

УДК 621.313.33:004

РАСЧЕТ СТАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ С КОРОТКОЗАМКНУТЫМ РОТОРОМ В ДВИГАТЕЛЬНОМ И ГЕНЕРАТОРНОМ РЕЖИМАХ ПРИ ЧАСТОТЕ НАПРЯЖЕНИЯ ПИТАНИЯ ОБМОТОК СТАТОРА ВЫШЕ НОМИНАЛЬНОЙ

М.А. Прищепов,

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

Д.М. Иванов,

аспирант, каф. электрооборудования сельскохозяйственных предприятий БГАТУ

Е.М. Прищепова,

ст. преподаватель каф. электрооборудования сельскохозяйственных предприятий БГАТУ

В статье рассмотрены методики расчета статических характеристик асинхронных электродвигателей с короткозамкнутым ротором в двигательном и генераторном режимах при частоте напряжения питания обмоток статора выше номинальной, разработаны алгоритмы расчета статических характеристик АД и проведено их сравнение.

Ключевые слова: асинхронный двигатель, частотно-регулируемый электропривод, статические характеристики, алгоритмы расчета.

The article deals with the calculation methods of static characteristics of asynchronous electric motors with short-circuited rotor in the motor and generator modes with the frequency of the supply voltage of the stator windings higher than the rated voltage. Algorithms for calculating the static characteristics of blood pressure are developed and their comparison is given.

Keywords: asynchronous motor, frequency-controlled electric drive, static characteristics, calculation algorithms.

Введение

Частотный метод регулирования скорости на сегодняшний день является наиболее широко распространенным, так как позволяет решать многие технические задачи привода в технологических процессах просто и эффективно. Все возрастающие требования к качеству и эффективности технологических процессов требуют и от систем электропривода высоких технических и экономических показателей управления, обеспечения широкого диапазона нагрузочных моментов и угловых скоростей, что часто требует использования двухзонного регулирования при частотном управлении, поэтому вопрос расчета статических характеристик асинхронного двигателя (АД) при частоте напряжения питания обмоток статора АД выше номинальной является весьма актуальным и требует обоснованного анализа и более подробного рассмотрения на конкретных примерах и расчетах.

Основная часть

Большинство современных систем частотного управления, как правило, предусматривают две зоны регулирования частоты (угловой скорости):

– вниз от номинальной – наиболее часто, при стабилизации потока возбуждения в зависимости от принятого закона управления (стабилизации потокосцепления статора Ψ_1 , взаимоиндукции Ψ_m , ротора Ψ_2);

– вверх от номинальной – при неизменной величине напряжения на статоре $U_1=U_{1H}$ и его частоте выше номинальной, т.е. $f_1>f_H$

Регулирование в зоне скоростей ниже номинальных и соответствующие ей механические и электро-механические характеристики были рассмотрены авторами в работах [1] и [2].

В данной статье рассмотрим зону регулирования угловой скорости выше номинальной $\omega_H \leq \omega \leq \omega_{MAX}$, в которой регулирование скорости осуществляют при постоянной допустимой мощности.

Для значительного расширения диапазона регулирования скорости во многих производственных механизмах требуется повышение угловой скорости АД привода выше номинальной. Придерживаться соотношения $U_1/f_1 = U_{1H}/f_H = const$ в данном диапазоне не представляется возможным, так как при наиболее распространенной схеме преобразователя частоты с автономным инвертором на его выходе невозможно получить напряжение выше напряжения питающей сети, да и АД привода по техническим возможностям не допус-

кает питания обмоток его статора напряжением выше номинального. Поэтому в этой зоне используется закон частотного управления при $U_1=U_{1H}$.

Для анализа изменения магнитного потока при регулировании угловой скорости в зоне выше номинальной воспользуемся выражением для относительного значения основного магнитного потока АД Φ_m , полученным в работе [3]:

$$\frac{\Phi_m}{\Phi_{mH}} = \left| \frac{1}{\alpha} - \frac{\vec{I}_1}{\vec{U}_{1H}} \cdot \left(\frac{r_1}{\alpha} + jx_1 \right) \right|, \quad (1)$$

где Φ_m – основной магнитный поток при текущих значениях частоты f_1 напряжения питания U_1 статора АД, Вб;

Φ_{mH} – основной магнитный поток при номинальных значениях частоты f_H напряжения питания U_{1H} статора АД, Вб;

I_1 – текущий ток обмоток статора АД, А;

$\alpha = f_1/f_H$ – относительное значение частоты питающего напряжения, о.е.;

r_1 – активное сопротивление обмотки статора АД, Ом;

x_1 – индуктивное сопротивление рассеяния обмотки статора АД, Ом.

Из выражения (1) очевидно, что при токе статора $I_1 \approx 0$ относительный поток изменяется обратно пропорционально частоте, а под нагрузкой при возрастании тока I_1 поток будет снижаться медленнее.

Уменьшение потока при увеличении частоты f_1 напряжения питания U_1 статора АД вызвано также уменьшением тока статора I_1 вследствие возрастания индуктивного сопротивления рассеяния обмоток статора x_1 , которое в этом режиме играет такую же роль, как и активное сопротивление r_1 при управлении по закону $U_1/f_1 = U_{1H}/f_H = \text{const}$.

Для анализа изменения механических и электро-механических характеристик АД проведем их расчет и построение при различных значениях относительной частоты α и напряжении питания статора U_1 по рассмотренным ранее в работе [1] методикам, изложенным в работах [4, 5] и работах [6, 7].

