

РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ СХЕМЫ ЗАМЕЩЕНИЯ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ПО КАТАЛОЖНЫМ ДАНЫМ И ПОСТРОЕНИЕ ИХ ЕСТЕСТВЕННЫХ МЕХАНИЧЕСКИХ И ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК

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 проведен анализ итерационных и безитерационных методик расчета параметров схемы замещения асинхронного двигателя, приведены алгоритм безитерационной методики расчета параметров схемы замещения, механических и электромеханических характеристик асинхронного двигателя, сравнительные табличные и графические данные проведенных расчетов.

Ключевые слова: асинхронный двигатель, схема замещения, параметры, алгоритм расчета.

The article provides the analysis of iterative and without iterative methods of calculation of the equivalent circuit parameters of the induction motor, the article algorithm without iterative calculation method of equivalent circuit parameters is given, mechanical and electromechanical characteristics of the induction motor, the comparative table and image data of the carried out calculations are presented.

Keywords: induction motor, equivalent circuit, parameters, the calculation algorithm.

Введение

Вопрос определения параметров схемы замещения (СЗ) асинхронного двигателя (АД) в настоящее время является весьма актуальным, так как в справочной литературе и каталогах для двигателей новых серий, как отечественного, так и зарубежного производства отсутствуют параметры СЗ, без которых невозможен расчет и построение их механических и электромеханических характеристик, что в значительной степени затрудняет разработку и проектирование электроприводов, исследование эксплуатационных режимов АД. Эти параметры необходимы для расчета токов нагрузок и коротких замыканий при выполнении защиты АД от перегрузок и «опрокидывания», моделирования переходных процессов, определения режимов работы электродвигателей и др.

Основная часть

От точности определения параметров СЗ АД зависит точность построения его характеристик и определения энергетических параметров, как в двигательном, так и генераторном режиме. Если ранее для серий двигателей А, АО, АО2, 4А параметры СЗ АД (проектные параметры) всегда приводились в ката-

ложных данных заводов-изготовителей в абсолютных или относительных единицах, что не вызывало никаких затруднений при проведении расчетов через СЗ АД, то для современных серий АД: АИР, АИРМ АДМ, 5А, 6А параметры СЗ в каталожных и справочных данных отсутствуют и это требует проводить их расчет через другие каталожные данные. В силу этих причин, за последние 15...20 лет вопросу расчета параметров схемы замещения АД по каталожным данным посвящено немало количество работ, наиболее типичные из которых, на наш взгляд, рассмотрены и проанализированы в данной статье, после чего выбрана наиболее приемлемая методика, которая может использоваться как в учебном процессе, так и научно-исследовательской деятельности.

Все рассматриваемые ниже методики расчета параметров СЗ [1-5] можно разделить на две группы: группа итерационных методик, требующая многократных уточняющих вычислений определенных параметров, и группа безитерационных методик, не требующая многократных уточняющих вычислений.

В работе [1] предложена методика расчета параметров СЗ АД, содержащая процедуру итераций. При этом на каждой итерации назначается коэффициент загрузки АД, соответствующий максимуму коэффици-

ента полезного действия АД, который изменяется от 0,5 до 1 и коэффициенты в выражениях добавочных и механических потерь, которые влияют на момент холостого хода. Далее рассчитываются значения номинального электромагнитного момента и электромагнитный момент при номинальном скольжении, после чего определяется относительная погрешность несовпадения их значений. Если найденная относительная погрешность превышает допустимую, то корректируется коэффициент загрузки и коэффициенты в выражениях добавочных и механических потерь, и процесс повторяется. Несмотря на возможность получения расчетных параметров СЗ по данной методике, хорошо совпадающих с проектными каталожными данными для более ранних серий АД и с расчетными параметрами СЗ, полученными по другим методикам, эта методика вызывает определенные трудности в использовании из-за сложности организации итерационного процесса при изменении трех вышеуказанных коэффициентов.

В статье [2] предложена безитерационная методика определения параметров СЗ АД, базирующаяся на решении квадратного уравнения относительно коэффициента α , равного отношению активного сопротивления обмотки статора r_1 к активному приведенному к обмотке статора сопротивлению обмотки ротора r'_2 ($\alpha=r_1/r'_2$).

Указанное квадратное уравнение получено из совместного решения и математических преобразований системы основных уравнений АД для режима номинальной нагрузки, векторной диаграммы токов, ЭДС и напряжений, удовлетворяющих этой системе, и выражений для критического момента и критического скольжения. При этом используются паспортные данные двигателя. В расчетах требуется угловая скорость поля статора, коэффициент мощности и полезного действия для номинальной (100 %) и одной из частичных нагрузок (25 % или 50 %). В данной методике для расчета составляющих квадратного уравнения (коэффициентов свободного члена) используется также усредненный коэффициент $\alpha=r_1/r'_2$ для АД разной номинальной мощности и частоты, значение которого находится в диапазоне 0,6-2,5. Автор рекомендует принимать среднее значение $\alpha=1,5$.

При этом проведенные авторами расчеты для АД с различными номинальными мощностями и частотами вращения показывают, что окончательно полученные значения параметров СЗ будут очень сильно зависеть от предварительно принятого значения коэффициента α . Рассмотренная методика будет давать удовлетворительные результаты не для всех номинальных параметров двигателей, кроме того, в каталогах новых серий АД отсутствуют данные о коэффициентах мощности и полезного действия для частичной загрузки.

