

УДК 621.313.33:004

## 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,**

*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 вопросы, касающиеся частотно-регулируемого асинхронного электропривода. Дано определение основных законов регулирования и проведено сравнение искусственных механических и электромеханических характеристик электродвигателей при стабилизации потока возбуждения статора.*

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

*The article deals with the questions relating to variable-frequency electric drive. The definition of the basic control laws is given; a comparison of artificial mechanical and electromechanical characteristics of the motors with the stabilization of the flow of excitation of the stator is carried out.*

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

### Введение

За последние два десятилетия регулируемый асинхронный электропривод существенно продвинулся в своем развитии, что позволило практически полностью вытеснить из многих технологических процессов привод постоянного тока. Это в значительной степени связано с последними достижениями в области силовой электроники и микропроцессорной техники, на основе которых разработаны статические преобразователи частоты, обеспечивающие частотное управление асинхронными двигателями (АД) с короткозамкнутым ротором с высокими энергетическими и динамическими показателями в сравнении с другими приводами и способами управления. Высокая скорость коммутации силовых транзисторов и скорость обработки информации современными микропроцессорами позволили разработать современные алгоритмы управления системой «преобразователь частоты – асинхронный двигатель».

### Основная часть

Частотный метод регулирования угловой скорости АД является наиболее широко используемым. Принцип частотного метода регулирования скорости АД заключается в том, что изменяя частоту  $f_1$  питающего напряжения  $U_1$  при неизменном числе пар полюсов  $p$ , можно

изменять синхронную угловую скорость магнитного поля статора  $\omega_0$  в соответствии с выражением:

$$\omega_0 = \frac{2 \cdot \pi \cdot f_1}{p}. \quad (1)$$

Таким образом, изменяя частоту  $f_1$  питающего напряжения  $U_1$ , можно получить семейство искусственных механических характеристик АД. При этом следует учесть, что с изменением частоты  $f_1$  питающего напряжения  $U_1$  изменяется и величина потока возбуждения  $\Phi_1$  АД, пропорционально отношению питающего напряжения  $U_1$  к его частоте  $f_1$ , т.е.  $\Phi_1 \approx U_1/f_1$ . Поэтому для получения высоких энергетических показателей электропривода (ЭП) одновременно с изменением частоты  $f_1$  питающего напряжения  $U_1$  нужно регулировать и его величину, причем регулирование величины напряжения  $U_1$  следует производить таким образом, чтобы абсолютное скольжение АД на искусственной механической характеристике было близким к номинальному абсолютному скольжению на естественной характеристике. Для обеспечения этого условия при разработке ЭП необходимо согласовывать искусственные механические характеристики АД с его нагрузкой, т.е. с механическими характеристиками производственных механизмов.

По характеру зависимости статического момента  $M_c$  на рабочем валу механизма от его угловой скорости  $M_c=f(\omega)$  можно выделить следующие основные группы механических характеристик производственных механизмов:

- не зависящие от угловой скорости механические характеристики;
- нелинейно-спадающие механические характеристики или работающие с постоянной мощностью;
- нелинейно-возрастающие механические характеристики или вентиляторные нагрузки.

Все эти группы зависимостей статического момента с определенным приближением можно описать формулой:

$$M_c = M_H \cdot \left( \frac{\omega_1}{\omega_{1H}} \right)^x \approx M_H \cdot \left( \frac{f_1}{f_{1H}} \right)^x, \quad (2)$$

где  $\omega_1, f_1$  – угловая скорость на рабочем валу механизма и соответствующая ей частота питающего напряжения статора АД, рад/с, Гц;

$\omega_{1H}, f_{1H}$  – номинальная угловая скорость на рабочем валу механизма и соответствующая ей номинальная частота питающего напряжения статора АД, рад/с, Гц;

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

Соответственно, при значениях показателя степени  $x=0, x=-1, x=2$ , подставив эту формулу в известную зависимость академика М.П. Костенко, т.е. зависимость управления напряжением в функции его частоты и момента нагрузки:

$$\frac{U_1}{U_{1H}} = \frac{f_1}{f_{1H}} \sqrt{\frac{M_c}{M_H}}, \quad (3)$$

где  $U_{1H}$  – номинальное напряжение питания статора, В; можно сформулировать зависимости управления электромагнитным моментом двигателей в частотно-регулируемых асинхронных ЭП для соответствующих групп механических характеристик. Например, при постоянном статическом моменте нагрузки (для  $x=0$ ) управление напряжением  $U_1$  статора АД и частотой  $f_1$  должно осуществляться по закону:

$$\frac{U_1}{f_1} = \frac{U_{1H}}{f_{1H}} = const. \quad (4)$$

При нелинейно-спадающей нагрузке (для  $x=-1$ ) – закон управления напряжением  $U_1$  и частотой  $f_1$  принимает вид:

$$\frac{U_1}{\sqrt{f_1}} = \frac{U_{1H}}{\sqrt{f_{1H}}} = const. \quad (5)$$

При вентиляторной нагрузке (для  $x=2$ ) напряжение  $U_1$  и частота  $f_1$  должны изменяться в соответствии

с зависимостью:

$$\frac{U_1}{f_1^2} = \frac{U_{1H}}{f_{1H}^2} = const. \quad (6)$$

Полученные зависимости указывают на то, как надо изменять напряжение, если АД будет работать не при номинальной частоте  $f_{1H}$ , а при новом, пониженном ее значении  $f_1$  с учетом свойства нагрузки. Если нагрузка с уменьшением частоты также уменьшается из-за сопутствующего почти пропорционально частоте уменьшения угловой скорости, то нет смысла сохранять поток двигателя на том же уровне. Его можно уменьшить настолько, чтобы только сохранить имевшийся запас статической устойчивости.

Все полученные выше зависимости справедливы для идеализированного двигателя, в котором сделаны следующие основные допущения:

- активное сопротивление обмотки статора равно нулю;
- магнитная система АД не насыщена;
- отсутствуют потери в стали магнитной системы АД.

Далее рассмотрим влияние сделанных допущений на механические и электромеханические характеристики АД. Для этого возьмем двигатель серии АИР с техническими характеристиками, приведенными в табл. 1, и построим для него искусственные механические и электромеханические характеристики, в двигателем и генераторном режимах при регулировании по закону  $U/f=const$  и значениях частоты напряжения обмотки статора 50,25,10,5 Гц (рис. 1...рис. 3).

Механическая характеристика  $M=f(\omega)$  АД при переменных значениях величины и частоты напряжения питания определяется выражением [2]:

$$M = \frac{3 \cdot U_1 \cdot r'_2}{\omega_0 \cdot s \cdot \left[ x_k^2 \cdot a^2 + \left( r_1 + \frac{r'_2}{s} \right)^2 + \left( \frac{r_1 \cdot r'_2}{s \cdot x_\mu \cdot a^2} \right)^2 \right]}, \quad (7)$$

где  $U_1$  – фазное напряжение питания обмоток статора асинхронного двигателя, В;

$a=f/f_{1H}$  – относительное значение частоты питающего напряжения;

$r_1$  – активное сопротивление обмотки статора, Ом;

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

$x_k$  – индуктивное сопротивление короткого замыкания, Ом;

$x_\mu$  – индуктивное сопротивление ветви намагничивания, Ом;

$s$  – скольжение АД, о.е.

