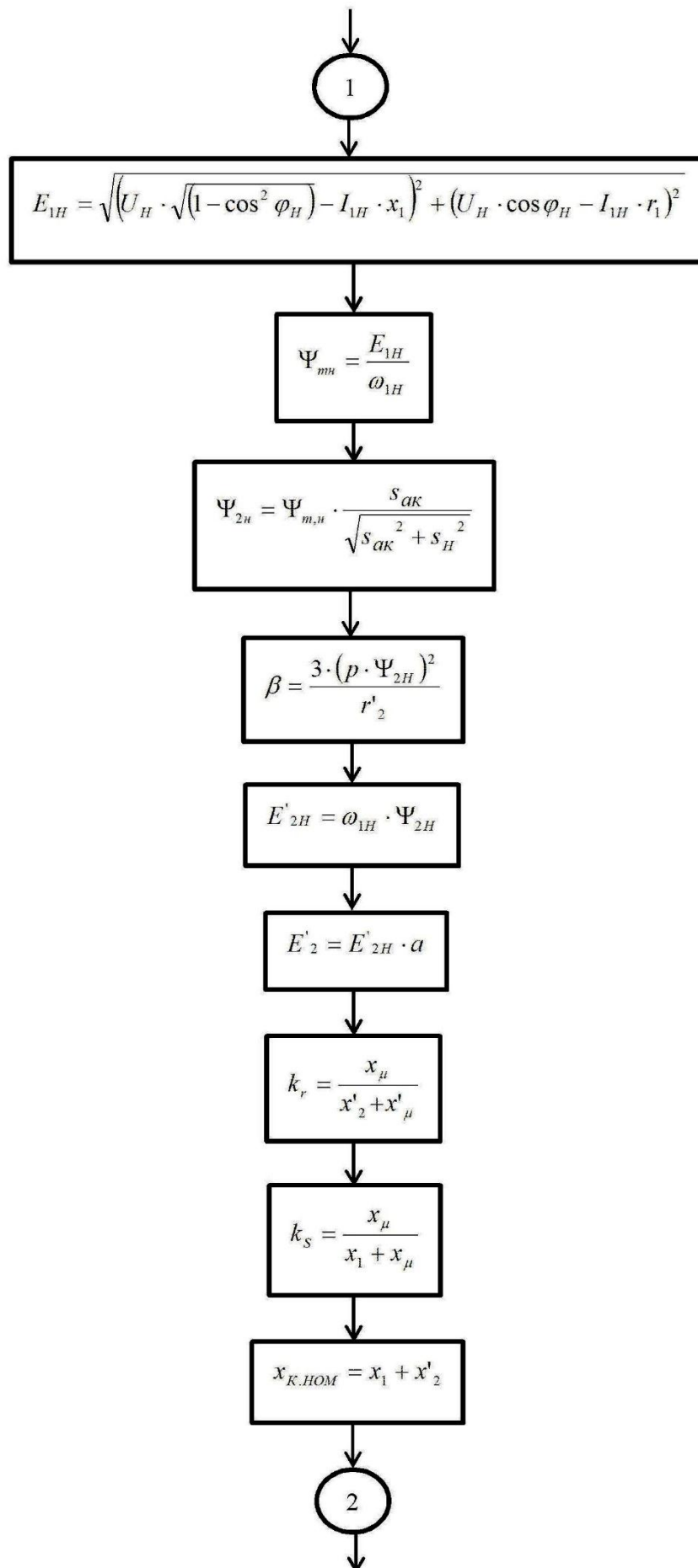
n_0 – синхронная частота вращения магнитного поля статора, мин^{-1} ;

s_H – номинальное скольжение АД, о.е;

α – относительная частота питающего напряжения, о.е;

ω_{1H} – номинальная угловая скорость переменного тока питающей сети, рад/с;