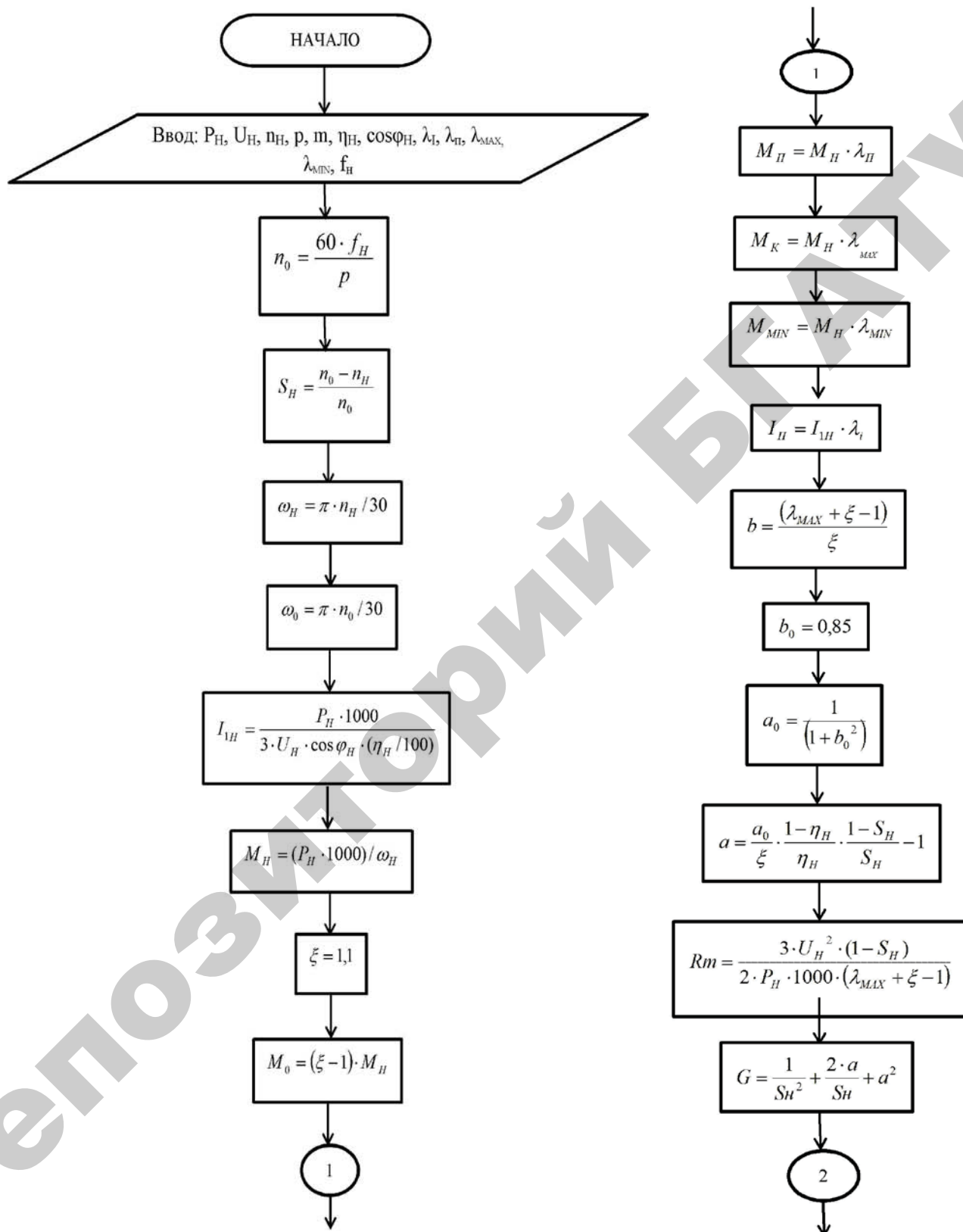
В работе [3] также предложена безитерационная методика определения параметров СЗ АД, в значительной степени схожая с методикой [2]. В этой работе в

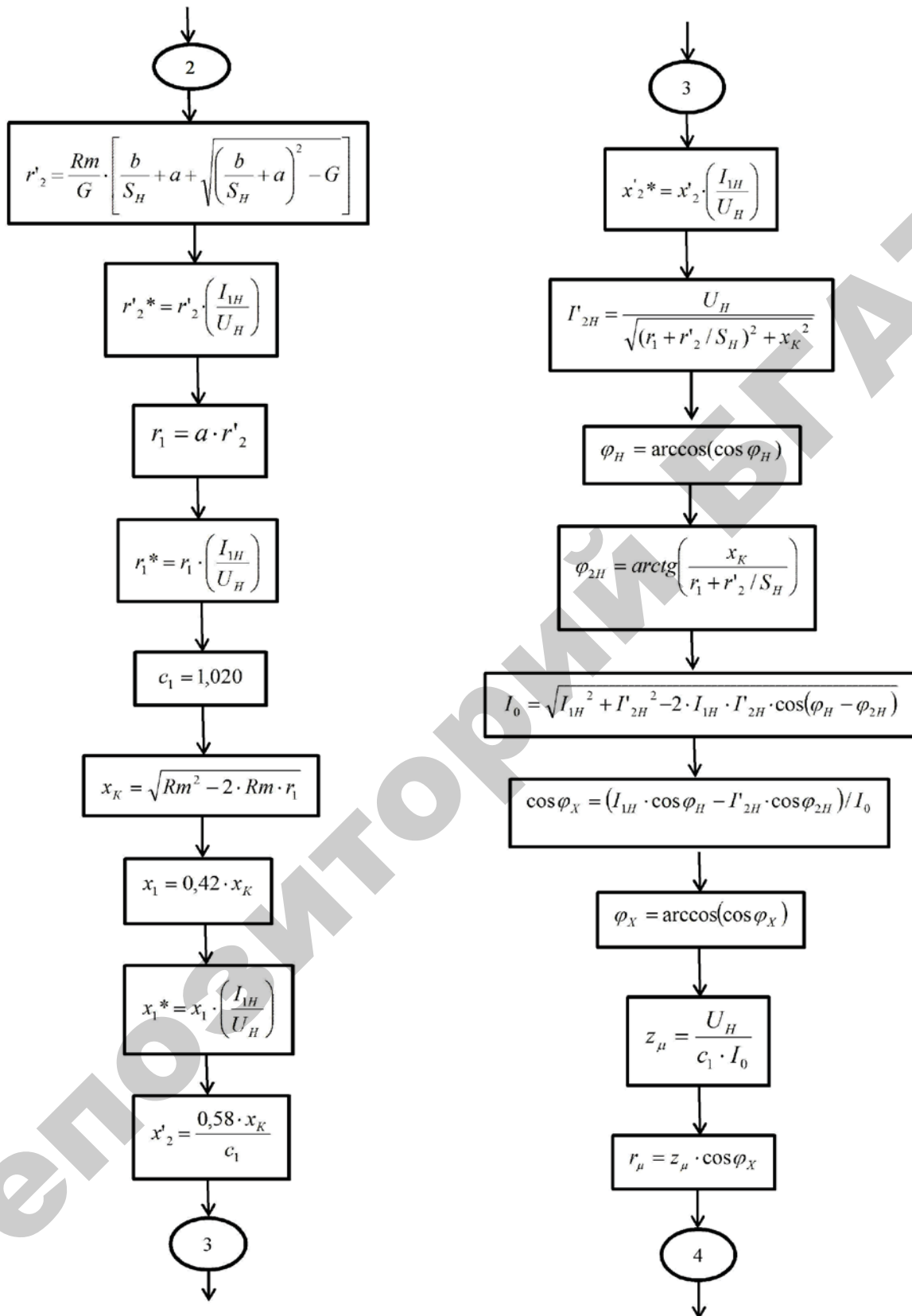
расчетах необходимы также значения коэффициента мощности ($\cos\varphi$) и полезного действия (η) при частичной загрузке АД. Эти параметры в работе определяются руководствуясь тем, что современные АД проектируются таким образом, что наибольший коэффициент полезного действия достигается при загрузке на 20-25 % меньше номинальной. Следовательно, при номинальной нагрузке и коэффициенте загрузки – 0,75 коэффициенты полезного действия можно принять равными между собой $\eta_H \approx \eta_{0,75}$. В свою очередь, при такой загрузке коэффициент мощности сильно отличается от номинального ($\cos\varphi_H$), поэтому авторами предлагается корректирующая зависимость отношения $\cos\varphi_{0,75}/\cos\varphi_H$ от номинальной мощности двигателя. Как и в предыдущей, в этой методике используется усредненный коэффициент $\alpha=r_1/r'_2$, только здесь его рекомендуется принимать равным 1,3, что для некоторых двигателей дает еще большие различия в результатах расчета, чем в предыдущей методике.

