

УДК 621.3.07: 621.313.333

ИССЛЕДОВАНИЕ МАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ ПРИ ЧАСТОТНОМ УПРАВЛЕНИИ

RESEARCH OF THE MAGNETIC SYSTEM OF THE ASYNCHRONOUS MOTOR UNDER FREQUENCY CONTROL

Островлянчик Виктор Юрьевич,

доктор технических наук, профессор, e-mail: viktor.ostrovlyanchik@yandex.ru

Ostrovlyanchik Viktor Yu.,

Dr. Sc.in Engineering

Поползин Иван Юрьевич,

аспирант, старший преподаватель, e-mail: eidoline@yandex.ru

Popolzin Ivan Yu.,

postgraduate student

Сибирский государственный индустриальный университет, 654007, Россия, г. Новокузнецк, ул. Кирова, 42

Siberian State Industrial University, 42 Kirova st., Novokuznetsk, 654007, Russian Federation

Аннотация. Актуальность работы. Частотное управление асинхронными двигателями в настоящее время получает все большее распространение. Оно применяется как для машин, спроектированных с учетом особенностей частотного управления, так и для машин общего назначения, рассчитанных на питание напряжением частотой 50 Гц. При этом недостаточно внимания уделяется описанию электромагнитных процессов, происходящих в машинах при изменении частоты. Если для машин специальных серий, рассчитанных на использование в электроприводах с частотным управлением и использующих такие решения, как шихтованные сердечники обмоток, это не столь актуально, то исследование электромагнитных процессов при изменении частоты питающего напряжения машин, рассчитанных на работу при частоте 50 Гц, представляет интерес.

Цель работы: исследование изменений свойств магнитной цепи асинхронного двигателя, рассчитанного на работу при частоте питающего напряжения 50 Гц, при частотах ниже номинальной.

Методы исследования: метод схем замещения, компьютерная симуляция.

Результаты: получены данные о поведении двигателя при пониженной частоте, показана неблагоприятность и недостаточная энергоэффективность такого режима при низких частотах.

Abstract. The urgency of the discussed issue. Frequency control of asynchronous motors are now gaining ground. It is used for specialized machines, designed considering the features of frequency control as well as for general purpose machines, designed for fixed supply voltage frequency 50 Hz. At the same time is often not enough attention is paid to the description of electromagnetic processes in the machine with varying frequency. This problem isn't very actual for special induction motors with laminated core windings, but it's very actual for machines designed to operate at a frequency of 50 Hz.

The main aim of the study: research changes in the properties of the magnetic circuit of the induction motor, designed to work at a frequency of 50 Hz voltage, at frequencies lower than the nominal.

The methods used in the study: method of equivalent circuits, computer simulation.

The results: obtained data on the behavior of the engine at a reduced frequency, low energy efficiency at low frequencies is shown.

Ключевые слова: частотное управление, асинхронный двигатель, схема замещения, насыщение, кривая намагничивания, индуктивное сопротивление, КПД.

Keywords: frequency control, asynchronous motor, equivalent circuit, saturation, magnetization curve, inductive reactance, energy conversion efficiency.

1. Введение

Основными факторами, влияющими на поведение магнитной системы машины при снижении частоты питающего напряжения, являются:

а) Изменение реактивного сопротивления кон-

тура намагничивания и, как следствие, уменьшение тока намагничивания [1], [2], [3];

б) Изменение абсолютной величины и структуры потерь в стали машины [4], [5], [6];

в) Изменение кривой намагничивания маши-

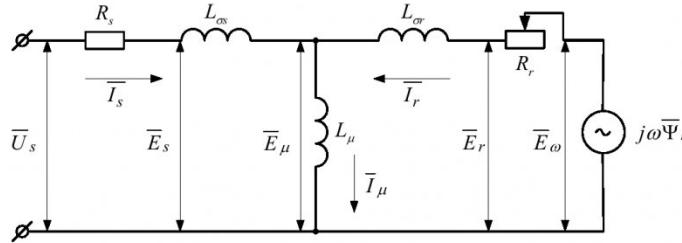


Рис. 1. Т-образная схема замещения асинхронного двигателя

ны и эффекты насыщения [4], [8], [9], [10];

г) Изменение индуктивности контура намагничивания машины вследствие изменения магнитной проницаемости сердечников обмоток [4], [8]. В данной работе влияние данного фактора не рассматривается ввиду его крайне малой величины при частотах ниже 1 кГц [4].

2. Влияние изменения реактивного сопротивления контура намагничивания на свойства АД при частотном управлении при $U_s=const, f=var$.

Для исследования влияния изменения частоты питающего двигатели напряжения на реактивное сопротивление контура намагничивания обратимся к Т-образной схеме замещения машины (рис. 1).

