

УДК 621.313.33:004

МЕТОДИКА РАСЧЕТА МОЩНОСТИ ПРИВОДНОГО И ТОРМОЗНОГО АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ПРИ ЧАСТОТНОМ РЕГУЛИРОВАНИИ СКОРОСТИ В ОБКАТОЧНО-ИСПЫТАТЕЛЬНЫХ СТЕНДАХ МЕХАНИЧЕСКИХ ПЕРЕДАЧ

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 представлен разработанный алгоритм расчета номинальной мощности приводного и тормозного асинхронных двигателей при частотном регулировании в обкаточно-испытательных стендах механических передач.

Ключевые слова: асинхронный двигатель, частотно-регулируемый электропривод, обкаточно-испытательный стенд, механическая передача, технологические требования, скоростная и нагрузочная диаграммы, алгоритм расчета.

The article presents an algorithm for calculating the rated power of a driving and braking asynchronous motor with frequency control in the run-test stands of mechanical transmissions.

Keywords: asynchronous motor, frequency-controlled electric drive, run-test bench, mechanical transmission, technological requirements, speed and load diagrams, calculation algorithm.

Введение

Процесс обкатки и испытания механических передач является важной завершающей операцией при их изготовлении и ремонте. Данная операция проводится как на холостом ходу (без нагрузки), так и под нагрузкой. Наиболее затратной является обкатка и испытание механических передач под нагрузкой, которая требует использования мощного приводного и тормозного асинхронных двигателей и значительных энергозатрат. Поэтому электропривод стенда должен в наибольшей степени обеспечивать технологические требования обкатки и испытания передачи и обладать обоснованными капитальными и эксплуатационными затратами [1-3]. Только в этом случае можно обеспечивать высокопроизводительную, надежную и экономичную работу обкаточно-испытательного стенда. При этом электропривод проектируется совместно с проектированием стенда исходя из технологических требований на обкатку и испытание передачи.

Основная часть

Определение номинальных мощности и частоты вращения приводного и тормозного электродвигателей обкаточно-испытательного стенда механических передач является наиболее трудоемким и ответственным этапом проектирования электропривода. Применение двигателей завышенной мощности приводит к

увеличению капитальных и эксплуатационных затрат, связанных со снижением КПД и коэффициента мощности асинхронных двигателей (АД). Если выбрать двигатель недостаточной мощности, то в этом случае возникает его тепловая перегрузка, ускоренное старение изоляции и сокращение срока службы.

Длительное воздействие нагрузки на двигатель ограничивается допустимым нагревом, а кратковременное – перегрузочной способностью. Определение воздействий нагрузки на приводной и тормозной двигатели производят исходя из технологических требований на обкатку механической передачи. Как правило, в технологических требованиях на обкатку скоростная диаграмма задается на ведущем (входном) валу механической передачи (рис. 1а) и нагрузочная диаграмма на ведомом (выходном) валу (рис. 2б). Зная передаточное отношение механической передачи, производится соответствующий расчет скоростей и моментов по формулам 1 и 2 на обоих валах, и скоростные, и нагрузочные диаграммы строятся для ее ведущего и ведомого валов (рис.1, 2). Если механическая передача имеет несколько ступеней, т.е. обкатывается коробка перемены передач (КПП) транспортного средства, то пересчет производится для каждой ступени.

$$\omega_{\text{торм}} = \frac{\omega_{\text{вед}}}{PP}, \quad (1)$$

где $\omega_{вед}$ – угловая скорость ведущего вала на соответствующей ступени механической передачи, рад/с;

PP – передаточное число соответствующей ступени механической передачи, о.е.

$$M_{вед} = \frac{M_{торм}}{\eta_{пер} \cdot PP \cdot \omega_{вед}}, \quad (2)$$

где $M_{торм}$ – тормозной момент на ведомом валу, на соответствующей передаче и скоростной ступени обкатки, Н·м;

$\eta_{пер}$ – коэффициент полезного действия испытуемой механической передачи, о.е.

Из нагрузочных диаграмм приводного и тормозного двигателей очевидно, что за цикл, т.е. промежуток времени $t_{ц}$, через который нагрузочная диаграмма повторяется, можно принять все время обкатки передачи, несмотря на то, что у скоростной диаграммы приводного двигателя есть повторяемость на каждой ступени механической передачи (рис. 1а). Так как время цикла будет более 10 минут, то в соответствии с характеристикой номинальных режимов двигателей

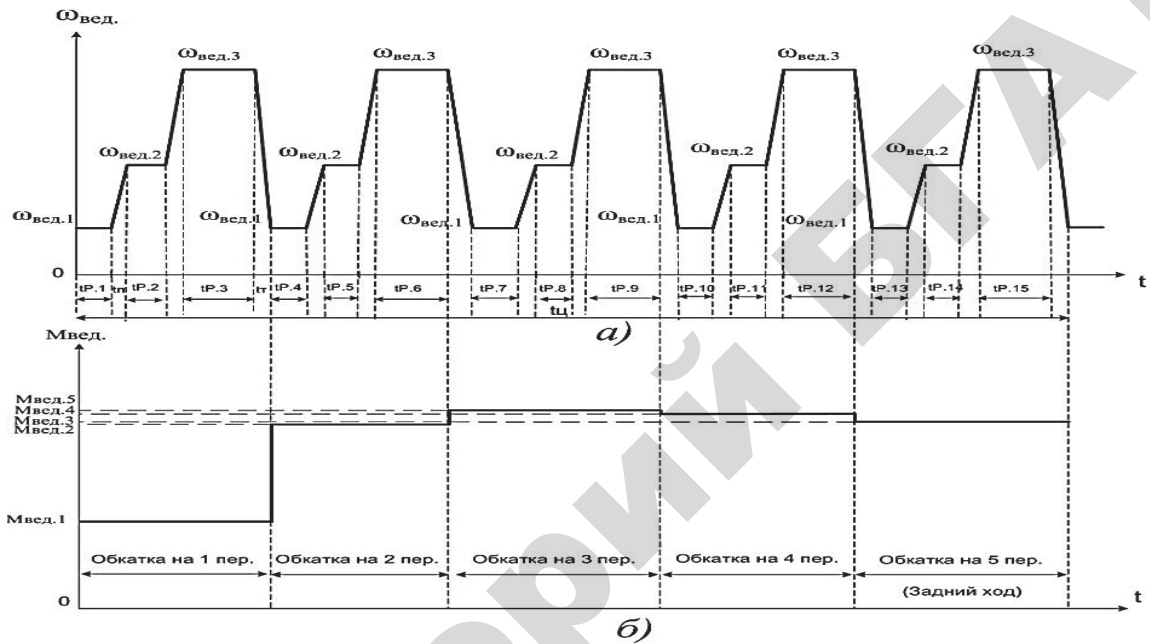


Рис. 1. Скоростная (а) и нагрузочная (б) диаграммы на ведущем валу (входном валу) многоступенчатой (пятиступенчатой) механической передачи