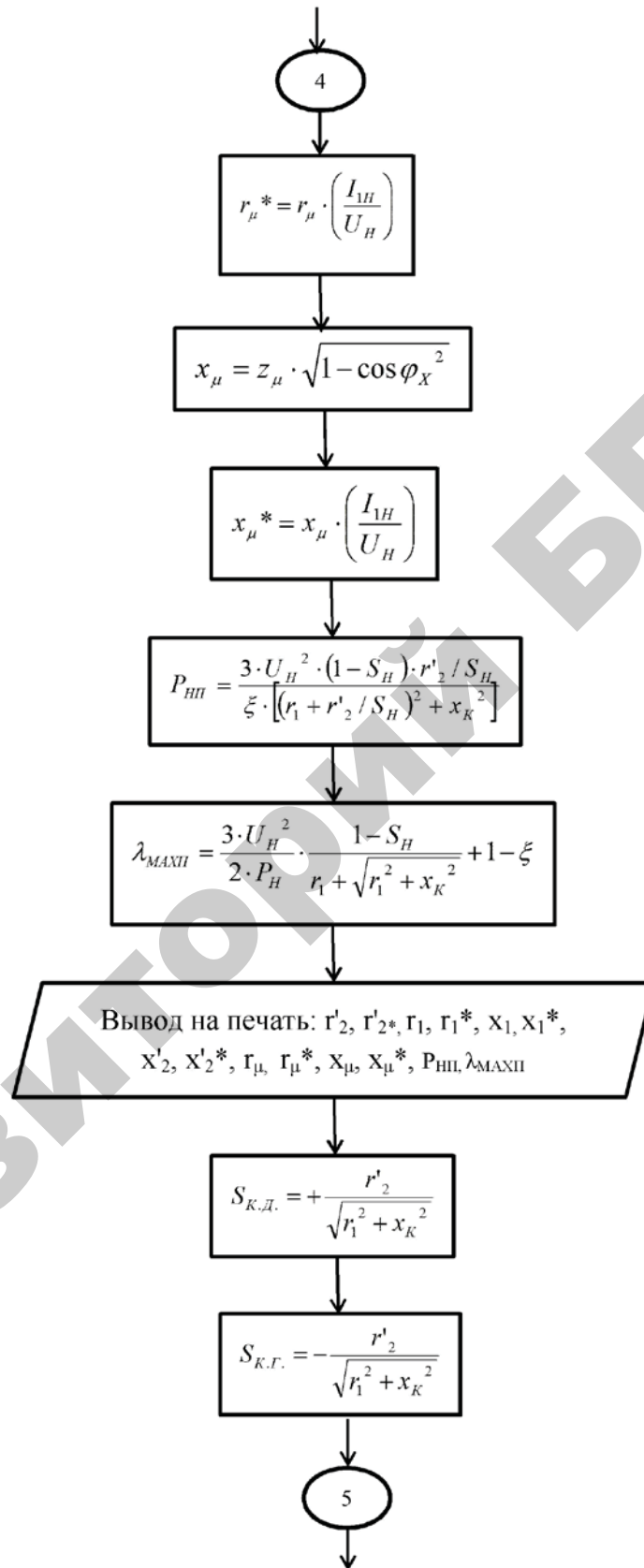
Методика, предложенная в статье [4], авторами позиционируется как безитерационная, при этом коэффициент $\alpha=r_1/r'_2$ изменяют с определенным шагом в интервале – 1,15-2,75, после чего рассчитанные параметры проверяют на всех этапах расчета. Расчет продолжают до тех пор, пока все расчетные параметры СЗ в относительных единицах, включая и электромагнитную мощность АД, будут внутри диапазонов, характерных для двигателей. Рассматриваемая методика является итерационной, так как требует многократных вычислений. В статье данная методика предложена только для АД общепромышленных серий. При проведении расчетов для АД малой мощности и низкой синхронной частоты не все контролируемые расчетные параметры входят в допустимый диапазон при проверке.

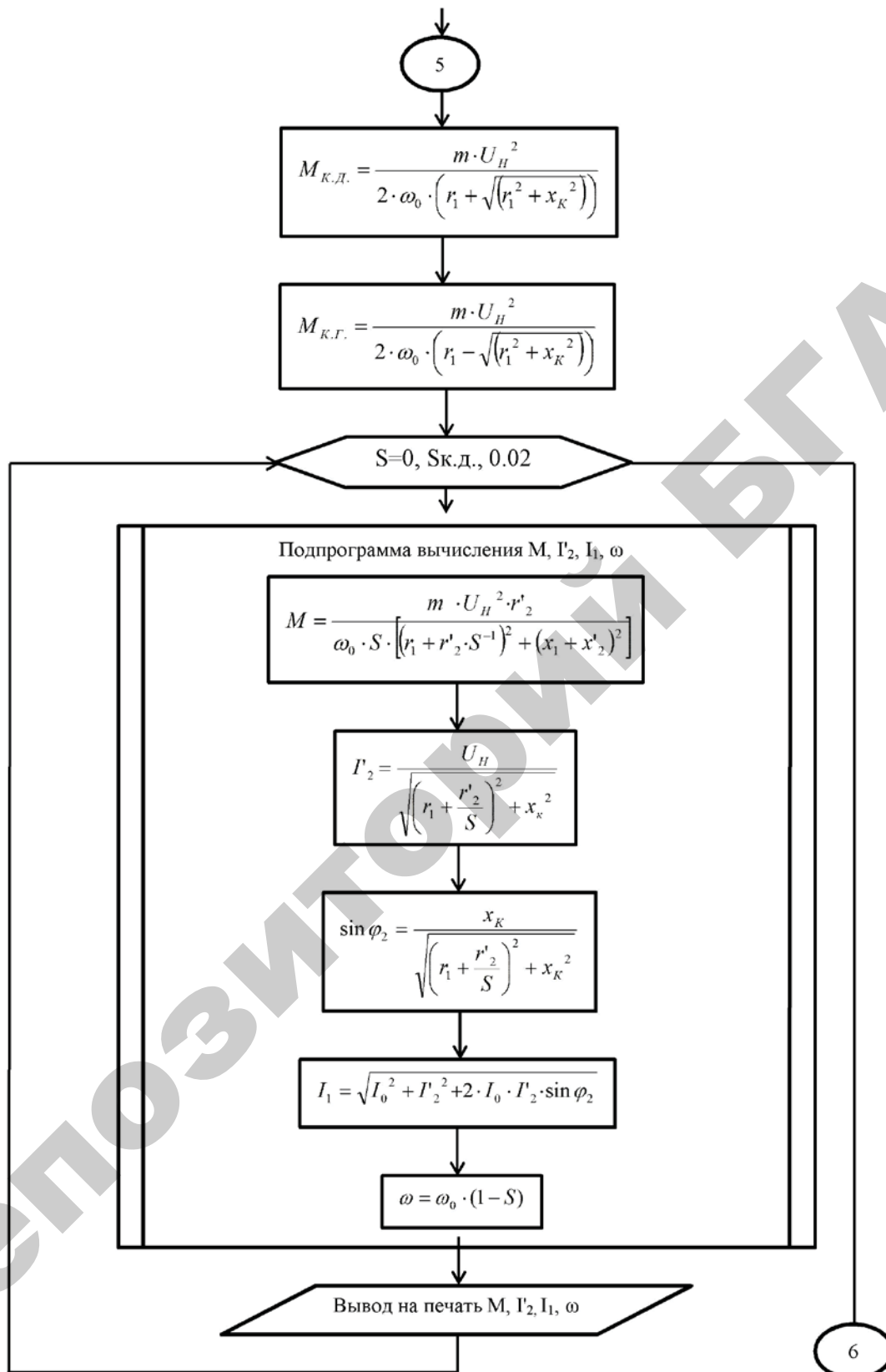
На наш взгляд, наиболее простой и приемлемой для использования в учебном процессе, а также при проведении научно-исследовательских работ с целью анализа процессов, происходящих в электроприводе и оптимизации их параметров, является безитерационная методика, предложенная в работе [5]. Она предполагает вначале расчет отношения активного сопротивления обмоток статора к активному приведенному к обмотке статора сопротивлению обмотки ротора, т.е. $\alpha=r_1/r'_2$, а затем расчет самих параметров, т.е. сопротивлений СЗ.

