

УДК 621.313.33:004

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

Прищепов М.А., д.т.н.,
Иванов Д.М., аспирант,
Прищепова Е.М., ст. преподаватель
НИИМЭСХ БГАТУ

Аннотация – в статье представлен алгоритм расчёта номинальной мощности приводного и тормозного асинхронного двигателя 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.

Постановка проблемы. Процесс обкатки и испытания механических передач является важной завершающей операцией при изготовлении и ремонте механических передач. Данная операция проводится как на холостом ходу (без нагрузки), так и под нагрузкой.

Анализ последних достижений. 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 [1,2,3]. Только в этом случае можно обеспечивать высокопроизводительную, надёжную 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 трудоёмким 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 задаётся на ведущем (входном) валу механической передачи (рис.1 а) и нагрузочная диаграмма на ведомом (выходном) валу (рис.2б).

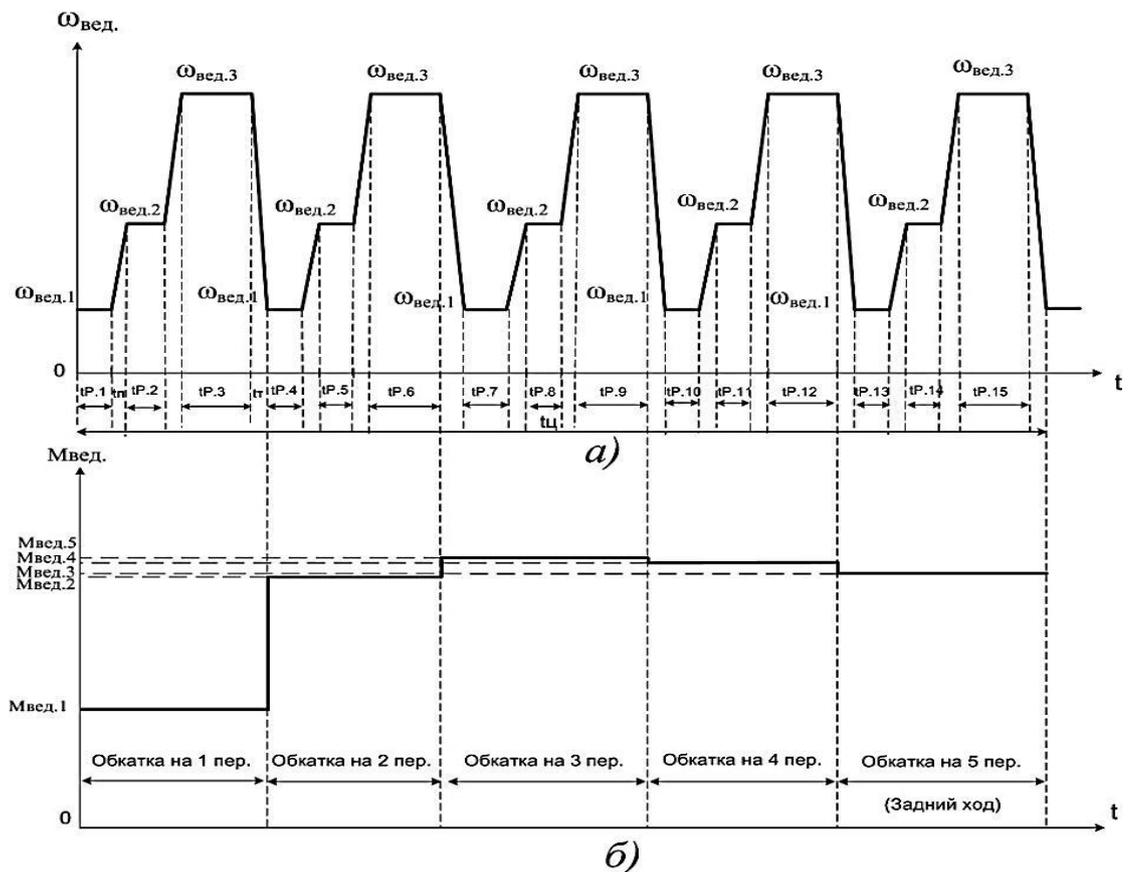


Рис. 1. Скоростная (а) и нагрузочная (б) диаграммы на ведущем валу (входном валу) многоступенчатой (пятиступенчатой) механической передачи.

Зная передаточное отношение механической передачи, производится соответствующий расчёт скоростей и моментов по формулам 1 и 2 на обоих валах и скоростные, и нагрузочные диаграммы строятся для её ведущего и ведомого валов (рис.1, 2). Если механическая передача имеет несколько

ступеней, т.е. обкатывается коробка перемены передач (КПП) транспортного средства, то пересчёт производится для каждой ступени.

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

где $\omega_{\text{вед}}$ – угловая скорость ведущего вала на соответствующей ступени механической передачи, рад/с;
 PP – передаточное число соответствующей ступени механической передачи, о.е.

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

где $M_{\text{торм}}$ – тормозной момент на ведомом валу, на соответствующей передаче и скоростной ступени обкатки, Н·м;
 $\eta_{\text{пер}}$ – коэффициент полезного действия испытуемой механической передачи, о.е.