В данной схеме выделим ветвь статора (индекс s), ветвь ротора (индекс r) и намагничивающую ветвь (индекс μ). Запишем выражения для индуктивных сопротивлений и законы Кирхгофа для контура статора:

$$\begin{cases} \omega = 2\pi f, \\ X_{\sigma s} = 2\pi f L_{\sigma s}, \\ X_\mu = 2\pi f L_\mu, \\ X_{\sigma r} = 2\pi f L_{\sigma r}. \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \bar{U}_s &= \bar{I}_s R_s + L_{\sigma s} \frac{d\bar{I}_s}{dt} + L_\mu \frac{d\bar{I}_\mu}{dt} = \\ &= \bar{I}_s R_s + \frac{d\bar{\Psi}_{\sigma s}}{dt} + \frac{d\bar{\Phi}_\mu}{dt}, \end{aligned} \quad (2)$$

$$\bar{I}_\mu = \bar{I}_s + \bar{I}_r.$$

где f , ω – линейная и циклическая частоты питающего напряжения; $X_{\sigma s}$, $X_{\sigma r}$ – индуктивные сопротивления рассеяния обмоток статора и ротора соответственно; X_μ – индуктивное сопротивление намагничивающей ветви; $L_{\sigma s}$, $L_{\sigma r}$, L_μ – индуктивности соответственно обмотки статора, обмотки ротора и намагничивающей ветви; \bar{U}_s – комплексное значение фазного напряжения обмотки статора; \bar{I}_s , \bar{I}_r , \bar{I}_μ – комплексные значения токов обмоток статора и ротора и намагничивающей ветви соответственно; $\bar{\Psi}_{\sigma s}$, $\bar{\Phi}_\mu$ – комплексные

значения потокосцепления рассеяния статора и основного потокосцепления машины соответственно.

Преобразуя первое уравнение системы (2) с учетом соотношения $\bar{\Psi}_\mu = w_s \frac{d\bar{\Phi}_\mu}{dt}$, где w_s – эффективное число витков обмотки статора, получим:

$$\begin{aligned} \bar{U}_s &= \bar{I}_s R_s + L_{\sigma s} \frac{d\bar{I}_s}{dt} + L_\mu \frac{d\bar{I}_\mu}{dt} = \\ &= \bar{I}_s R_s + \frac{d\bar{\Psi}_{\sigma s}}{dt} + w_s \frac{d\bar{\Phi}_\mu}{dt}. \end{aligned} \quad (3)$$

Осуществим замену $\frac{d}{dt} \rightarrow p$:

$$\begin{aligned} \bar{U}_s &= \bar{I}_s R_s + p L_{\sigma s} \bar{I}_s + p L_\mu \bar{I}_\mu = \\ &= \bar{I}_s R_s + p \bar{\Psi}_{\sigma s} + p w_s \bar{\Phi}_\mu. \end{aligned}$$

Переходя к частотным характеристикам с использованием замены $p \rightarrow j\omega$, получим:

$$\begin{aligned} \bar{U}_s &= \bar{I}_s R_s + j\omega L_{\sigma s} \bar{I}_s + j\omega L_\mu \bar{I}_\mu = \\ &= \bar{I}_s R_s + j\omega \bar{\Psi}_{\sigma s} + j\omega w_s \bar{\Phi}_\mu. \end{aligned} \quad (4)$$

Из уравнения (4) следует:

$$\bar{\Phi}_\mu = -j \frac{1}{2\pi w_s} \left(\frac{U_s}{f} - \frac{R_s}{f} \bar{I}_s - j 2\pi L_{\sigma s} \bar{I}_s \right) \quad (5)$$

Переходя от изображающего вектора потока к действующим значениям параметров, получим:

$$\begin{aligned} \Phi_\mu &= \frac{1}{\sqrt{2\pi w_s}} \left(\frac{U_s}{f} - \frac{R_s}{f} I_s \right) \\ &\quad \left. \left(-j 2\pi L_{\sigma s} I_s \right) \right|_{L_\mu \gg L_{\sigma s}; R_s \ll \omega L_\mu} \\ &\approx \frac{1}{\sqrt{2\pi w_s}} \left(\frac{U_s}{f} \right) \end{aligned} \quad (6)$$

Из выражения (6) следует, что для поддержания постоянства основного магнитного потока машины следует соблюдать условие $\frac{U_s}{f} = const$, также называемое законом Костенко [1], или его

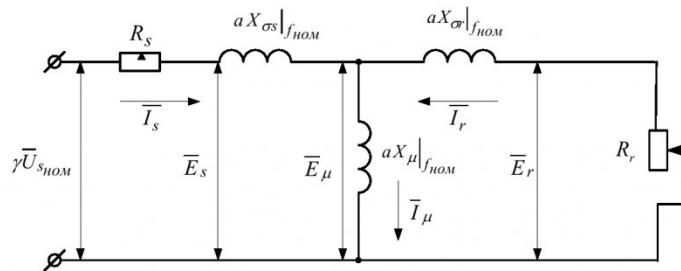


Рис. 2. Модифицированная Т-образная схема замещения асинхронного двигателя при переменных частоте и величине питающего напряжения

модификации при различных законах изменения статического момента[1].

