

УДК 621.3

Г. С. Ленеvский, О. А. Капитонов, А. С. Третьяков

РАЗРАБОТКА УТОЧНЕННОЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ МОДЕЛИ АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ

UDC 621.3

G. S. Lenevsky, O. A. Kapitonov, A. S. Tretiakov

DEVELOPMENT OF THE REFINED ELECTROMAGNETIC MODEL OF AN ASYNCHRONOUS ELECTRIC MOTOR

Аннотация

Описаны уточненная электромагнитная модель асинхронного электродвигателя и ее составные части. Обоснована необходимость идентификации параметров схемы замещения асинхронного электродвигателя, а также учета зависимостей активных и индуктивных сопротивлений от скольжения. Проведены анализ и сравнительная оценка существующих методик идентификации. На основании анализа разработана оригинальная методика расчета параметров схемы замещения. Представлена методика учета потерь в стали и эффекта вытеснения тока в стержнях ротора исследуемого электродвигателя.

Ключевые слова:

асинхронный электродвигатель, схема замещения, идентификация параметров, эффект вытеснения тока.

Abstract

The refined electromagnetic model of an asynchronous electric motor and its components are described. The necessity of identifying equivalent circuit parameters for the asynchronous electric motor is justified. It is also essential to take into account the dependence of active resistance and inductive reactance on the rotor slip. The analysis and comparative assessment of the existing identification techniques were performed. Based on the analysis, the original method for calculating equivalent circuit parameters was developed. The method to record steel losses and the effect of current displacement in rotor rods of the investigated electric motor is presented.

Keywords:

asynchronous electric motor, identification of equivalent circuit parameters, current displacement.

Введение

При расчете и моделировании электромагнитных процессов асинхронного электродвигателя одной из задач является расчет параметров схемы замещения. Более того, знание и точное определение этих параметров очень важно, например, при векторном управлении асинхронным электродвигателем.

Многие факторы оказывают влияние на переходные процессы асинхронного электродвигателя: изменение ак-

тивного и реактивного сопротивлений в функции скольжения, наличие потерь в стали, эффект вытеснения тока в стержневой обмотке ротора и т. д.

Цель работы – разработка электромагнитной модели, учитывающей:

- 1) зависимость активных и индуктивных сопротивлений схемы замещения асинхронного электродвигателя от скольжения;
- 2) потери в стали;
- 3) эффект вытеснения тока ротора.



Обзор методов расчета параметров схемы замещения асинхронного электродвигателя

В настоящее время существует большое количество публикаций на данную тематику. В основе каждой из методик лежит Т- или Г-образная схема замещения. Исходными данными являются каталожные данные двигателя. На основании уравнений, выведенных по расчетной схеме замещения, и известных зависимостей из курсов «Теоретические основы электротехники», «Электрические машины» и «Теория электропривода» путем последовательных преобразований получают выражения для расчета параметров схемы замещения.

Пример расчета параметров схемы замещения по методике М. С. Макеева, А. А. Кувшинова представлен в [1]. В качестве исходных данных используются каталожные данные двигателя. Исходя из потребляемой мощности, выбираются и записываются уравнения и рассчитывается ток холостого тока. Далее на основании расчета дополнительных коэффициентов рассчитываются параметры схемы замещения. Достоинство данной методики в том, что она не содержит итераций и имеет большую точность вычислений.

Пример расчета параметров схемы замещения по методике А. А. Усольцева, Д. В. Лукичева представлен в [2]. В качестве исходных данных используются каталожные данные асинхронного двигателя. Особенностью этой модели является зависимость расчетных параметров схемы замещения в виде функций коэффициента a , изменяющегося в пределах $0 < a < 1/s_{\max}$. Следовательно, задача сводится к определению данного коэффициента, но по параметрам механической характеристики значение a можно однозначно определить, только если известно критическое скольжение. Достоинством рассматриваемой мето-

дики является высокая сходимости и точность вычисления для большого ряда мощностей АД. Основным недостатком заключается в наличии итераций.

