

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ Т-ОБРАЗНОЙ СХЕМЫ ЗАМЕЩЕНИЯ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ НА ОСНОВЕ ОПЫТА ХОЛОСТОГО ХОДА

Шеремет А. И., Шевченко Г. С.

Рассматривается метод определения Т-образной схемы замещения асинхронного двигателя на основе опыта холостого хода. Установлено, что при исследовании влияния на электромеханические характеристики асинхронного двигателя напряжения сети целесообразно использовать Т-образную схему замещения, что позволит учесть особенности при исследовании электромеханических характеристик асинхронного двигателя при изменении напряжения. Параметры Т-образной схемы замещения могут быть получены расчетным или экспериментальным путём, либо их комбинацией. Наибольшее распространение получили экспериментальные методы исследований. Установлено, что ток холостого хода оказывает существенное влияние на ток в обмотке статора в асинхронном двигателе с менее насыщенной магнитной системой (при меньших значениях тока холостого хода), имеет место более интенсивный рост тока статора при уменьшении входного напряжения; ток ротора при изменении тока холостого хода изменяется незначительно.

Розглядається метод визначення Т-образної схеми заміщення асинхронного двигуна на основі експерименту холостого ходу. Встановлено, що при дослідженні впливу на електромеханічні характеристики асинхронного двигуна напруги мережі доцільно використовувати Т-образну схему заміщення, що дозволить врахувати особливості при дослідженні електромеханічних характеристик асинхронного двигуна при зміні напруги. Параметри Т-подібної схеми заміщення можуть бути отримані розрахунковим або експериментальним шляхом, або їх комбінацією. Найбільшого поширення набули експериментальні методи досліджень. Встановлено, що струм холостого ходу має суттєвий вплив на струм в обмотці статора в асинхронному двигуні з менш насиченою магнітною системою (при менших значеннях струму холостого ходу), має місце більш інтенсивне зростання струму статора при зменшенні входної напруги; струм ротора при зміні струму холостого ходу змінюється незначно.

The article deals with the method of determining the T-shaped circuit for the replacement in induction motor based on the idling experience. It is established that when studying the effect on the electromechanical characteristics of an asynchronous motor of the network voltage, it is advisable to use the T-shaped replacement circuit, which will allow taking into account the peculiarities in the investigation of the electromechanical characteristics of an asynchronous motor with a voltage change. The parameters of the T-type substitution circuit can be obtained either by calculation or by experiment, or by a combination of these. The most widely used experimental methods research. It is established that the no-load current has a significant effect on the current in the stator winding in an asynchronous motor with a less saturated magnetic system (at lower idle current values), there is more intensive growth of the stator current with decreasing input voltage; The current of the rotor varies insignificantly when the no-load current varies.

Шеремет А. И.

канд. техн. наук, доц. каф. ЭСА ДГМА, докторант ДГТУ  
sheremet-oleksii@ukr.net

Шевченко Г. С.

магистр каф. ЭСА ДГМА

УДК 621.313.3

Шеремет А. И., Шевченко Г. С.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ Т-ОБРАЗНОЙ СХЕМЫ ЗАМЕЩЕНИЯ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ НА ОСНОВЕ ОПЫТА ХОЛОСТОГО ХОДА

Эксплуатация асинхронных двигателей (АД) зачастую сопровождается различного рода аномалиями. Одной из наиболее распространенных является нестабильное напряжение сети. Отклонения напряжения могут достигать 15 и более процентов, что превышает допустимое значение. Изменение напряжения может привести к росту тока в обмотках асинхронного двигателя, к увеличению потерь, росту температуры обмоток АД и в результате – к досрочному выходу его из строя. Влияние напряжения питания на электромеханические и тепловые характеристики АД как в продолжительном режиме, так и повторно-кратковременных режимах требует дальнейшего изучения. Актуальность анализа теплового состояния АД при изменении напряжения вызвана как необходимостью повышения надежности эксплуатации двигателя, так и требованием совершенствования алгоритмов систем контроля и прогнозирования теплового состояния АД в различных режимах [1].