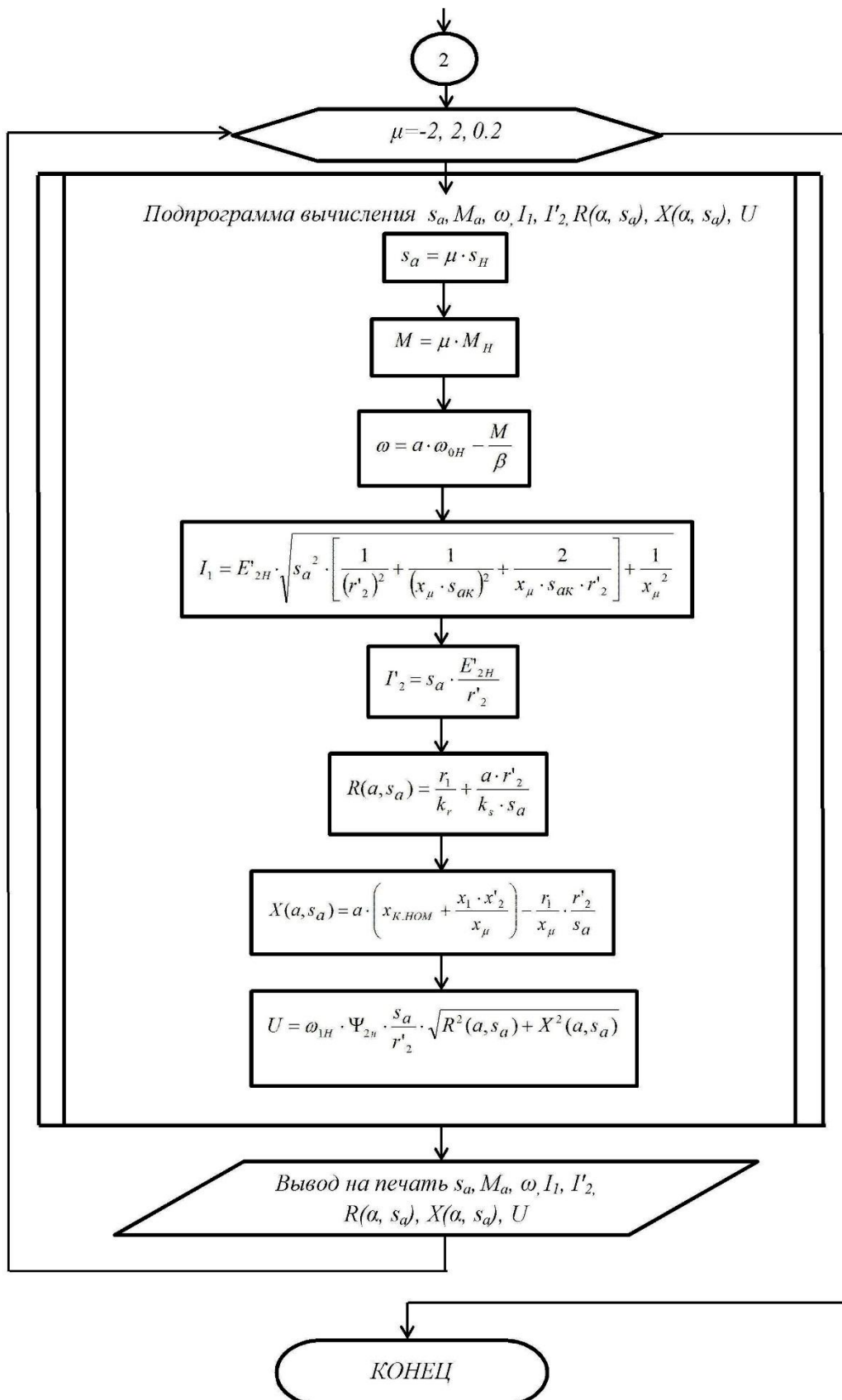


Рис.2. Алгоритм расчёта механических и электромеханических характеристик АД при частотном регулировании для $\Psi_2 = \text{const}$ по методике [5, 6]



ω_{0H} – синхронная угловая скорость АД при номинальной частоте f_H переменного тока питающей сети, рад/с;

ω_{σ} – синхронная угловая скорость АД при текущей частоте f_I питающей сети, рад/с;

$s_{ак}$ – абсолютное критическое скольжение при законе управления Ψ_m ;

E_{1H} – значение номинальной ЭДС взаимоиндукции, В;

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

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

β – модуль жёсткости 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_I питающего напряжения, В;

k_r – коэффициент магнитной связи ротора;

k_s – коэффициент магнитной связи статора;

$X_{к.ном}$ – 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;

μ – относительный момент механической характеристики АД, о.е.;

M – расчётный момент механической характеристики АД, Н·м;

ω – текущее значение угловой скорости ротора АД, с⁻¹.