Пример расчета параметров схемы замещения по методике Б. И. Фираго представлен в [3, 4]. В качестве исходных данных используются каталожные данные асинхронного электродвигателя. Вначале рассчитываются номинальные параметры двигателя, затем – потери и вспомогательные параметры. Далее рассчитываются текущие значения параметров схемы замещения. После проверяется условие схождения расчетной погрешности к заданной. Как только условие выполняется, расчет параметров схемы замещения заканчивается. Достоинством методики Б. И. Фираго является ее универсальность и высокая точность расчетов. Недостатки заключаются в наличии итераций и применимости только в диапазоне скольжений от $-s_n$ до $+s_n$ для обеспечения высокой точности вычислений.

Также можно вспомнить публикации на данную тематику таких ученых, как А. В. Островский [5], Ю. А. Мощинский [6], С. И. Качин [7]. Их разработки имеют похожие алгоритмы расчета, рассмотренные ранее, но применимые для конкретных задач.

В [3, с. 46–57] наглядно показано, что при переменных параметрах асинхронного двигателя использование справочных и каталожных данных приводит к искаженным, лишенным смысла результатам. Дело в том, что активные и индуктивные сопротивления являются зависимыми от скольжения в различных режимах работы.

Предлагаемые методики могут быть применены для анализа и разработки импульсного устройства плавного пуска, рассмотренного в [8, 9], а также для расчета тепловентиляционных процессов по методике, изложенной в [10].



Описание методики расчета параметров схемы замещения

Для решения задачи получения параметров схемы замещения, пригодных для применения в диапазоне скольжений от 0 до 2, предложены уточнен-

ная математическая модель асинхронного электродвигателя и методика расчета параметров данной модели.

В качестве основных параметров предлагаемой модели используются параметры Т-образной схемы замещения, представленной на рис. 1.

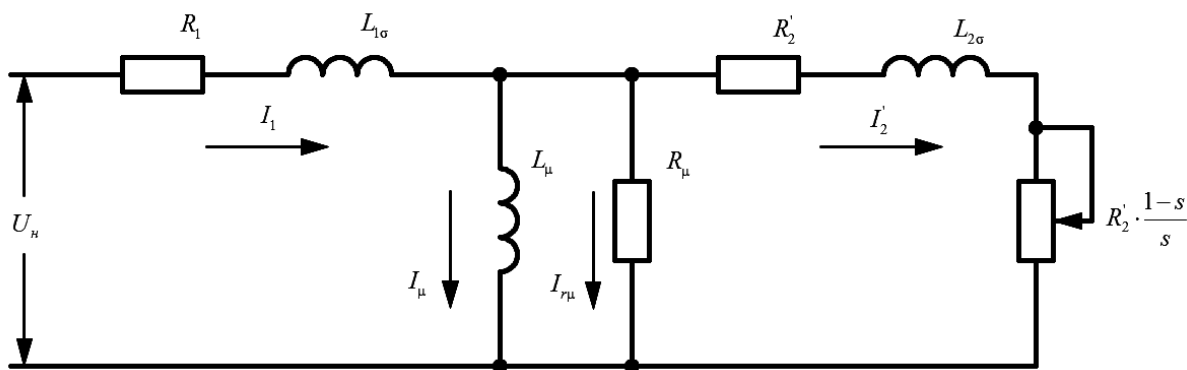


Рис. 1. Т-образная схема замещения асинхронного электродвигателя: R_1 – активное сопротивление обмотки статора, Ом; R_2' – активное сопротивление статора, приведенное к обмотке ротора, Ом; $L_{1\sigma}$ – индуктивность рассеяния обмотки статора, Гн; $L_{2\sigma}$ – индуктивность рассеяния обмотки ротора, Гн; L_μ – взаимная индуктивность обмоток статора и ротора, Гн; R_μ – взаимное сопротивление обмоток статора и ротора, Ом

Исходными данными для расчета являются:

- 1) номинальный момент электродвигателя M_n , Н·м;
- 2) номинальный ток статора I_1 , А;
- 3) номинальная скорость вращения ротора n_n , об/мин;
- 4) номинальный КПД η_n ;
- 5) номинальный коэффициент мощности $\cos(\varphi)_n$;
- 6) номинальное напряжение питания U_n , В;
- 7) синхронная скорость вращения поля статора n_0 , об/мин;
- 8) потери мощности в обмотке статора в номинальном режиме ΔP_{1n} , Вт;
- 9) потери мощности в обмотке ротора в номинальном режиме ΔP_{2n} , Вт;
- 10) потери в стали статора в номинальном режиме ΔP_{sn} , Вт.

Параметры из пп. 1–7 являются

каталожными данными либо могут быть рассчитаны непосредственно по каталожным данным. Параметры из пп. 8–10 могут быть взяты из протокола заводских испытаний электродвигателя либо получены путем расчета по методике, изложенной в ГОСТ 7217–87.

Далее может быть составлена по законам Кирхгофа система уравнений Т-образной схемы замещения:

$$\begin{cases} U_n = I_1 R_1 + jX_1 I_1 + jX_\mu I_\mu; \\ 0 = I_2' R_2' / s + jX_2' I_2' - jX_\mu I_\mu; \\ 0 = jX_\mu I_\mu - R_\mu I_{\sigma\mu}; \\ 0 = I_1 - I_2' - I_\mu - I_{\sigma\mu}. \end{cases} \quad (1)$$

Решив систему уравнений (1) для произвольных значений параметров схемы замещения и скольжения $s = s_n$, можно получить значения токов статора, ротора и цепи намагничивания электродвигателя. Затем необходимо рас-



считать значения потерь мощности, КПД и коэффициента мощности:

$$\Delta P_1 = I_1^2 R_1; \quad (2)$$

$$\Delta P_2 = I_2^2 R_2'; \quad (3)$$

$$\Delta P_s = I_{r\mu}^2 R_{\mu}; \quad (4)$$

$$\eta = \frac{I_2^2 R_2' \frac{1-s}{s}}{\Re(U_1 \cdot I_1)}; \quad (5)$$

$$\cos(\varphi) = \cos(\arg(U_1 \cdot I_1)); \quad (6)$$

$$M = \frac{I_2^2 R_2'}{\omega_0 s}. \quad (7)$$

Алгоритм метода заключается в поиске одним из численных методов оптимизации нелинейных функций таких значений параметров схемы замещения, которые дают наименьшее значение следующей целевой функции:

$$F = k_0 |\Delta P_1 - \Delta P_{1n}| + k_1 |\Delta P_2 - \Delta P_{2n}| + k_2 |\Delta P_s - \Delta P_{sn}| + k_3 |\eta - \eta_n| + k_4 |\cos(\varphi) - \cos(\varphi)_n| + k_5 |I_1 - I_{1n}| + k_6 |M - M_n|, \quad (8)$$

где $k_0 \dots k_6$ – весовые коэффициенты, выбираемые исходя из важности масштаба параметров по принципу Парето.

В результате расчета по изложенной методике получены следующие значения параметров схемы замещения для электродвигателя АИР100S4 для номинального режима работы:

1) активное сопротивление обмотки статора $R_1 = 2,3$ Ом;

2) активное сопротивление статора, приведенное к обмотке ротора, $R_2' = 2,09$ Ом;

3) индуктивность рассеивания обмотки статора $L_{1\sigma} = 1,102704e-02$ Гн;

4) индуктивность рассеивания об-

мотки ротора $L_{2\sigma} = 1,102704e-02$ Гн;

5) взаимная индуктивность обмоток статора и ротора $L_{\mu} = 2,333212e-01$ Гн.

В случае применения предлагаемой методики в микропрограмме силового преобразователя для идентификации параметров электродвигателя необходимые опыты могут быть проведены в ходе процедуры автоматической адаптации электродвигателя при наладке электропривода.

