

УДК 621.313.333.2; 621.311.2.002.5.004 (076.5)

А. Ш. Маджидов, Н.К. Каныбекова
Национальный исследовательский университет
«Московский энергетический институт», г. Москва

ПРОСТОЙ СПОСОБ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СКОЛЬЖЕНИЯ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором в основном применяются в приводах механизмов такие как насосы, вентиляторы, компрессоры и т.д., собственных нужд электрических станциях и подстанциях. Надежная и бесперебойная работа механизмов собственных нужд электрических станциях и подстанциях считается приоритетная задача каждого инженера. Свойства асинхронных двигателей определяются их механическими характеристиками, зависимостями тока статора (кратности пускового тока) от относительной частоты вращения (скольжения), а также такими параметрами, как кратность максимального момента, кратность пускового момента, критическое скольжение. При этом, в ряде случаев, необходимо осуществлять постоянный контроль за работой асинхронных двигателей этих механизмов с помощью методов идентификации параметров. Учитывая эти факторы в данной статье рассмотрены простой способ определения скольжения асинхронного двигателя, работающего с нагрузкой, зависящей от параметров электрической цепи.

Ключевые слова: асинхронный двигатель, короткозамкнутый ротор, механизм, насос, вентилятор, компрессор, собственные нужды электростанции и подстанции, механическая характеристика, кратность пускового тока, момент, скольжение, идентификация параметров.

Abdullo Majidov, Nurzat Kanybekova
National Research University "Moscow Power Engineering Institute", Moscow

A Simple Way to Determine the Slip of An Asynchronous Motor

Asynchronous motors with squirrel-cage rotor are mainly used in drives of mechanisms such as pumps, fans, compressors, etc., for auxiliary of power plants and substations. Reliable and uninterrupted operation of the mechanisms for auxiliary of power plants and substations is considered a priority task of every engineer. The properties of asynchronous motors are determined by their mechanical characteristics, the dependences of the stator current (multiplicity of starting current) on the relative frequency of rotation (slip), as well as parameters such as the multiplicity of the maximum torque, the multiplicity of the starting torque, critical slip. At the same time, in some cases, it is necessary to constantly monitor the operation of asynchronous motors of these mechanisms using the methods of parameter identification. Considering these factors, this article considers a simple way to determine the slip of an asynchronous motor operating with a load that depends on the parameters of the electrical circuit.

Keywords: asynchronous motor, squirrel-cage rotor, mechanism, pump, fan, compressor, auxiliary for power plant and substation, mechanical characteristic, frequency of starting current, torque, slip, identification of parameters

Вращение большинство механизмов собственных нужд (СН) электростанций и подстанций (ЭС и ПС) осуществляется с помощью электрическим приводом, а именно асинхронные двигатели (АД) с короткозамкнутым ротором, так как эти АД считаются самыми

распространенными, который дает возможность пуска от полного напряжения сети без специальных пусковых устройств. Другое преимущество этих АД – восстанавливать нормальный режим работы после глубоких понижений питающего напряжения, которые считаются самозапуска АД [1,3,5].

Для механизмов СН ЭС и ПС важно рассчитать токи и напряжение на выводах АД при различных механических нагрузках. Расчет статического режима разветвленной электрической цепи решается методами теории цепей [2,4] и путем определения расчетного сопротивления АД в цепи. Эти АД в схеме представлены Т-образными или Г-образными схемами замещения [3,5], которая показано на рис. 1.