I_1 – расчётный ток статора АД электромеханической характеристики, А;

I'_2 – расчётный ток ротора, приведенный к обмотке статора, А;

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

$X(\alpha, s_a)$ – индуктивное сопротивление АД при данном абсолютном скольжении s_a и относительной частоте α , 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 для номинального режима ($f_H = 50$ Гц) на примере двигателя серии АИР с техническими характеристиками, приведенными в (табл.1).

Таблица 1

Технические характеристики электродвигателя [10]

Тип	P, кВт	$n_H, \text{мин}^{-1}$	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

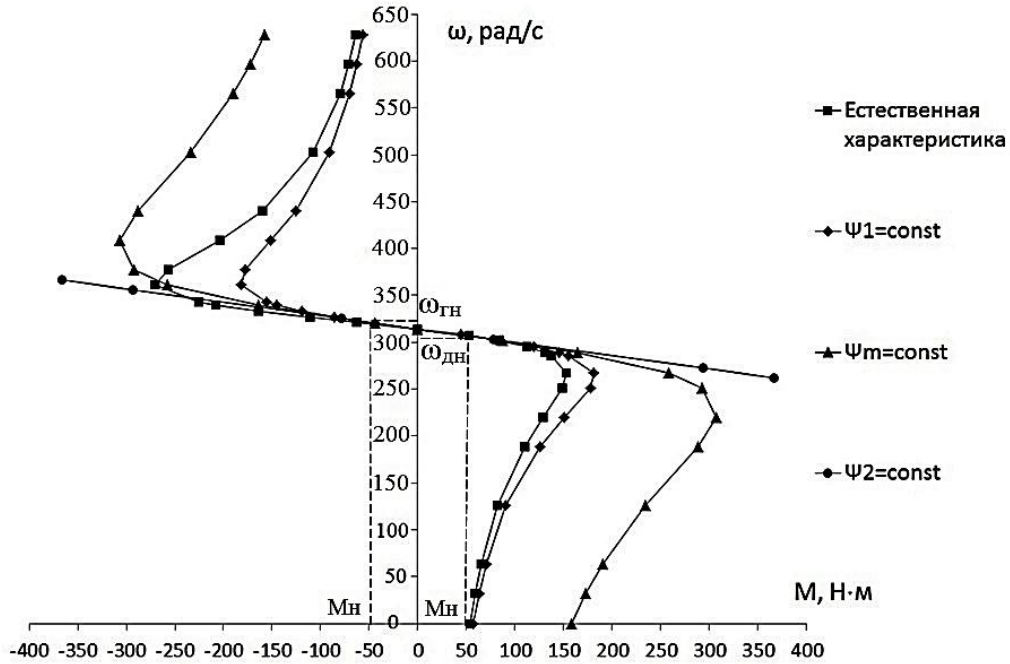


Рис. 3. Механические характеристики $M=f(\omega)$

(естественная, $\Psi_1 = \text{const}$, $\Psi_m = \text{const}$, $\Psi_2 = \text{const}$) для двигателя АИР160S2