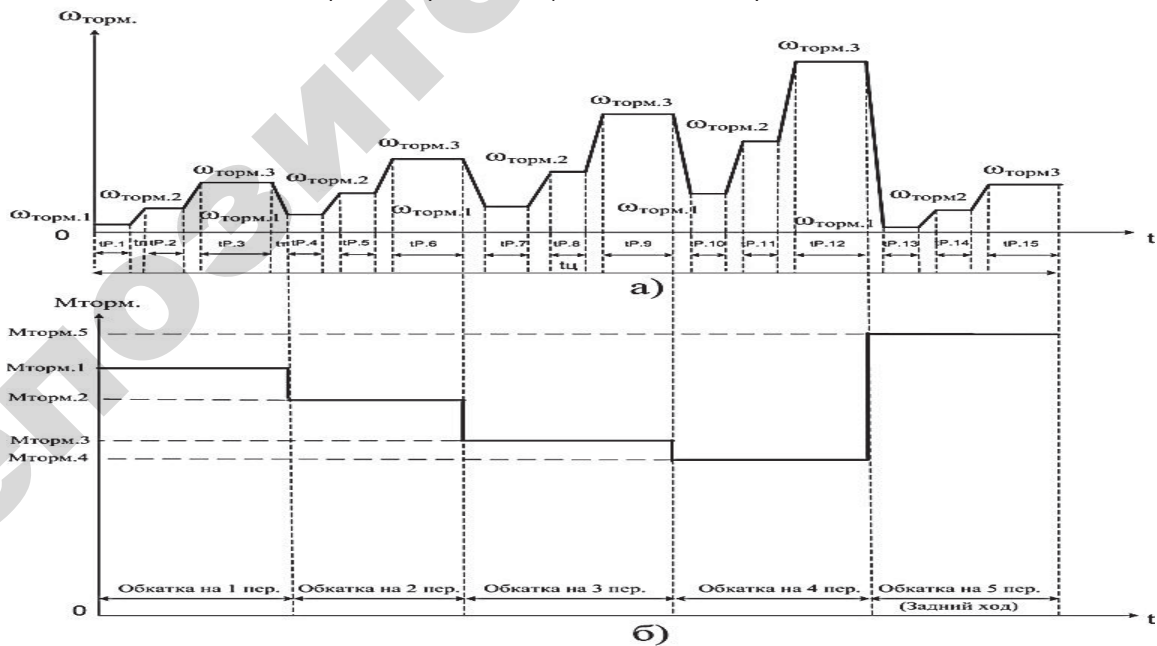


Рис. 2. Скоростная (а) и нагрузочная (б) диаграммы на ведомом валу (выходном валу) многоступенчатой (пятиступенчатой) механической передачи

это будет длительный режим работы с переменной нагрузкой. Поэтому предварительный выбор мощности двигателей при регулировании их угловой скорости с учетом изменения условий охлаждения можно найти через среднеквадратичный (эквивалентный) момент электродвигателя за время цикла t_{Σ} , т.е. за все время обкатки под нагрузкой [4]:

$$M_{\Sigma} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n M_i^2 \cdot t_i}{\sum_{i=1}^n \beta_{OX,i} \cdot t_i}}, \quad (3)$$

где M_i – электромагнитный момент двигателя на i -м участке нагрузочной диаграммы, Н·м;

$\beta_{OX,i}$ – коэффициент охлаждения самовентилируемого двигателя на i -м участке нагрузочной диаграммы;
 t_i – временной интервал i -го участка, мин;
 n – число временных интервалов.

Предварительно выбранный электродвигатель, работая в расчетном режиме, не будет нагреваться, если:

$$M_{\Sigma} \leq M_{НОМ}, \quad (4)$$

где $M_{НОМ}$ – номинальный момент выбранного двигателя, Н·м.

После проверки двигателя по нагреву выполняют проверку его на перегрузочную способность:

$$\frac{M_{MAX}}{M_{НОМ}} \leq \lambda_m, \quad (5)$$

где M_{MAX} – максимальное значение момента двигателя в цикле работы, Н·м;

λ_m – допустимая перегрузочная способность двигателя по моменту, о.е.

Учитывая, что обкатка и испытание механических передач производится в широком диапазоне скоростей и, как правило, охватывает и вторую зону регулирования, в которой электродвигатель работает с переменным магнитным потоком возбуждения, то эквивалентный момент электродвигателя уже не в полной мере отражает его нагрев, в нашем случае это будет лишь предварительным выбором мощности АД. Следовательно, нагрузочную диаграмму $M(t)$ нужно пересчитать в нагрузочную диаграмму тока электродвигателя $I(t)$, затем по ней рассчитать эквивалентный ток I_{Σ} за время t_{Σ} [4] и уточнить номинальную мощность АД:

$$I_{\Sigma} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n I_i^2 \cdot t_i}{\sum_{i=1}^n \beta_{OX,i} \cdot t_i}}, \quad (6)$$

где I_i – ток двигателя на i -м участке нагрузочной диаграммы электропривода, А.

Если $I_{\Sigma} \leq I_{НОМ}$, то выбранный двигатель удовлетворяет условию нагрева.

После проверки двигателя по условию нагрева проводится проверка его перегрузочной способности по току:

$$\frac{I_{max}}{I_H} \leq \lambda_I, \quad (7)$$

где I_{max} – максимальное значение тока на диаграмме $I(t)$, А;

I_H – номинальный ток электродвигателя, А;

λ_I – допустимая перегрузочная способность двигателя по току, о.е.

Если хотя бы одно из вышеуказанных условий не выполняется, проводят увеличение номинальной мощности двигателя на одну ступень и расчет повторяют до тех пор, пока оба условия не выполняются.