Электромеханическая характеристика тока ротора, приведенного к обмотке статора АД  $I'_2=f(\omega)$ , рас-

Таблица 1. Технические характеристики электродвигателя [1]

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

считывается в соответствии с выражением:

$$I'_2 = \frac{U_1}{\sqrt{\left(r_1 + \frac{r'_2}{s}\right) + x_k^2 \cdot a^2 + \left(\frac{r_1 \cdot r'_2}{s \cdot x_\mu \cdot a^2}\right)^2}}, \quad (8)$$

а электромеханическая характеристика тока статора АД  $I_1=f(\omega)$  в соответствии с выражением:

$$I_1 = \sqrt{I_0^2 + (I'_2)^2 + 2 \cdot I_0 \cdot I'_2 \cdot \sin \phi_2}, \quad (9)$$

где  $I_0 = \frac{U_1}{\sqrt{r_1^2 + (x_1 + x_\mu)^2 \cdot a^2}}$  – ток холостого хода, А;

$$\sin \phi_2 = \frac{x_k \cdot a}{\sqrt{\left(r_1 + \frac{r'_2}{s}\right) + x_k^2 \cdot a^2}} \text{ – синус угла между}$$

вектором напряжения питания статора  $\vec{U}_1$  и вектором тока ротора  $\vec{I}'_2$ , рад; (11)

Анализ полученных механических характеристик АД (рис.1) показывает, что максимальный или критический момент в генераторном режиме больше, чем в двигательном при одной и той же частоте  $f_1$  напряжения питания  $U_1$  статора, и в противоположность двигательному режиму возрастает с понижением частоты  $f_1$  и напряжения  $U_1$  статора АД. Это явление обусловлено возрастающей ролью активного сопротивления статора. При относительной частоте напряжения питания статора  $\alpha=1\dots0,5$  двигатель работает в условиях, близких к номинальным, т.е. поток возбуждения практически остается неизменным в силу незначительных относительных потерь в стато-

ре. При дальнейшем уменьшении  $\alpha$  происходит ошутимое снижение потока возбуждения, обусловленное значительными относительными потерями в активном сопротивлении статора, так как ток статора  $I_1 \equiv M_c = const$ . Соответственно, при таком снижении частоты  $f_1$  и величины напряжения  $U_1$  статора в двигательном режиме значительно снижается развиваемый критический момент на валу двигателя, а в генераторном режиме при преобразовании механической энергии в электрическую с рекуперацией ее в сеть, он значительно возрастает, тем самым покрывая относительно возрастающие потери в статоре АД. В итоге это снижает диапазон регулирования скорости АД.

Анализ электромеханических характеристик АД  $I_1=f(\omega)$  и  $I'_2=f(\omega)$  (рис. 2, 3), полученных уменьшением частоты и величины напряжения статора при соотношении  $U/f=const$ , показывает, что при этом значительно снижаются токи  $I_1$  и  $I'_2$ , а соответственно и допустимый диапазон нагрузок. Для устранения указанного недостатка (расширения диапазона регулирования скорости АД) необходимо использовать замкнутые системы управления с различными сигналами обратной связи. Такими сигналами могут быть ток и ЭДС статора, магнитный поток АД, частота вращения ротора или его абсолютное скольжение. Наиболее доступным сигналом для частотного управления является ток статора, и, как правило, он и используется в большинстве приводов широкого применения. При постоянном значении напряжения статора механические характеристики АД существенно нелинейны, так как изменение нагрузки на валу двигателя вызывает изменение токов ротора и статора и связанных с ними магнитных потоков, создающих электромагнитный момент АД. Однако осуществляя питание двигателя от регулируемого источника напряжения  $U_1$  можно стабилизировать или регулировать тот или иной магнитный поток АД.

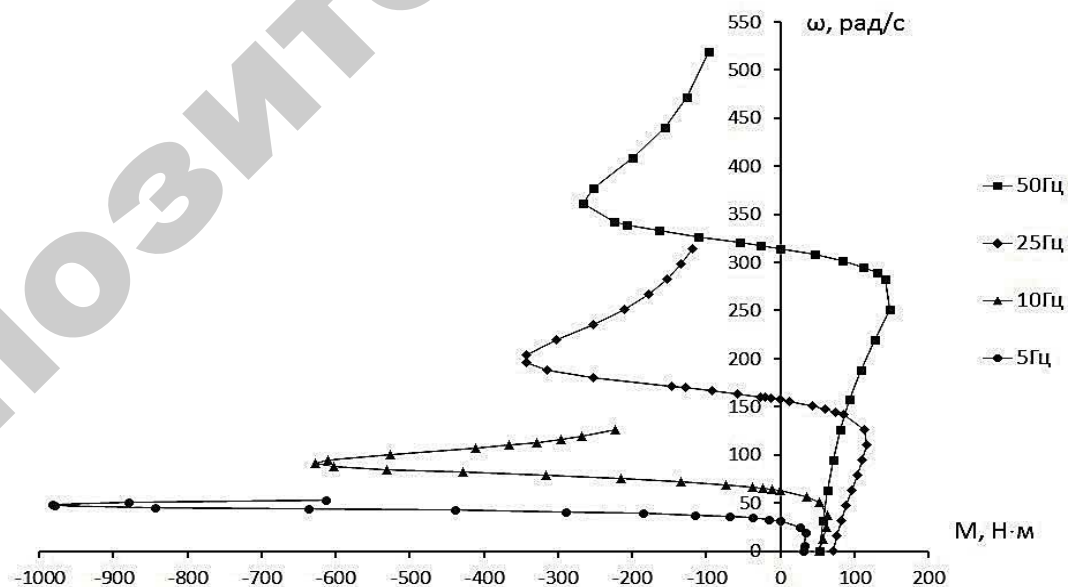


Рисунок 1. Искусственные механические характеристики  $M=f(\omega)$ , при различных частотах питающего напряжения статора и законе регулирования  $U/f=const$  для двигателя AIP160S2