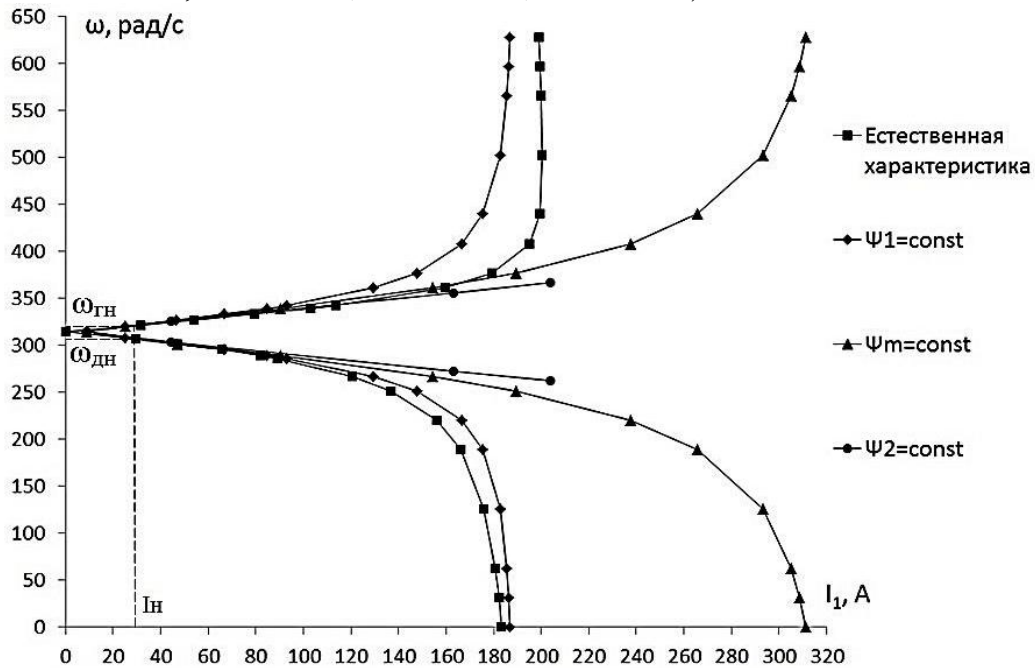


Рис.4. Электромеханические характеристики $I_1=f(\omega)$ (естественная, $\Psi_1 = \text{const}$, $\Psi_m = \text{const}$, $\Psi_2 = \text{const}$) для двигателя АИР160S2

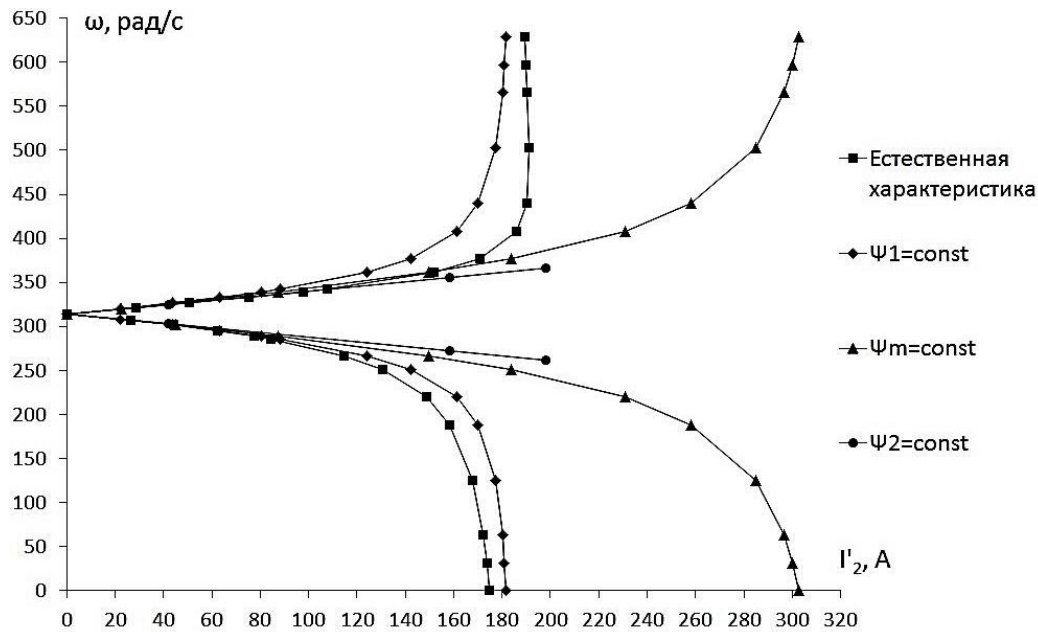


Рис. 5. Электромеханические характеристики $\Gamma_2=f(\omega)$ (естественная, $\Psi_1 = \text{const}$, $\Psi_m = \text{const}$, $\Psi_2 = \text{const}$) для двигателя АИР160S2

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 токи. 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 $1,5 \dots 2 \cdot M_n$, так как дальнейшее увеличение момента невозможно реализовать из-за значительного увеличения тока обмоток статора.

Для того, что бы 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.