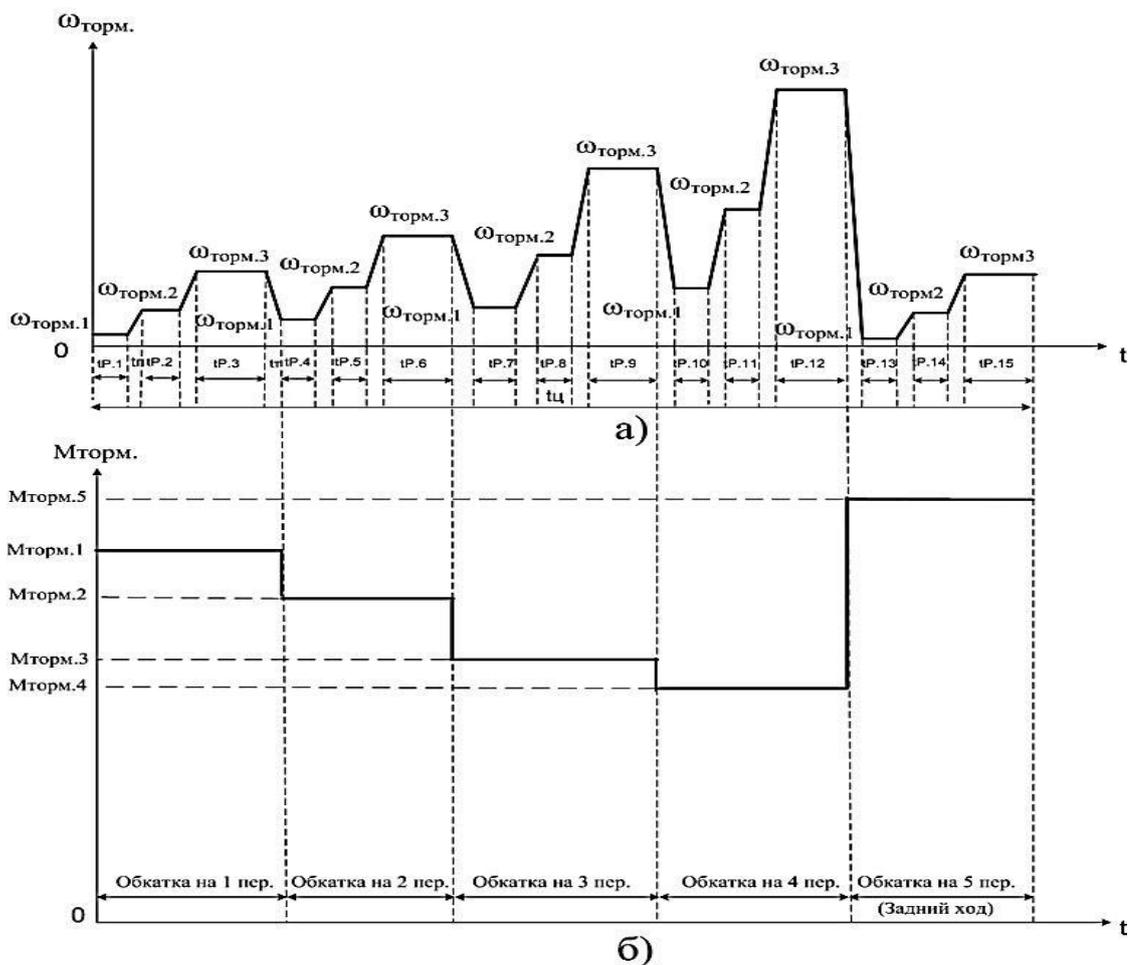


Рис. 2. Скоростная (а) и нагрузочная (б) диаграммы на ведомом валу (выходном валу) многоступенчатой (пятиступенчатой) механической передачи.

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.1.а). Так как время цикла будет более 10 минут, то в соответствии с характеристикой номинальных режимов двигателей это будет длительный режим работы с переменной нагрузкой. Поэтому предварительный выбор мощности двигателей при регулировании их угловой скорости с учётом изменения условий охлаждения можно найти через среднеквадратичный (эквивалентный) момент электродвигателя за время цикла $t_{ц}$, т.е. за всё время обкатки под нагрузкой [4]:

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

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

$\beta_{OX,i}$ – коэффициент охлаждения самовентилируемого двигателя на i -ом участке нагрузочной диаграммы;

t_i – временной интервал i -ого участка, мин;

n – число временных интервалов.

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

$$M_{\mathcal{E}} \leq M_{НОМ}; \quad (4)$$

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

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

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

где $M_{МАХ}$ – 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 $I_{\text{э}}$ за время t_y [4] и уточнить номинальную мощность АД:

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

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

Если $I_{\text{э}} \leq I_{\text{НОМ}}$; то выбранный двигатель удовлетворяет условию нагрева.

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

$$\frac{I_{\text{max}}}{I_{\text{H}}} \leq \lambda_I \quad (7)$$

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 расчёт 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.;