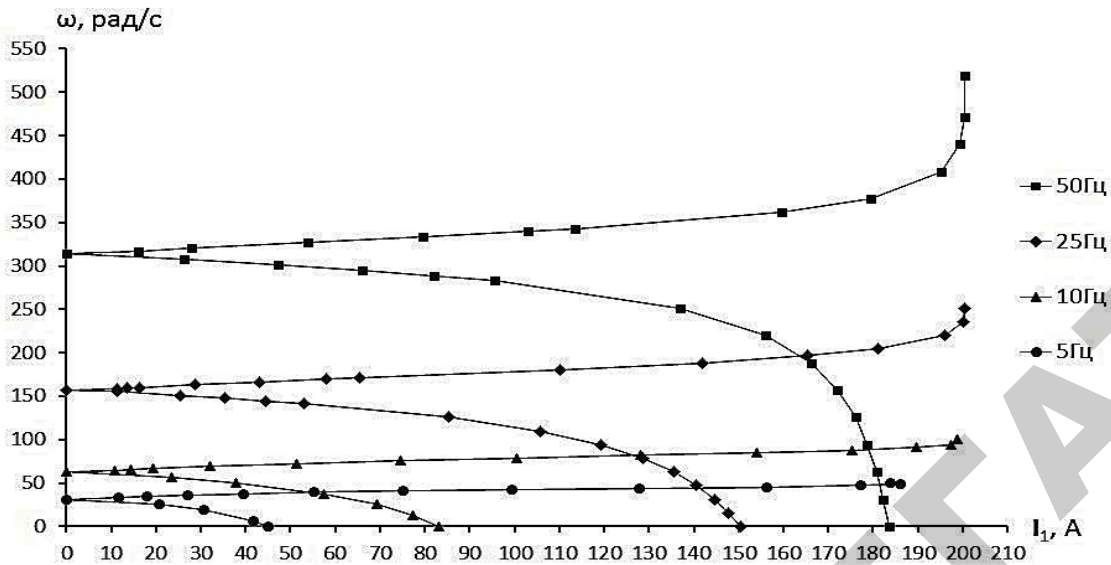


Рисунок 2. Искусственные электромеханические характеристики  $I_1=f(\omega)$ , при различных частотах питающего напряжения статора и законе регулирования  $U/f=const$  для двигателя АИР160S2

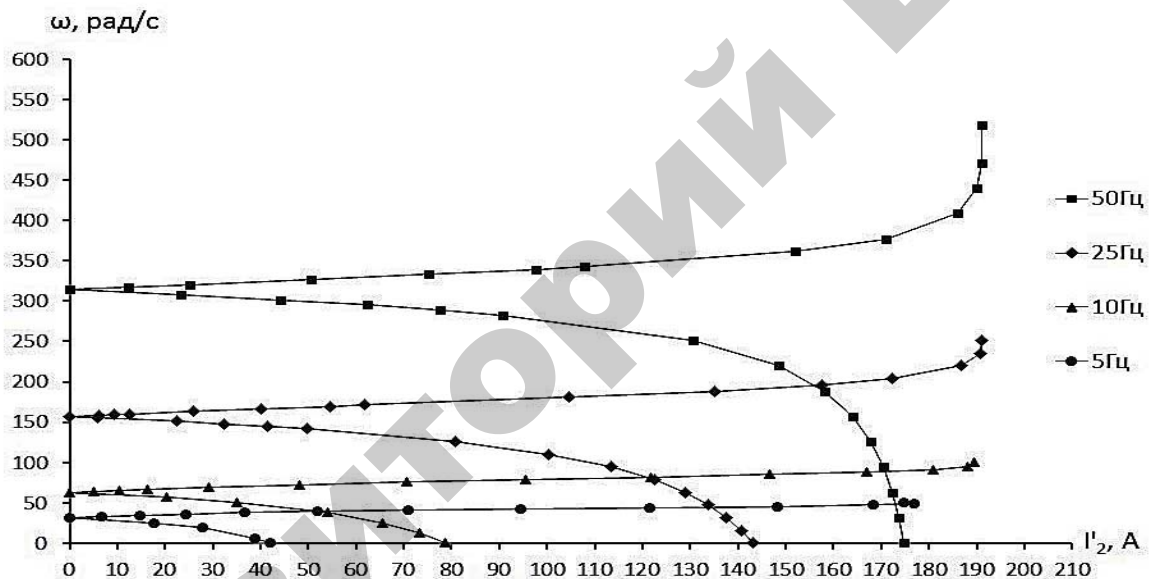


Рисунок 3. Искусственные электромеханические характеристики  $I'_2=f(\omega)$ , при различных частотах питающего напряжения статора и законе регулирования  $U/f=const$  для двигателя АИР160S2

Для пояснения изложенного выше запишем общеизвестные комплексно-векторные уравнения статора и ротора АД в статическом режиме и представим вектор потокосцепления через векторы основного потокосцепления и потокосцепления рассеяния:

$$\begin{aligned} \vec{U}_1 &= \vec{I}_1 \cdot r_1 + j\omega_1 \cdot \vec{\Psi}_1 = \vec{I}_1 \cdot r_1 + j\omega_1 \vec{\Psi}_{1\delta} + \\ &+ j\omega_1 \cdot \vec{\Psi}_m = \vec{I}_1 \cdot (r_1 + jx_1) + j\omega_1 \cdot \vec{\Psi}_m; \\ 0 &= \vec{I}'_2 \cdot r'_2 / s + j\omega_1 \cdot \vec{\Psi}_2 = \vec{I}'_2 \cdot r'_2 / s + \\ &+ j\omega_1 \vec{\Psi}_{2\delta} + j\omega_1 \cdot \vec{\Psi}_m = \vec{I}'_2 \cdot (r'_2 / s + jx'_2) + \\ &+ j\omega_1 \vec{\Psi}_m, \end{aligned} \quad (12)$$

где  $\omega_1$  – угловая скорость магнитного поля статора АД, рад/с;

$\vec{E}_1 = -\vec{E}'_2 = j\omega_1 \cdot \vec{\Psi}_m$  – ЭДС взаимной индукции, создаваемая основным магнитным потоком, В;

$\vec{\Psi}_1$ ,  $\vec{\Psi}_2$  и  $\vec{\Psi}_m$  – векторы потокосцеплений, соответственно, статора, ротора и взаимной индукции, В·с;

Равные

$$\begin{aligned} \vec{\Psi}_1 &= \vec{\Psi}_m + \vec{\Psi}_{1\delta}, \\ \vec{\Psi}_2 &= \vec{\Psi}_m + \vec{\Psi}_{2\delta}, \end{aligned} \quad (13)$$

где  $\vec{\Psi}_{1\delta}$ ,  $\vec{\Psi}_{2\delta}$  – векторы потокосцеплений рассеяния статора и ротора, В·с;

На рис. 4 представлена эквивалентная T – образная схема замещения АД, соответствующая этим уравнениям.

Из схемы замещения следуют следующие векторные равенства:

$$\begin{aligned} & \text{– ЭДС статора} \\ & \vec{E}_s = \vec{U}_1 - \vec{I}_1 \cdot r_1 = j\omega_1 \cdot \vec{\Psi}_1; \\ & \text{– ЭДС взаимоиндукции} \\ & \vec{E}_1 = \vec{U}_1 - \vec{I}_1 \cdot (r_1 + jx_1) = j\omega_1 \cdot \vec{\Psi}_m; \\ & \text{– ЭДС ротора, приведенное к обмотке статора} \\ & \vec{E}'_2 \approx \vec{U}_1 - \vec{I}_1 \cdot (r_1 + j(x_1 + x'_2)) = j\omega_1 \cdot \vec{\Psi}_2. \end{aligned} \quad (14)$$

Откуда, соответственно, модули потокоцеплений из векторных равенств равны:

$$\begin{aligned} |\vec{\Psi}_1| &= \frac{|\vec{E}_s|}{\omega_1} = \frac{|\vec{U}_1 - \vec{I}_1 \cdot r_1|}{\omega_1}; \\ |\vec{\Psi}_m| &= \frac{|\vec{E}_1|}{\omega_1} = \frac{|\vec{U}_1 - \vec{I}_1 \cdot (r_1 + jx_1)|}{\omega_1}; \\ |\vec{\Psi}_2| &= \frac{|\vec{E}'_2|}{\omega_1} \approx \frac{|\vec{U}_1 - \vec{I}_1 \cdot (r_1 + j(x_1 + x'_2))|}{\omega_1}, \end{aligned} \quad (15)$$

поэтому при изменении тока статора  $\vec{I}_1$  для стабилизации потокоцеплений необходимо изменять напряжение статора  $\vec{U}_1$ .