Отклонение напряжения  $\delta U = U - U_n$  – разность между действительным и номинальным значением напряжения в В, относительная величина отклонения напряжения вычисляется в процентах ( $\delta U = \frac{U - U_n}{U_n} \cdot 100\%$ ). ГОСТ предусматривает нормальное отклонение

напряжения  $\pm 5\%$ , максимальное –  $\pm 10\%$ . Отклонения напряжения, как правило, носят колебательный характер. Различают медленные изменения напряжения, когда скорость изменения напряжения не превышает 1 % в секунду от действующего значения, и быстрые отклонения (колебания), происходящие со скоростью более 1 % в секунду [2–4].

При исследовании влияния на электромеханические характеристики асинхронного двигателя напряжения сети целесообразно использовать Т-образную схему замещения, что позволит учесть особенности при исследовании электромеханических характеристик АД при изменении напряжения [2, 3]. В современной литературе, посвященной асинхронным электрическим машинам, вопрос влияния изменения напряжения на распределение потерь в узлах короткозамкнутого АД и двигателя с фазным ротором является недостаточно изученным [4]. Практически отсутствуют методики расчета распределения потерь в узлах АД с помощью Т-образной схемы замещения с учетом нелинейности ее параметров, и поэтому углубленное исследование распределения потерь является достаточно актуальным. Как известно, потери в узлах АД являются исходными данными для расчета теплового состояния двигателя.

Целью работы является демонстрация возможностей применения опыта холостого хода для определения параметров Т-образной схемы замещения асинхронного двигателя при решении мониторинговых и диагностических задач.

Известные методики с использованием Г-образной схемы замещения дают существенные неточности, связанные с неучетом нелинейных зависимостей напряжения намагничивающего контура  $U_0$  от тока холостого хода  $I_0$  ( $U_0(I_0)$ ) и потерь в стали от  $U_0$  ( $p_{cm}(U_0)$ ), параметров вторичного контура короткозамкнутого АД от частоты тока ротора  $f_2$  или скольжения  $s$  ( $r_2'(s)$ ,  $x_2'(s)$ ), падения напряжения ( $I_1 z_1$ ) на сопротивлении статора. Поэтому ниже излагаются результаты исследований, полученные с использованием Т-образной схемы замещения (рис. 1).

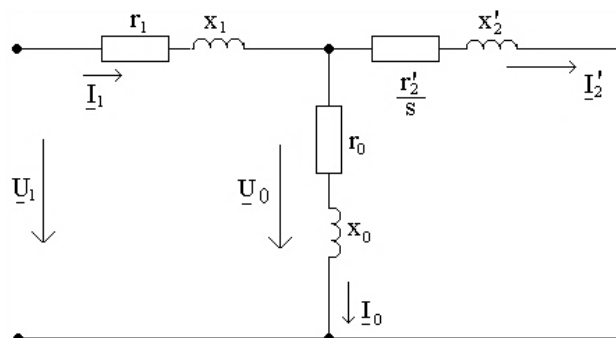


Рис. 1. Т-образная схема замещения АД

Параметры Т-образной схемы замещения могут быть получены расчетным или экспериментальным путём, либо их комбинацией [3]. Наибольшее распространение получили экспериментальные методы исследований [4, 5]. Для получения этих параметров и исследования электромеханических характеристик АД, в соответствии с ГОСТ [6], следует провести опыт измерения сопротивления обмотки статора постоянным током в практически холодном состоянии, опыт холостого хода, опыт короткого замыкания и опыт под нагрузкой [5, 6]. Для получения нелинейных зависимостей  $U_0(I_0)$ ,  $p_{cm}(U_0)$  и  $r_2'(s)$ ,  $x_2'(s)$  необходимо внести определенные изменения в общепринятую методику проведения опытов.

Целью проведения опыта холостого хода является построение нелинейных зависимостей напряжения холостого хода  $U_0$  от тока холостого хода ( $U_0(I_0)$ ) и потерь в стали от  $U_0$  ( $p_{cm}(U_0)$ ), определение базовых механических потерь, базового момента холостого хода.

Предварительно проводят опыт по определению  $r_1$ . Далее проводят опыты холостого хода при различных напряжениях  $U_1$ , в результате которых определяют  $P_0$ ,  $I_0$  и  $s_0$  для различных напряжений. Измеряемые величины приведены в табл. 1.