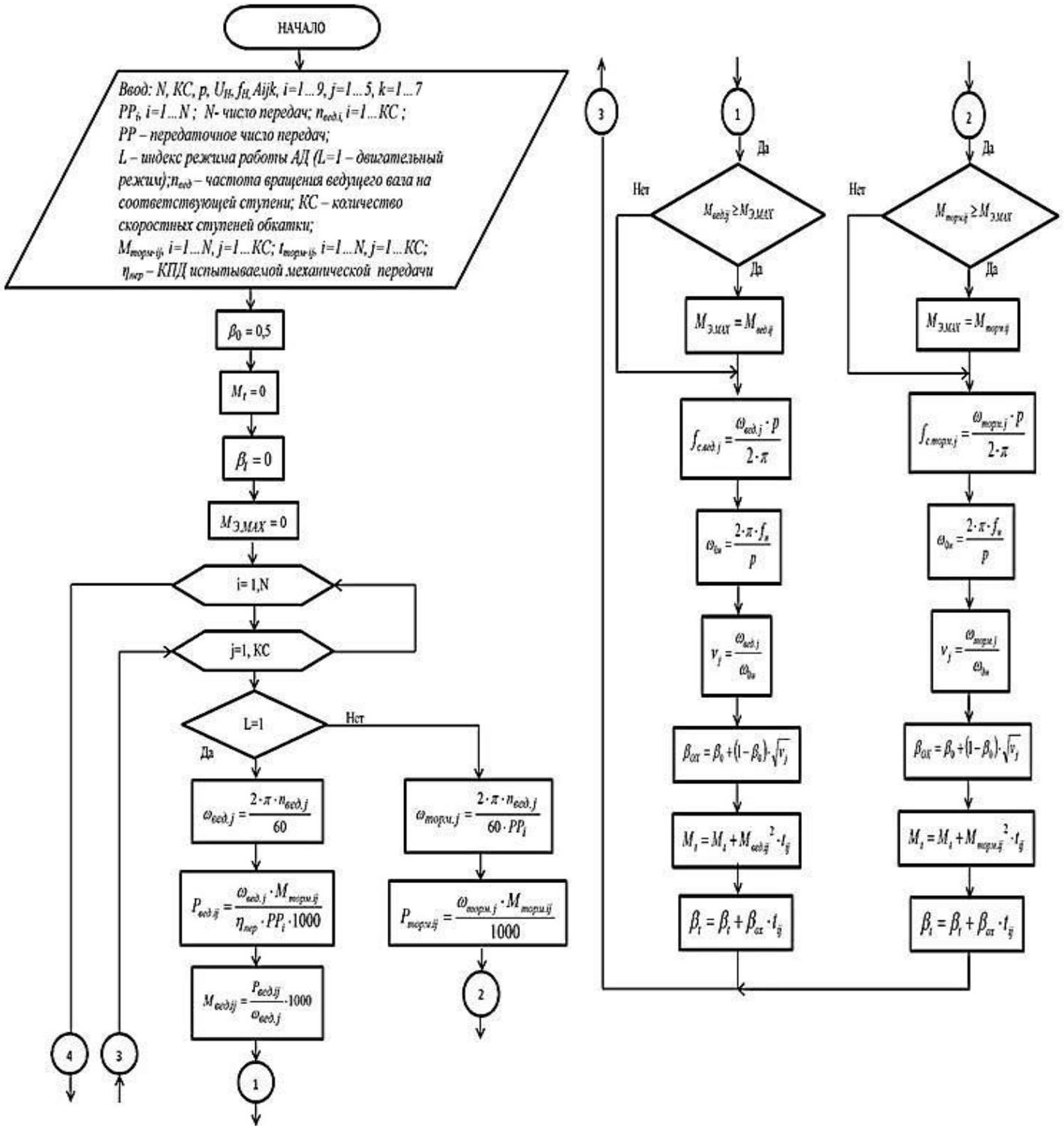
Откуда абсолютное скольжение АД:

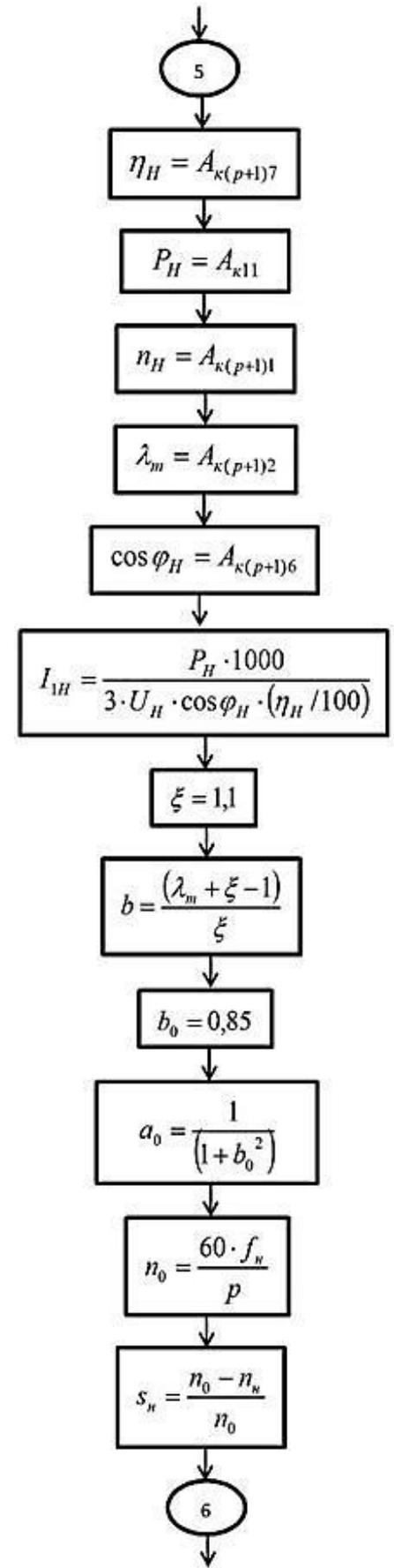
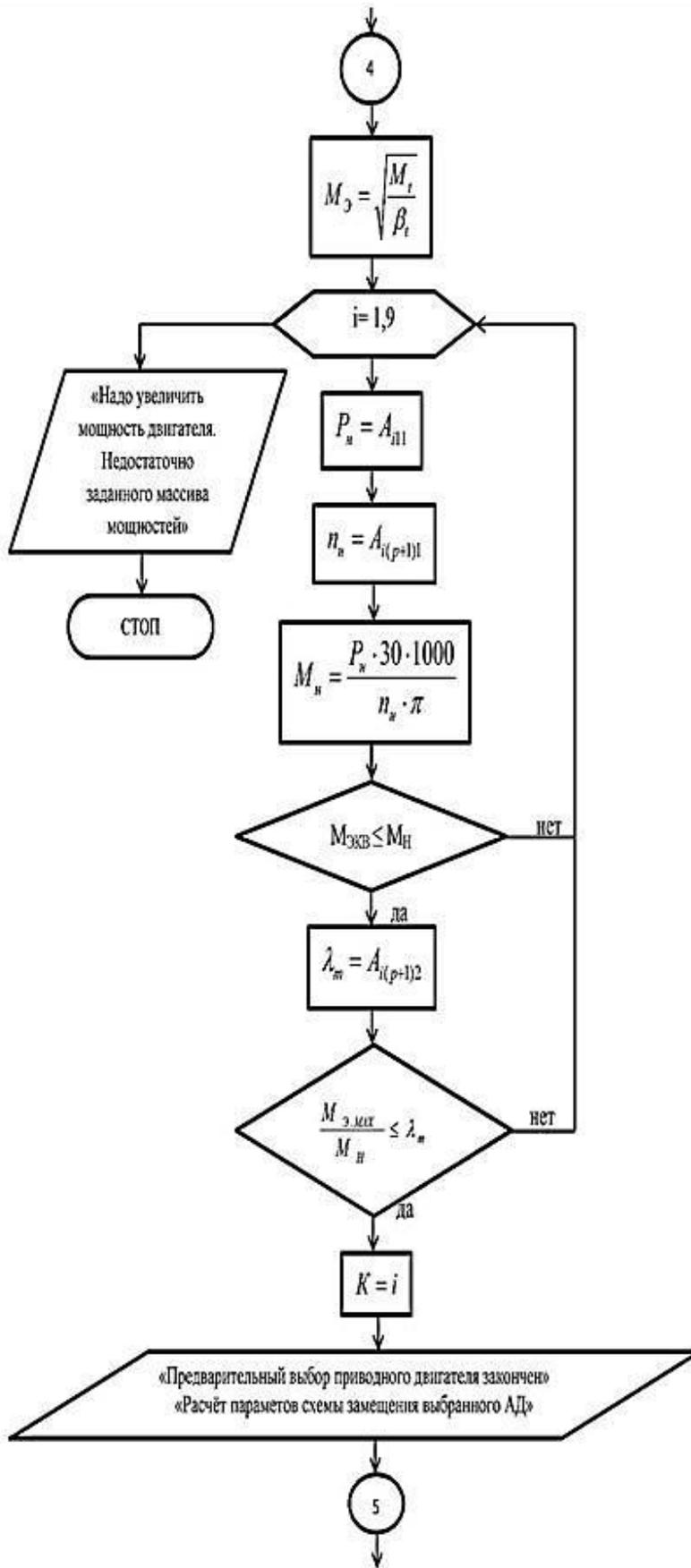
$$s_a = \frac{M_K}{M_{вед}} \cdot s_{ак} - s_{ак} \cdot \sqrt{\left(\frac{M_K}{M_{вед}}\right)^2 - 1} \quad (9)$$