Рассмотрим процессы, происходящие в контуре статора при уменьшении частоты. Введем следующие относительные величины:

1) Относительная частота напряжения на статоре: $\alpha = \frac{f}{f_n}$;

2) Относительная частота ЭДС ротора (абсолютное скольжение): $\beta = \frac{f_r}{f_n} = \frac{\omega_s - \omega}{2\pi f_n}$;

3) Относительное напряжение на статоре: $\gamma = \frac{U_s}{U_{s_n}}$.

Для упрощения анализа примем, что машина работает на холостом ходу и ток ротора близок к нулю. Как следует из (1), реактивные сопротивления индуктивностей схемы замещения прямо пропорциональны частоте. Таким образом, при уменьшении частоты пропорционально уменьшаются реактивные сопротивления индуктивностей:

$$\begin{cases} X_{\sigma s} = 2\pi f_n L_{\sigma s} \alpha, \\ X_{\mu} = 2\pi f_n L_{\mu} \alpha. \end{cases}$$

Тогда полное сопротивление обмотки статора определится как:

$$\begin{aligned} Z_s &= \sqrt{R_s^2 + X_{\sigma s}^2} = \\ &= \sqrt{R_s^2 + 4\pi^2 f_n^2 \alpha^2 (L_{\sigma s}^2 + L_{\mu s}^2)} \end{aligned}$$

а ток статора как:

$$I_s = \frac{U_s}{\sqrt{R_s^2 + 4\pi^2 f_n^2 \alpha^2 (L_{\sigma s}^2 + L_{\mu s}^2)}}. \quad (7)$$

Схема замещения, соответствующая введенным величинам, представлена на рис. 2.

Построим и исследуем зависимости тока статора, падения напряжения на реактивном сопротивлении намагничивающей ветви и падения напряжения на активном сопротивлении статора для двигателя типа 4А160М4УЗ в режиме холостого хода ($I_r=0$) при снижении частоты ниже 50 Гц и постоянстве питающего напряжения. Используем для этого средства среды Wolfram Mathematica.

Ток статора при $U_s=const$ обратно пропорционально зависит от частоты. Видно, что ток статора резко увеличивается, начиная с частоты 25 Гц, и при нулевой частоте обусловлен только величиной активного сопротивления статора. Физический смысл данного явления заключается в том, что в соответствии с выражением (6), при уменьшении частоты и постоянной амплитуде напряжения машина пытается компенсировать уменьшение главного магнитного потока ростом тока статора. Очевидно, что зависимости, приведенные на рис. 3, имеют теоретический характер, поскольку такой сильный рост тока статора приведет к термическому и механическому повреждению машины. Следует отметить, что данные соображения справедливы не только для режима холостого хода, но и для любого рабочего режима двигателя, поскольку физическая основа данного явления

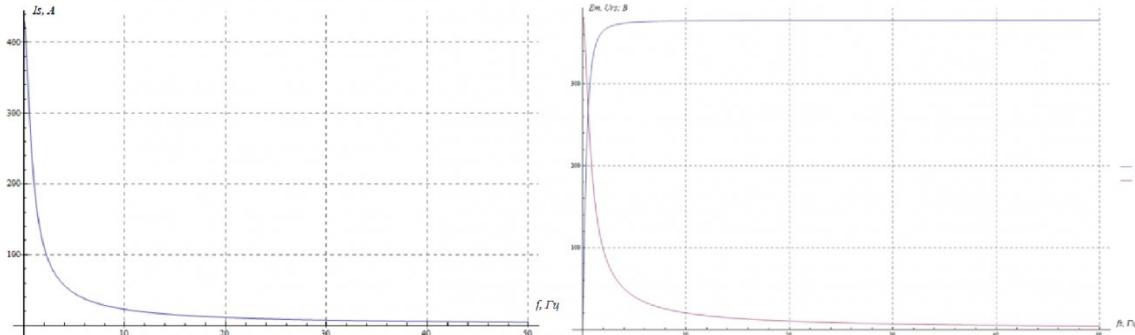


Рис. 3. Зависимости тока статора двигателя 4А160М4УЗ, ЭДС намагничивания и падения напряжения на активном сопротивлении статора от частоты питающего напряжения при $U_s=const$

лежит в сохранении постоянства основного потока двигателя. Из рис. 3 видно, что ЭДС намагничивания, а, следовательно, и главный магнитный поток машины, практически во всем диапазоне изменения частоты, и начинают резко спадать только при частоте 4 Гц, на которой реактивное сопротивление цепи намагничивания оказывается мало по сравнению с активным сопротивлением статора.