Обзор методов расчета потерь в стали и эффекта вытеснения тока в стержнях ротора исследуемого электродвигателя

При синусоидальном напряжении питания частотой 50 Гц расчет потерь в стали может быть произведен по одной из известных в теории проектирования электрических машин методик. В случае при работе двигателя от силового преобразователя возникает ряд проблем при определении данных потерь.

Пренебрежение эффектом вытеснения тока в роторе электродвигателя при моделировании машин малой мощности влечет за собой существенные расхождения результатов моделирования с работой реального электродвигателя при высоком скольжении, что наиболее сильно проявляется при моделировании устройств плавного пуска и прямого пуска. Эффект вытеснения тока приводит к значительному увеличению пускового момента и уменьшению пускового тока.

Ввиду большой сложности математического описания расчета потерь стали и учета эффекта вытеснения тока при несинусоидальном напряжении питания при выполнении студенческих, научных работ, а также диссертационных исследований подобные вопросы рассматриваются в крайне упрощенном

варианте либо вообще опускаются (кроме случаев исследований по данной тематике).

Как правило, при расчете потерь при несинусоидальном напряжении питания рассматривается разложение потерь на составляющие. Так, Ю. Б. Казаковым, Н. К. Швецовым в [11] предложена аналитическая методика расчета потерь в стали асинхронных двигателей при питании от полигармонических источников напряжения, включающая выявление спектра и амплитуд гармоник, разделение потерь в стали на потери от вихревых токов и гистерезис и определение потерь для каждой гармоники с учетом эффекта размагничивающего действия вихревых токов.

При расчете электромагнитных процессов при учете эффекта вытеснения тока обычно используется ряд программного обеспечения. Например, И. Б. Цодиком, К. В. Худобиным в [12] описана методика синтеза математической модели асинхронного двигателя. Предлагается выполнять эксперименты в следующей последовательности. В среде AutoCAD строятся геометрические модели, после импорта которых в Comsol Multiphysics и последующей доработки под управлением Matlab производится расчет коэффициентов и зависимостей, которые используются в математической модели асинхронного двигателя.

Моделирование потерь в стали и эффекта вытеснения тока в стержнях ротора исследуемого электродвигателя

Для моделирования работы двигателя при значениях скольжения больше номинального необходимо учесть зависимость приведенного сопротивления ротора и приведенной индуктивности рассеивания ротора от скольжения.

Сделать это можно по методике, изложенной в [3, 10]:

$$R'_2(s) = R'_{2,0} + \frac{R'_{2n} - R'_{2,0}}{1 - s_n}(s - s_n); \quad (9)$$

$$X_k(s) = \frac{X_{k,0}}{1 + k(s - s_n)}; \quad (10)$$

$$k = \left(\frac{X_{k,0}}{X_{kn}} - 1\right)(1 - s_n), \quad (11)$$

где $R'_{2,0}$ – приведенное активное сопротивление ротора для скольжений $-s_{ном} < s < s_{ном}$, Ом; R'_{2n} – приведенное активное сопротивление ротора для пускового режима ($s = 1$), Ом; $X_{k,0}$ – индуктивное сопротивление короткого замыкания в номинальном режиме, Ом; X_{kn} – индуктивное сопротивление короткого замыкания в пусковом режиме, Ом.

При этом индуктивность рассеивания ротора может быть получена следующим образом:

$$X'_2(s) = X_k(s) - X_{1n}; \quad (12)$$

$$L'_2(s) = X'_2(s) / \omega_{0,эв}. \quad (13)$$

Для моделирования эффекта вытеснения тока в стержневой обмотке ротора при питании электродвигателя от напряжения произвольной несинусоидальной формы была разработана следующая методика. На основании зависимостей $R'_2(s)$ и $X'_2(s)$ может быть получена амплитудно-фазовая частотная характеристика (АФЧХ) роторной цепи:

$$\left\{ \begin{aligned} W(\omega) &= \frac{1 / R'_2(s(\omega))}{j\omega L'_2(s(\omega)) / R'_2(s(\omega)) + 1}; \\ s(\omega) &= \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0}. \end{aligned} \right. \quad (14)$$