Стабилизация потокоцепления статора  $\vec{\Psi}_1$  осуществляется компенсацией влияния на электромагнитные процессы в АД падения напряжения на  $r_1$ . Поэтому этот закон управления называют также IR – компенсацией. Реализовать эту компенсацию можно введением положительной обратной связи по току статора.

Тогда в выражения (7), (8), (10) и (11), приведенные выше, и вместо сопротивления статора  $r_1$  необходимо подставить сопротивление  $r_{1ЭКВ} = r_1 - k_{KM} \cdot r_1$  – эквивалентное активное сопротивление цепи обмотки

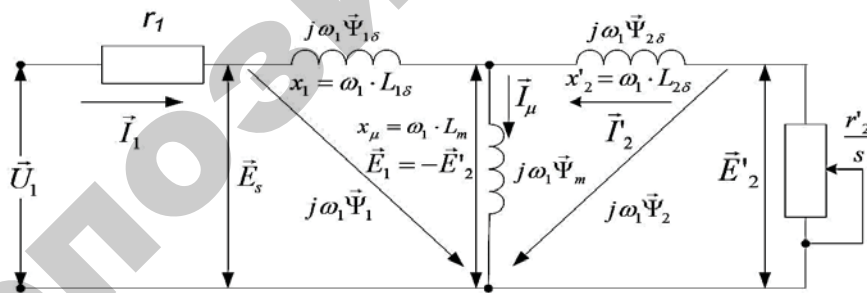


Рисунок 4. Эквивалентная T-образная схема замещения АД:

где  $x_1 = \omega_1 \cdot L_{1\delta}$  – индуктивное сопротивление рассеяния фазы статора, Ом;  $x'_2 = \omega_1 \cdot L_{2\delta}$  – индуктивное сопротивление рассеяния фазы ротора, приведенное к обмотке статора, Ом;  $x_\mu = \omega_1 \cdot L_m$  – индуктивное сопротивление ветви намагничивания, Ом;  $L_{1\delta}$  – индуктивность рассеяния обмотки статора, Гн;  $L_{2\delta}$  – индуктивность рассеяния обмотки ротора, Гн;  $L_m$  – индуктивность ветви намагничивания, Гн.

статора [2], где  $k_{KM}$  – коэффициент положительной обратной связи по току изменяется от 0 до 1. При этом указанные зависимости (7), (8), (10) и (11) для данного закона регулирования скорости с IR – компенсацией примут следующий вид:

$$\begin{aligned} & \text{– механическая характеристика } M=f(\omega) \text{ АД} \\ & M = \frac{3 \cdot U_1 \cdot r'_2}{\omega_0 \cdot s \cdot \left[ x_K^2 \cdot a^2 + \left( r_{1ЭКВ} + \frac{r'_2}{s} \right)^2 + \left( \frac{r_{1ЭКВ} \cdot r'_2}{s \cdot x_\mu \cdot a^2} \right)^2 \right]}; \quad (16) \end{aligned}$$

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

$$I'_2 = \frac{U_1}{\sqrt{\left( r_{1ЭКВ} + \frac{r'_2}{s} \right)^2 + x_K^2 \cdot a^2 + \left( \frac{r_{1ЭКВ} \cdot r'_2}{s \cdot x_\mu \cdot a^2} \right)^2}}; \quad (17)$$

– ток холостого хода АД

$$I_0 = \frac{U_1}{\sqrt{r_{1ЭКВ}^2 + (x_1 \cdot a + x_\mu \cdot a)^2}}; \quad (18)$$

– синус угла между вектором напряжения питания статора  $\vec{U}_1$  и вектором тока ротора  $\vec{I}'_2$

$$\sin \phi_2 = \frac{x_K \cdot a}{\sqrt{\left( r_{1ЭКВ} + \frac{r'_2}{s} \right)^2 + x_K^2 \cdot a^2}}. \quad (19)$$

Далее для двигателя АИР160S2 построим характеристики (рис. 5...рис. 7) при значениях частот напряжений обмотки статора 50,25 и 10 Гц и значениях коэффициента положительной обратной связи по току  $k_{KM}=0$ ;  $k_{KM}=0,5$ ;  $k_{KM}=0,75$ ;  $k_{KM}=1,0$  (при  $k_{KM}=0$  – IR – компенсация отсутствует, при  $k_{KM}=0,5$  и  $k_{KM}=0,75$  – компенсация является неполной или частичной).

Анализируя полученные механические характеристики с IR –компенсацией можно сделать вывод,

что при этом значительно увеличивается критический момент АД в двигательном режиме, а также уменьшается разница между ними в двигательном и генераторном режимах, причем это проявляется в большей степени при возрастании  $k_{KM}$ , особенно при низких частотах питающего напряжения. Одновременно с этим возрастают и токи статора.

Для подтверждения правильности проведенных выше выводов проведем расчет механических и электромеханических характеристик при  $\Psi_1 = \text{const}$  по ме-

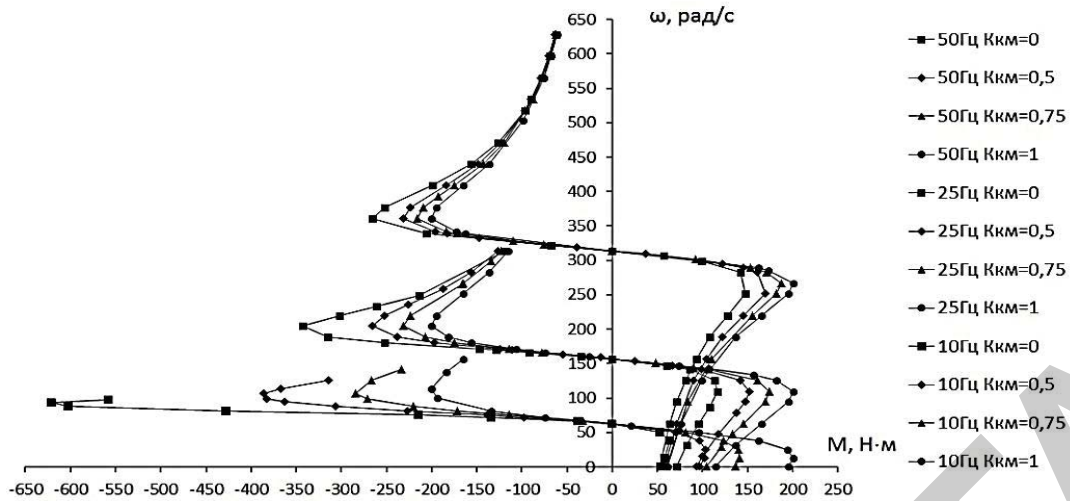


Рисунок 5. Искусственные механические характеристики  $M=f(\omega)$  с IR –компенсацией, при различных частотах питающего напряжения статора для двигателя АИР160S2