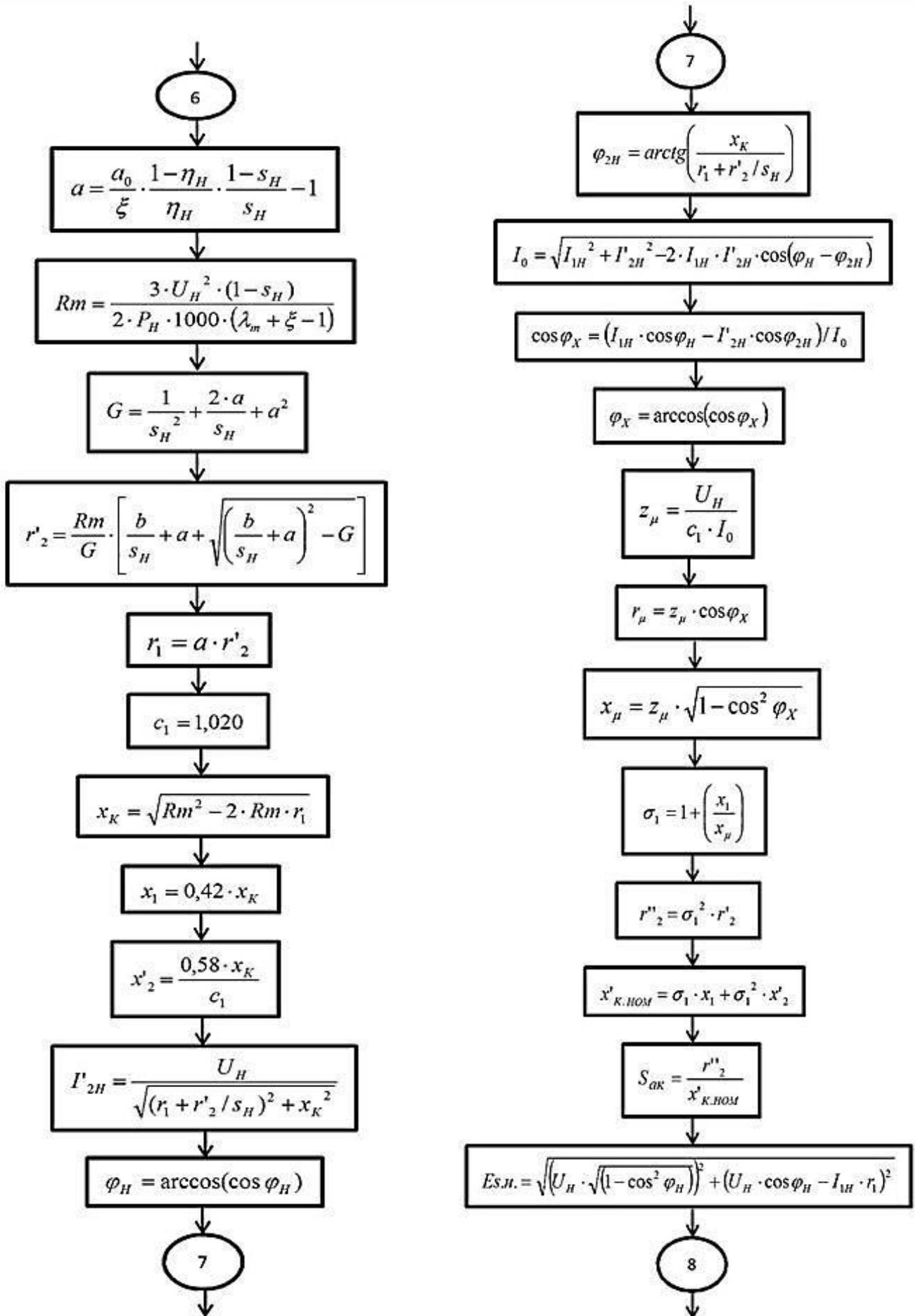
Далее после определения абсолютного скольжения АД по общеизвестным формулам, приведённым ниже в блок-схеме алгоритма, производят уточнения скольжения, относительной синхронной частоты питающего напряжения, частоты напряжения питания двигателя.