При помощи полученной АФЧХ



роторной цепи в численной табличной форме может быть найдена передаточная функция роторной цепи по Лапласу методом наименьших квадратов следующего вида:

$$W(p) = \frac{a_n p^n + a_{n-1} p^{n-1} + \dots + a_1 p + a_0}{b_n p^n + b_{n-1} p^{n-1} + \dots + b_1 p + 1}, \quad (15)$$

где n – степень передаточной функции; $a_0 \dots a_n$, $b_1 \dots b_n$ – коэффициенты передаточной функции, полученные методом наименьших квадратов.

С увеличением степени передаточной функции возрастает точность моделирования эффекта вытеснения тока.

Для расчета потерь в стали в ходе моделирования работы электродвигателя при питании от источника напряжения с произвольным гармоническим составом была разработана следующая методика.

Напряжение на статоре электродвигателя произвольной формы может быть разложено на гармонические составляющие, и для каждой отдельно взятой составляющей можно найти долю потерь в стали электродвигателя. Для определения величины потерь была разработана модель исследуемого электродвигателя в программе FEMM. В результате моделирования работы электродвигателя в программе FEMM могут быть получены значения потокосцепления намагничивания электродвигателя для каждой из гармонических составляющих тока статора. На основе данных значений может быть построена АФЧХ, связывающая потокосцепление намагничивания и частоту тока намагничивания, а от АФЧХ можно осуществить переход к передаточной функции, пригодной для использования в динамической модели асинхронного электродвигателя.

При этом в электромагнитной модели электродвигателя потокосцепле-

ние определяется следующим образом:

$$\Psi_{\mu\alpha}(p) = I_{\mu\alpha}(p) W_{\Psi}(p); \quad (16)$$

$$\Psi_{\mu\beta}(p) = I_{\mu\beta}(p) W_{\Psi}(p); \quad (17)$$

$$W_{\Psi}(p) = \frac{a_{sn} p^n + a_{s(n-1)} p^{n-1} + \dots + a_{s1} p + a_{s0}}{b_{sn} p^n + b_{s(n-1)} p^{n-1} + \dots + b_{s1} p + 1}, \quad (18)$$

где $\Psi_{\mu\alpha}(p)$, $I_{\mu\alpha}(p)$ – изображения по Лапласу потокосцепления намагничивания и тока намагничивания по оси α ; $\Psi_{\mu\beta}(p)$, $I_{\mu\beta}(p)$ – изображения по Лапласу потокосцепления намагничивания и тока намагничивания по оси β ; $W_{\Psi}(p)$ – полученная по вышеизложенной методике передаточная функция, связывающая ток намагничивания и потокосцепление намагничивания; n – степень передаточной функции; $a_{s0} \dots a_{sn}$, $b_{s1} \dots b_{sn}$ – коэффициенты передаточной функции, полученные методом наименьших квадратов.

В случае расчета по приведенной на рис. 1 схеме замещения передаточная функция $W_{\Psi}(p)$ имеет вид:

$$W_{\Psi}(p) = \frac{L_{12}}{L_{12} / R_{\mu} p + 1}. \quad (19)$$

Передаточная функция $W_{\Psi}(p)$ учитывает возникающие в магнитопроводе потери и их зависимость от частоты, таким образом мощность магнитного поля, создаваемого током намагничивания, оказывается уменьшенной на величину потерь в стали по сравнению с известными моделями без учета данных потерь.