При разработке методика расчета параметров СЗ использовалась классическая схема замещения одной фазы АД, известная, например, по работе [6]. В дальнейшем при разработке методика расчета и выводе формул автор руководствовался положениями, приведенными в классических работах [6, 7], что делает эту методику общедоступной в понимании и использовании. Авторами публикации разработаны детальные алгоритмы расчета параметров СЗ, механических и электромеханических характеристик АД по всем рассмотренным выше методикам. Алгоритм расчета параметров СЗ по методике, приведенной в работе [5], и характеристик АД по методике, приведенной в работе [3], представлен на рисунке 1.









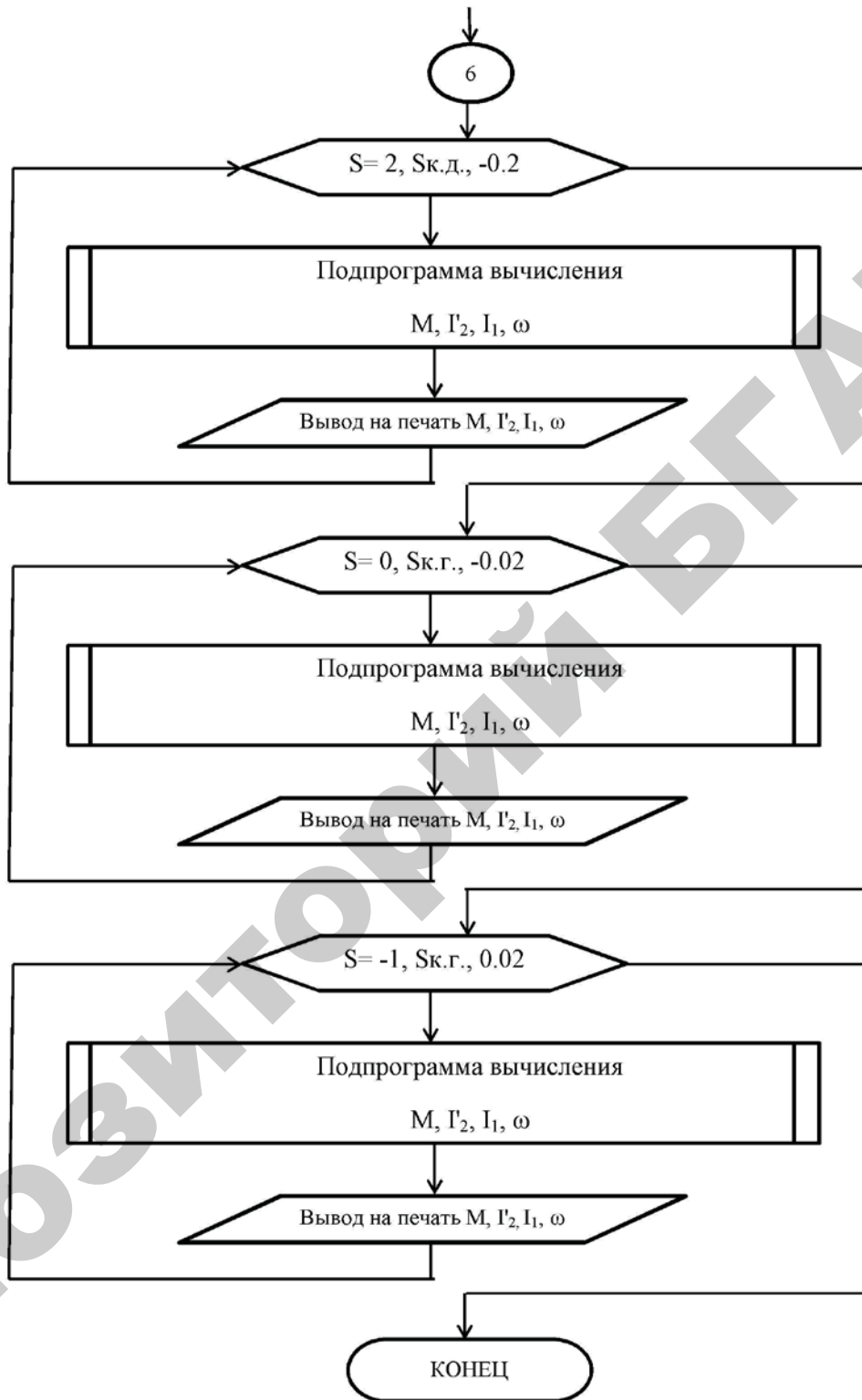


Рисунок 1. Алгоритм расчета параметров СЗ и естественных механических и электромеханических характеристик АД по их каталожным данным:

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.;

η_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;

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

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

p – число пар полюсов;

m – число фаз;

$f_{\text{Н}}$ – номинальная частота переменного тока питающей сети, Гц;

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

$S_{\text{Н}}$ – номинальное скольжение АД, о.е;

$\omega_{\text{Н}}$ – номинальная угловая скорость ротора, с^{-1} ;

ω_0 – синхронная угловая скорость магнитного поля статора, с^{-1} ;

$I_{\text{Н}}$ – номинальный фазный ток статора, А;

$M_{\text{Н}}$ – номинальный момент двигателя, Н·м;

$\xi=(1,02-1,1)$ – отношение номинального электромагнитного момента к номинальному моменту АД, рекомендуем принять 1,1 о.е;

M_0 – момент холостого хода, Н·м;

$M_{\text{П}}$ – пусковой момент, Н·м;

$M_{\text{К}}$ – критический момент, Н·м;

$M_{\text{МИН}}$ – минимальный момент, Н·м;

$I_{\text{П}}$ – пусковой ток, А;

b – вспомогательный коэффициент, о.е;

$b_0 = (0,7-0,85)$ – коэффициент загрузки АД, для которого коэффициент полезного действия максимальный, рекомендуем при расчете принять равным 0,85, о.е;

a_0 – вспомогательный коэффициент, о.е;

α – отношение активных сопротивлений обмоток АД $\alpha=r_1/r'_2$, может принимать значение от десятых долей единицы до нескольких единиц, о.е;

R_m – промежуточная переменная, Ом;

G – промежуточная переменная, о.е;

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

r'_2^* – активное сопротивление обмотки ротора, приведенное к обмотке статора в относительных единицах, о.е;

r_1 – активное сопротивление обмотки статора, Ом;

r_1^* – активное сопротивление обмотки статора в относительных единицах, о.е;

c_1 – коэффициент приведения параметров Т-образной СЗ к Г-образной;