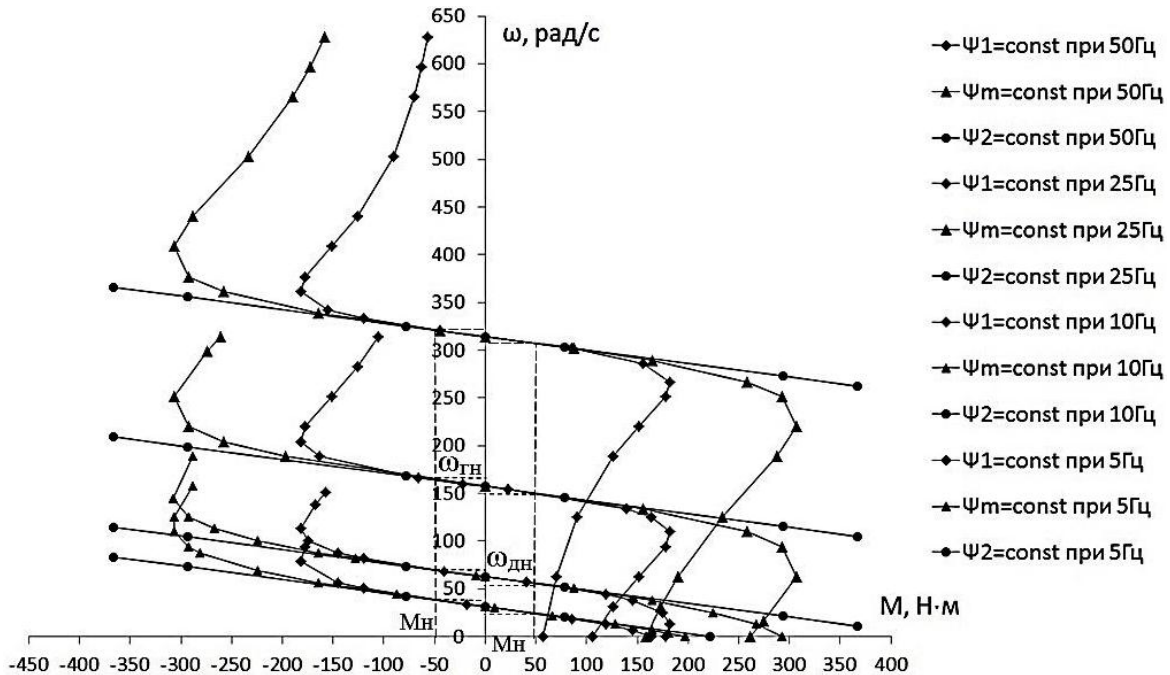


Рис. 6. Механические характеристики при разных значениях частот напряжений обмотки статора $M=f(\omega)$ ($\Psi_1 = \text{const}$, $\Psi_m = \text{const}$, $\Psi_2 = \text{const}$) для двигателя АИР160S2