Значение абсолютного скольжения АД s_a , при котором момент приводной равен тормозному для соответствующих двигателей, определим из выражения статической механической характеристики АД, приведенной в работе [4]:

$$M = \frac{2 \cdot M_K}{\frac{s_{ак}}{s_a} + \frac{s_a}{s_{ак}}}, \quad (8)$$

где M_K – критический момент двигателя, Н·м;

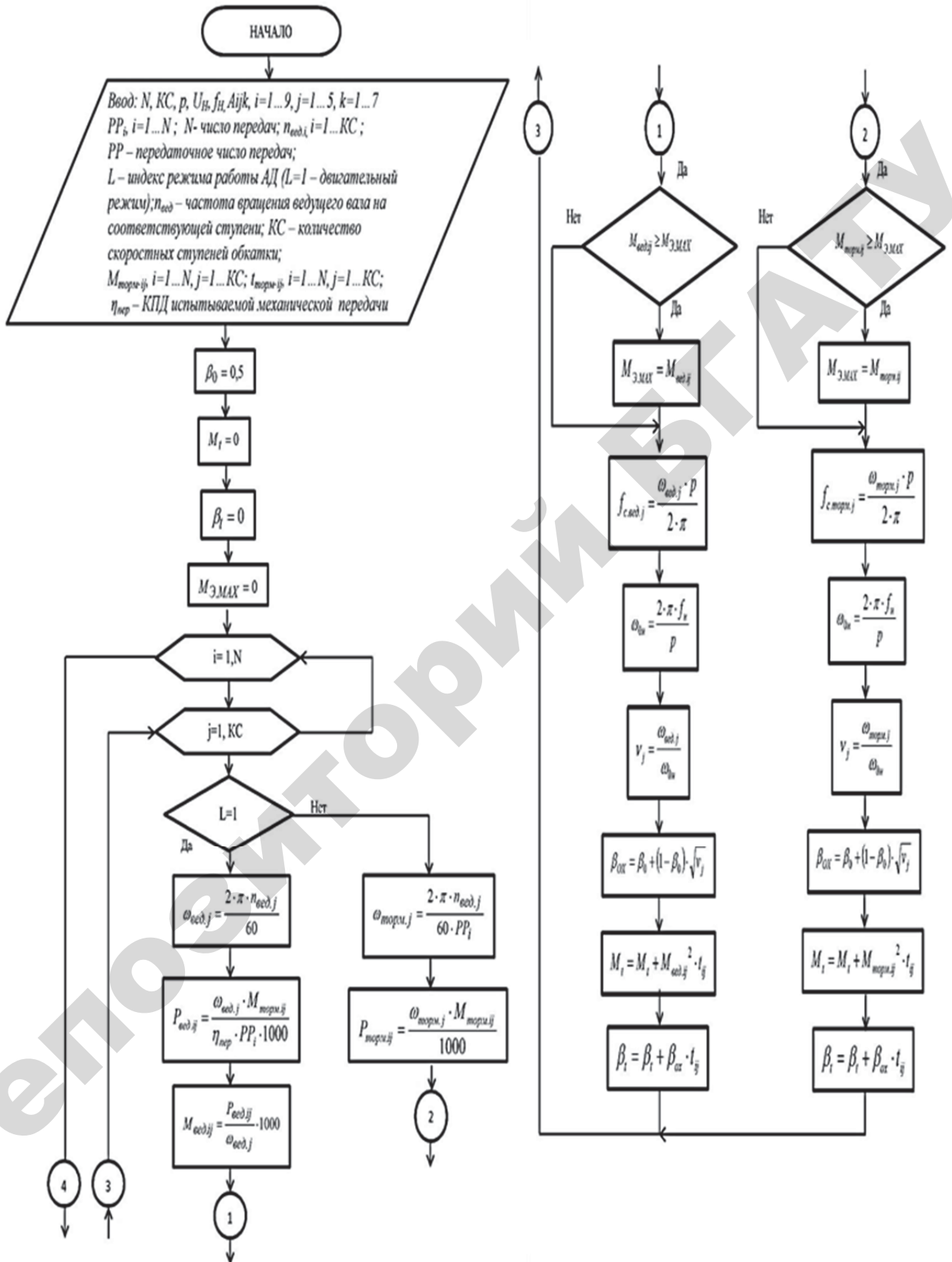
$s_{ак}$ – абсолютное критическое скольжение АД, о.е.

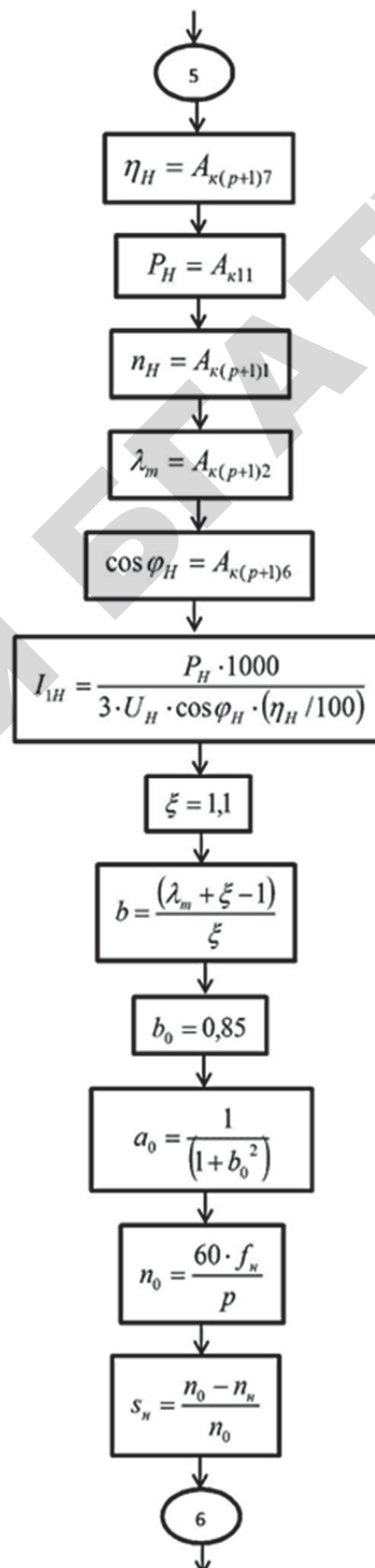
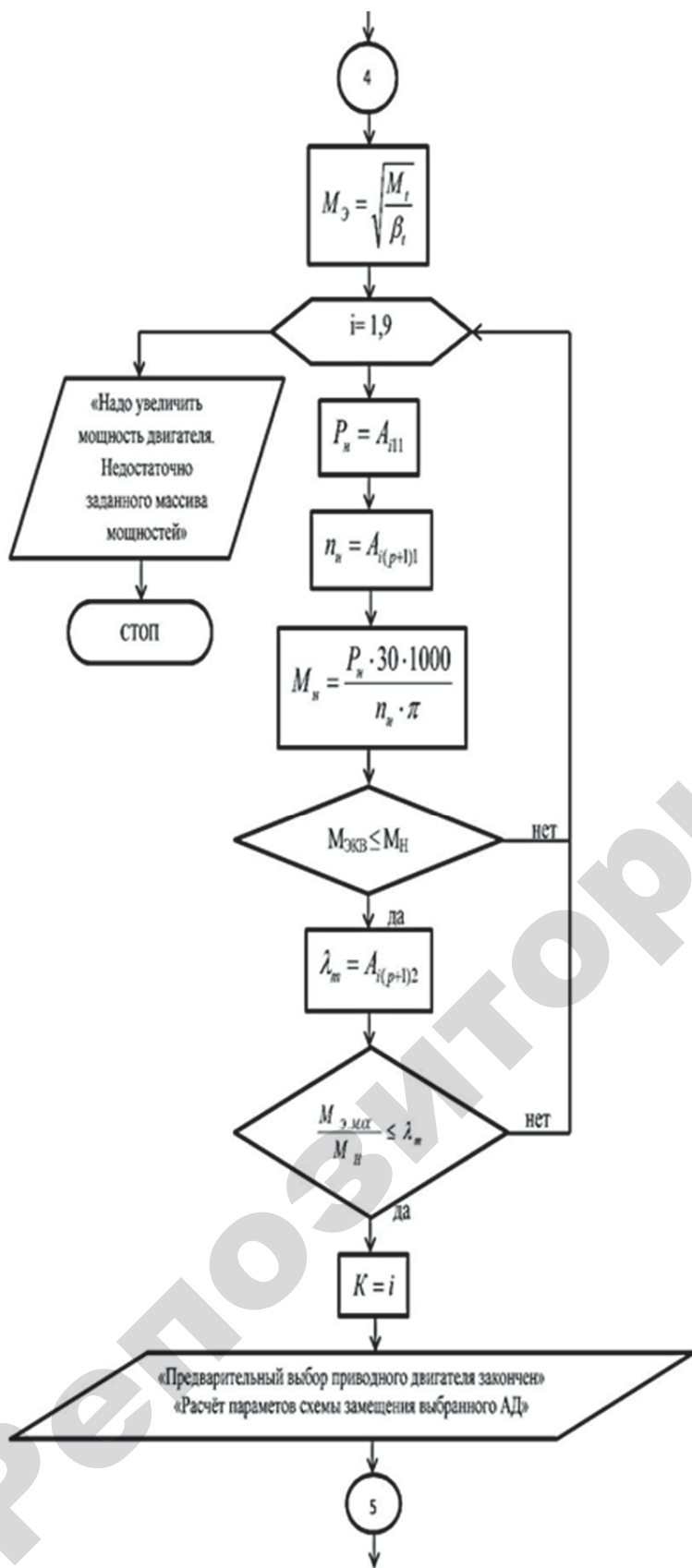
Откуда абсолютное скольжение АД:

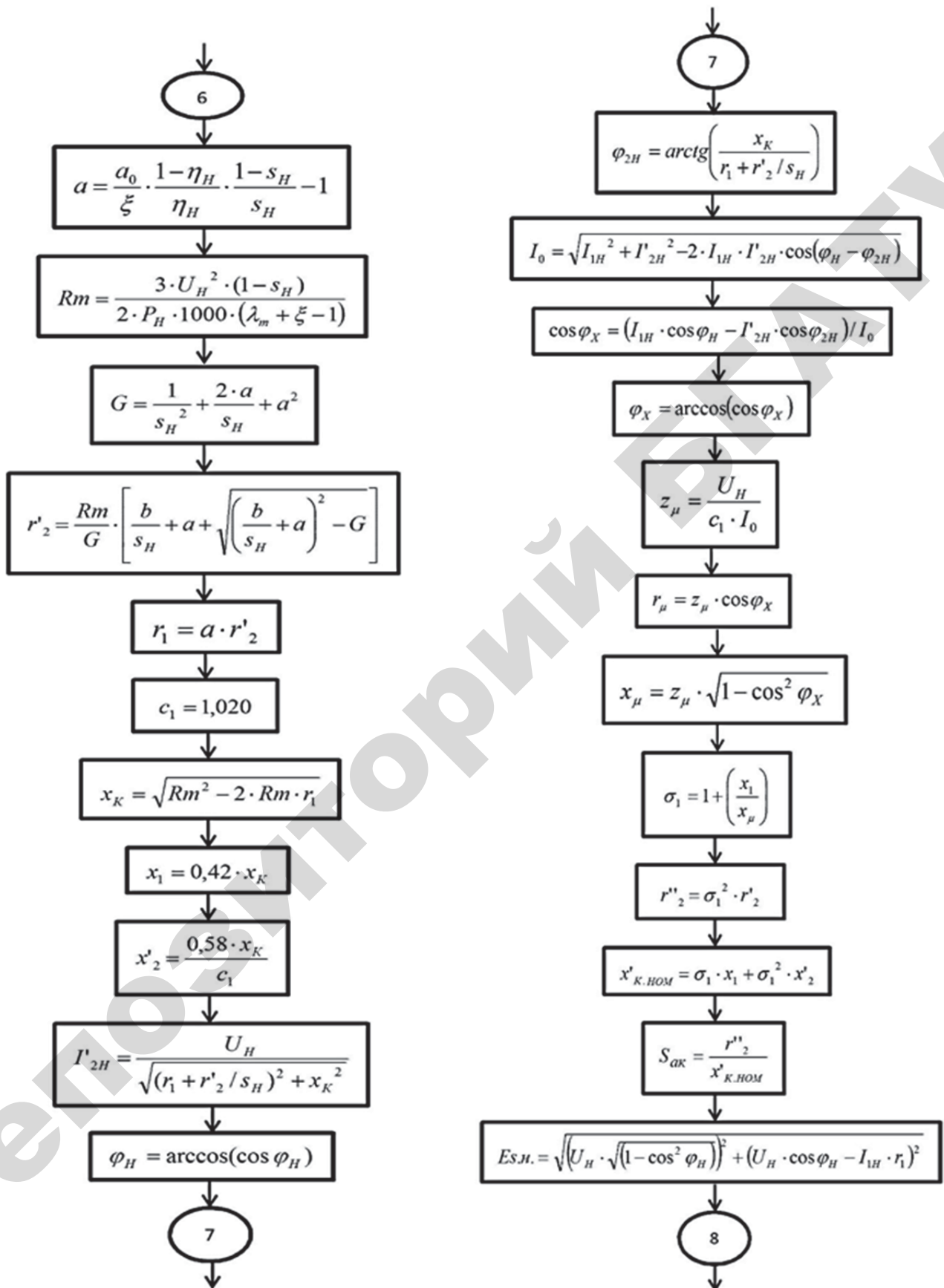
$$s_a = \frac{M_K}{M} \cdot s_{ак} - s_{ак} \cdot \sqrt{\left(\frac{M_K}{M}\right)^2 - 1}. \quad (9)$$