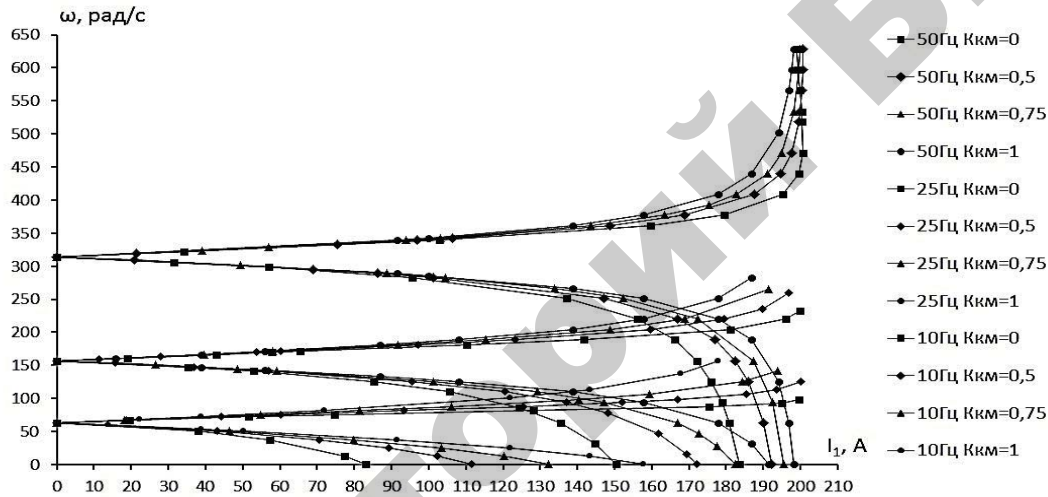


Рисунок 6. Искусственные электромеханические характеристики  $I_1=f(\omega)$  с IR –компенсацией, при различных частотах питающего напряжения статора для двигателя АИР160S2

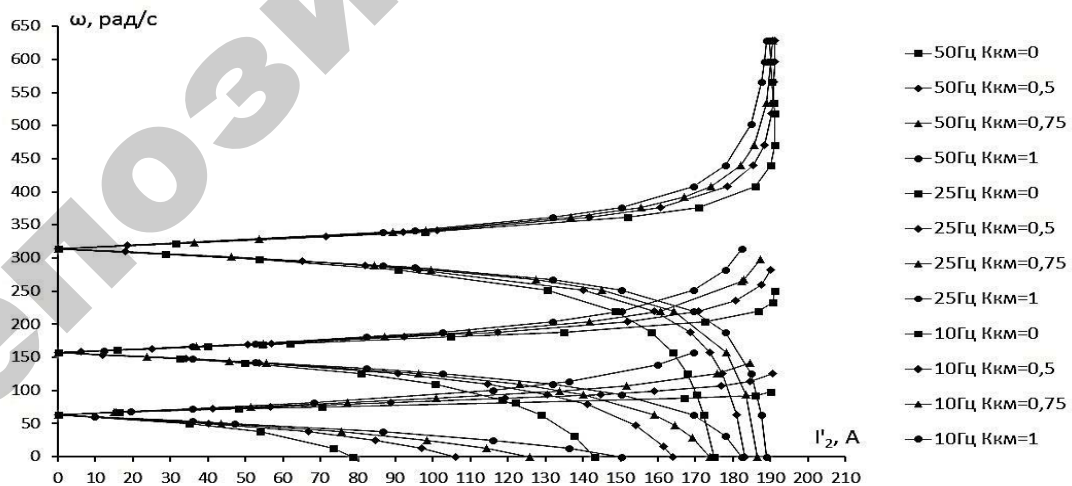
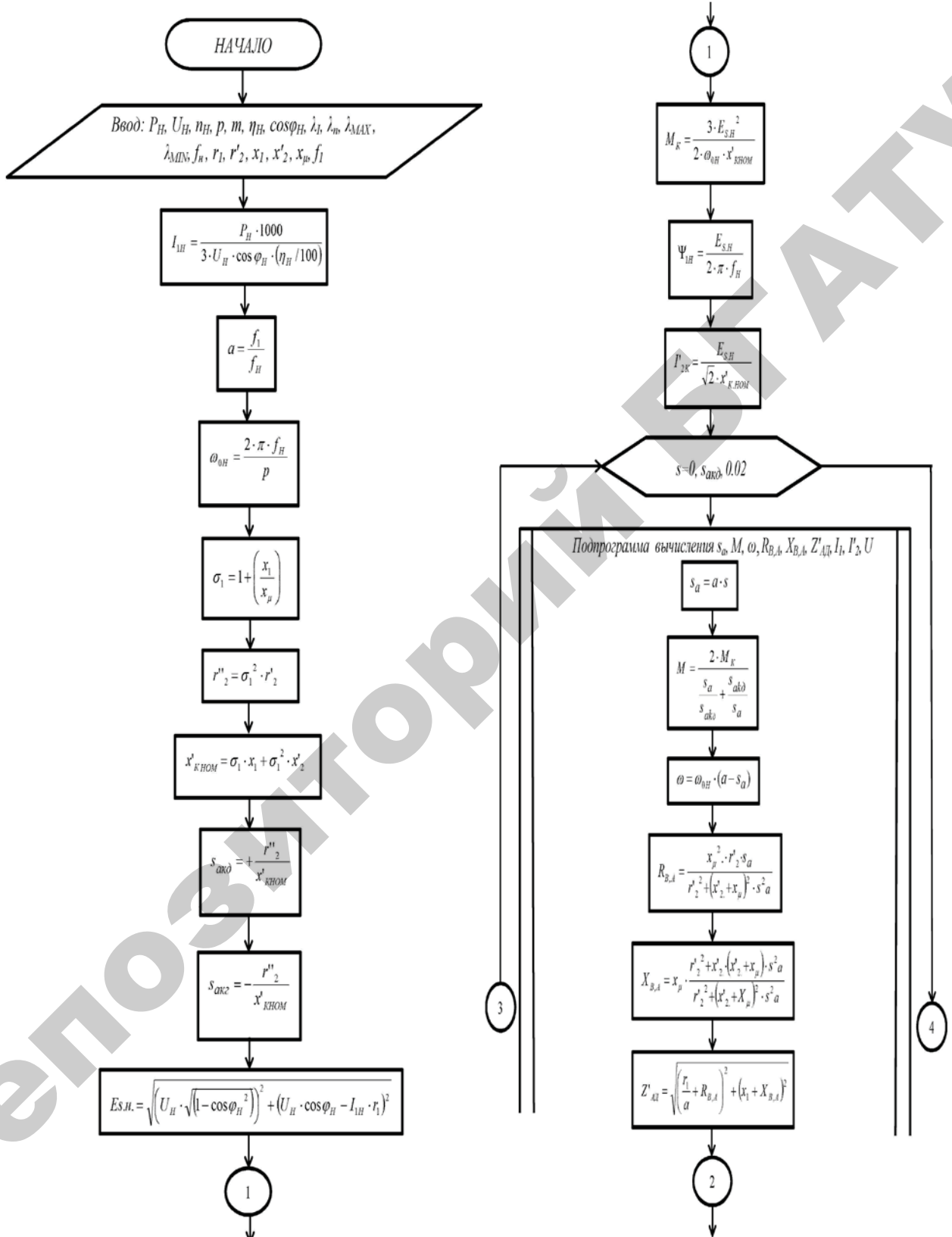