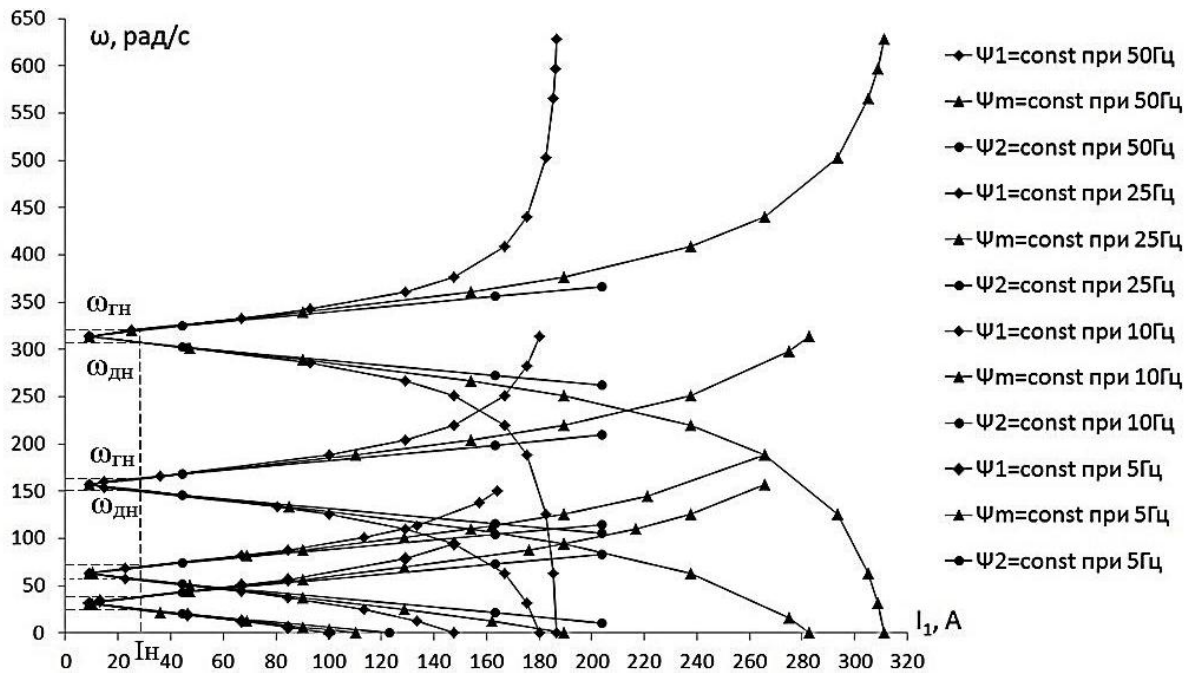


Рис. 7. Электромеханические характеристики при разных значениях частот напряжений обмотки статора $I_1=f(\omega)$ ($\Psi_1 = \text{const}$, $\Psi_m = \text{const}$, $\Psi_2 = \text{const}$) для двигателя АИР160S2

Как видим из полученных характеристик (рис.6...рис.8) при изменении частоты напряжения обмотки статора механические характеристики смещаются параллельно, т.е. жёсткость механических характеристик остаётся неизменной для всего диапазона

относительных частот α , поэтому все характеристики подобны (конгруэнтны). Из расчётов критических моментов выражения (8) (16) видно, что они не зависят от частоты статора и одинаковы как в двигательном, так и в генераторном режиме.

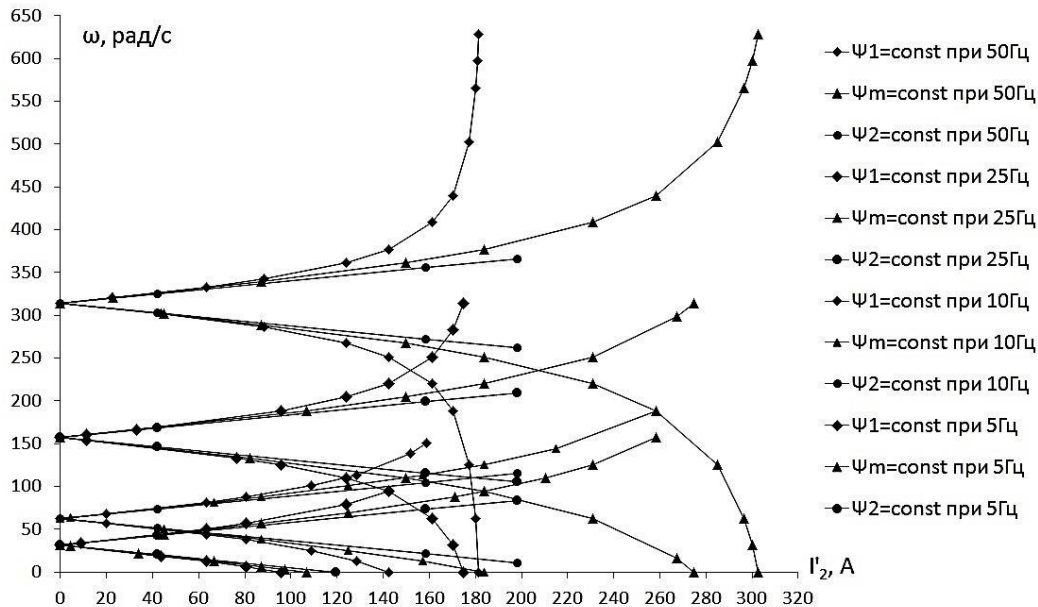


Рис.8. Электромеханические характеристики при разных значениях частот напряжений обмотки статора $\Gamma_2=f(\omega)$ ($\Psi_1=const$, $\Psi_m=const$, $\Psi_2=const$) для двигателя АИР160S2

Выводы. Проведённые расчёты показывают, что при ограничении тока статора в пределах $1 \dots 1,5 I_{1н}$ наибольший момент развивает АД, управляемый по закону $\Psi_2=const$ за ним идёт 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 расчёта частотно-регулируемого асинхронного электропривода для производственных механизмов, расчёт 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 / А. Б. Виноградов // 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 / Расчёты по электроприводу производственных машин и механизмов: учебное пособие. – Минск: Техноперспектива, 2012. – 639с.
7. Прищепов М. А. Расчёт 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. М. Иванов, Е. М. Прищепова // Агропанорама, 2016. - №6. – с.20-30.
8. Чернышев А. Ю., Дементьев Ю. Н., Чернышев И. А. Электропривод переменного тока: учебное пособие; Томский Политехнический Университет. - Томск: Издательство Томского Политехнического университета, 2011. - 203 с.
9. Прищепов М. А. Расчёт 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 «Могилёвский завод «Электродвигатель» [Электронный ресурс]. –Режим доступа: <http://www.mez.by>. – Дата доступа: 15.01.2018г.