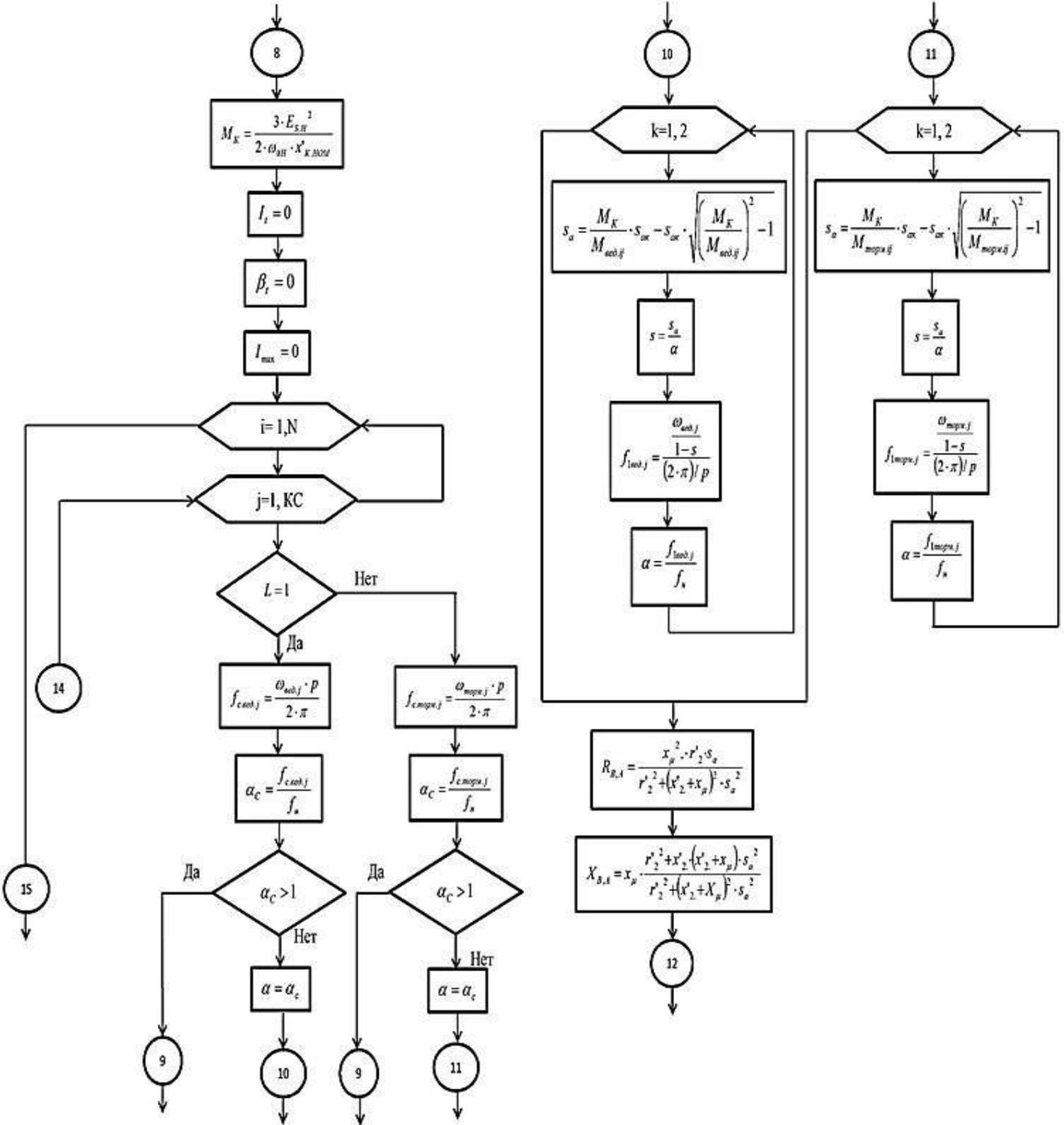
Учитывая вышеизложенное и основываясь на результатах исследований, приведенных в работах [4-9], авторами разработана блок-схема алгоритма методики расчёта мощности приводного и тормозного АД при частотном регулировании скорости в обкаточно-испытательных стендах механических передач, приведенная на рис. 3. В методике не учитываются потери переходных процессов при переключении режимов обкатки, так как они незначительны из-за кратковременности переходного процесса.