Некоторое несовпадение характеристик, рассмотренных по указанным выше методикам, объясняется тем, что ЭДС статора по методике, изложенной в работах [6, 7], рассчитывалась из векторной диаграммы геометрически, а по методике, изложенной в работах [4, 5], из алгебраического выражения. Тогда, основные выражения, используемые при построении характеристик по методике, изложенной в работах [4, 5], будут следующими:

– механическая характеристика $\omega=f(M)$ АД

$$M = \frac{3 \cdot U_1 \cdot r_2'}{\omega_0 \cdot s \left[x_K^2 \cdot \alpha^2 + \left(r_{1\text{экв}} + \frac{r_2'}{s} \right) + \left(\frac{r_{1\text{экв}} \cdot r_2'}{s \cdot x_u \cdot \alpha^2} \right)^2 \right]}, \quad (2)$$

где r_2' – активное сопротивление обмотки ротора, приведенное к обмотке статора, Ом;

$\omega_0 = 2 \cdot \pi \cdot f_1/p$ – синхронная угловая скорость магнитного поля статора при текущем значении частоты f_1 питающего напряжения U_1 статора АД, рад/с;

s – скольжение АД, о.е.;

x_K – индуктивное сопротивление короткого замыкания, Ом;

x_u – индуктивное сопротивление ветви намагничивания, Ом;

$r_{1\text{экв}}=r_1 - k_{KM} \cdot r_1$ – эквивалентное активное сопротивление цепи обмотки статора [4], где k_{KM} – коэффициент положительной обратной связи по току изменяется от 0 до 1.

– электро-механическая характеристика $\omega=f(I_2')$ для данного закона регулирования скорости

$$I_2' = \frac{U_1}{\sqrt{\left(r_{1\text{экв}} + \frac{r_2'}{s} \right) + x_K^2 \cdot \alpha^2 + \left(\frac{r_{1\text{экв}} \cdot r_2'}{s \cdot x_u \cdot \alpha^2} \right)^2}} \quad (3)$$

– электро-механическая характеристика тока статора АД $\omega=f(I_1)$ в соответствии с выражением:

$$I_1 = \sqrt{I_0^2 + (I_2')^2 + 2 \cdot I_0 \cdot I_2' \cdot \sin\varphi_2}, \quad (4)$$

где $I_0 = \frac{U_1}{\sqrt{r_{1\text{экв}}^2 + (x_1 \cdot \alpha + x_u \cdot \alpha)^2}}$ – ток холостого хода, А;

$\sin\varphi_2 = \frac{x_K \cdot \alpha}{\sqrt{\left(r_{1\text{экв}} + \frac{r_2'}{s} \right)^2 + x_K^2 \cdot \alpha^2}}$ – синус угла между

вектором напряжения питания статора \vec{U}_1 и вектором тока ротора \vec{I}_2' , рад.

Детальный алгоритм расчета механических и электро-механических характеристик АД при частотном регулировании для закона $U_1=U_{1H}$ и относительной частоте напряжения питания статора $\alpha \geq 1$ по методике [4, 5] представлен на рисунке 1.

В работах [6, 7] при расчете электро-механических характеристик, токи рассчитываются через полное сопротивление цепи АД ($Z'_{\text{АД}}$).

Выражения для построения характеристик будут иметь следующий вид:

– механическая характеристика $\omega=f(M)$ АД:

$$M = \frac{2 \cdot M_K}{\alpha^2 \cdot \left(\frac{s_a}{s_{\text{ак}}} + \frac{s_{\text{ак}}}{s_a} \right)}, \quad (5)$$

$$\omega = \omega_{0H} \cdot (\alpha - s_a)$$

где M_K – критический момент двигателя, Н·м;

s_a – абсолютное скольжение;

$\omega_{0H} = 2 \cdot \pi \cdot f_u/p$ – синхронная угловая скорость магнитного поля статора при номинальной частоте f_H питающего напряжения статора АД, рад/с;

– электро-механическая характеристика $\omega=f(I_1)$ для данного закона регулирования скорости:

$$I_1 = \frac{U_{1H}}{Z'_{\text{АД}}}, \quad (6)$$

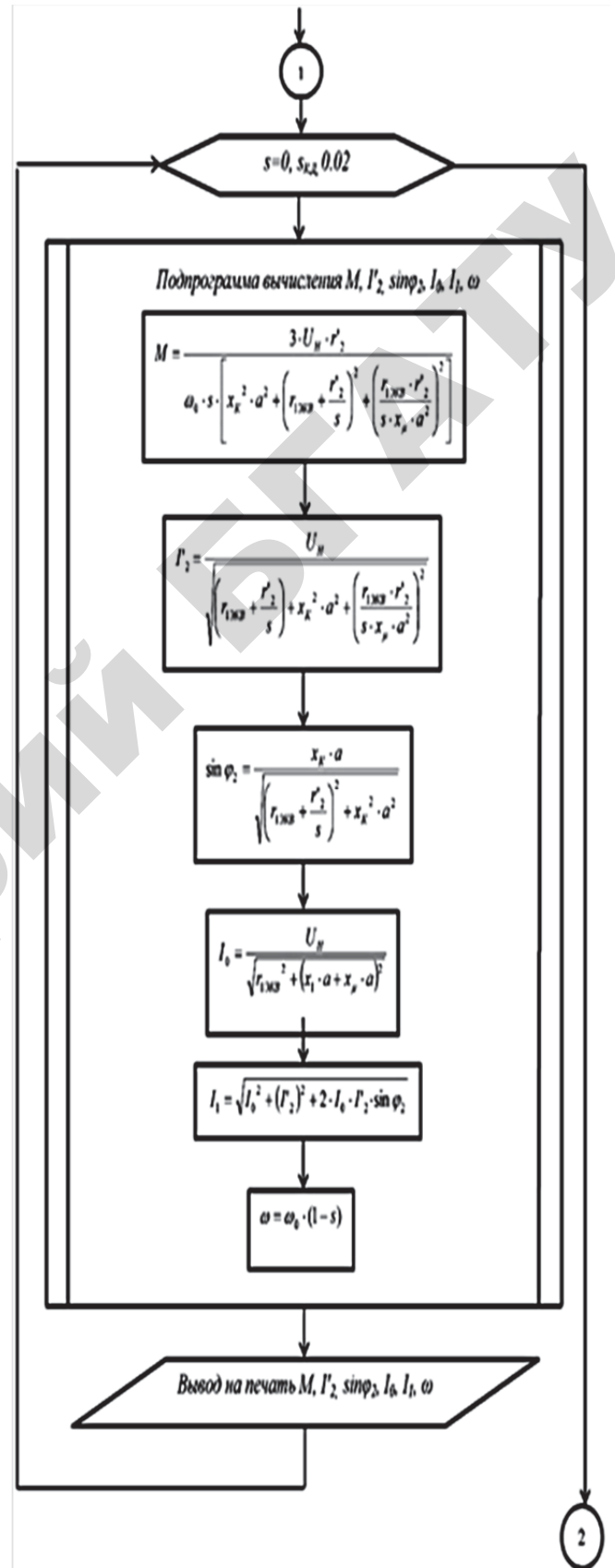
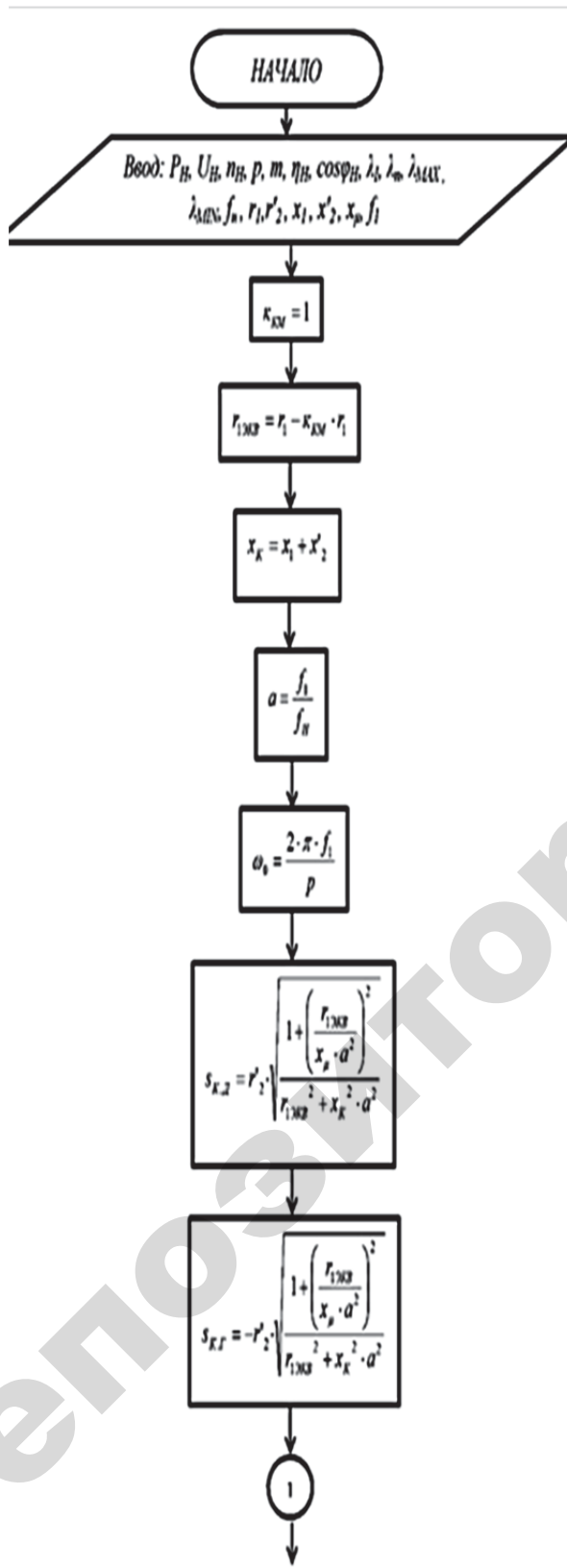
где $Z'_{\text{АД}}$ – полное сопротивление цепи АД при данном абсолютном скольжении s_a и относительной частоте α , Ом.

Полное сопротивление цепи АД при данном абсолютном скольжении s_a и относительной частоте α :

$$Z'_{\text{АД}} = \sqrt{R_{\text{АД}}^2 + X_{\text{АД}}^2}, \quad (7)$$

где $R_{\text{АД}}$ – активное сопротивление эквивалентной схемы АД, Ом;

$X_{\text{АД}}$ – индуктивное сопротивление эквивалентной схемы АД, Ом.