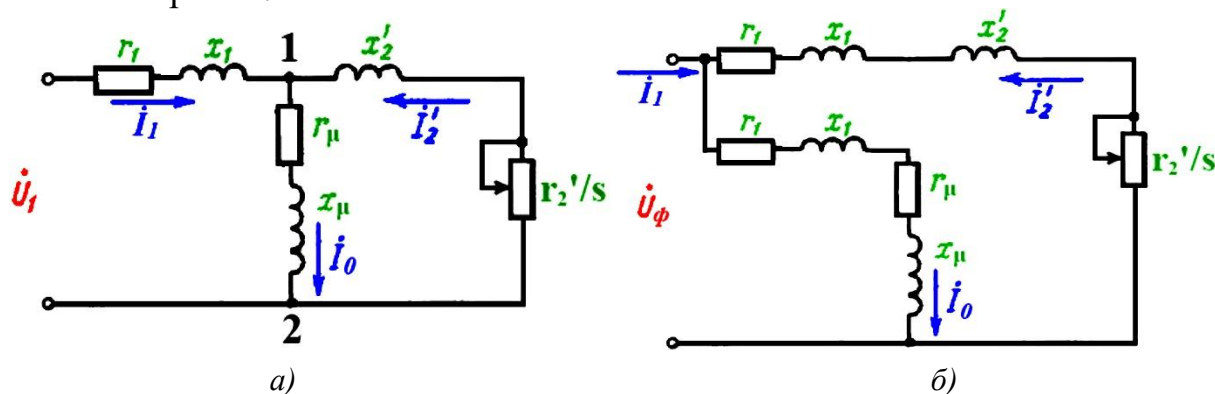


Рисунок 1 – Схема замещения асинхронного двигателя: а) Т-образная; б) Г-образная

Уравнениям ЭДС и токов соответствует эквивалентная схема замещения, как показано на рис. 1. Таким образом, сложную магнитную цепь АД можно заменить электрической схемой. Сопротивление r'_2/s можно рассматривать как внешнее сопротивление, включенное в обмотку ротора. Оно является единственным переменным параметром схемы. Изменение этого сопротивления эквивалентно изменению нагрузки на валу АД, и приводит к изменению s . Тогда не сложно угадать, что скольжение АД в зависимости от нагрузки меняется незначительно (1–6%) [3]. Чем больше мощность АД, тем меньше его s .

Определение эквивалентного сопротивления этих цепей в основном поддерживается необходимостью определения расчетного скольжения АД, которое в простейшем случае представляет собой функцию механической нагрузки (момент сопротивления вращению рабочей машины), амплитуду, частота и напряжения на обмотке статора [1-5]. На скольжение могут влиять несимметричность трехфазного напряжения, несинусоидальное напряжение, случайные изменения механической нагрузки [2,4]. Погрешность определения скольжения 0,001 отн. ед. приводит к значительному увеличению погрешности конечных результатов расчета электрических цепей из-за накопления ошибок в многодвигательном приводе, а также к итерационным расчетам при использовании совместно с методы численных расчетов, при которых накапливается ошибка вычислений.

Для определения скольжения используются уравнение электромагнитного момента электродвигателя и уравнение механической характеристики рабочей машины, приложенной к валу электродвигателя. Известное уравнение

электромагнитного момента (механической характеристики) асинхронного двигателя АМ [2,4] имеет вид:

$$M = \frac{m_1 \cdot U_1^2 \cdot \frac{r'_2}{s}}{\omega \left(\left(r_1 + \frac{r'_2}{s_k} \right)^2 + (x_1 + x'_2)^2 \right)} \quad (1)$$

где M – электромагнитный момент; m_1 – количество фаз; U_1 – фазное напряжение на обмотке статора; s – номинальное скольжение; s_k – критическое скольжение; ω – угловая частота вращения магнитного поля; r_1, r'_2, x_1, x'_2 – активное и индуктивное сопротивления утечки обмотки статора и приведенной обмотки ротора соответственно.

Это уравнение отражает процессы в двигателях в рамках традиционных предположений о постоянных значениях параметров r'_2, x'_2 , без учета насыщения магнитопровода. Это дает существенную погрешность при расчете статических режимов работы электропривода. Особенно остро эта ошибка проявляется в задачах с двигателями, подверженными перегрузкам при изменении напряжения питающей сети, что часто проявляется в сельскохозяйственных электроприводах.