Рисунок 7. Искусственные электромеханические характеристики  $I'_2=f(\omega)$  с IR –компенсацией, при различных частотах питающего напряжения статора для двигателя АИР160S2

тодике, изложенной в работе [3], алгоритм которой представлен на рис. 8. При этом параметры схемы

замещения АД были рассчитаны по методике, приведенной в статьях [4] и [5].



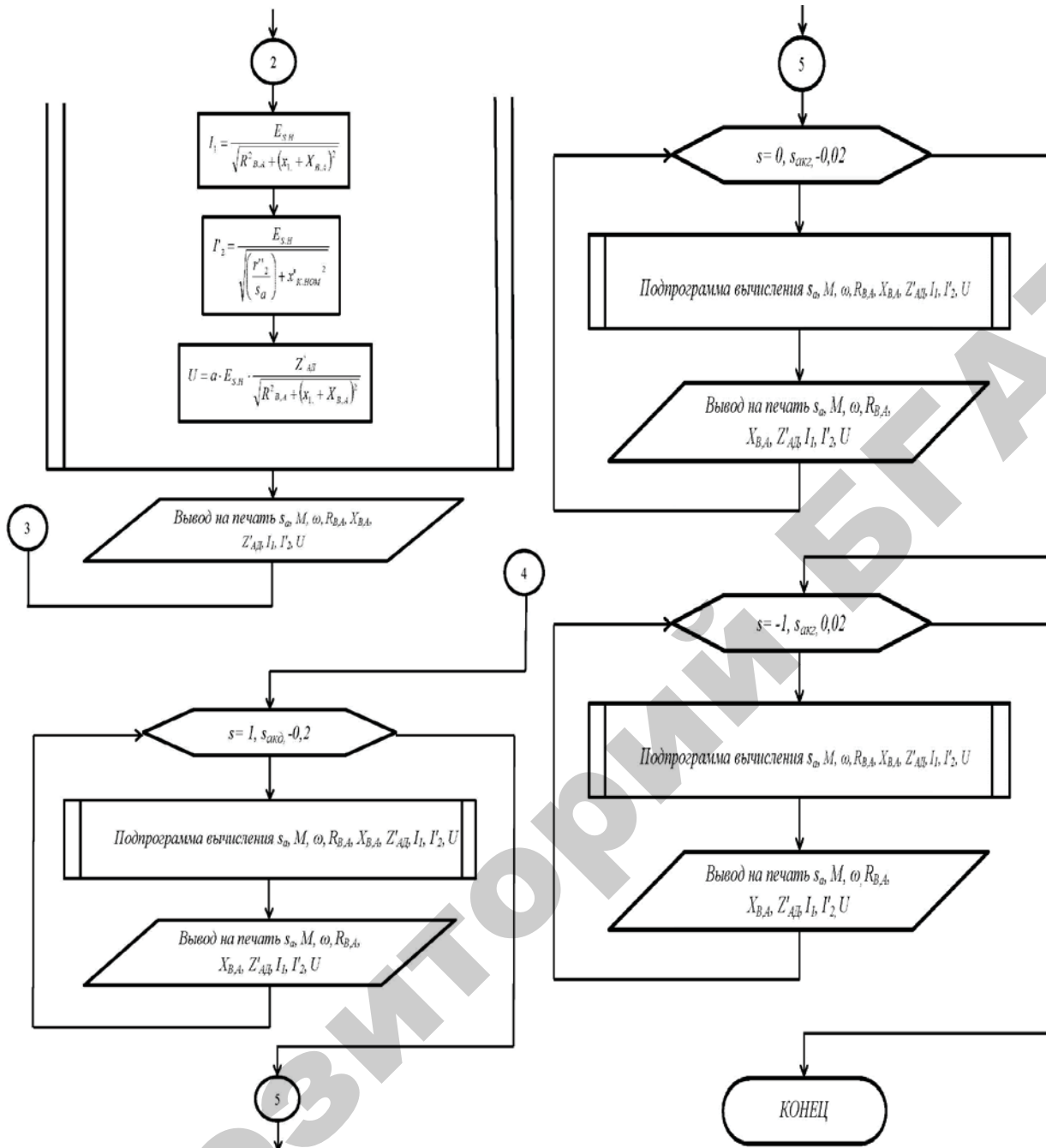


Рисунок 8. Алгоритм расчета механических и электромеханических характеристик АД при частотном регулировании для  $\Psi_1 = \text{const}$  по методике [3]

где  $P_H$  – номинальная мощность двигателя, кВт;  
 $U_H$  – номинальное напряжение питания статора АД (фазное), В;  
 $n_H$  – номинальная частота вращения ротора АД, об/мин;  
 $\cos\varphi_H$  – номинальный коэффициент мощности двигателя, о.е;  
 $\eta_H$  – номинальный коэффициент полезного действия двигателя, %;  
 $\lambda_{\text{МАХ}}$  – кратность максимального момента к номинальному, о.е;

$\lambda_{\text{П}}$  – кратность пускового момента к номинальному, о.е;  
 $\lambda_i$  – кратность пускового тока к номинальному, о.е;  
 $\lambda_{\text{МИН}}$  – кратность минимального момента к номинальному, о.е;  
 $f_H$  – номинальная частота переменного тока питающей сети, 50Гц;  
 $rI$  – активное сопротивление обмотки статора, Ом;  
 $r'_2$  – активное сопротивление обмотки ротора, приведенное к обмотке статора, Ом;



$x_l$  – индуктивное сопротивление рассеяния фазы статора, Ом;  
 $x'_2$  – индуктивное сопротивление рассеяния фазы ротора, приведенное к обмотке статора, Ом;  
 $x_n$  – индуктивное сопротивление ветви намагничивания, Ом;  
 $f_1$  – текущая частота переменного тока питающей сети, Гц;  
 $I_{1H}$  – номинальный фазный ток статора, А;  
 $a$  – относительная частота питающего напряжения, о.е.;  
 $\omega_{OH}$  – синхронная угловая скорость магнитного поля статора АД при номинальной частоте переменного тока питающей сети, с<sup>-1</sup>;  
 $\sigma_l$  – коэффициент приведения параметров Т-образной схемы замещения к Г-образной;  
 $r'_2$  – активное сопротивление обмотки ротора, приведенное к обмотке статора, для Г-образной схемы замещения, Ом;  
 $x'_{K,НОМ}$  – индуктивное номинальное сопротивление обмоток статора и ротора АД при номинальной частоте питающего напряжения для режима короткого замыкания (при неподвижном роторе), Ом;  
 $s_{акд}$  – абсолютное критическое скольжение в двигательном режиме;  
 $s_{акг}$  – абсолютное критическое скольжение в генераторном режиме;  
 $E_{с,Н}$  – действующее значение номинальной ЭДС статора, В;  
 $M_K$  – критический момент двигателя, Н·м;  
 $\Psi_{1H}$  – номинальное потокоцепление статора (действующее значение), В·с;