Таблица 1

## Результаты опыта холостого хода

Измеряемые величины	При $U_{1н}$	При $U_1$
Напряжение, В	$U_{1н}$	$U_1$
Мощность, потребляемая из сети, Вт	$P_{0н}$	$P_0$
Ток холостого хода, А	$I_{0н}$	$I_0$
Частота сети, Гц	$f_{1н}$	$f_1$
Частота вращения, рад/с	$n_{0н}$	$n_0$
Скольжение, %	$s_{0н}$	$s_0$

По результатам опыта холостого хода строится зависимость  $P_0(U_1)$ . Как известно, эта зависимость может быть аппроксимирована с помощью квадратичной функции  $P_0 = a_1 + a_2 U_1^2$ . С помощью этой кривой находят механические потери  $p_{mex} = P_0(0) = a_1$ .

По результатам опыта холостого хода строятся зависимости  $U_0(I_0)$ ,  $p_{cm} = f(U_0)$  в относительных единицах. Для этого используются следующие соотношения. Рассчитываются значения величин  $\underline{I}_0$ ,  $\underline{U}_1$ ,  $\underline{U}_0$  в комплексной форме [7, 8].

$$\underline{U}_1 = U_1, \underline{I}_0 = I_0 \exp(-j\varphi_0), \underline{U}_0 = \underline{U}_1 - \underline{I}_0 \underline{z}_1, \quad (1)$$

где  $\varphi_0 = \arccos\left(\frac{P_0}{3U_1 I_0}\right)$ ;  $\underline{z}_1 = r_1 + jx_1$  – комплексное сопротивление обмотки статора

(значение  $x_1$  можно взять из данных каталога, колебания  $x_1$  незначительно влияют на колебания электромеханических характеристик АД [9, 10]).

Величина  $p_{cm} + p_{mex}$  соответственно равна:

$$p_{cm} + p_{mex} = P_0 - 3I_0^2 r_1. \quad (2)$$

После проведения этих расчетов для всех напряжений формируются зависимости  $U_0(I_0)$  и  $p_{cm}(U_0)$  в относительных единицах. За базовые  $U_0$ ,  $I_0$  и  $p_{cm}$  целесообразно принять значения при номинальном напряжении. Полученные зависимости в относительных единицах носят универсальный характер и применимы для любого двигателя одного типоразмера. Это означает, что опыт холостого хода при различных напряжениях для двигателей одного типоразмера достаточно проводить на этапе приёмочных либо типовых и периодических испытаний. Для конкретного двигателя достаточно провести опыт холостого хода при номинальном напряжении, при котором определяются  $P_{0н}$ ,  $U_{1н}$ ,  $I_{0н}$  и  $s_{0н}$ , и опыт по определению  $r_1$  на этапе приёмочных испытаний.

При этом механические потери  $p_{mex}$  для конкретного двигателя можно определить из соотношения:

$$p_{mex} = M_0 \omega_0, \quad (3)$$

где  $M_0$  – момент холостого хода, который вычисляется по формуле:

$$M_0 = \frac{M_{0б}}{s_{0б}} s_0. \quad (4)$$

В последнем выражении  $s_{0б} = s_{0н}$ , а базовый момент холостого хода  $M_{0б}$  вычисляется на этапе приёмочных испытаний:

$$M_{0б} = \frac{p_{mexб}}{\omega_0} = \frac{p_{mexб}}{\omega_1(1-s_{0б})}. \quad (5)$$

На этом этапе определяются базовые потери в стали  $p_{cmб}$ . На рис. 2 приведена зависимость  $P_0(U_1)$  для двигателя с фазным ротором МТН111-6 в относительных единицах.

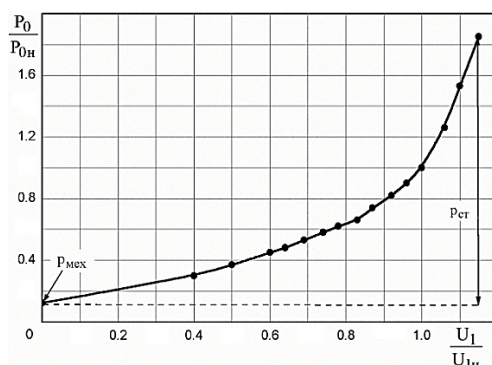


Рис. 2. Зависимость  $P_0(U_1)$  для АД МТН111-6

На рис. 3 и рис. 4 изображены зависимости  $U_0(I_0)$  и  $p_{ст}(U_0)$ , построенные в относительных единицах по результатам опыта холостого хода. В качестве базовых значений  $p_{стн}$ ,  $I_{0н}$  и  $U_{0н}$  приняты величины, соответствующие номинальному напряжению  $U_{1н}$  ( $\beta_U = \frac{U_1}{U_{1н}}$ ).