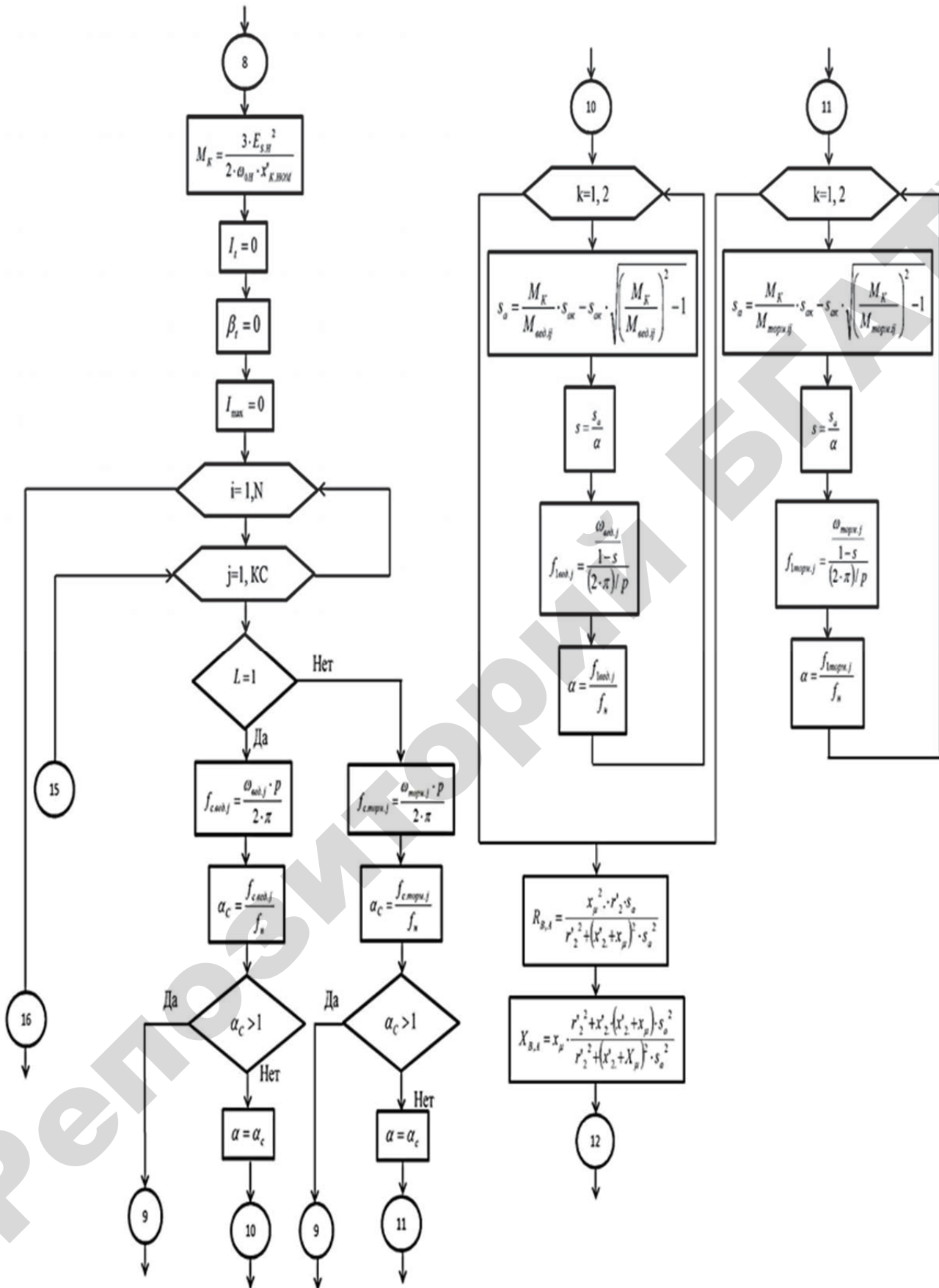
Далее, после определения абсолютного скольжения АД по общеизвестным формулам, приведенным ниже в блок-схеме алгоритма, производят уточнения скольжения, частоты напряжения питания двигателя, относительной синхронной частоты питающего напряжения.

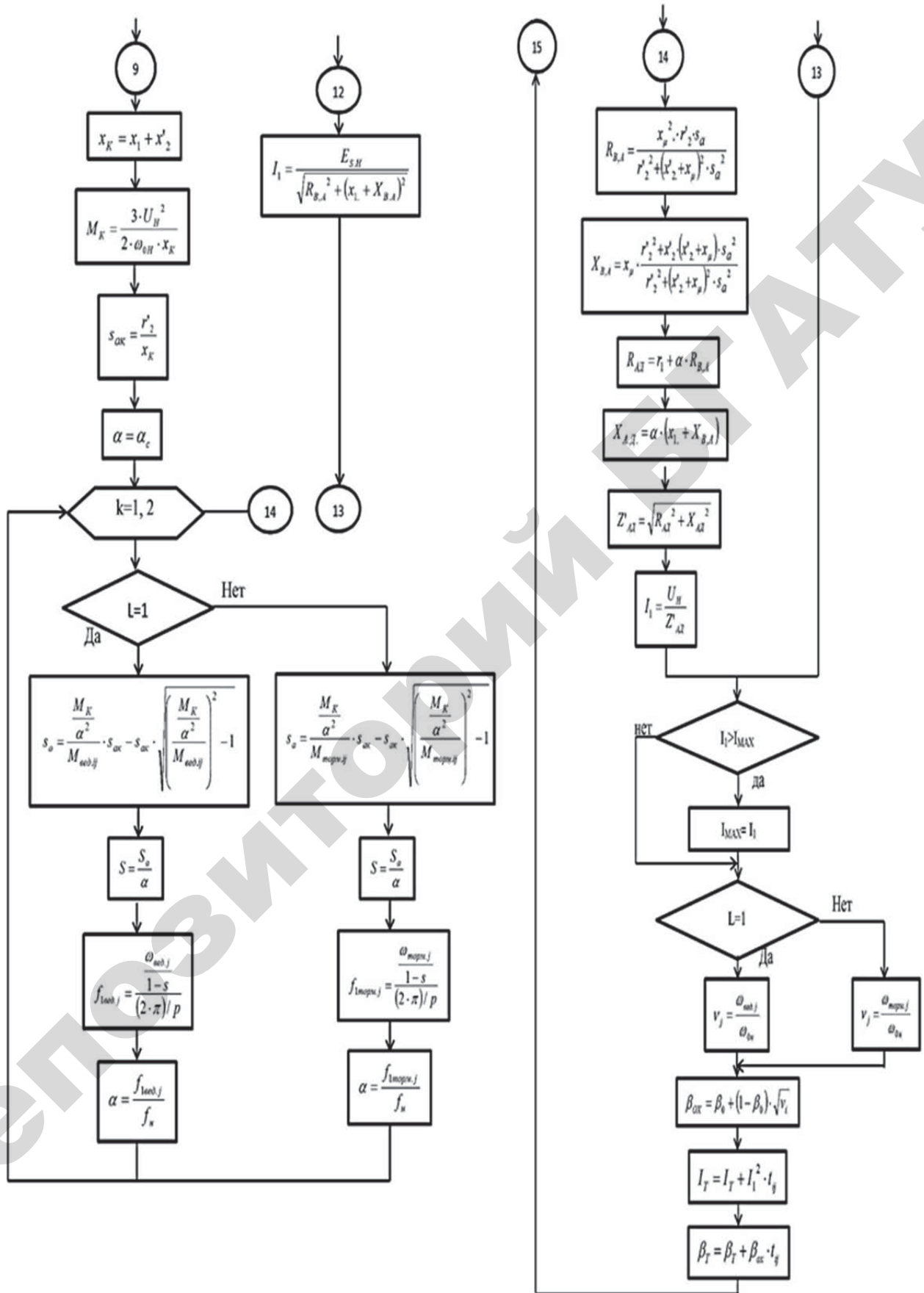
Учитывая вышеизложенное и основываясь на результатах исследований, приведенных в работах [4-10], авторами разработана блок-схема алгоритма методики расчета мощности приводного и тормозного АД при частотном регулировании скорости в обкаточно-испытательных стендах механических передач, приведенная на рис. 3. В методике не учитываются потери переходных процессов при переключении режимов обкатки, так как они незначительны из-за кратковременности переходного процесса.