**РОЗРАХУНОК МЕХАНІЧНИХ І ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ
ХАРАКТЕРИСТИК АСИНХРОННИХ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ У
ДВИГУННОМУ ТА ГЕНЕРАТОРНОМУ РЕЖИМАХ
ПРИ ЧАСТОТНОМУ КЕРУВАННІ**

Прищепов М. О., Прищепова О. М., Иванов Д. М.

Анотація - у статті розглянуті питання, що стосуються частотно-регульованого асинхронного електроприводу. Наведено основні статичні закони частотного управління (закон сталості потокозчеплення статора, закон сталості потокозчеплення кола намагнічування, закон сталості потокозчеплення ротора). Для найбільш широко поширених законів стабілізації потокозчеплення статора, ротора, взаємодукції розроблені детальні алгоритми розрахунку статичних характеристик АД і проведено їх порівняння. Алгоритм розрахунку механічних і електромеханічних характеристик асинхронного двигуна при частотному регулюванні для $\Psi_2 = \text{const}$ за методикою Фіраго Б.І. В алгоритмі розрахунок



характеристик асинхронного двигуна проводиться на робочій ділянці механічної характеристики від $2 M_n$ до $-2 M_n$, тобто при зміні відносного моменту μ от 2 до -2. Виконані розрахунки показали, що при обмеженні струму статора в межах $1 \dots 1,5 I_{1n}$ асинхронний двигун розвиває максимальний момент при керування за законом $\Psi_2 = \text{const}$. Наступні значення максимального моменту при законах керування $\Psi_m = \text{const}$ та $\Psi_1 = \text{const}$ відповідно менші. Для цих законів побудовані механічні та електромеханічні характеристики для номінального режиму роботи на прикладі двигуна АИР160S2. Різниця моментів, котрі розвиваються незначна. Механічні характеристики асинхронного двигуна при однаковому обмеженні струму статора у вказаних межах практично ідентичні. На основі приведених розрахунків робиться висновок про те, що при розробці методики розрахунку частотно-регульованого асинхронного електроприводу для виробничих механізмів, розрахунок механічних і електромеханічних характеристик у межах вказаного діапазону зміни струму статора може здійснюватися при будь-якому законі стабілізації потоку збудження асинхронного двигуна.

CALCULATION OF MECHANICAL AND ELECTROMECHANICAL CHARACTERISTICS OF ASYNCHRONOUS ELECTRIC MOTORS IN MOTOR AND GENERATOR MODES AT FREQUENCY CONTROL

M. Pryshchepau, E. Pryshchepova, D. Ivanov

Summary

The article deals with questions relating to variable-frequency electric drive. The basic static laws of frequency control are listed (the law of constancy of the stator flux linkage, the law of constancy of the flux linkage of the magnetization chain, the law of constancy of the rotor flux linkage). For the most widespread laws of stabilization of the flow coupling (stator, rotor, mutual induction), detailed algorithms have been developed for calculating the static characteristics of an asynchronous motor and compared them.. Algorithm for calculating the mechanical and electromechanical characteristics of arterial pressure in frequency regulation for $\Psi_2 = \text{const}$ according to the Firago B.I. method. In the algorithm, the calculation of the characteristics of an asynchronous motor is carried out on the working section of the mechanical characteristic from $2 M_n$ to $-2 M_n$, i.e. when changing the relative moment μ from 2 to -2.. The calculations showed that when the stator current is limited to $1 \dots 1.5 I_{1n}$, the asynchronous motor develops the greatest moment, which is controlled by the law $\Psi_2 = \text{const}$ and according to the laws $\Psi_m = \text{const}$ and $\Psi_1 = \text{const}$. For these laws, mechanical and electromechanical characteristics for the nominal operating mode are built using the example of an АИР160S2.. The difference in points that develop is negligible. The mechanical characteristics of the asynchronous motor with the same stator current limit in the specified limit are almost identical. Based on the data obtained, the conclusion is that when developing methods for calculating a frequency-controlled asynchronous electric drive for production mechanisms, the calculation of mechanical and electromechanical characteristics within the specified range of stator current variation can be performed with any law of stabilization of the asynchronous motor's excitation flow.

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