Рассмотрим поведение момента двигателя при уменьшении частоты питающего напряжения и постоянстве его величины. Для этого воспользуемся подходом, изложенным в [1], несколько модифицировав его. Рассмотрим подробнее Т-образную схему замещения машины с учетом относительного напряжения на статоре и выражений, определяющих связь индуктивностей ветвей схемы с их реактивными сопротивлениями (рис. 2).

3. Влияние изменения реактивного сопротивления контура намагничивания на свойства АД при частотном управлении при $U_s/f=const$

Развивая методику, предложенную в [1], введем следующие параметры:

$$\begin{aligned} k_{\sigma s} &= \frac{X_{\sigma s}}{X_{\mu}}, & k_{\sigma r} &= \frac{X_{\sigma r}}{X_{\mu}}, \\ \sigma &= k_{\sigma s} + k_{\sigma r} + k_{\sigma s}k_{\sigma r}, \\ R'_r &= R_r(1+k_{\sigma r}), & X_{\mu n} &= X_{\mu}\sigma, \\ \cos\varphi_S &= \frac{R_s}{X_{\mu}}, & k_s &= 1+k_{\sigma s}, \\ Z'_r &= \sqrt{R'^2 + \alpha^2 X_{\mu n}^2}, \\ k_{s\mu} &= \sqrt{\cos\varphi_S^2 + \alpha^2 k_s^2}, \\ Z'_s &= \sqrt{Z'^2 + \beta^2 + 2R_s R_r \alpha \beta + k_{s\mu}^2 R_r^2}. \end{aligned} \quad (8)$$

где $k_{\sigma s}, k_{\sigma r}, \sigma$ - коэффициенты рассеяния ста-

тора, ротора и воздушного зазора соответственно; R_r' – приведенное активное сопротивление ротора; $X_{\mu n}$ – полное сопротивление намагничивающей ветви Т-образной схемы замещения; $\cos\varphi_S$ – коэффициент мощности обмотки статора; k_s – приведенный коэффициент рассеяния статора; Z_r' – приведенное полное сопротивление ротора; $k_{s\mu}$ – коэффициент, характеризующий формирование обмоткой статора основного магнитного потока машины; Z_s' – приведенное полное сопротивление машины.

Используя известное выражение для электромагнитного момента машины [10], [12] с учетом приведенных в (8) соотношений, получим:

$$M = \frac{3\gamma^2 U_s^2}{2\pi f_u} \cdot \frac{R_r \beta}{Z_s'^2} \quad (9)$$

Рассмотрим режим управления асинхронной машиной по закону $U/f=const$, или, что эквивалентно, $\alpha = \gamma$. Зависимость полного сопротивления статора будет линейной и полностью аналогичной показанной на рисунке 2, по причине того, что на его величину влияет только частота. Зависимость тока холостого хода от частоты, приведена на рис. 4.

Видно, что при управлении по закону $U/f=const$ ток холостого хода (и ток намагничивания при фиксированном скольжении) постоянен в широком диапазоне частот. Практически ток намагничивания спадает только при частоте, близкой к 0, что хорошо согласуется с данными [1] о том, что при нулевой частоте главный поток машины всегда равен 0. При этом момент уменьшается при уменьшении частоты, при значениях частоты ниже 25 Гц скорость уменьшения момента резко возрастает, что значительно ухудшает характеристики двигателя.

Построим также зависимости для критического скольжения и критического момента машины, которые выражаются из параметров, введенных в (8) и известных соотношений [12] (рис. 5), а также семейство зависимостей момента машины от абсолютного скольжения при различных значениях частоты (рис. 6).

На рис. 5 видно, что при уменьшении частоты

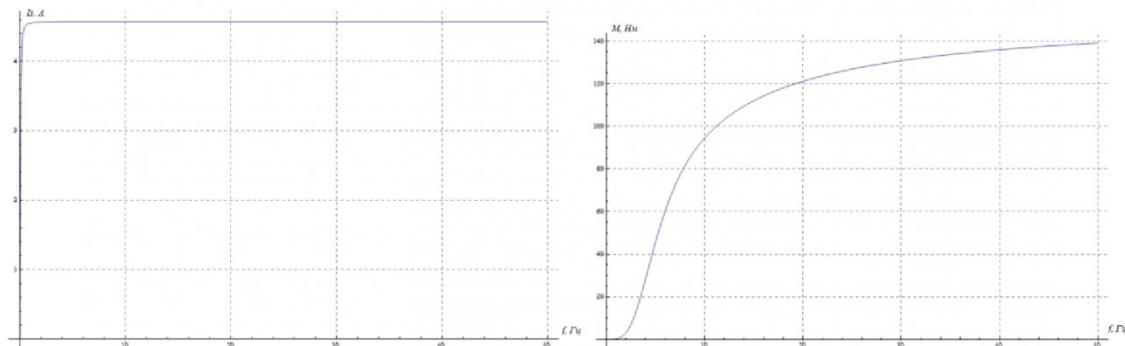


Рис. 4. а) Зависимость тока холостого хода двигателя 4A160M4УЗ от частоты при управлении по закону $U/f=const$; б - Зависимость момента от частоты при абсолютном скольжении 2% и управлении по закону $U/f=const$