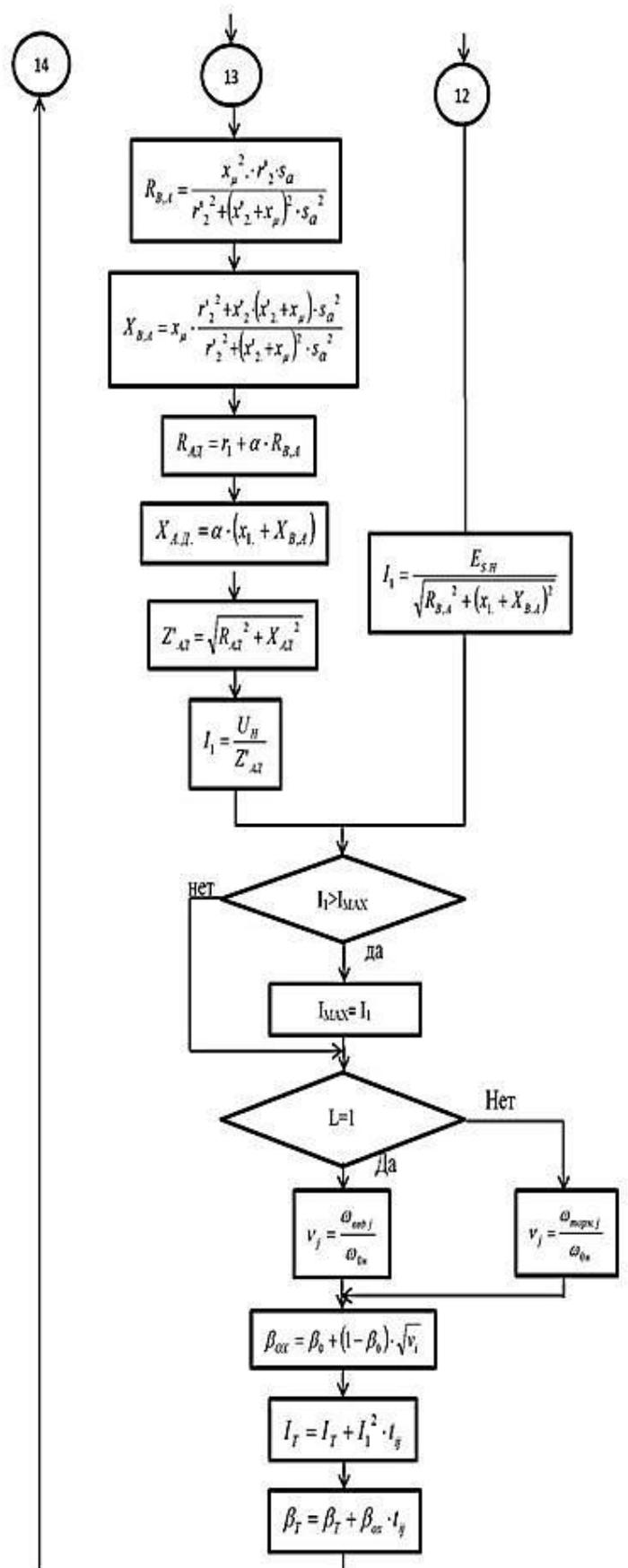
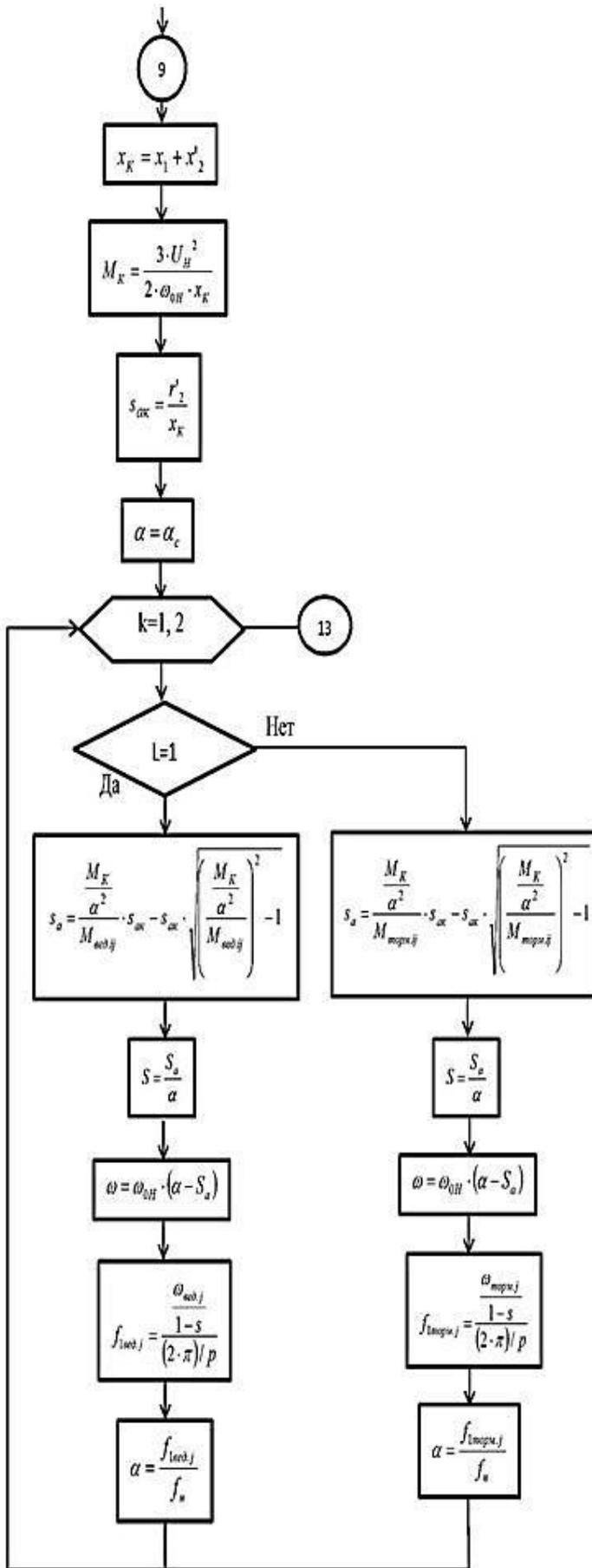
Проведённый вычислительный эксперимент с использованием разработанной методики при обкатке КПП ГАЗ-24 в соответствии с технологическими требованиями, сформулированными в [10], показывает, что мощности приводного и тормозного двигателей будут зависеть от заданных диапазонов скоростей обкатки на ведущем валу, тормозных моментов на ведомом валу и выбранной номинальной частоты вращения АД, о чём 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. Проведённые расчёты 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.