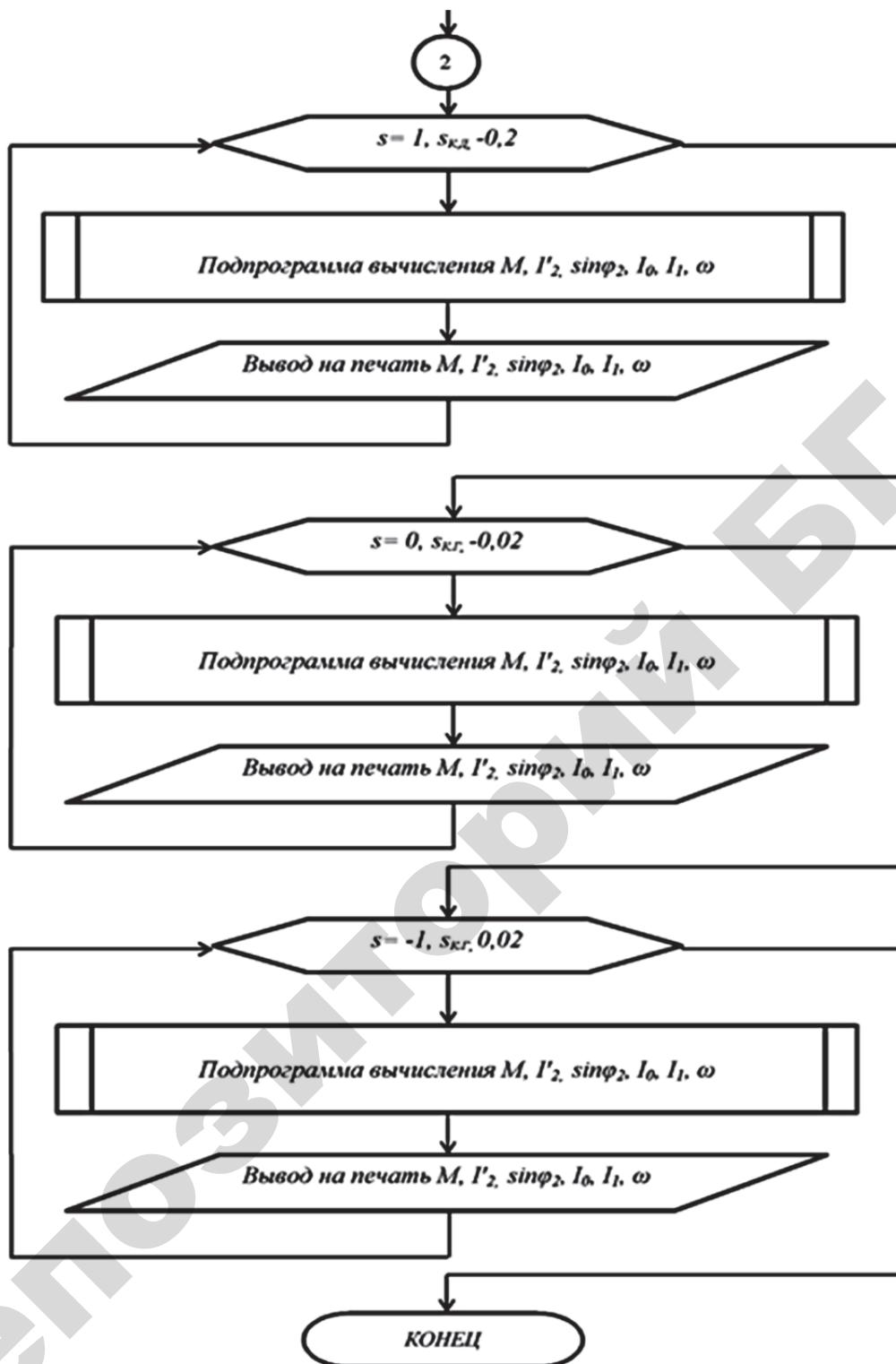


Рисунок 1. Алгоритм расчета механических и электромеханических характеристик АД при частотном регулировании для $U_1 = U_{1H}$ по методике [4, 5] и относительной частоте напряжения питания статора $\alpha \geq 1$:

где P_H – номинальная мощность двигателя, кВт;
 U_H – номинальное напряжение питания (фазное), В;
 n_H – номинальная частота вращения ротора АД, об/мин;

η_H – номинальный коэффициент полезного действия двигателя, %;
 λ_{MAX} – кратность максимального момента к номинальному, о.е;

$\cos\varphi_H$ – номинальный коэффициент мощности, о.е;
 λ_{II} – 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, 50 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;
 x_k – индуктивное сопротивление короткого замыкания, Ом;
 f_1 – текущая частота переменного тока питающей сети, Гц;
 k_{KM} – коэффициент положительной обратной связи по току (при полной IR-компенсации $k_{KM} = 1$);
 $r_{1ЭKB}$ – эквивалентное активное сопротивление цепи обмотки статора, Ом;
 α – относительная частота питающего напряжения, о.е.;
 ω_0 – синхронная угловая скорость магнитного поля статора при текущем значении частоты f_1 питающего напряжения статора АД, рад/с;
 s – скольжение АД, о.е.;
 $s_{к.д.}$ – критическое скольжение в двигательном режиме, о.е.;
 $s_{к.г.}$ – критическое скольжение в генераторном режиме о.е.;
 M – расчетный момент механической характеристики АД, Н·м;
 I'_2 – расчетный ток ротора АД, приведенный к обмотке статора, А;
 $\sin\varphi_2$ – синус угла между вектором напряжения питания \vec{U}_1 и вектором тока ротора \vec{I}'_2 , рад;
 I_0 – ток холостого хода, А;
 I_1 – расчетный ток статора АД искусственной электромеханической характеристики, А;
 ω – текущее значение угловой скорости ротора АД, с⁻¹.

Активное сопротивление эквивалентной схемы АД равно:

$R_{АД} = r_1 + \alpha \cdot R_{В,А}$, (8)
 где $R_{В,А}$ – «внутреннее» активное сопротивление АД при номинальной частоте и данном значении абсолютного скольжения s_a , Ом.

Индуктивное сопротивление эквивалентной схемы АД равно:

$$X_{АД} = \alpha \cdot (x_1 + X_{В,А}),$$
 (9)

где $X_{В,А}$ – «внутреннее» индуктивное сопротивление АД при номинальной частоте и данном значении абсолютного скольжения s_a , Ом.

«Внутреннее» активное сопротивление АД при номинальной частоте и данном значении абсолютного скольжения s_a :

$$R_{В,А} = \frac{x_\mu^2 \cdot r'_2 \cdot s_a}{r'_2{}^2 + (x'_2 + x_\mu)^2 \cdot s_a^2} .$$
 (10)

«Внутреннее» индуктивное сопротивление АД при номинальной частоте и данном значении абсолютного скольжения s_a :

$$X_{В,А} = x_\mu \cdot \frac{r'_2 + x'_2 \cdot (x'_2 + x_\mu) \cdot s_a^2}{r'_2{}^2 + (x'_2 + x_\mu)^2 \cdot s_a^2} ;$$
 (11)

– электромеханическая характеристика $\omega=f(I'_2)$ для данного закона регулирования скорости:

$$I'_2 = \frac{U_{1H}}{\sqrt{\left(r_1 + \frac{\alpha \cdot r'_2}{s_a}\right)^2 + (\alpha \cdot x'_{к.ном})^2}} .$$
 (12)

Алгоритм расчета механических и электромеханических характеристик АД при частотном регулировании для закона $U_1=U_{1H}$ и относительной частоте $\alpha \geq 1$ по методике [6, 7] представлен на рисунке 2.