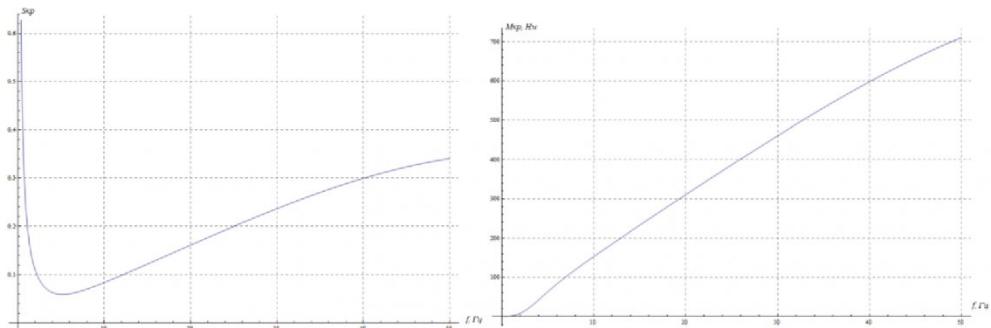


Рис. 5. Зависимость критического скольжения и критического момента от частоты для двигателя 4A160M4УЗ при управлении по закону $U/f=\text{const}$

критическое скольжение и критический момент двигателя уменьшаются, что ведет к уменьшению жесткости линейного (рабочего) участка механической характеристики двигателя (MX) и его сокращению. При этом хорошо видно, что уже при достижении частотой значения 25 Гц критическое скольжение и критический момент уменьшаются практически в 2 раза

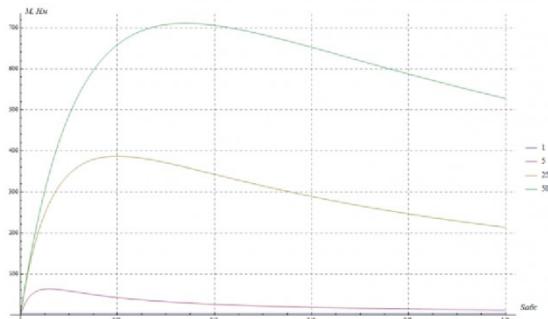


Рис. 6. Семейство зависимостей момента двигателя 4A160M4УЗ от абсолютного скольжения при управлении по закону $U/f=\text{const}$

Сокращение рабочего участка MX и уменьшение его жесткости иллюстрируется семейством зависимостей электромагнитного момента двигателя от абсолютного скольжения, приведенным на рис. 6.

Исходя из зависимостей, приведенных на рис. 5 и 6, можно сделать вывод о том, что работа машины, рассчитанной на частоту питающего напряжения 50 Гц, нецелесообразна на частотах ниже 25 Гц по причине значительного уменьшения развиваемого двигателем момента и снижения критических скольжения и момента. Выше, в разделе 2 также было показано, что частота 25 Гц, т.е. $0,5f_{\text{ном}}$ является граничной, и при падении частоты ниже 25 Гц свойства двигателя резко ухудшаются.

4. Анализ изменения кривой намагничивания машины при снижении частоты

Кривая намагничивания представляет собой зависимость индукции поля B от напряженности магнитного поля H . При этом индукция поля при прочих равных условиях зависит от частоты перенамагничивания (частоты тока намагничивания):

$B \sim 1/f$. Напряженность поля зависит от величины намагничивающего тока при неизменных размерах обмотки: $H \sim I_\mu$. Поскольку деформация обмоток в асинхронном двигателе мала, в дальнейшем будем считать размеры обмоток постоянными. Также согласно [4], [8] примем, что гистерезисные петли в стали сердечников в переменном поле имеют эллиптическую форму и охватывают площадь, равную площади, отсекаемой реальными петлями гистерезиса. Это позволит не учитывать искажение синусоидальной формы токов и порождаемые им высшие гармоники.

На практике кривые намагничивания асинхронных машин представляют в виде характеристик холостого хода – зависимостей между напряжением на статоре машины и током статора, который в режиме холостого хода фактически является током намагничивания [12]. Рассмотрим Т-образную схему замещения двигателя, приведенную на рис. 1. ЭДС обмотки статора двигателя определяется по выражению [12]:

$$E_S = k\Phi f, \quad (10)$$

где k – коэффициент пропорциональности.

В режиме холостого хода асинхронного двигателя ток ротора практически равен 0, и схема замещения машины принимает иной вид (рис. 7).