Для расчета электрической цепи с АД аппроксимация экспериментальной механической характеристики АД более удобна, чем уравнение (1). С точки зрения теории приближения экспериментальная механическая характеристика АД в рабочей зоне должна быть аппроксимирована функцией, дающей погрешность не меньшей величины, чем указанные уравнения.

Наилучшие результаты дает аппроксимирующая функция, где $m = a \cdot (1 - e^{-bs})$ – электромагнитный момент, a и b – коэффициенты, а e – основание натурального логарифма. Он обеспечивает скорость аппроксимации $\xi = 0,0005$ для соответствующих значений a и b . Для определения коэффициентов a и b достаточно иметь координаты трех упомянутых выше узлов, что позволяет рассчитать их значения на основе данных каталога АД. Существенно, что эта функция позволяет аналитическое решение вместе с уравнением механической характеристики рабочей машины, заданным традиционным уравнением в виде:

$$m_c = m_0 + (m_n - m_0) \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_n} \right)^v \quad (2)$$

где m_c – расчетный момент сопротивления рабочей машины, m_0 – пусковой момент, m_n – момент сопротивления в режиме номинальной нагрузки, ω_n – номинальная угловая частота рабочей машины, ω – номинальная угловая частота расчетная единица, v – степень отражающий особенности работающей машины.

Благодаря отмеченным преимуществам, такой вариант аппроксимации механической характеристики становится преимущественным.

Аппроксимация механической характеристики АД с регулируемым напряжением питания имеет лучшую характеристику при использовании следующего уравнения:

$$m = a \cdot (1 - e^{-bs})^{(2+cu)} \quad (3)$$

где a, b, s – коэффициенты аппроксимирующей функции; u – напряжение на АД в относительных единицах (по отношению к номинальному напряжению $u = U / U_{ном}$).

Необходимо отметить, что значения коэффициентов a и b определяются на основании каталожных данных АД по координатам идеальной скорости режимов работы холостого хода, номинального и критического момента.

После выполнения расчетных операций приведения крутящего момента и скорости к валу АД уравнение (2) принимает вид:

$$m_c = m_0 + (m_n - m_0) \cdot \left(\frac{W(1-s)}{W_m} \right)^v \quad (4)$$

Традиционно для совместного решения уравнений механических характеристик АД и работающей машины используется графоаналитический метод, который плохо приспособлен для использования в математических моделях. В условиях переменных нагрузок и взаимного влияния питающего напряжения многомашинного зала расчеты требуют много времени из-за использования циклических расчетов и множественной интерполяции характеристик АД при различных напряжениях питания. Для расчета разветвленной электрической цепи с многомашинными залами требуется минимизировать циклические операции с использованием «прямых» алгоритмов расчета. Относительно совместного решения уравнений (2) и (4) дает такую возможность как метод возмущений [2,4].

Совместное решение уравнений (4) и (6) за исключением момента m :

$$\exp(-bx) + h_1 \cdot (1-s)^v + h_2 = 0 \quad (5)$$

$$h_1 = \frac{\left((m_n - m_0) \cdot \left(\frac{W}{W_m} \right)^v \right)}{a \cdot u^{(2+cu)}} \quad (6)$$

где,

$$h_2 = \frac{m_0}{a \cdot u^{(2+cu)}} - 1 \quad (7)$$

При использовании метода возмущений важно выбрать стратегию решения задачи. Общий смысл решения уравнения этим методом состоит в том, что решение представляется в виде сходящегося ряда. Наиболее часто используется ряд по малому параметру возмущения, описывается следующие:

$$s = s_0 + \varepsilon \cdot s_1 + \varepsilon^2 \cdot s_2 + \dots + \varepsilon^n \cdot s_n \quad (8)$$

где s_0 – корень невозмущенного уравнения, т. е. уравнения, полученного из исходного путем наложения упрощающего условия $\varepsilon = 0$; s_1, s_2, \dots, s_n –

коэффициенты, не зависящие от ε , которых решается из задачи расчета скольжения. Правая часть уравнения (8), за исключением s_0 , представляют собой поправки к корню невозмущенного уравнения, чтобы аппроксимировать корень исходного уравнения (возмущенного).