Описание уточненной электромагнитной модели

С учетом вышеизложенного уточненную электромагнитную модель можно представить в следующем виде:



$$\begin{aligned}
 u_{1\alpha} &= i_{1\alpha} R_1 + \frac{d\Psi_{1\alpha}}{dt}; \\
 u_{1\beta} &= i_{1\beta} R_1 + \frac{d\Psi_{1\beta}}{dt}; \\
 e_{rd} &= -L_{12} \frac{d(i_{1\alpha} / \sin \varphi_{\text{эл}})}{dt} - L_{12} \frac{d(i_{1\beta} / \cos \varphi_{\text{эл}})}{dt} - L_{12} \frac{di'_{2d}}{dt}; \\
 e_{rq} &= L_{12} \frac{d(i_{1\alpha} / \cos \varphi_{\text{эл}})}{dt} - L_{12} \frac{d(i_{1\beta} / \sin \varphi_{\text{эл}})}{dt} - L_{12} \frac{di'_{2q}}{dt}; \\
 a_{r0} i'_{2d} + a_{r1} \frac{di'_{2d}}{dt} + \dots + a_{rk} \frac{d^k i'_{2d}}{dt^k} &= e_{rd} + b_{r1} \frac{de_{rd}}{dt} + \dots + b_{rk} \frac{d^k e_{rd}}{dt^k}; \\
 a_{r0} i'_{2q} + a_{r1} \frac{di'_{2q}}{dt} + \dots + a_{rk} \frac{d^k i'_{2q}}{dt^k} &= e_{rq} + b_{r1} \frac{de_{rq}}{dt} + \dots + b_{rk} \frac{d^k e_{rq}}{dt^k}; \\
 \Psi_{1\alpha} &= L_{1\sigma} i_{1\alpha} + \Psi_{m\alpha}; \\
 \Psi_{1\beta} &= L_{1\sigma} i_{1\beta} + \Psi_{m\beta}; \\
 \Psi_{m\alpha} + b_{s1} \frac{d\Psi_{m\alpha}}{dt} + \dots + b_{sn} \frac{d^n \Psi_{m\alpha}}{dt^n} &= a_{s0} + a_{s1} \frac{d(i_{1\alpha} + \cos \varphi_{\text{эл}} i'_{2d})}{dt} + \dots + a_{s2} \frac{d^n (i_{1\alpha} + \cos \varphi_{\text{эл}} i'_{2d})}{dt^n}; \\
 \Psi_{m\beta} + b_{s1} \frac{d\Psi_{m\beta}}{dt} + \dots + b_{sn} \frac{d^n \Psi_{m\beta}}{dt^n} &= a_{s0} + a_{s1} \frac{d(i_{1\beta} + \sin \varphi_{\text{эл}} i'_{2q})}{dt} + \dots + a_{s2} \frac{d^n (i_{1\beta} + \sin \varphi_{\text{эл}} i'_{2q})}{dt^n}; \\
 M &= p_n L_{12} ((i_{1\beta} i'_{2d} - i_{1\alpha} i'_{2q}) \cos \varphi_{\text{эл}} + (i_{1\alpha} i'_{2d} - i_{1\beta} i'_{2q}) \sin \varphi_{\text{эл}}),
 \end{aligned} \tag{20}$$

где $a_{s0} \dots a_{sn}$, $b_{s1} \dots b_{sn}$ – коэффициенты передаточной функции, полученные методом наименьших квадратов по вышеизложенной методике для учета потерь в стали статора; $a_{r0} \dots a_{rk}$, $b_{r1} \dots b_{rk}$ – коэффициенты передаточной функции, полученные методом наименьших квадратов по вышеизложенной методике для учета эффекта вытеснения тока в стержневой обмотке ротора; $L_{1\sigma}$ – индуктивность рассеивания обмотки статора, Гн; L_{12} – взаимная индуктивность обмоток статора и ротора; R_1 – сопротивление обмотки статора, Ом; $i_{1\alpha}$, $i_{1\beta}$ – токи обмотки статора, А; i'_{2d} , i'_{2q} – приведенные токи обмотки ротора, А; $\Psi_{1\alpha}$, $\Psi_{1\beta}$ – потокосцепления обмотки статора, Вб; $\Psi_{m\alpha}$, $\Psi_{m\beta}$ – потокосцепления намагничивания, Вб; $\varphi_{\text{эл}}$ – угол между обмотками статора и ротора, эл. градусов.