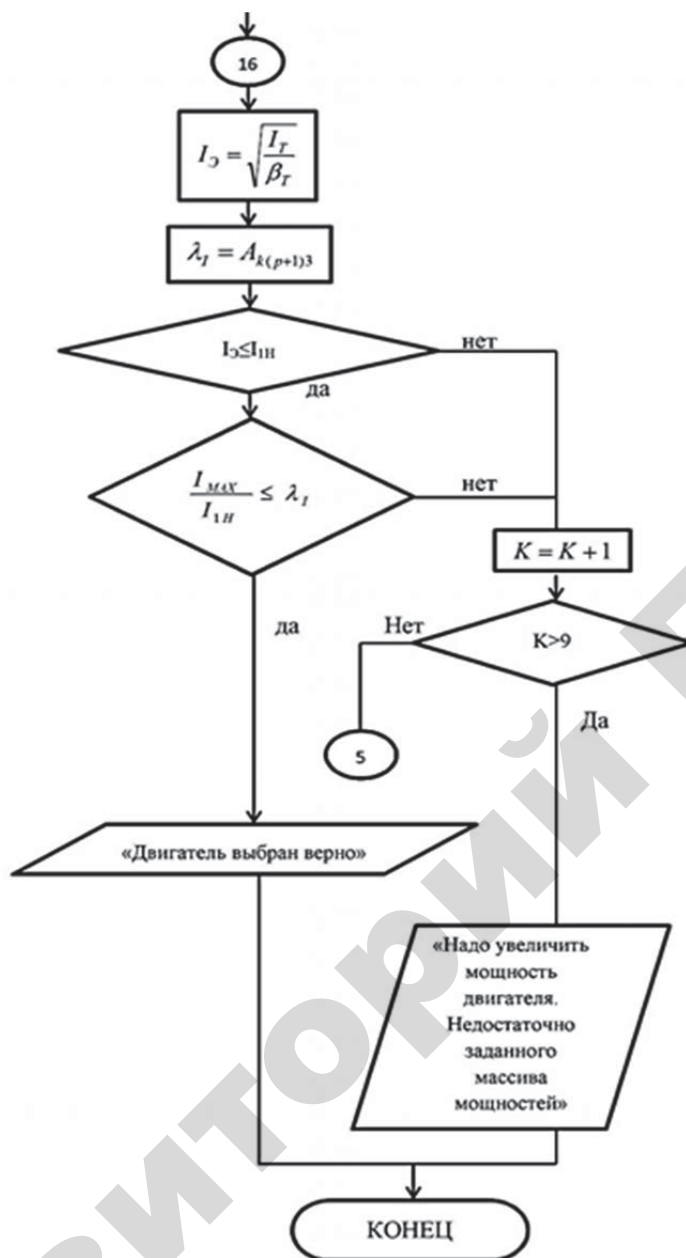


Рис. 3. Блок-схема алгоритма расчета мощности приводного и тормозного асинхронных двигателей при частотном регулировании скорости в обкаточно-испытательных стендах механических передач

где N – число передач КПП;
 KC – количество скоростных ступеней обкатки;
 A_{ijk} – трехмерный массив паспортных данных АД (номинальные мощность, частота вращения, коэффициент полезного действия, кратность максимального момента, номинальный коэффициент мощности и др.);
 p – число пар полюсов АД;
 U_H – номинальное напряжение питания (фазное), В;
 f_H – номинальная частота переменного тока питающей сети, 50Гц;
 $PP_i, i = 1 \dots N$ – передаточные числа передач КПП;

$n_{вед,i}, i = 1 \dots KC$ – частота вращения ведущего вала на соответствующей скоростной ступени обкатки, об/мин;
 $M_{торм,ij}, i = 1 \dots N, j = 1 \dots KC$ – тормозной момент на ведомом валу, на соответствующей передаче и скоростной ступени обкатки, Н·м;
 $t_{торм,ij}, i = 1 \dots N, j = 1 \dots KC$ – продолжительность обкатки на соответствующей передаче и скоростной ступени обкатки, мин;
 β_0 – коэффициент, зависящий от способа охлаждения и степени защиты АД, для закрытого самовентилируемого двигателя $\beta_0=0,5$;

$\omega_{вед,i}$, $i = 1 \dots KC$ – угловая скорость ведущего вала на соответствующей скоростной ступени обкатки, рад/с;

$P_{вед,ij}$, $i = 1 \dots N$, $j = 1 \dots KC$ – мощность на ведущем валу на соответствующей передаче и скоростной ступени обкатки, Вт;

$M_{вед,ij}$, $i = 1 \dots N$, $j = 1 \dots KC$ – приведенный тормозной момент, на ведущем валу, на соответствующей передаче и скоростной ступени обкатки, Н·м;

$f_{с.вед,j}$ – частота напряжения питания приводного двигателя на соответствующей скоростной ступени обкатки, Гц;

$f_{с.торм,j}$ – частота напряжения питания тормозного двигателя на соответствующей скоростной ступени обкатки, Гц;

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

v_i – относительная угловая скорость, о.е.;

β_{0X} – коэффициент изменения теплоотдачи самовентилируемого электродвигателя;

M_{Σ} – среднеквадратичный (эквивалентный) момент электродвигателя за время цикла $t_{ц}$, Н·м;