$x_{\text{К}}$ – индуктивное сопротивление обмоток для режима короткого замыкания (при неподвижном роторе), Ом;

x_1 – индуктивное сопротивление рассеяния фазы статора, Ом;

x_1^* – индуктивное сопротивление фазы статора в относительных единицах, о.е;

x_2 – индуктивное сопротивление рассеяния фазы ротора, Ом;

x_2^* – индуктивное сопротивление рассеяния фазы ротора в относительных единицах, о.е.;

$I_{2\text{Н}}$ – номинальный ток в обмотке ротора, приведенный к обмотке статора, А;

$\varphi_{\text{Н}}$ – угол между векторами тока $\vec{I}_{1\text{Н}}$ и напряжения питания $\vec{U}_{\text{Н}}$, рад;

$\varphi_{2\text{Н}}$ – угол между векторами тока $\vec{I}_{2\text{Н}}$ и напряжения питания $\vec{U}_{\text{Н}}$, рад;

I_0 – ток холостого хода, А;

$\cos\varphi_{\text{Х}}$ – коэффициент мощности холостого хода;

$\varphi_{\text{Х}}$ – угол между векторами тока холостого хода \vec{I}_0 и напряжения питания $\vec{U}_{\text{Н}}$, рад;

$z_{\text{ц}}$ – полное сопротивление цепи намагничивания, Ом;

$r_{\text{ц}}$ – активное сопротивление ветви намагничивания, Ом;

$r_{\text{ц}}^*$ – активное сопротивление ветви намагничивания в относительных единицах, о.е.;

$x_{\text{ц}}$ – индуктивное сопротивление ветви намагничивания, Ом;

$x_{\text{ц}}^*$ – индуктивное сопротивление ветви намагничивания в относительных единицах, о.е.;

$P_{\text{НП}}$ – расчетная номинальная мощность двигателя, полученная после вычисления параметров СЗ АД, Вт;

$\lambda_{\text{МАХП}}$ – расчетная кратность максимального момента, полученная после вычисления параметров СЗ АД, о.е;

$S_{\text{КД}}$ – критическое скольжение в двигательном режиме, о.е.;

$S_{\text{КГ}}$ – критическое скольжение в генераторном режиме о.е.;

$M_{\text{КД}}$ – момент критический в двигательном режиме, Н·м;

$M_{\text{КГ}}$ – момент критический в генераторном режиме, Н·м;

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

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

$\sin\varphi_2$ – синус угла между векторами напряжения питания $\vec{U}_{\text{Н}}$ и тока ротора \vec{I}_2 , рад;

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

ω – текущее значение угловой скорости ротора АД, с^{-1} .

Для сравнения рассмотренных методик [1-5] авторами публикации был проведен расчет параметров СЗ большого количества АД серий 4А и сравнение расчетных параметров СЗ с проектными. Проектные параметры СЗ и паспортные данные АД брались из справочника [8]. Для некоторой оценки результатов

проведенного вычислительного эксперимента приведем из него выборку для АД различной номинальной мощности и частоты вращения. Паспортные данные двигателей представлены в таблице 1. В таблице 2 представлены результаты расчета и сравнения параметров СЗ по пяти рассмотренным методикам.

Таблица 1. Паспортные данные асинхронных двигателей

Тип двигателя	P_n , кВт	U_n , В	n_n , мин ⁻¹	P , число пар пол.	η_n	$\cos\phi_n$	f_n	λ_{max}	λ_n	λ
4A100L2Y3	5,5	220	2898	1	0,875	0,91	50	2,5	2	7,5
4A132M6Y3	7,5	220	968	3	0,85	0,81	50	2,5	2	6
4A160S2Y3	15	220	2937	1	0,88	0,91	50	2,2	1,4	7
4A225M8Y3	30	220	736,5	4	0,905	0,81	50	2,1	1,3	6
4A250S10Y3	30	220	588,6	5	0,88	0,81	50	1,9	1,2	6

Таблица 2. Результаты расчета и сравнения параметров СЗ по пяти рассмотренным методикам

Тип двигателя	Параметры по [1-5] методикам	Параметры схемы замещения					Средняя погрешность по параметрам СЗ, %
		r_1^*	x_1^*	r_2^*	x_2^*	x_m^*	
4A100L2Y3	Проектные	0,050	0,054	0,036	0,11	3,8	
	Расчетные:						
	Методика1	0,049	0,093	0,036	0,093	3,2	15,97
	Методика2	0,053	0,074	0,035	0,099	2,4	20,86
	Методика3	0,047	0,077	0,035	0,104	2,4	20,48
	Методика4	0,054	0,075	0,034	0,100	3,3	13,55
4A132M6Y3	Проектные	0,060	0,07	0,04	0,11	2,1	
	Расчетные:						
	Методика1	0,058	0,107	0,039	0,107	2,2	9,17
	Методика2	0,066	0,082	0,036	0,110	2,8	8,11
	Методика3	0,051	0,091	0,038	0,122	2,9	16,65
	Методика4	0,067	0,085	0,037	0,113	1,8	10,64
4A160S2Y3	Проектные	0,052	0,092	0,022	0,12	4	
	Расчетные:						
	Методика1	0,052	0,109	0,022	0,109	3,2	10,42
	Методика2	0,049	0,092	0,021	0,126	5,0	7,24
	Методика3	0,030	0,102	0,023	0,139	5,2	24,52
	Методика4	0,057	0,088	0,021	0,116	3,6	6,59
4A225M8Y3	Проектные	0,045	0,12	0,022	0,17	2,3	
	Расчетные:						
	Методика1	0,046	0,134	0,021	0,134	2,2	9,83
	Методика2	0,041	0,113	0,020	0,154	5,4	18,14
	Методика3	0,028	0,120	0,021	0,162	5,4	25,58
	Методика4	0,041	0,113	0,020	0,149	2,1	9,53
4A250S10Y3	Проектные	0,045	0,12	0,022	0,17	2,3	
	Расчетные:						
	Методика1	0,054	0,150	0,022	0,150	2,1	10,74
	Методика2	0,055	0,124	0,021	0,169	5,3	15,97
	Методика3	0,030	0,137	0,023	0,186	5,5	35,14
	Методика4	0,069	0,116	0,020	0,155	2,1	11,73
Методика5	0,055	0,119	0,020	0,161	2,6	8,20	

Для визуального сравнения рассмотренных методик представим также графики механических и электромеханических характеристик АД одной и той же мощности серии 4А и АИР (рис. 2...7).