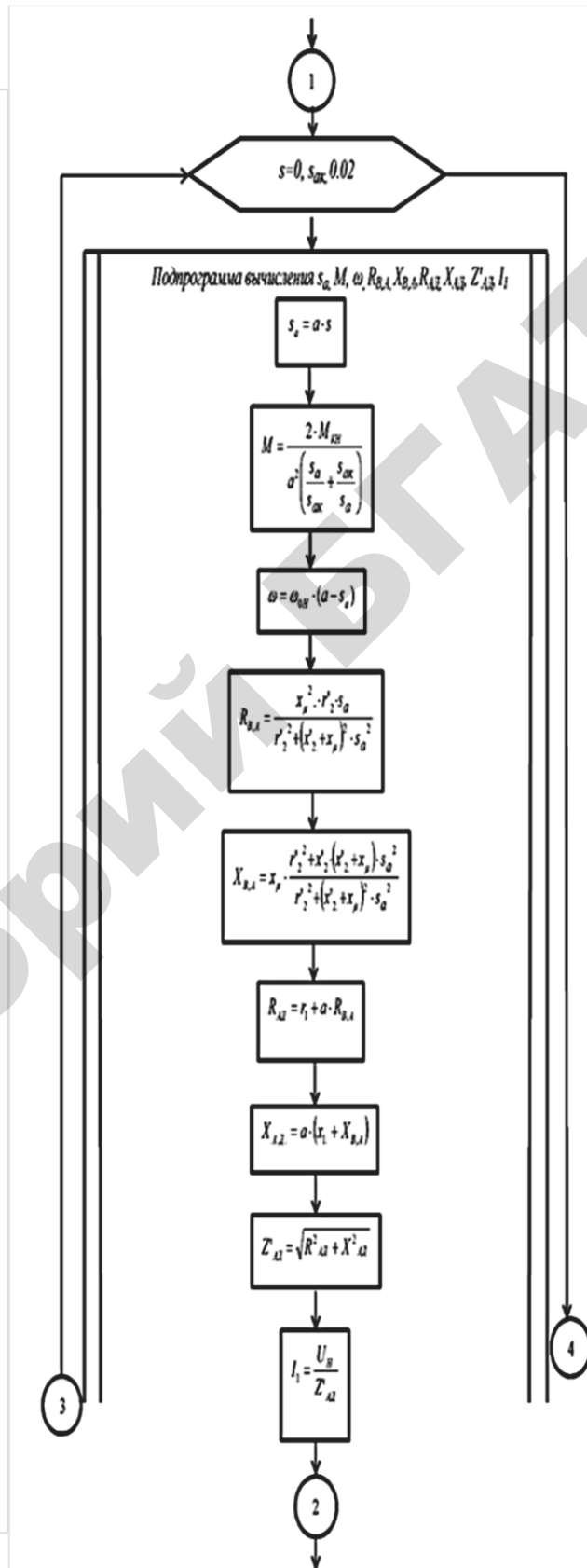
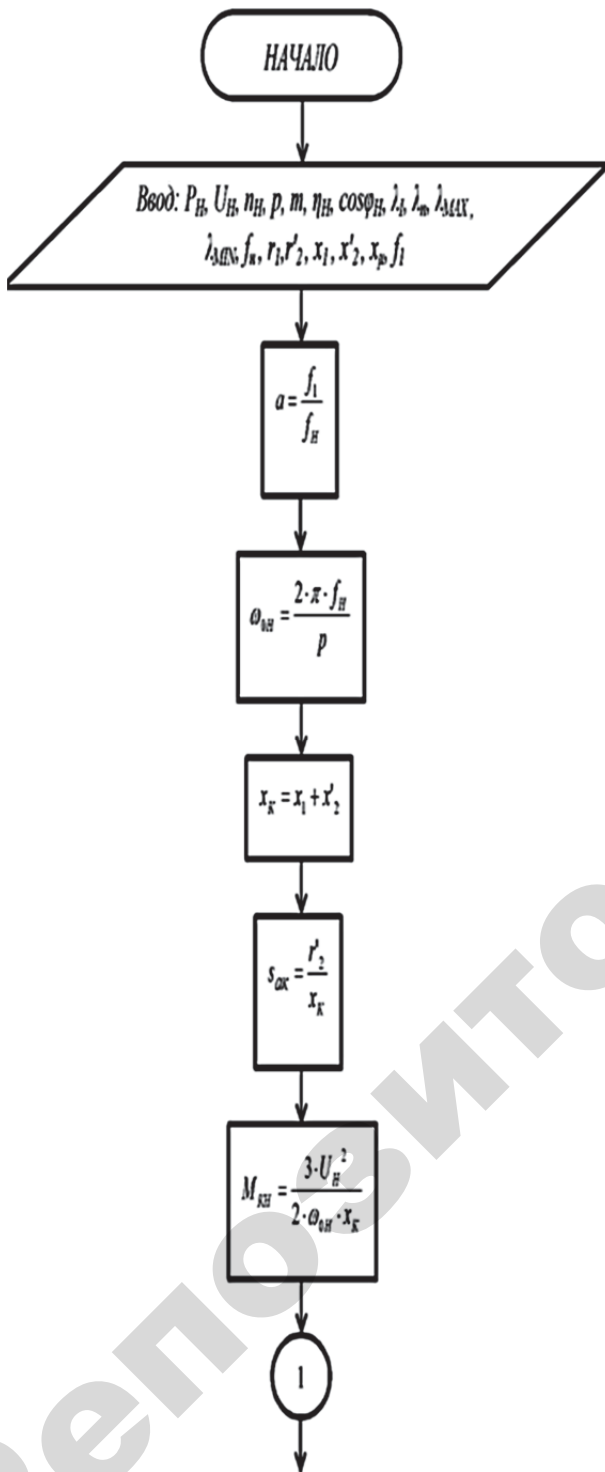
Остальные встречающиеся обозначения в этом алгоритме (рис. 2) совпадают с обозначениями алгоритма, приведенного на рисунке 1.

Далее по приведенным алгоритмам построим механические (рис. 3) и электромеханические (рис. 4, 5) характеристики для разных частот и напряжений на примере двигателя серии АИР с техническими характеристиками, приведенными в (табл. 1).

Сравнение полученных механических характеристик показывает (рис. 3) их практически полное совпадение. Некоторое несоответствие электромеханических характеристик $\omega=f(I_1)$ (рис. 4) и $\omega=f(I'_2)$ (рис. 5) возникает из-за того, что ЭДС статора в одной методике рассчитывается из векторной диаграммы, а во второй – из алгебраического выражения.