P_H – номинальная мощность двигателя, кВт;

n_H – номинальная частота вращения двигателя, об/мин;

M_H – номинальный момент двигателя, Н·м;

M_{max} – максимальное значение момента двигателя в цикле работы, Н·м;

λ_m – кратность максимального момента к номинальному, о.е.;

η_H – номинальный коэффициент полезного действия АД, %;

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

$\eta_{пер}$ – коэффициент полезного действия испытуемой механической передачи, о.е.;

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

b – расчетный 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.;

n_0 – синхронная частота вращения магнитного поля статора АД, мин⁻¹;

s_H – номинальное скольжение АД, о.е.;

a – 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_1 – активное сопротивление обмотки статора, Ом;

c_1 – коэффициент приведения параметров Т-образной схемы замещения АД к Г-образной;

x_K – индуктивное сопротивление обмоток для режима короткого замыкания (при неподвижном роторе), Ом;

x_1 – индуктивное сопротивление рассеяния фазы статора, Ом;

x'_2 – индуктивное сопротивление рассеяния фазы ротора, Ом;

I_{2H} – номинальный ток в обмотке ротора, приведенный к обмотке статора, А;

φ_H – угол между векторами тока \vec{I}_{1H} и напряжения питания \vec{U}_H , рад;

φ_{2H} – угол между векторами тока \vec{I}_{2H} и напряжения питания \vec{U}_H , рад;

I_0 – ток холостого хода, А;

$\cos\varphi_X$ – коэффициент мощности холостого хода;

φ_X – угол между векторами тока холостого хода

\vec{I}_0 и напряжения питания \vec{U}_H , рад;

z_{μ} – полное сопротивление цепи намагничивания, Ом;

r_{μ} – активное сопротивление ветви намагничивания, Ом;

x_{μ} – индуктивное сопротивление ветви намагничивания, Ом;

σ_1 – уточненный коэффициент приведения параметров Т-образной схемы замещения АД к Г-образной;

r''_2 – активное сопротивление обмотки ротора, приведенное к обмотке статора, для Г-образной схемы замещения АД, Ом;

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

$s_{ак}$ – абсолютное критическое скольжение;

$E_{S,H}$ – действующее значение номинальной ЭДС статора, В;

M_K – критический момент двигателя, Н·м;

α_c – относительная синхронная частота питающего напряжения, о.е.;

s_a – вычисленное абсолютное скольжение АД, соответствующее тормозному моменту, заданному в технологических требованиях на обкатку КПП, о.е.;

s – уточненное скольжение АД, о.е.;

$f_{1.вед,j}$ – уточненное значение частоты напряжения питания приводного двигателя на соответствующей скоростной ступени обкатки, Гц;

$f_{1.торм,j}$ – уточненное значение частоты напряжения питания тормозного двигателя на соответствующей скоростной ступени обкатки, Гц;

α – уточненная относительная синхронная частота питающего напряжения, о.е.;

$R_{B,A}$ – «внутреннее» активное сопротивление АД при номинальной частоте и абсолютном скольжении s_a , Ом;

$X_{B,A}$ – «внутреннее» индуктивное сопротивление АД при номинальной частоте и абсолютном скольжении s_a , Ом;

I_l – расчетный ток статора АД искусственной электромеханической характеристики, А;

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

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

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

$I_{Э}$ – эквивалентный ток электродвигателя за время цикла, А;

I_{max} – максимальный ток нагрузочной диаграммы электродвигателя, А.

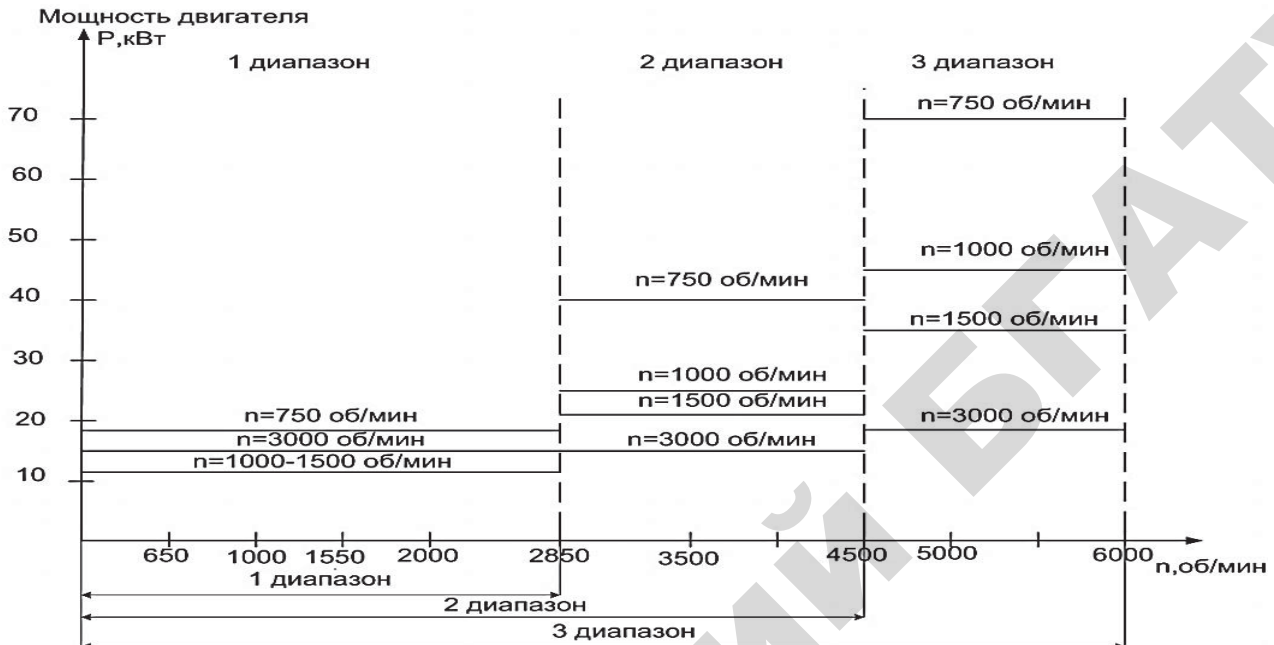


Рис. 4. Диаграмма изменения мощностей приводного двигателя в зависимости от диапазона скоростей обкатки и выбранной номинальной частоты вращения АД