При построении характеристик использовался

двигатель 4А160S2У3, паспортные данные которого приведены в таблице 1, и двигатель АИР 160S2У3 со следующими паспортными данными: $P_n=15$ кВт, $U_n=220$ В, $n_n=2930$ мин⁻¹, $\cos\varphi_n=0,89$, $\eta_n=88,7$, $\lambda_{max}=3$, $\lambda_p=2,1$, $\lambda_i=7$, $p=1$, $f_n=50$ Гц

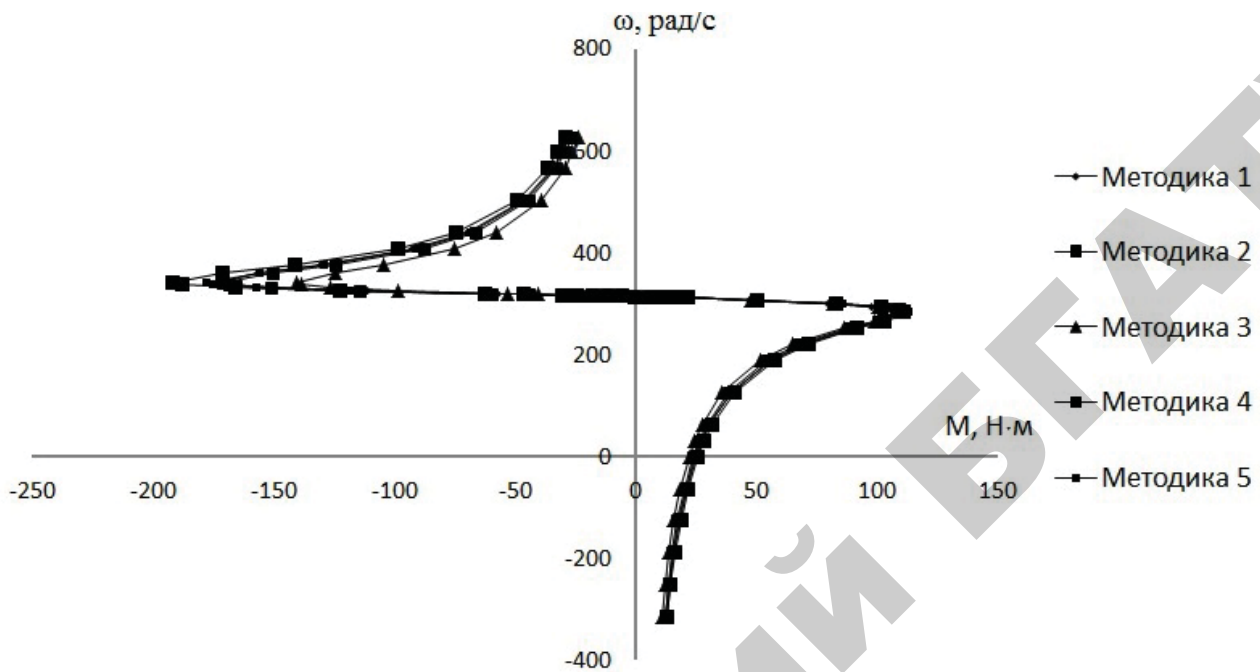


Рисунок 2. Естественные механические характеристики $M=f(\omega)$, полученные по пяти методикам [1-5] для двигателя 4А160S2У3

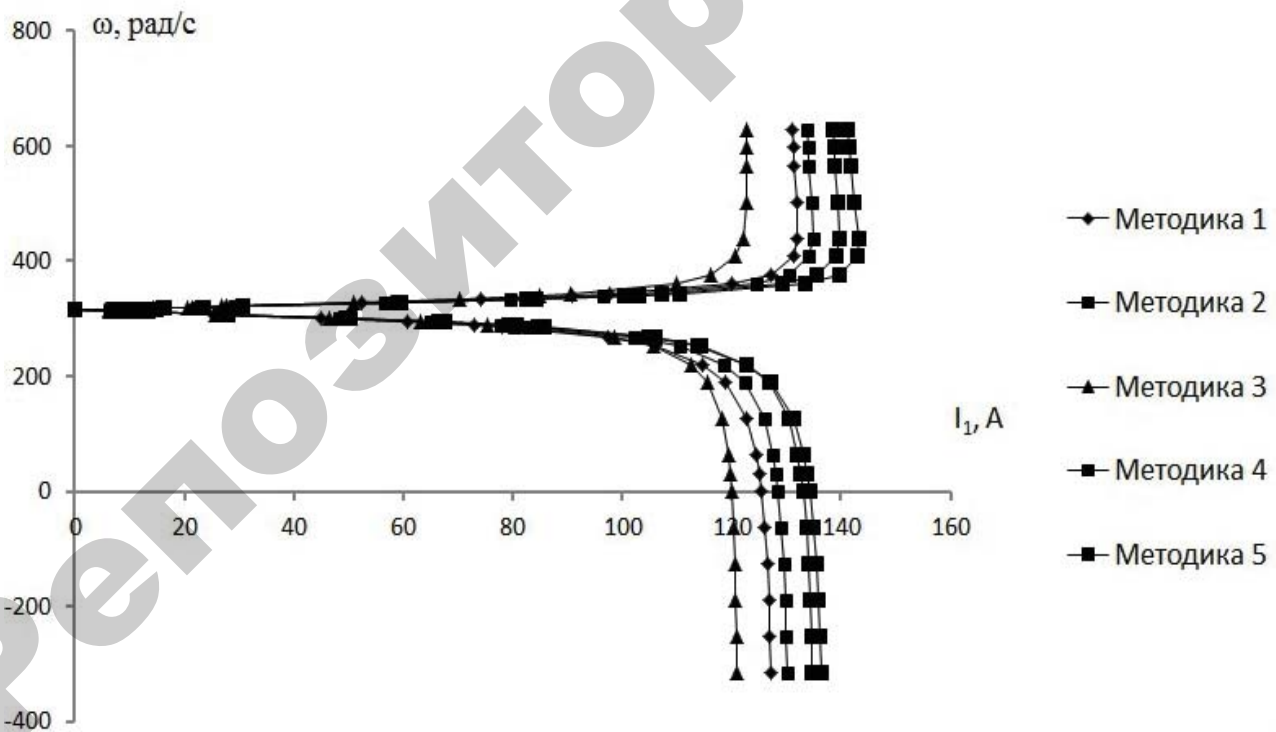


Рисунок 3. Естественные электромеханические характеристики $I_1=f(\omega)$, полученные по пяти методикам [1-5] для двигателя 4А160S2У3