Наилучшие результаты получаются при использовании параметра возмущения $\varepsilon = 1$ скорректированном в уравнении (7):

$$\exp(-bs) + h_1 \cdot (1 - \varepsilon s)^v + h_2 = 0 \quad (9)$$

Далее разложим выражение $(1 - \varepsilon s)^v$ в ряд бинома Ньютона и получим [2]:

$$(1 - \varepsilon s)^v = \sum_{m=1}^n C_m^v \cdot (-\varepsilon s)^m; C_m^v = \frac{v!}{[m!(v-m)!]} \quad (10)$$

Применения этот метод для расчета электрической цепи показывает, что целесообразно можно сохранять элементы не выше второго ряда со степенью ε . Остальные элементы ряд не имеют многого значения.

Скольжение имеет большое значение для АД, так как скольжение определяет многие свойства АД. Заметно, что при $s=1$ ротор АД неподвижен. При уменьшении скольжения частота вращения ротора АД возрастает и при $s=0$ ротор АД достигает наибольшей синхронной частоты вращения. Поэтому в этот момент, частота вращения магнитного поля статора АД и частота вращения ротора АД считаются одинаковым.

Поскольку, в точках $s = -\infty; s = 0; s = +\infty$ момент $M = 0$ (равен нулю), то между этими точками находятся максимум и минимум момента (рис. 2) [1,3,5].

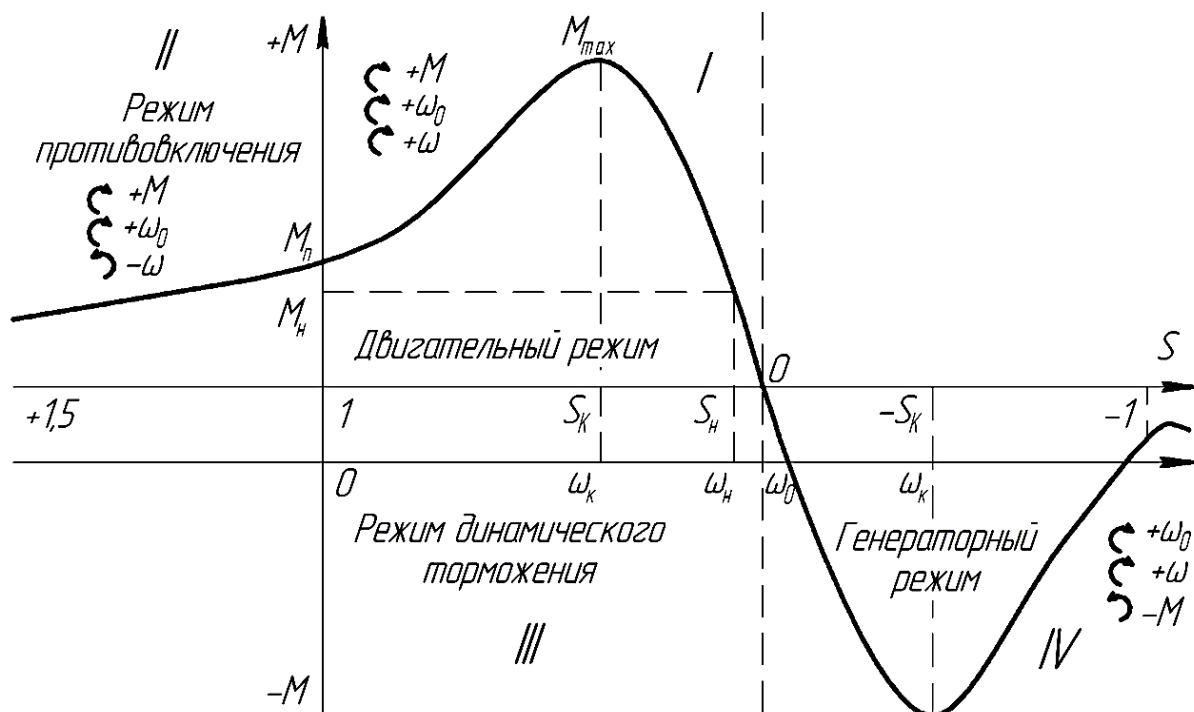


Рисунок 2 – Графический вид уравнения механической характеристики асинхронного двигателя