Таблица 1. Технические характеристики электродвигателя [8]

Тип	Р, кВт	$n_H, \text{мин}^{-1}$	КПД, %	$\cos\varphi$	$\lambda_\gamma = \frac{I_{II}}{I_H}$	$\lambda_H = \frac{M_{II}}{M_H}$	$\lambda_{MAX} = \frac{M_K}{M_H}$	$\lambda_{MIN} = \frac{M_{MIN}}{M_H}$
АИР160S2	15	2930	88,7	0,89	7,0	2,1	3,0	2,0



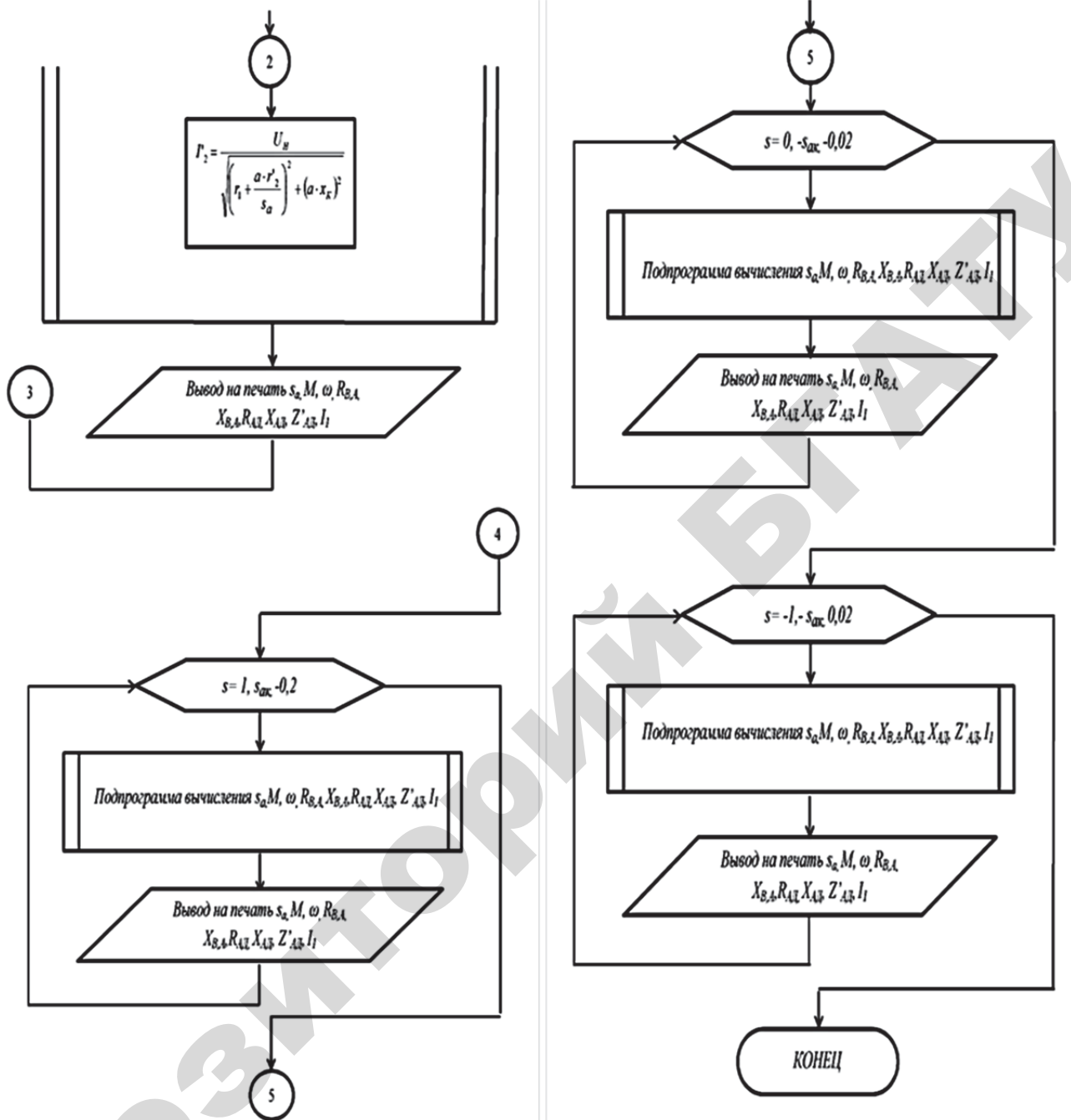


Рисунок 2. Алгоритм расчета механических и электромеханических характеристик АД при частотном регулировании для $U_1 = U_{1H}$ по методике [6, 7] и относительной частоте напряжения питания статора $\alpha \geq 1$:

где ω_{0H} – синхронная угловая скорость магнитного поля статора АД при номинальной частоте f_n напряжения питания, рад/с;

$s_{ак}$ – абсолютное критическое скольжение, о.е.;

M_{KH} – критический момент двигателя при номинальной частоте и напряжении питания АД, Н·м;

s_a – абсолютное скольжение, о.е.;

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

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

$R_{AЛ}$ – активное сопротивление эквивалентной схемы АД, Ом;

$X_{AЛ}$ – индуктивное сопротивление эквивалентной схемы АД, Ом;