Уравнения статора электродвигателя записаны для системы координат $\alpha - \beta$, неподвижной относительно статора электродвигателя, а уравнения ротора – для системы координат $d - q$, неподвижной относительно ротора.

На основе моделирования асинхронного электродвигателя АИР100S4 по вышеприведенной методике были получены механическая характеристика без учета зависимости параметров схемы замещения от скольжения (1) и механическая характеристика с учетом данной зависимости (2). Результаты расчета отображены на рис. 2.

Как видно из рисунка, рассчитанная при помощи уточненной модели механическая характеристика значительно точнее соответствует каталожным данным электродвигателя АИР100S4, чем полученная по стандартной методике с постоянными параметрами схемы замещения.



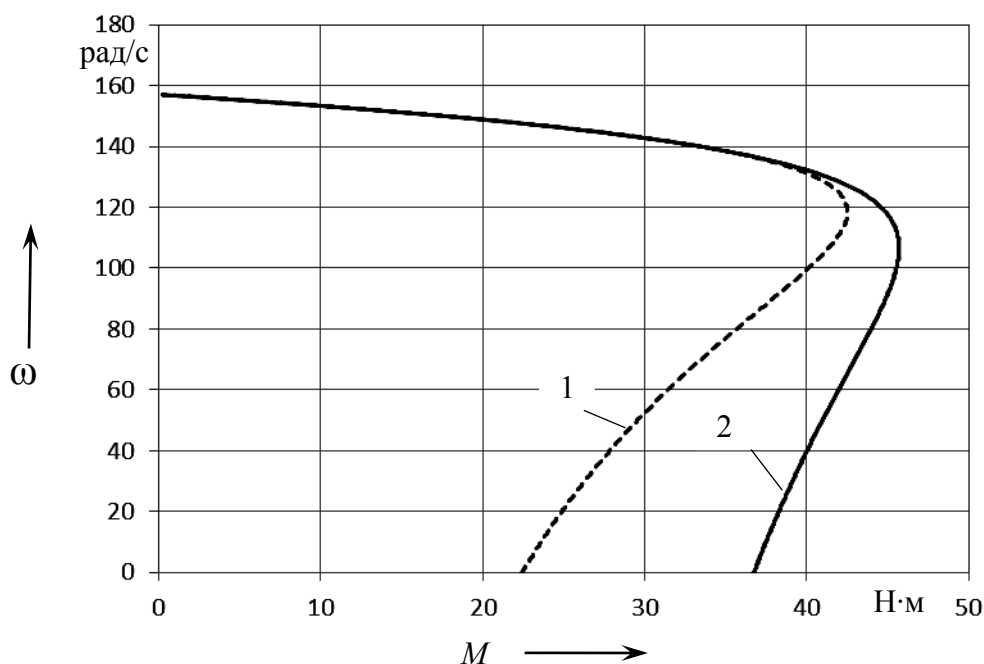


Рис. 2. Механические характеристики, полученные при помощи уточненной модели электродвигателя АИР100S4: 1 – механическая характеристика без учета зависимости параметров схемы замещения от скольжения; 2 – механическая характеристика с учетом зависимости параметров схемы замещения от скольжения

Выводы

В результате проделанной работы:

1) обоснована необходимость расчета параметров схемы замещения при переменных параметрах, учета потерь в стали и эффекта вытеснения тока в статоре;

2) разработана методика расчета параметров схемы замещения асинхронного электродвигателя при переменных параметрах;

3) разработана методика расчета

потерь в стали и получения передаточной функции при использовании в динамической модели асинхронного электродвигателя для учета эффекта вытеснения тока в стержнях ротора;