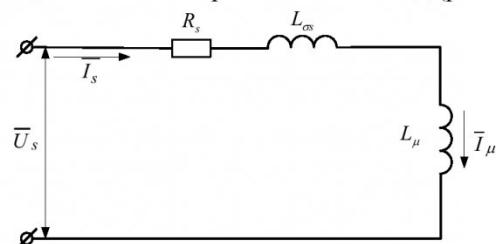


Рис. 7. Схема замещения асинхронного двигателя в режиме холостого хода

Как следует из схемы замещения машины, при пренебрежении потерями в статоре ЭДС статора равна приложенному к статору напряжению:

$$E_S \approx U_S = k\Phi f. \quad (11)$$

Как видно из (11), изменение частоты приложенного к статору напряжения без изменения его величины приводит к изменению магнитного по-

тока машины, что было также показано в (5) и (6). Таким образом, эксперимент холостого хода позволяет снять зависимость $U_s=f(I_s)$, которая для данного режима эквивалентна зависимости $E_s=f(I_\mu)$ (рисунок 10). С учетом того, что поток намагничивания пропорционален ЭДС статора, данная зависимость эквивалентна кривой намагничивания машины в виде $\Phi=f(I_\mu)$. Поскольку, с другой стороны, в соответствии с уравнением трансформаторной ЭДС

$$E_S = 4,44\Psi_s f = 4,44L_\mu I_s f, \quad (12)$$

зависимость $U_s=f(I_s)$ позволяет также перейти к зависимости $L_\mu=f(I_\mu)$ для учета эффектов насыщения [14].

Как отмечается в [4], стандартно для электротехнических сталей приводится основная кривая намагничивания, снимаемая при частоте 50 Гц. При таких же условиях обычно снимается и характеристика холостого хода асинхронной машины [15]. Предложим методику пересчета кривой намагничивания АД при частоте 50 Гц в кривую намагничивания при другой частоте. В качестве примера рассмотрим двигатель типа 4A160M4УЗ (рис. 8). Для пересчета необходимы следующие параметры:

а) Индуктивность намагничивающей ветви: 262,8 мГн;

б) Индуктивность рассеяния статора: 1,8 мГн;
в) Активное сопротивление статора: 0,145 Ом.

Методика пересчета:

1. Снять кривую намагничивания машины при частоте 50 Гц;

2. Рассчитать для выбранных значений частоты ток холостого хода по (7);

3. Рассчитать коэффициент пересчета

$$k_I = \frac{I_s|_{f_0}}{I_s|_{f_H}};$$

4. Фиксируя на снятой в п. 1 кривой намагничивания значения напряжения, пересчитать соответствующие им значения тока:

$$I_s = k_I I_s|_{50\text{ Гц}}(U_s);$$

5. По полученным в п. 4 парам координат (U_s ; I_s) построить кривую намагничивания для интересующей частоты.

Из рис.8 видно, что при падении частоты значительно возрастает ток намагничивания машины, что ведет к сильному нагреву меди и стали и, очевидно, к падению КПД и, в дальнейшем, повреждению машины.

Рассмотрим также зависимость индуктивности намагничивания машины ветви от тока статора, рассчитанную через уравнение трансформаторной ЭДС (12), при различных значениях часто-

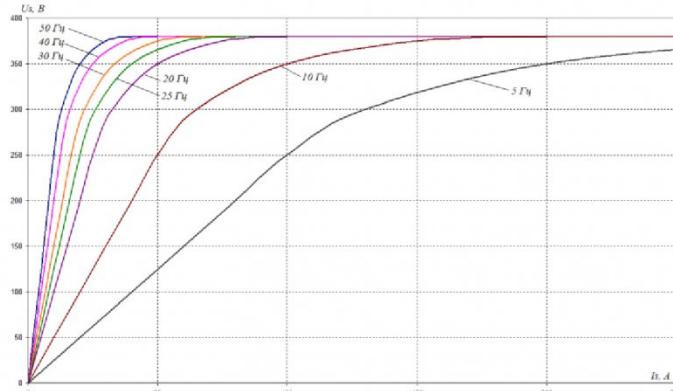


Рис. 8. Характеристики холостого хода двигателя 4A160M4УЗ при различных значениях частоты линейного питающего напряжения