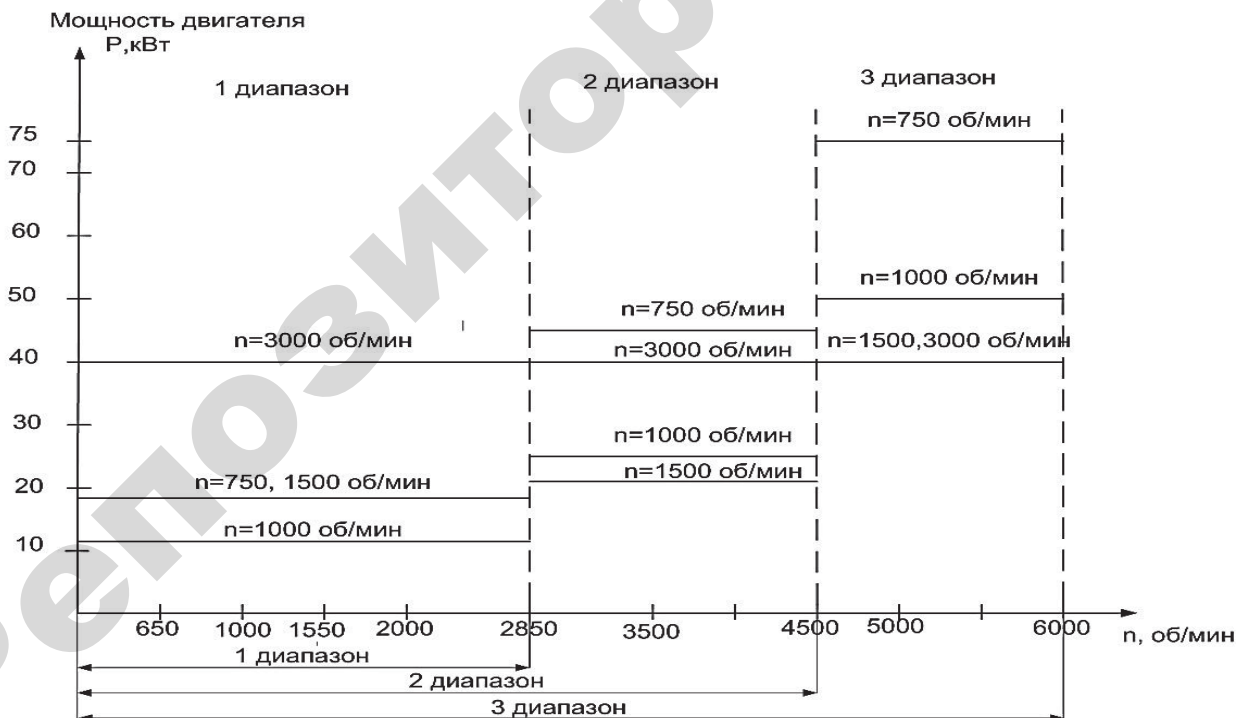


Рис. 5. Диаграмма изменения мощностей тормозного двигателя в зависимости от диапазона скоростей обкатки и выбранной номинальной частоты вращения АД

Проведенный вычислительный эксперимент с использованием разработанной методики при обкатке КПП ГАЗ-24 в соответствии с технологическими требованиями, сформированными в [11], показывает, что мощности приводного и тормозного двигателей будут зависеть от заданных диапазонов скоростей обкатки на ведущем валу, тормозных моментов на ведомом валу и выбранной номинальной частоты вращения АД, о чем свидетельствуют диаграммы, приведенные на рис. 4-5. Из анализа диаграмм мощностей следует, что с ростом верхнего значения диапазона скоростей обкатки должна увеличиваться и номинальная частота вращения двигателя, в противном случае необходимо завышать номинальную мощность АД. Проведенные расчеты показывают, что при обкатке автомобильных КПП, как правило, тормозные двигатели должны иметь меньшую номинальную частоту вращения и большую номинальную мощность в сравнении с приводными двигателями.

Заключение

Проведенные вычисления по разработанной методике расчета мощности приводного и тормозного АД при частотном регулировании скорости в обкаточно-испытательных стендах механических передач, обеспечивающих заданные технологические требования, подтверждают возможность практической реализации предложенного технического решения. При этом необходимо отметить, что мощности приводного и тормозного АД будут определяться технологическими требованиями на обкатку и зависеть от диапазона скоростей обкатки на ведущем валу, тормозных моментов на ведомом валу и выбранной номинальной частоты вращения двигателей.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Прищепов, М.А. Обоснование применения частотно-регулируемого асинхронного электропривода для стендов обкатки и испытания механических передач / М.А. Прищепов, Д.М. Иванов // Техническое и кадровое обеспечение инновационных технологий в сельском хозяйстве: материалы Междунар. науч.-практич. конф., Минск, 23-24 октября 2014 г.: в 2-х ч. / редкол.: И.Н. Шило [и др.]. – Минск: БГАТУ, 2014. – Ч. 2. – С. 159-162.

2. Прищепов, М.А. Энергетическая и технологическая эффективность систем электропривода обкаточно-испытательных стендов механических передач / М.А. Прищепов, Д.М. Иванов // Энергосбережение – важнейшее условие инновационного развития АПК: сб. научных статей Междунар. научно-технической

конф., Минск, 26-27 ноября 2015 г. / под ред. М.А. Прищепова. – Минск: БГАТУ, 2015. – 412 с.

3. Прищепов, М.А. Анализ существующих и обоснование перспективной системы электропривода обкаточно-испытательных стендов механических передач / М.А. Прищепов, Д.М. Иванов, В.В. Смоленчук // Агропанорама. – 2016. – № 2. – С. 26-33.

4. Фираго, Б.И. Теория электропривода / Б.И. Фираго, Л.Б. Павлячик. – М.: Техноперспектива, 2007. – 588 с.

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. – С. 20-32.

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

7. Прищепов, М.А. Статические характеристики асинхронных двигателей при частотном регулировании скорости / М.А. Прищепов, Д.М. Иванов, Е.М. Прищепова // Энергосбережение – важнейшее условие инновационного развития АПК: сб. научных статей Междунар. науч.-технич. конф., Минск, 23-24 ноября 2017 г. / под ред. М.А. Прищепова. – Минск: БГАТУ, 2017. – 400 с.

8. 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 // Агропанорама. – 2016. – № 6. – С. 20-30.

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

10. Прищепов, М.А. Расчет статических характеристик асинхронных электродвигателей с короткозамкнутым ротором в двигательном и генераторном режимах при частоте напряжения питания обмоток статора выше номинальной / М.А. Прищепов, Д.М. Иванов, Е.М. Прищепова // Агропанорама. – 2017. – № 3. – С. 26-34.

11. Сархошьян, Г.Н. Ремонт автомобиля ГАЗ-24 «Волга» / Г.Н. Сархошьян, В.Н. Малянов. – М.: Транспорт, 1980. – 220 с.

ПОСТУПИЛА В РЕДАКЦИЮ 27.12.2017