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

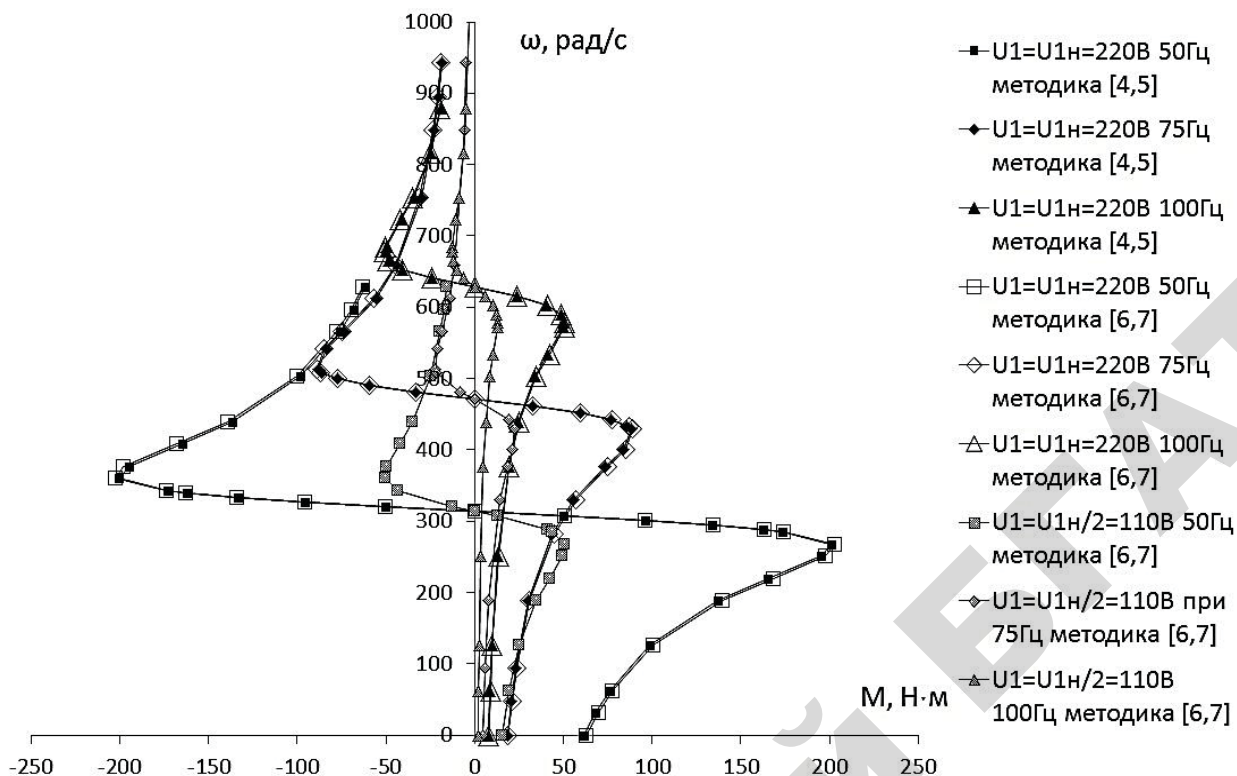


Рисунок 3. Механические характеристики АД $\omega=f(M)$ при частотном регулировании для $U_1 = U_{1н}$ ($U_1 = U_{1н}/2$) и относительной частоте напряжения статора $\alpha \geq 1$ по методикам [4, 5] и [6, 7] для двигателя АИР160S2

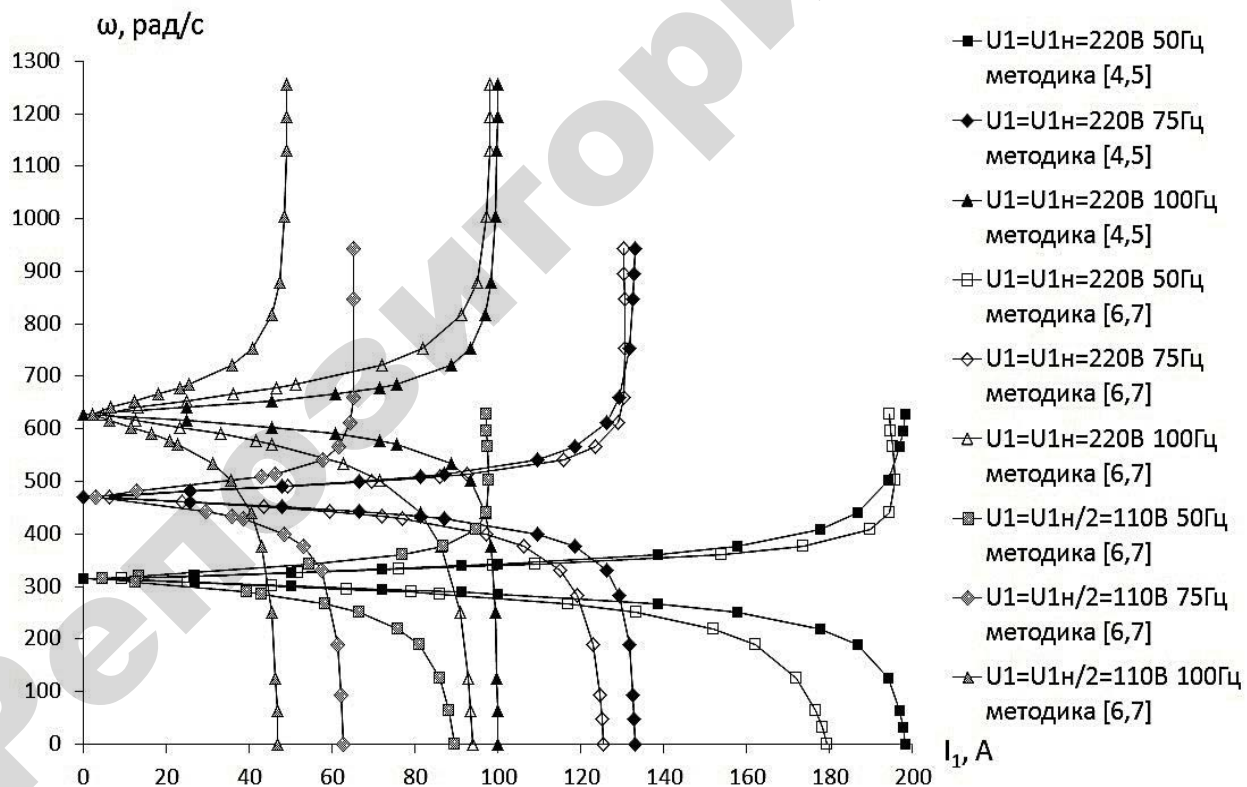


Рисунок 4. Электромеханические характеристики АД $\omega=f(I_1)$ при частотном регулировании для $U_1 = U_{1н}$ ($U_1 = U_{1н}/2$) и относительной частоте напряжения статора $\alpha \geq 1$ по методикам [4, 5] и [6, 7] для двигателя АИР160S2