Всеми известно, что АД известны как наиболее простые по конструкции и недорогие по производству, именно поэтому считаются основные

конкурентные преимущества в сравнении с другими типами электропривода. Доля АД в системах СН ЭС и ПС занимает порядка 70%. Поэтому, всегда нужно осуществлять постоянный контроль за работой асинхронных двигателей и механизмов СН ЭС и ПС с помощью методов идентификации параметров. Учитывая эти факторы в данной работе исследовано простой способ определения скольжения асинхронного двигателя, работающих с нагрузкой, зависящей от параметров электрической цепи.

Список литературы

1. Маджидов А.Ш. Сравнение методов определения энергоэффективности асинхронных двигателей / А.Ш. Маджидов, А.З. Джавахян // XI Международная Интернет-конференция молодых ученых, аспирантов и студентов «Инновационные технологии: теория, инструменты, практика» (InnoTech-2019). Пермь, 2019, С. 163-167
2. I.G. Strizhkov, E.N. Chesnyuk and S.V. Oskin, "Method for Calculating Asynchronous Motor Slip in Tasks of Electric Drive" 2018 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), Moscow, Russia, 2018, pp. 1-4, DOI: <https://doi.org/10.1109/ICIEAM.2018.8728751>
3. Маджидов А.Ш. Учет асинхронного электродвигателя с неизменным скольжением при внезапном трехфазном коротком замыкании / А.Ш. Маджидов, Г.М. Султаналиева, Э.М. Султаналиева // Материалы Международной научно-практической конференции Актуальные проблемы современной науки: взгляд молодых ученых. Грозный, 2020, С. 651-657
4. Стрижков И.Г. Безитерационный метод расчета скольжения асинхронного двигателя в задачах сельскохозяйственного электропривода / И.Г. Стрижков, Е.Н. Чеснюк, С.В. Оськин // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского Государственного Аграрного Университета. Краснодар, 2017, № 133, С. 347-364, DOI: <https://doi.org/10.21515/1990-4665-133-029>
5. Маджидов А.Ш. Уравнения асинхронного электродвигателя при переходном процессе / А.Ш. Маджидов // Информационные технологии, энергетика и экономика (электроэнергетика, электротехника и теплоэнергетика, математическое моделирование и информационные технологии в производстве): сборник трудов XVII Международной научно-технической конференции студентов и аспирантов. ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ», филиал в г. Смоленске. Смоленск, 2020, С. 44-49

Сведения об авторе

Маджидов Абдулло Шарифхуджаевич – аспирант кафедры «Электрические станции» Национального исследовательского университета «Московский энергетический институт», Москва, e-mail: abdullomajidi@gmail.com

Нурзат Каныбековна Каныбекова – магистрант кафедры «Теоретических основ теплотехники имени Вукаловича» Национального исследовательского университета «Московский энергетический институт», Москва, E-mail: nurzatkanybekova1995@gmail.com

About the author

Abdullo Majidov – Ph.D.-student of Electrical Stations Department, National Research University "Moscow Power Engineering Institute", Moscow, Russian Federation. e-mail: abdullomajidi@gmail.com

Nurzat Kanybekova – Master Student of Department of Theoretical Bases of Heat Engineering Department, National Research University "Moscow Power Engineering Institute", Moscow, Russian Federation. E-mail: nurzatkanybekova1995@gmail.com