4) разработана уточненная электромагнитная модель, учитывающая переменные параметры асинхронного электродвигателя, потери в стали и эффект вытеснения тока в стержнях ротора.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Макеев, М. С.** Алгоритм расчета параметров схемы замещения асинхронного двигателя по каталожным данным / М. С. Макей, А. А. Кувшинов // Вектор науки ТГУ. – 2013. – № 1 (23). – С. 108–112.
2. **Усольцев, А. А.** Определение параметров модели асинхронного двигателя по справочным данным / А. А. Усольцев, Д. В. Лукичев // Изв. вузов. Сер. Приборостроение. – 2005. – № 12. – С. 35–41.
3. **Фираго, Б. И.** Регулируемые электроприводы переменного тока / Б. И. Фираго, Л. Б. Павлячик. – Минск: Техноперспектива, 2006. – 363 с.
4. **Фираго, Б. И.** Теория электропривода: учебное пособие / Б. И. Фираго, Л. Б. Павлячик. – Минск: Техноперспектива, 2004. – 527 с.
5. **Островский, А. В.** Безытерационная методика определения параметров схемы замещения асинхронного электродвигателя / А. В. Островский // Праці ТДАТУ. – 2012. – Вип. 12, Т. 2. – С. 66–72.



6. **Мощинский, Ю. А.** Определение параметров схемы замещения асинхронных машин по каталожным данным / Ю. А. Мощинский, В. Я. Беспалов, А. А. Кирякин // Электричество. – 1998. – № 4. – С. 38–42.

7. **Качин, С. И.** Электрический привод : учебно-методическое пособие / С. И. Качин, А. Ю. Чернышев, О. С. Качин. – Томск : Изд-во Томского политехн. ун-та, 2009. – 157 с.

8. **Парфенович, О. Н.** Транзисторный широтно-импульсный регулятор напряжения для асинхронных электродвигателей / О. Н. Парфенович, О. А. Капитонов // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2010. – № 3 (28). – С. 119–127.

9. **Парфенович, О. Н.** Параметрический электропривод в электромехатронном исполнении со специальным асинхронным электродвигателем – перспективная альтернатива частотно-регулируемому электроприводу : наукові праці Донецького національного технічного університету. Сер. Електротехніка і енергетика / О. Н. Парфенович, О. А. Капитонов. – 2013. – № 1 (14). – С. 211–216.

10. **Третьяков, А. С.** Моделирование тепловентиляционных режимов работы асинхронных электродвигателей при питании от синусоидального источника напряжения / А. С. Третьяков, О. А. Капитонов // Вестн. ГГТУ им. П. О. Сухого. – 2018. – № 2. – С. 66–73.

11. **Казаков, Ю. Б.** Расчетный анализ потерь в стали асинхронных двигателей при питании от преобразователей частоты с несинусоидальным выходным напряжением / Ю. Б. Казаков, Н. К. Швецов // Вестн. Иванов. гос. энергет. ун-та. – 2015. – № 5. – С. 42–46.

12. **Цодик, И. Б.** Учет эффекта вытеснения тока и насыщения магнитной цепи в математической модели асинхронного двигателя / И. Б. Цодик, К. В. Худобин // Електротехніка і електромеханіка. – 2018. – № 2. – С. 66–73.

Статья сдана в редакцию 17 сентября 2018 года

Геннадий Сергеевич Ленеvский, канд. техн. наук, Белорусско-Российский университет.
E-mail: emos@rambler.ru.

Олег Александрович Капитонов, ст. преподаватель, Белорусско-Российский университет.
E-mail: kapitonov1987@gmail.com.

Артем Сергеевич Третьяков, ст. преподаватель, Белорусско-Российский университет.
E-mail: loggie121@gmail.com.

Gennady Sergeevich Lenevsky, PhD (Engineering), Associate Prof., Belarusian-Russian University.
E-mail: emos@rambler.ru.

Oleg Alexandrovich Kapitonov, senior lecturer, Belarusian-Russian University.
E-mail: kapitonov1987@gmail.com.

Artem Sergeevich Tretiakov, senior lecturer, Belarusian-Russian University. E-mail: loggie121@gmail.com.