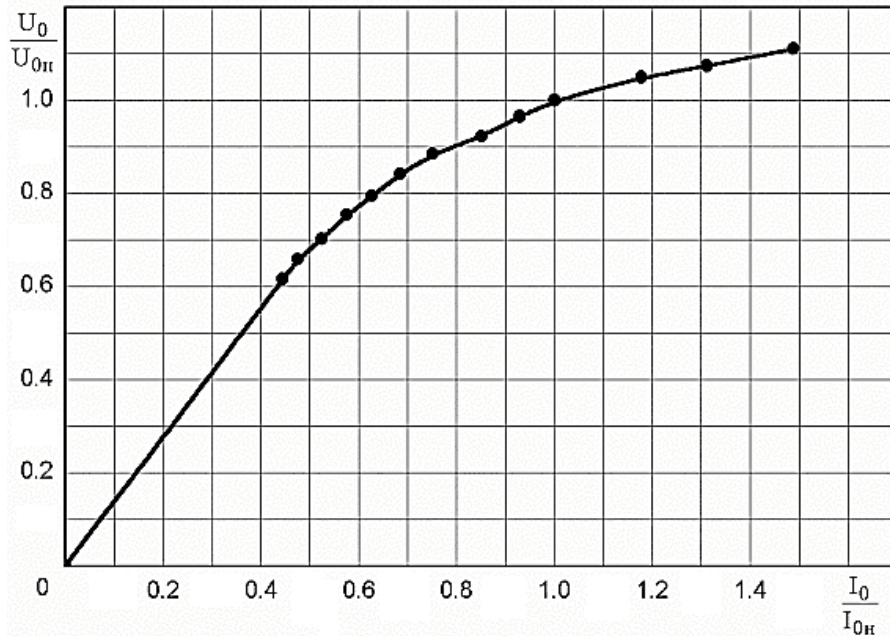


Рис. 3. Напряжение  $U_0$  при изменении тока холостого хода

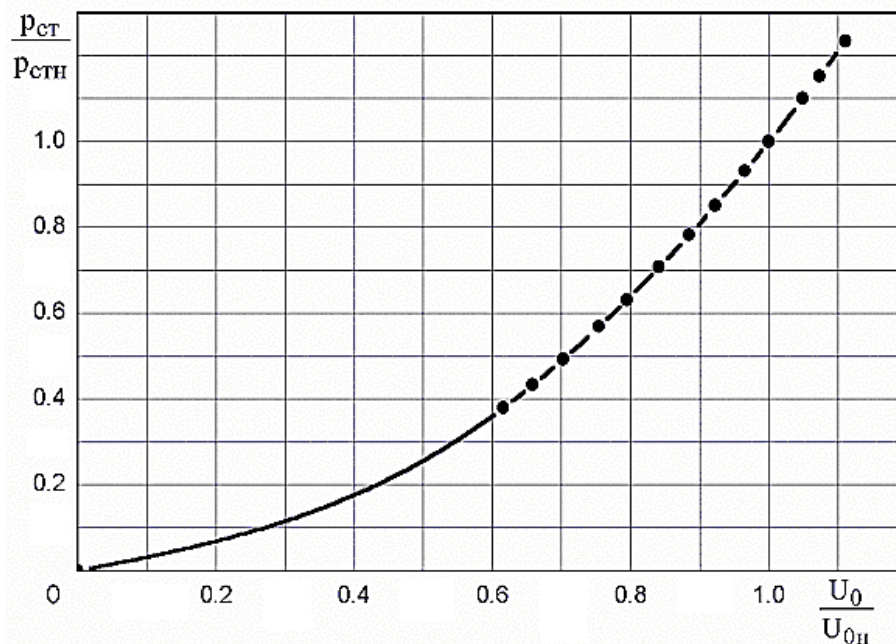


Рис. 4. Потери в стали  $p_{ст}$  при изменении напряжения намагничивающего контура

## ВЫВОДЫ

Предложенный алгоритм использования данных опыта холостого хода позволяет на этапе приемочных испытаний для двигателей одного типоразмера:

- построить кривую зависимости напряжения  $U_0$  от тока холостого хода ( $U_0(I_0)$ );
- построить нелинейную зависимость потерь в стали от  $U_0$  ( $P_{ст}(U_0)$ );
- определить момент холостого хода  $M_0$  и базовые механические потери  $P_{мехб}$ .