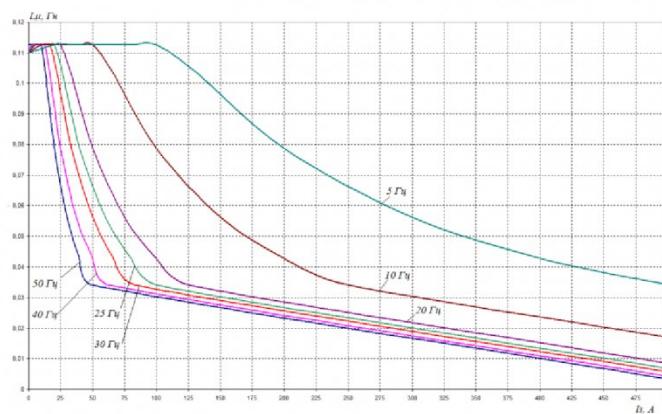
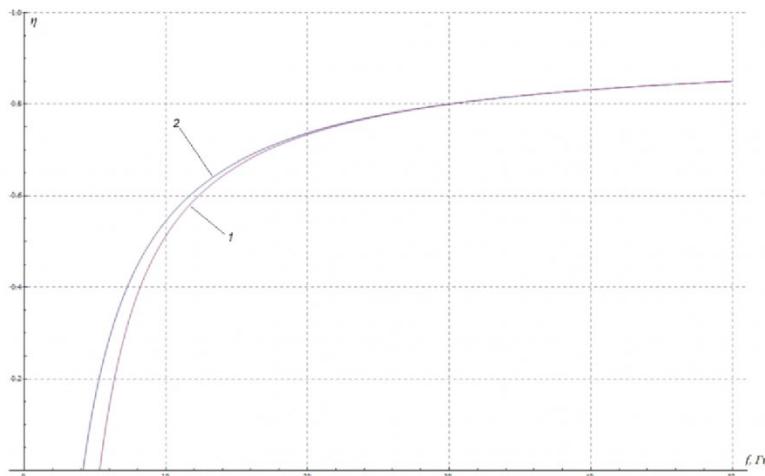


Рис. 9. Зависимости индуктивности ветви намагничивания двигателя 4A160M4УЗ от тока статора при различных значениях частоты питающего напряжения



Рису. 10. Зависимость КПД двигателя 4A160M4УЗ от частоты при управлении по закону $U/f=const$ и скольжении 0,02: 1 – без учета, 2 – с учетом нелинейности кривой намагничивания

ты (рис. 9).

Предложенная выше методика пересчета (12) и семейство зависимостей, приведенных на рисунках 8, 9, позволяют учитывать изменение условий намагничивания машины при изменении частоты.

5. Анализ потерь и КПД

Рассмотрим управление машиной по закону $U/f=const$, как наиболее распространенный на практике [1]. Как показано в [12] и [13], полезная мощность двигателя определяется как:

$$P_r = (1-s)(P_s - \Delta P_{const} - \Delta P_{var}), \quad (13)$$

где P_{const} – постоянные потери;

P_{var} – переменные потери [12].

Постоянные потери определяются по следующему выражению:

$$\begin{aligned} \Delta P_{const} &= 3I_{s0nom}^2 R_s \left(\frac{\Phi_\mu}{\Phi_{\mu nom}} \right)^2 + \\ &+ \Delta P_{стном} \left(\frac{\Phi_\mu}{\Phi_{\mu nom}} \right)^2 \left(\frac{f}{f_{nom}} \right)^{1,3} (1+s)^{1,3} + \\ &+ \Delta P_{мехном} \frac{\omega}{\omega_{nom}} \end{aligned} \quad (14)$$

где I_{s0nom} – номинальный ток холостого хода машины;

Φ_μ , $\Phi_{\mu nom}$ – текущее и номинальное значение главного магнитного потока машины;

f , f_{nom} – текущее и номинальное значения частоты питающего напряжения;

ω , ω_{nom} – текущее и номинальное значения угловой скорости машины;

$\Delta P_{стном}$ – номинальные потери в стали;

$\Delta P_{мехном}$ – номинальные механические потери.

Первое слагаемое (14) учитывает потери от тока намагничивания, протекающего по обмоткам статора. Как было показано выше, при управлении по закону $U/f=const$ ток намагничивания постоянен в широком диапазоне частот, и первое слагаемое практически постоянно. Второе слагаемое обуславливает зависимость потерь в стали от частоты питающего напряжения. В [5] и [16] указывается, что потери в стали пропорциональны квадрату частоты. В [7] указывается на недостатки данного подхода. В [4] и [12] принимается, что степень пропорциональности составляет 1,3...1,5. При этом потери в стали для статора принимаются примерно равным таковым для ротора в силу того, что объемы стали статора и ротора практически равны [12]. Третье слагаемое определяется, в основном, трением в подшипниках машины и зависит только от механической скорости вращения вала

Переменные потери определяются как:

$$\Delta P_{var} = 3I_s^2 R_s + 3I_r'^2 R_s' = 3I_s^2 R_s \left(1 + \frac{R_r'}{R_s} \right) \quad (15)$$

Таким образом, КПД машины при управлении по закону $U/f=const$ и с учетом введенного коэффициента a определится как (16).

$$\eta = (1-s) \left[1 - \frac{\left(3I_{s0}^2 R_s + \Delta P_{стном} a^{1,3} (1+s)^{1,3} + \right. \right. \\ \left. \left. + \Delta P_{мехном} (1-s) + 3I_s^2 R_s \left(1 + \frac{R_r'}{R_s} \right) \right)}{3\gamma U_{s_{nom}} I_s \cos \varphi_s} \right] \quad (16)$$

На рис. 10 приведены зависимости КПД машины от частоты при управлении по закону $U/f=const$. Зависимость 1 была получена при условии постоянства индуктивности намагничивания

двигателя, зависимость 2 – при использовании методики учета изменения свойств магнитной системы машины, предложенной в разделе 4 настоящей работы. Видно, что КПД машины уменьшается при уменьшении частоты и резко падает при снижении частоты ниже 25 Гц.