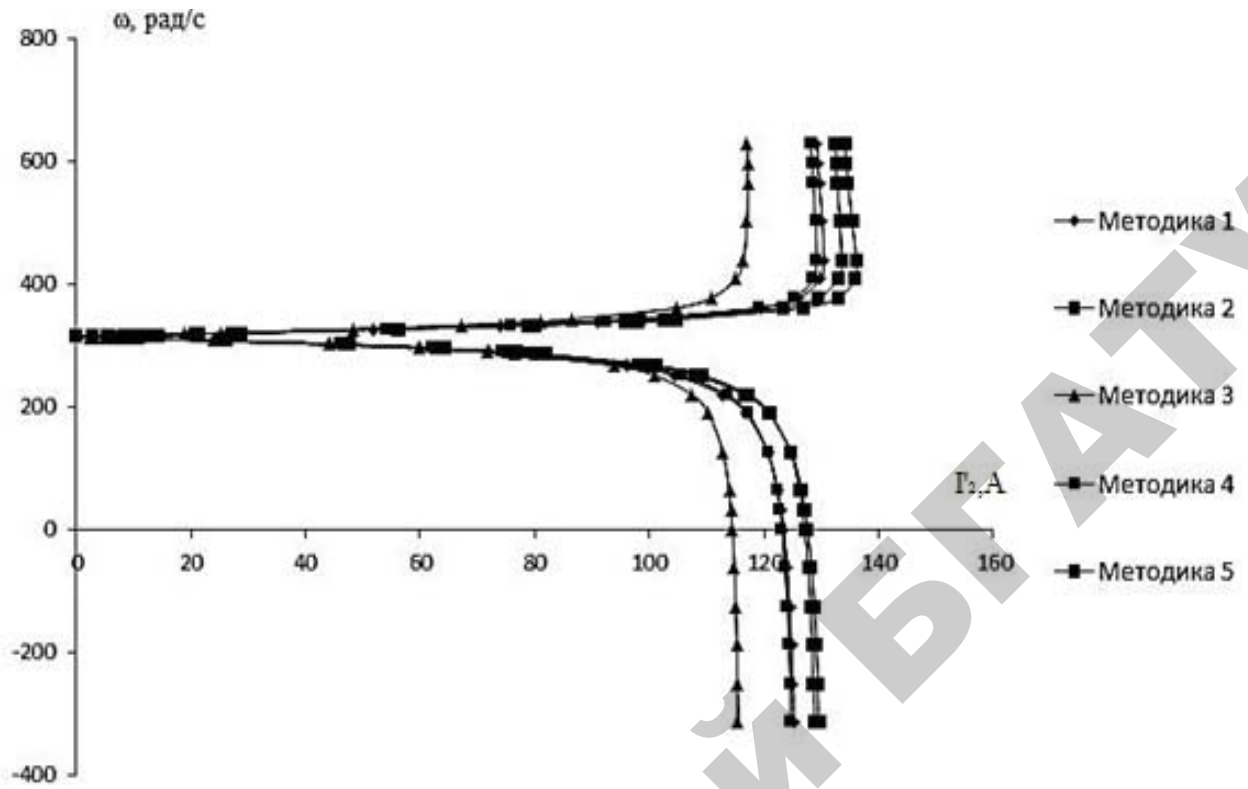


Рисунок 4. Естественные электромеханические характеристики $I_2=f(\omega)$, полученные по пяти методикам [1-5] для двигателя 4A160S2У3

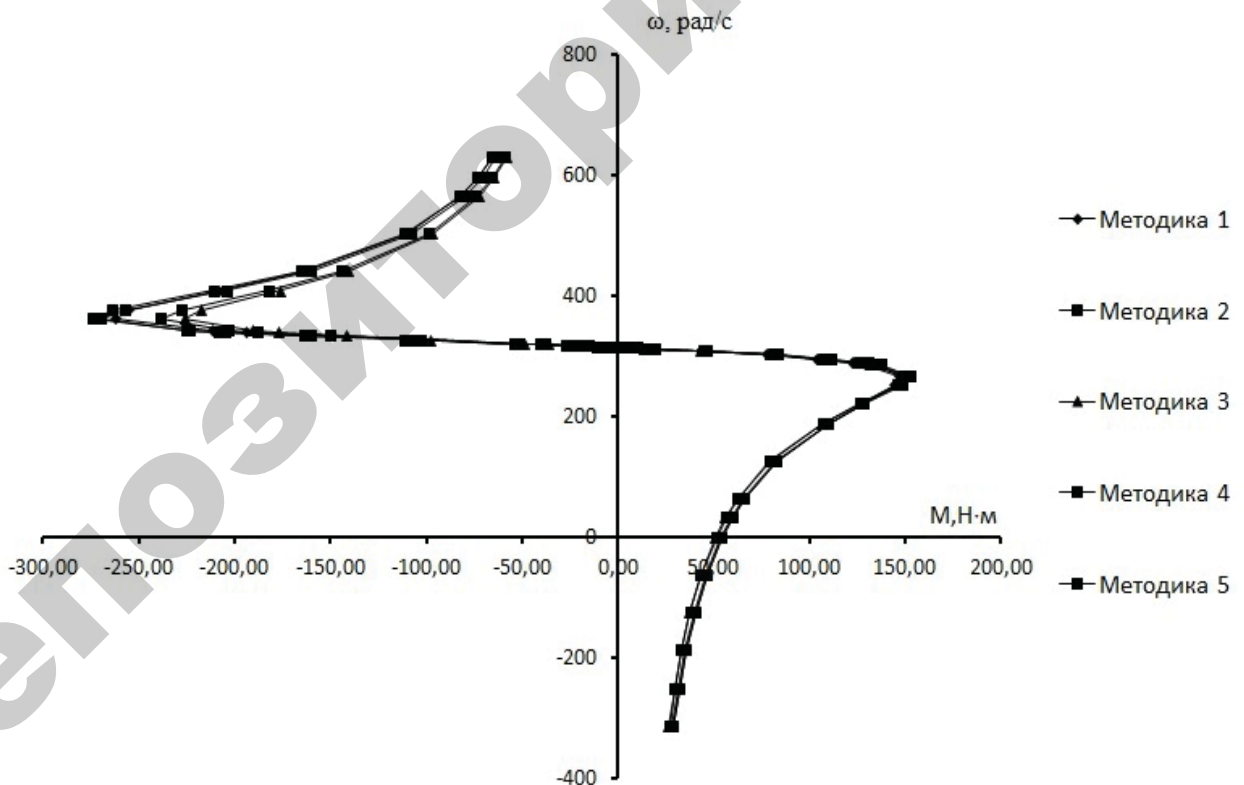


Рисунок 5. Естественные механические характеристики $M=f(\omega)$, полученные по пяти методикам [1-5] для двигателя AIP160S2У3

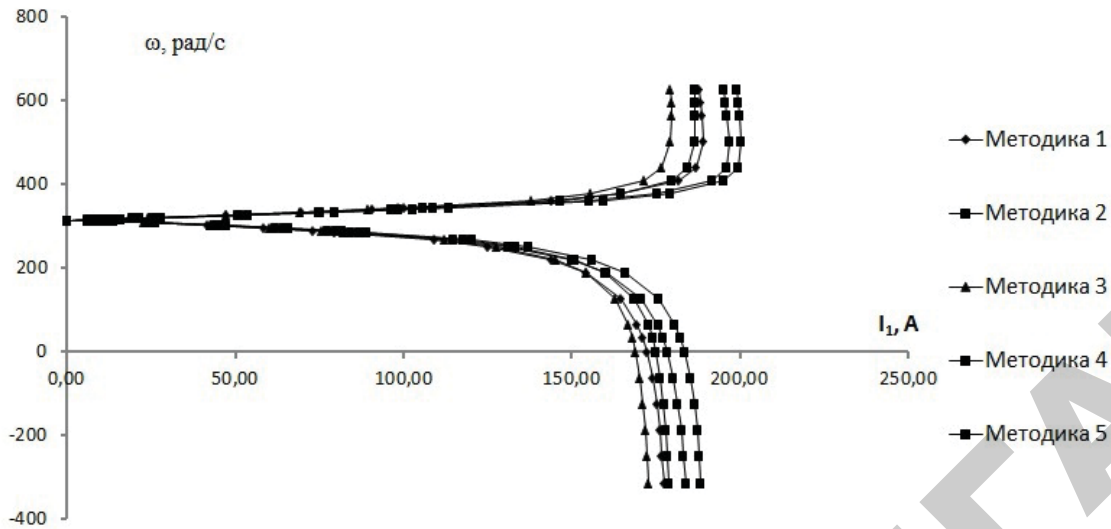


Рисунок 6. Естественные электромеханические характеристики $I_1=f(\omega)$, полученные по пяти методикам [1-5] для двигателя АИР160S2У3