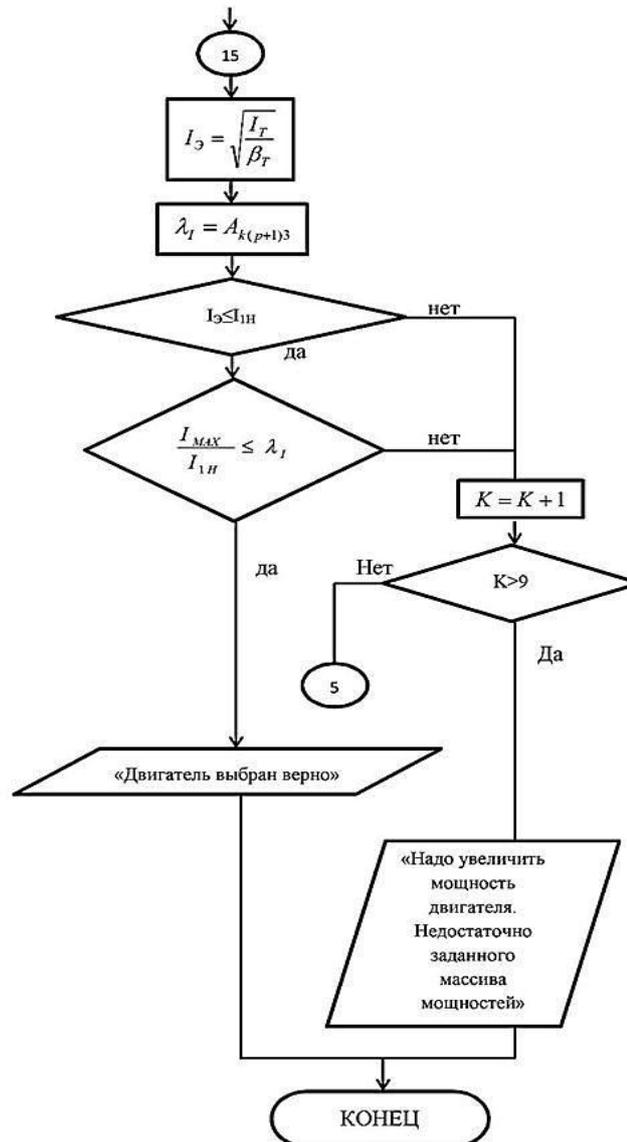


Рис. 3. Блок-схема алгоритма расчёта мощности приводного и тормозного асинхронных двигателей при частотном регулировании скорости в обкаточно-испытательных стендах механических передач.

N – число передач КПП;

$KС$ – количество скоростных ступеней обкатки;

A_{ijk} – трёхмерный 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;

$n_{вед,i}, i=1 \dots KС$ – частота вращения ведущего вала на соответствующей скоростной ступени обкатки, об/мин;

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

- $t_{\text{торм},ij}$, $i=1\dots N$, $j=1\dots \text{КС}$ – 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 $\beta_0=0,5$;
- $\omega_{\text{вед},i}$, $i=1\dots \text{КС}$ – угловая скорость ведущего вала на соответствующей скоростной ступени обкатки, рад/с;
- $P_{\text{вед},ij}$, $i=1\dots N$, $j=1\dots \text{КС}$ – мощность на ведущем валу на соответствующей передаче и скоростной ступени обкатки, Вт;
- $M_{\text{вед},ij}$, $i=1\dots N$, $j=1\dots \text{КС}$ – приведенный тормозной момент на ведущем валу, на соответствующей передаче и скоростной ступени обкатки, Н·м;
- $f_{\text{с.вед},j}$ – частота напряжения питания приводного двигателя на соответствующей скоростной ступени обкатки, Гц;
- $f_{\text{с.торм},j}$ – 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 $t_{\text{ц}}$, 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;
- $\eta_{\text{пер}}$ – 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 – расчётный вспомогательный коэффициент, о.е;
- $b_0=(0,7-0,85)$ – коэффициент загрузки АД, для которого коэффициент полезного действия максимальный, рекомендуем при расчёте принять равным 0,85, о.е;
- a_0 – вспомогательный коэффициент, о.е;
- p_0 – синхронная частота вращения магнитного поля статора АД, мин⁻¹;
- s_H – номинальное скольжение АД, о.е;
- a – отношение активных сопротивлений обмоток АД $a=r_1/r'_2$, 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_I – уточнённый 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;

$x'_{K,НОМ}$ – 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 – уточнённое скольжение АД, о.е.;

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

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

α – уточнённая 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_I – расчётный ток статора АД искусственной электромеханической характеристики, А;