В результате проведенных экспериментов установлено, что:

– повышение напряжения сети  $U_1$  сопровождается увеличением тока статора  $I_1$  за счет роста тока холостого хода  $I_0$  при насыщении магнитной системы АД; ток обмоток ротора при этом уменьшается;

– снижение напряжения  $U_1$  приводит к увеличению токов статора  $I_1$  и ротора  $I_2$ ; большие темпы роста тока наблюдаются в роторе;

– зависимость тока статора от напряжения  $I_1(U_1)$  имеет явно выраженный минимум, который в зависимости от нагрузки наблюдается при  $U_1 = (0.9 \div 1.1)U_{1н}$ ; при больших нагрузках минимум напряжения смещается в сторону увеличения  $U_1$ , при меньших – в сторону уменьшения;

– при отклонениях напряжения сети от номинальной величины имеет место перераспределение потерь в АД; в случае снижении напряжения  $U_1$  для АД с фазным ротором имеет место существенное возрастание потерь в обмотке ротора;

– коэффициент полезного действия (КПД) уменьшается со снижением напряжения сети; максимум КПД уменьшается при снижении напряжения;

– ток холостого хода оказывает существенное влияние на ток в обмотке статора; в АД с менее насыщенной магнитной системой (при меньших значениях тока холостого хода) имеет место более интенсивный рост тока статора при уменьшении входного напряжения; ток ротора при изменении тока холостого хода изменяется незначительно.

Таким образом, подтверждена обоснованность применения рассмотренной методики. Выявлено, что рассчитанные с помощью Т-образной схемы замещения значения момента, токов и потерь точнее, чем в случае Г-образной схемы замещения.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Fedorov M., Dennik V., Alekseev E. The system of automatic trial and prognosis of the electric mechanical and thermal testimonial of asynchronous engines // World Mining Congress, 13th International Conference on Automation in Mining. September 8–11, 1998. – High Tatras. Slovak Republic, – 1998. – P. 93–96.
2. Гольдберг О. Д. Испытания электрических машин / О. Д. Гольдберг. – М.: Высшая школа, 2000. – 256 с.
3. Мощинский Ю. А. Определение параметров схемы замещения асинхронной машины по каталожным данным / Ю. А. Мощинский, В. Я. Беспалов, А. А. Кирякин // Электричество. – 1998. – № 4. – С. 38–42.
4. Гольдберг О. Д., Гурин Я. С., Свириденко И. С. Проектирование электрических машин / Под ред. О. Д. Гольдберга. – М.: Высшая школа, 2000. 430 с.
5. Гольдберг О. Д. Качество и надежность асинхронных двигателей. – М.: Высшая школа, 1968. – 176 с.
6. ГОСТ 11828-86. Машины электрические вращающиеся. Общие методы испытаний. – Взамен ГОСТ 11828-75 (кроме разд. 6), 25000-81; введ. 07.01. 87. – М.: Издательство стандартов, 1986. – 22 с.
7. Асинхронные конденсаторные двигатели повышенной мощности / Иванов А. В., Меренков Д. А., Семенчуков Г. А., Сентрюхин Н. И., Щербаков А. В. // Электротехника. – 2002. – № 8. – С. 14–20.
8. Бессонов Л. А. Теоретические основы электротехники. – М.: Высшая школа, 1973. – 750 с.
9. Мартынов В. А. Анализ динамических процессов АД с учетом вытеснения тока в обмотке ротора / В. А. Мартынов // Электричество. – 1999. – № 2. – С. 38–41.
10. Асинхронные двигатели серии 4А: справочник / Кравчик А. Э., Шлаф М. М., Афонин В. И., Соболенская Е. А. – М.: Энергоиздат, 1982. – 504 с.