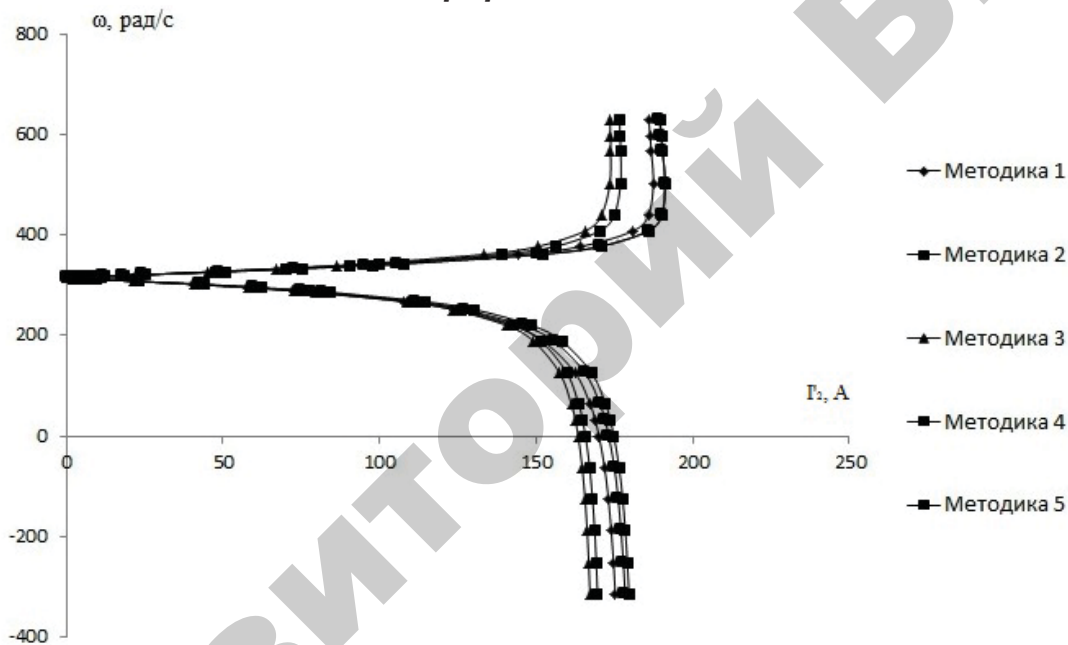


Рисунок 7. Естественные электромеханические характеристики $I_2=f(\omega)$, полученные по пяти методикам [1-5] для двигателя АИР160S2У3

Заключение

1. Анализ методик расчета параметров СЗ АД показывает, что существующие методики расчета можно разделить на две группы: группа итерационных методик расчета, требующая многократных уточнений расчетных параметров, и группа безитерационных методик, не требующая многократных уточнений расчетных параметров, что делает ее наиболее приемлемой в использовании при условии обеспечения заданной точности расчетов.

2. Полученные по рассмотренным выше методикам естественные механические и электромеханические

характеристики показывают, что наибольшие отклонения для расчетных характеристик наблюдаются в генераторном режиме работы АД (рис. 2...7). В двигательном режиме работы АД при построении механических и электромеханических характеристик все методики показали приемлемые результаты.

3. Наиболее приемлемой в использовании при проведении расчетов параметров и характеристик АД, на наш взгляд, является методика, приведенная в работе [5], так как она является безитерационной, что не вызывает сложностей в организации процесса вычислений и обладает сравнительно высокой точностью при определении параметров СЗ АД.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ
ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фираго, Б.И. Регулируемые электроприводы переменного тока / Б.И. Фираго, Л.Б. Павлячик. – Минск: Техноперспектива, 2006. – 363 с.
2. Мощинский, Ю.А. Определение параметров схемы замещения асинхронной машины по каталожным данным / Ю.А. Мощинский, В.Я. Беспалов, А.А. Кириякин // Электричество, 1998. – № 4. – С. 38-42.
3. Дементьев, Ю.Н. Автоматизированный электропривод: учеб. пос./ Ю.Н. Дементьев, А.Ю. Чернышев, И.А. Чернышев. – Томск: ТПУ, 2009. – 224 с.
4. Дружинин, А.В. Определение параметров Т-образной схемы замещения асинхронного двигателя при расчете систем управления частотно-регулируемым электроприводом / А.В. Дружинин,

Е.А. Дружинина, В.Н. Полузадов // Изв. вузов. Горный журнал, 2013. – № 3. – С. 98-105.

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

6. Иванов-Смоленский, А.В. Электрические машины: учеб. для вузов / А.В. Иванов-Смоленский. – М.: Энергия, 1980. – 928 с.

7. Вольдек, А.И. Электрические машины: учеб. для вузов / А.И. Вольдек. – 2-е изд.; перераб. и доп. – Л.: Энергия, 1974. – 840 с.

8. Асинхронные двигатели серии 4А: справочник / А. Э. Кравчик [и др.]. – М.: Энергоатомиздат, 1982. – 504 с.

ПОСТУПИЛА В РЕДАКЦИЮ 19.08.2016

УДК 536.27

К РАСЧЕТУ ПАРАМЕТРОВ ВЫТЯЖНОГО ВОЗДУХА НА
ВЫХОДЕ КОЖУХОТРУБЧАТЫХ ТЕПЛОУТИЛИЗАТОРОВ В
СИСТЕМАХ ВЕНТИЛЯЦИИ

А.Г. Цубанов,

доцент каф. энергетики БГАТУ, канд. техн. наук, доцент

И.А. Цубанов,

ст. преподаватель каф. энергетики БГАТУ

И.А. Цубанова,

ст. преподаватель каф. прикладной информатики БГАТУ

В статье предложена методика теплового расчета параметров вытяжного воздуха на выходе из кожухотрубчатого теплоутилизатора в системах вентиляции с учетом влияния влаговываждения на процессы теплообмена.

Ключевые слова: кожухотрубчатый теплоутилизатор, вытяжной воздух, влаговываждение, температура и энтальпия.

The article proposes a method for calculating the thermal exhaust air parameters at the output from the shell and tube heat exchanger in the ventilation systems, taking into account the impact of moisture fall on heat transfer processes.

Keywords: shell and tube heat recovery loop, exhaust air, moisture fall, temperature and enthalpy.

Введение

Одной из задач теплового расчета кожухотрубчатых теплоутилизаторов (КТУ) систем вентиляции является расчет параметров вытяжного воздуха на выходе теплоутилизатора. Их нахождение позволяет завершить тепловой расчет КТУ: определить тепловую мощность (теплопроизводительность); конечные параметры приточного воздуха, коэффициент влаговываждения и коэффициент эффективности его работы.

При тепловом расчете КТУ, как рекуперативных теплоутилизаторов (ТУ), используют методику проектного (конструкторского) и поверочного теплового расчета рекуперативных теплообменных аппаратов [1].

При этом в тепловых расчетах все большее распространение находит метод эффективности, основанный на использовании безразмерных характеристик: коэффициента эффективности и числа единиц переноса [1].

Основой теплового расчета ТУ в системах вентиляции и кондиционирования являются уравнения теплопередачи, тепловой эффективности, теплового и материального баланса [2-4].

КТУ могут работать в режиме «сухого» теплообмена при отсутствии конденсации водяных паров из состава вытяжного воздуха и в режиме «мокрого» теплообмена с выпадением конденсата на поверхности трубок со стороны вытяжного воздуха.