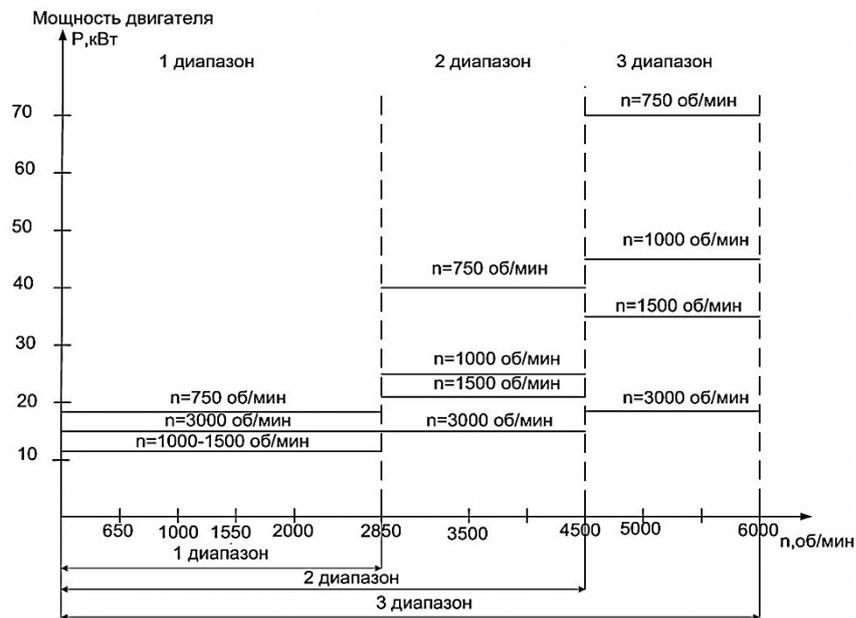
$R_{АД}$ – активное сопротивление эквивалентной схемы АД, Ом;

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

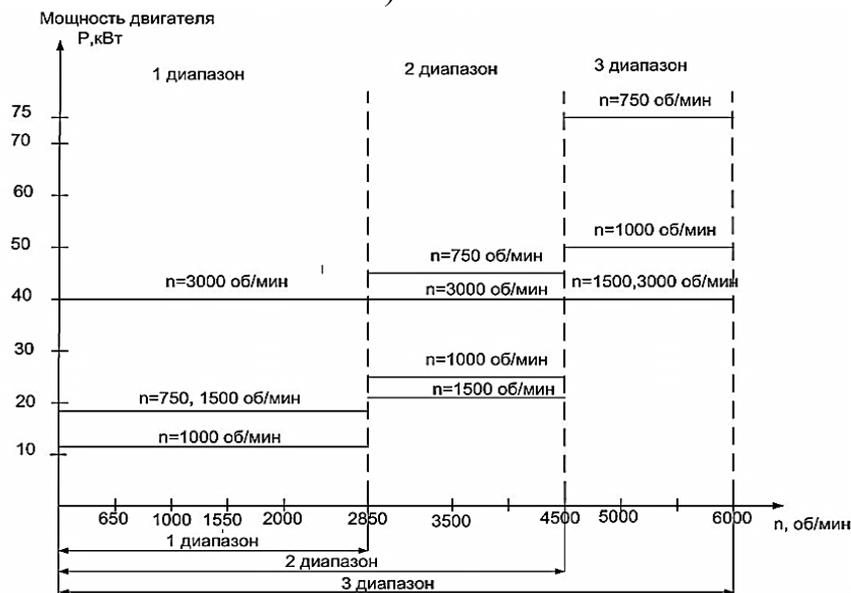
$Z'_{А,Д}$ – полное сопротивление цепи АД при абсолютном скольжении s_a и относительной частоте α , Ом;

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

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



а)



б)

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

Выводы. Проведённые вычисления по разработанной методике расчёта мощности приводного и тормозного АД при частотном регулировании скорости в обкаточно-испытательных стендах механических передач, обеспечивающих заданные технологические требования, показывают 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.

Литература:

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 Международной научно-практической конференции. Минск, 23-24 октября 2014 г. В 2 ч. Ч. 2 / редкол.: И.Н. Шило и др. – Минск: БГАТУ, 2014. – 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: сборник научных статей Международной научно-технической конференции. Минск, 26-27 ноября 2015г. /под ред. М.А. Прищепова. – Минск : БГАТУ, 2015. – 412с.

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

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

5. *Прищепов, М.А., Прищепова, Е.М., Иванов, Д.М.* Расчёт параметров схемы замещения асинхронных двигателей по каталожным данным и построение их естественных механических и электромеханических характеристик//Агропанорама, 2016.-№5.- с. 20-32.

6. *Гридин, В.М.* Расчет параметров схемы замещения асинхронных двигателей по каталожным данным. Электричество. 2012;(5):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: сборник научных статей Международной научно-технической конференции. Минск, 23-24 ноября 2017г. /под ред. М.А. Прищепова. – Минск : БГАТУ, 2017. – 400с.

8. *Прищепов, М.А., Иванов, Д.М., Прищепова, Е.М.* Расчёт статических характеристик асинхронных электродвигателей с короткозамкнутым ротором

в двигательном и генераторном режимах при частотном регулировании скорости и стабилизации потока возбуждения статора // Агропанорама, 2016. - №6. – с.20-30.

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

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

РОЗРАХУНОК ПОТУЖНОСТІ ПРИВODНОГО І ГАЛЬМІВНОГО АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ ПРИ ЧАСТОТНОМУ РЕГУЛЮВАННІ ШВИДКОСТІ В ОБКАТУВАЛЬНО-ВИПРОБУВАЛЬНИХ СТЕНДАХ МЕХАНІЧНИХ ПЕРЕДАЧ

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

Анотація - у статті представлено алгоритм розрахунку номінальної потужності приводного і гальмівного асинхронного двигуна при частотному регулюванні в обкатувально-випробувальних стендах механічних передач.

POWER CALCULATION UP TO AND NORMAN CHAN OF ASTON MOTORS AT REGULAR SPEED TO STAGING-ESTATE STAND MECHANIC GEAR

M. Prishchepov, D. Ivanov O. Prischepova

Summary

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.