$I'_{2К}$  – ток ротора, соответствующий абсолютному критическому скольжению, А;  
 $M$  – расчетный момент искусственной механической характеристики АД, Н·м;  
 $\omega$  – текущее значение угловой скорости ротора АД, с<sup>-1</sup>.  
 $R_{в,А}$  – «внутреннее» активное сопротивление АД при номинальной частоте и данном значении абсолютного скольжения  $s_a$ , Ом;  
 $X_{в,А}$  – «внутреннее» индуктивное сопротивление АД при номинальной частоте и данном значении абсолютного скольжения  $s_a$ , Ом;  
 $Z'_{АЛ}$  – полное сопротивление цепи АД при данном абсолютном скольжении  $s_a$  и относительной частоте  $a$ , Ом;  
 $I_1$  – расчетный ток статора АД искусственной электромеханической характеристики, А;  
 $I'_2$  – расчетный ток ротора АД, приведенный к обмотке статора, А;  
 $U$  – изменяемое напряжение питания на обмотках статора АД при частотном регулировании для  $\Psi_1 = \text{const}$ , В.

Сравнение рассмотренных методик было проведено после расчета характеристик АД при полной IR – компенсации по методике [2] и при  $\Psi_1 = \text{const}$  по методике [3] для различных частот питающей сети (рис. 9...11).

Имеющееся несовпадение механических и электромеханических характеристик, рассчитанных по рассмотренным выше методикам, объясняется тем, что ЭДС статора  $E_s$  в методике [3] рассчитывалось из векторной диаграммы геометрически, а в методике [2] из выражения  $\vec{U}_1 - \vec{I}_1 \cdot r_1$ .

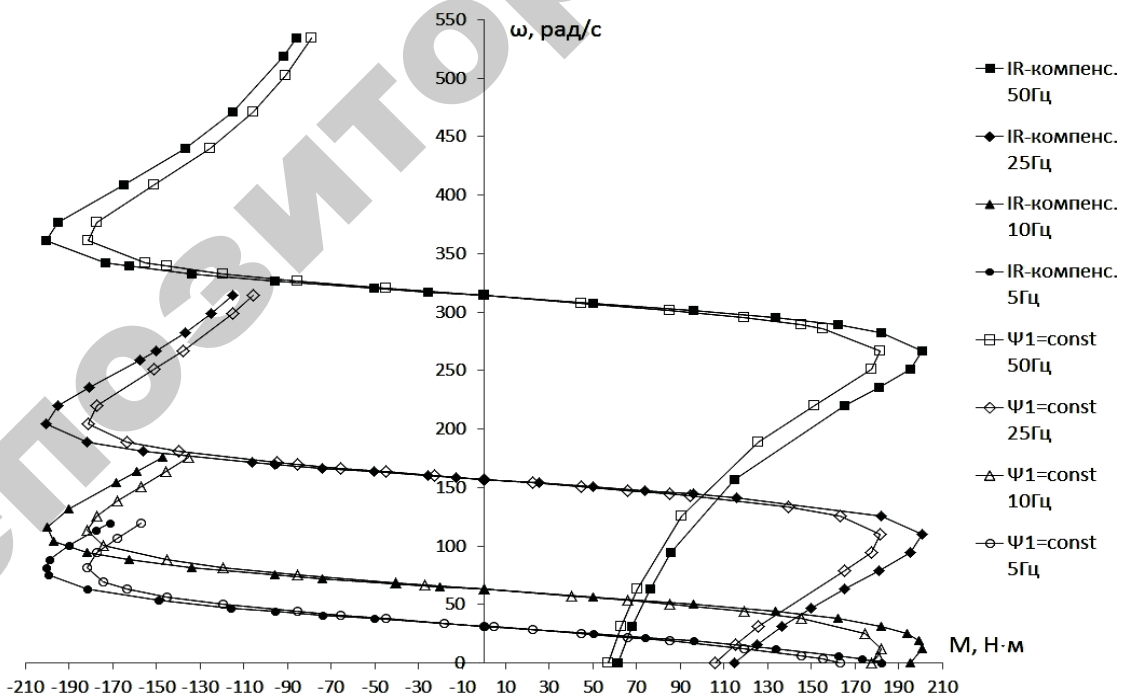


Рисунок 9. Искусственные механические характеристики  $M=f(\omega)$  при полной IR – компенсации и при  $\Psi_1 = \text{const}$ , для различных частот питающего напряжения статора двигателя АИР160S2

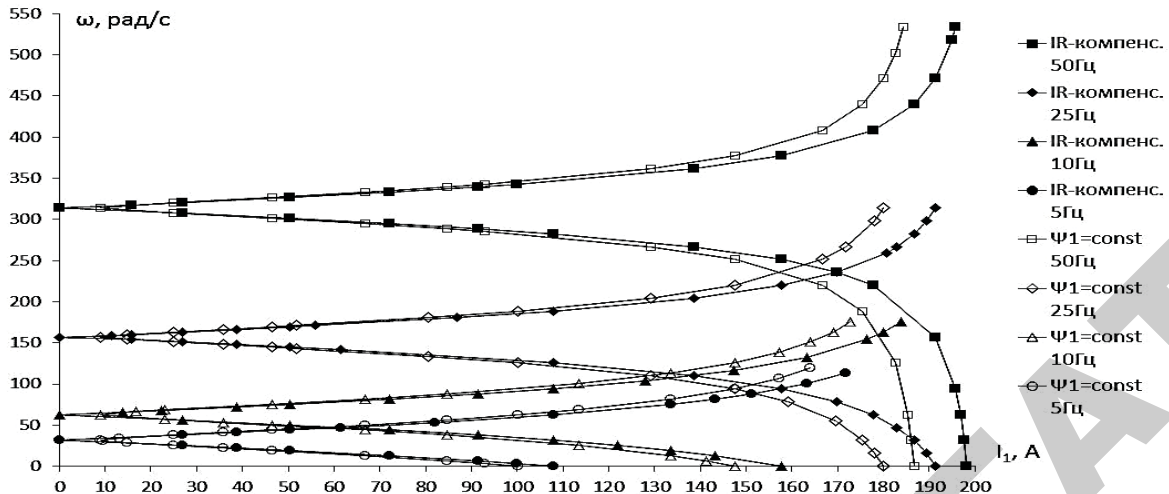


Рисунок 10. Искусственные электромеханические характеристики  $I_1=f(\omega)$  при  $\Psi_1=\text{const}$  для двигателя АИР160S2