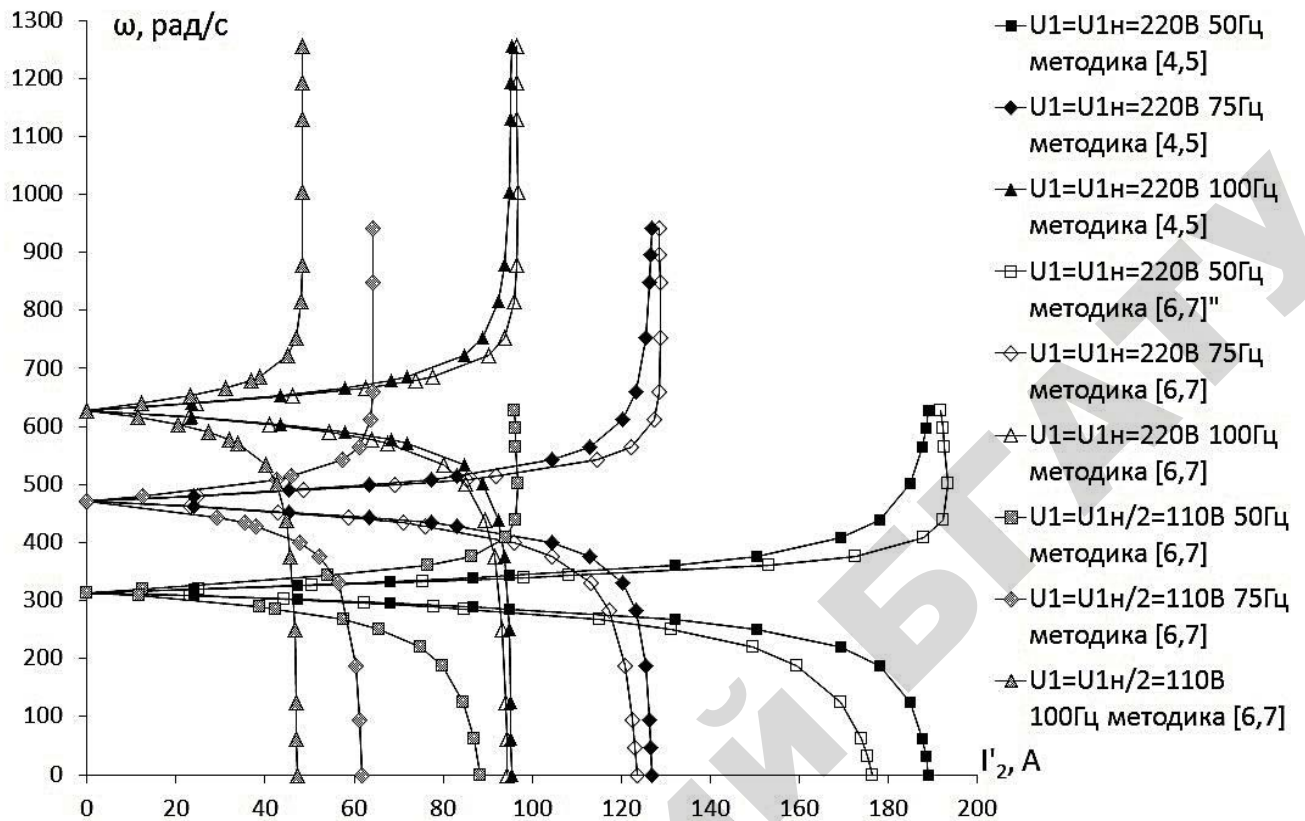


Рисунок 5. Электромеханические характеристики АД $\omega=f(I'_2)$ при частотном регулировании для $U_1 = U_{1н}$ ($U_1 = U_{1н}/2$) и относительной частоте напряжения статора $\alpha \geq 1$ по методикам [4, 5] и [6, 7] для двигателя АИР160S2

Заключение

Рассмотрев результаты расчета характеристик АД в диапазоне угловых скоростей, больших номинальной, по приведенным выше методикам, можно утверждать, что они имеют хорошее совпадение. При этом регулирование угловой скорости осуществляется при постоянной мощности, а критический момент уменьшается обратно пропорционально квадрату напряжения питания статора U_1 и квадрату его относительной частоты α .

**СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ
ЛИТЕРАТУРЫ**

1. 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.М. Иванов, Е.М. Прищепова // Агрорама, 2016. – №6. – С. 20-30.
2. Прищепов, М.А. Расчет статических характеристик асинхронных электродвигателей с короткозамкнутым ротором в двигательном и генераторном режимах при частотном управлении скоростью и стабилизации потока возбуждения / М.А. Прищепов,

Е.М. Прищепова, Д.М. Иванов // Агрорама, 2017. – №2. – С. 26-36.

3. Усольцев, А.А. Частотное управление асинхронными двигателями: учеб. пособие / А.А. Усольцев. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2006. – 94 с.
4. Чернышев, А.Ю. Электропривод переменного тока: учеб. пособие / А.Ю. Чернышев, Ю.Н. Дементьев, И.А. Чернышев.–Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2011. – 203 с.
5. Удут, Л.С. Проектирование и исследование автоматизированных электроприводов: ч. 8. Асинхронный частотно-регулируемый электропривод: учеб. пособие / Л.С. Удут, Н.В. Кояин, О.П. Мальцева. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2009. – 448 с.
6. Фираго, Б.И / Регулируемые электроприводы переменного тока / Б.И. Фираго, Л.Б. Павлячик. – Мн.: Технопerspective, 2006. – 363 с.
7. Фираго, Б.И / Расчеты по электроприводу производственных машин и механизмов: учеб. пособие / Б.И. Фираго. – Минск: Технопerspective, 2012. – 639 с.
8. Асинхронные двигатели: каталог ОАО «Могилевский завод «Электродвигатель» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.mez.by>. – Дата доступа: 19.03.2017.

ПОСТУПИЛА В РЕДАКЦИЮ 12.04.2017