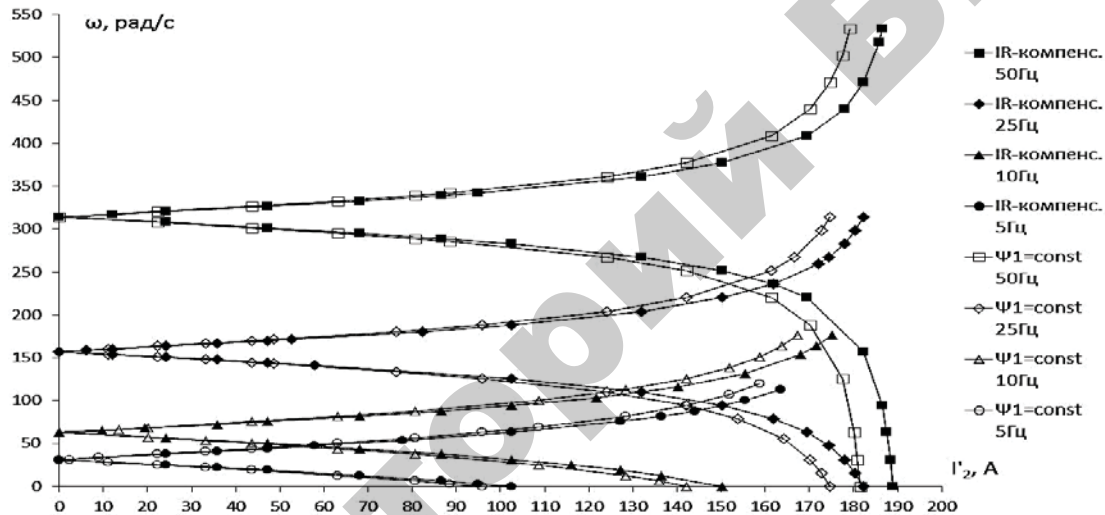


Рисунок 11. Искусственные электромеханические характеристики  $I'_2=f(\omega)$  при  $\Psi_1=\text{const}$  для двигателя АИР160S2

### Заключение

1. Сравнительный анализ рассчитанных по рассмотренным методикам характеристик показывает, что жесткость механических характеристик неизменна для всех относительных частот напряжения питания статора АД  $\alpha$  при постоянном критическом моменте, а механические и электромеханические характеристики являются подобными (конгруэнтными) при разных частотах, что совпадает с аналогичными выводами работы [3].

2. Критический момент механической характеристики АД при частотном управлении по закону  $\Psi_1=\text{const}$  близок к критическому моменту на естественной механической характеристике, аналогично можно утверждать и про максимальные токи электромеханических характеристик – они близки к пре-

дельным токам на естественных электромеханических характеристиках.

3. При частотном управлении АД по закону  $\Psi_1=\text{const}$  свойства двигателя близки свойствам двигателя при работе на естественной характеристике, за исключением скорости. Поэтому такое частотное управление широко используется в замкнутых системах.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Асинхронные двигатели: каталог ОАО «Могилевский завод «Электродвигатель» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.mez.by>. – Дата доступа: 12.10.2016.
2. Чернышев, А.Ю. Электропривод переменного тока: учеб. пос. / А.Ю. Чернышев, Ю.Н. Дементьев,

И.А. Чернышев. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2011. – 203 с.

3. Фигаро, Б.И. Теория электропривода / Б.И. Фигаро, Л.Б. Павлячик. – М.: Техноперспектива, 2007. – 88 с.

4. Гридин, В.М. Расчет параметров схемы замещения асинхронных двигателей по каталожным данным / В.М. Гридин // Электричество. – 2012. – № 5. – С. 40-44.

5. 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 (117). – С.20-32.

ПОСТУПИЛА В РЕДАКЦИЮ 24.11.2016

УДК 621.9. 048.6

## ОСОБЕННОСТИ РАЗВИТИЯ КАВИТАЦИИ И ЭФФЕКТИВНОСТЬ ОЧИСТНЫХ ПРОЦЕССОВ В УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ВАННЕ

**Н.К. Толочко,**

*профессор каф. технологии металлов БГАТУ, докт. ф.-м. наук, профессор*

**В.С. Корко,**

*доцент каф. электротехнологий БГАТУ, канд. техн. наук, доцент*

**А.Н. Челединов,**

*аспирант каф. технологии металлов БГАТУ*

*Экспериментально исследованы особенности развития кавитации в ультразвуковой ванне. Рассмотрено влияние пространственной неоднородности, активности кавитации на эффективность очистных процессов.*

*Ключевые слова: кавитация, ультразвуковая ванна, загрязнение, очистка*

*The peculiarities of cavitation development in ultrasonic bath are investigated experimentally. The effect of spatial irregularity of cavitation activity on the cleaning process efficiency is considered.*

*Keywords: cavitation, ultrasonic bath, contamination, cleaning.*

### Введение

В аграрной индустрии важная роль отводится процессам очистки поверхности деталей сельхозтехники и плодоовощных продуктов от различных видов загрязнений. В последние годы получили распространение очистные процессы, основанные на использовании ультразвука [1-3]. Для их реализации широко применяются ультразвуковые (УЗ) моечные ванны. Эффективность очистки в УЗ ваннах определяется активностью кавитации  $a_k$ , которая, в свою очередь, зависит от особенностей распространения УЗ волн в объеме жидкости, заполняющей ванну. На практике учет этих особенностей позволяет оптимизировать условия реализации очистных процессов. Особенно важно учитывать распределение  $a_k$  по объему жидкости, которое, как правило, является неоднородным.

Цель данной работы – экспериментально исследовать особенности проявления неоднородностей в распределении  $a_k$  по объему жидкости в УЗ ванне и оценить степень влияния этих неоднородностей на равномерность удаления загрязнений с поверхности очищаемых предметов. До сих пор эти вопросы были изучены недостаточно.

### Основная часть

Эксперименты проводились на ультразвуковой установке УЗУ-0,25 (потребляемая мощность генератора – 450 Вт, выходная – 250 Вт, рабочая частота – 18 кГц). Размеры полости ванны (длина – 22 см, ширина – 17 см, глубина – 16 см, объем – 4,5 л). Ванна была снабжена тремя пьезоэлектрическими преобразователями (УЗ излучателями), встроенными в ее донной части. Ванну заполняли водой до некоторого фиксированного уровня  $H_0$ .

### Особенности развития кавитации

Значения  $a_k$  оценивали по звуковому давлению в кавитирующей воде, измеряемому с помощью кавитометра – индикатора кавитационной активности ИСА-4Д (производство БГУИР, г. Минск). Он состоит из электронного блока и выносного измерительного щупа – датчика (широкополосного гидрофона) с волноводом. Действие прибора основано на анализе и обработке спектра кавитационного шума, воспринимаемого щупом. Используемый щуп в силу особенностей своей конструкции характеризовался сравнительно малой локализацией области измерений. Кавитометр измерял полную активность кавитации, т.е. активность и пуль-