6. Выводы

1) Изучено влияние уменьшения частоты питающего напряжения при частотном управлении на механические и энергетические характеристики асинхронного двигателя, не рассчитанного на работу при частоте, отличной от 50 Гц. Показано, что при уменьшении частоты снижается КПД ма-

шины, уменьшается развиваемый ей момент, снижаются критические значения скольжения и момента. Таким образом, режим работы при пониженной частоте питающего напряжения является неблагоприятным для данных машин. Также показано, что при снижении частоты ниже 25 Гц ($0,5f_{nom}$) указанные характеристики резко ухудшаются, что обуславливает непригодность данного режима работы для практических целей.

2) Предложены методики расчета параметров асинхронного двигателя при частотном управлении и учета изменения свойств магнитной системы машины при снижении частоты.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Усольцев А. А. Частотное управление асинхронными двигателями. – СПб.: СПбГУ ИТМО, 2006. – 94 с.
2. Бессонов Л. А. Электрические цепи со сталью. – М., Л.: Госэнергоиздат, 1948. – 345 с.
3. Кодкин, В. Л., Аникин В. С. Повышение эффективности частотного управления асинхронными электроприводами // Электротехнические системы и комплексы. 2012. №20. с. 33-41
4. Дружинин В. В. Магнитные свойства электротехнической стали. – М.: Энергия, 1974. – 240 с.
5. Hiroki Kaihara. Effect of Carrier Frequency and Circuit Resistance on Iron Loss of Non-Oriented Electrical Steel Sheet under Single-Phase Full-Bridge PWM Inverter Excitation / Hiroki Kaihara et al. – Electrical Engineering in Japan, 2015. Volume 192, Issue 2. – P. 49–56.
6. Kwangyoung Jeong. Measurement of Stator Core Loss of an Induction Motor at Each Manufacturing Process / Kwangyoung Jeong et al. – Journal of Electrical Engineering & Technology, 2014. Vol. 9. – P. 742-747.
7. Тимофеев И. А. Влияние структуры на потери в ферромагнетике // Успехи современного естествознания. 2007. №8. с. 91-94
8. Поливанов К. М. Электродинамика вещественных сред: сборник статей. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 288 с.
9. Мазуренко Л. И. Учет насыщения магнитной системы асинхронного двигателя и его влияния на процесс разгона // Вісник КДПУ. 2007. Выпуск 3. Часть 2. с. 57-61
10. Пентегов И. В. Универсальная аппроксимация кривых намагничивания электротехнической стали // Електротехніка і електромеханіка. 2006. №1. с. 66-70
11. Семыкина И. Ю. Бездатчиковое управление асинхронными электроприводами. – Кемерово, КузГТУ, 2008. – 45 с.
12. Чиликин М. Г., Ключев В. И., Сандлер А. С. Теория автоматизированного электропривода. – М.:Энергия, 1979. – 616 с.
13. Островлянчик В. Ю., Поползин И. Ю. Определение КПД и коэффициента мощности асинхронного двигателя // Автоматизированный электропривод и промышленная электроника: труды шестой Всероссийской научно-практической конференции, посвященной 85-летию СибГИУ, 25–27 ноября 2014 г. – Новокузнецк: СибГИУ, 2014. – С. 97-108.
14. Калинов А. П., Огарь В. А. Характеристики асинхронных двигателей с учетом нелинейности кривой намагничивания // Електромашинобуд. та електрообладн.. 2006. Вип. 66. С. 226-229.
15. Belahcen, A. Uncertainty Propagation Of Iron Loss From Characterization Measurements To Computation Of Electrical Machines / A. Belahcen et al. // COMPEL: The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering, Vol. 34 Iss: 3. – P. 624 - 636
16. Круг К. А. Основы электротехники. Том 2. Теория переменных токов. – М., Л.: Госэнергоиздат, 1946. – 635 с.

REFERENCES

1. Usol'tsev A. A. Chastotnoe upravlenie asinkhronnymi dvigateleyami [Frequency control of induction motors]. SPb, ITMO University, 2006. 94 P.
2. Bessonov L. A. Elektricheskie tsepi so stal'yu. [Electrical circuits with steel]. Moscow, Gosenergoizdat, 1948. 345 P.

3. Kodkin, V. L., Anikin V. S. Povyshenie effektivnosti chastotnogo upravleniya asinkhronnymi elektroprivodami [Increasing efficiency of frequency control over induction motors] // Electrotechnical systems and complexes. 2012. Vol. 20. P. 33-41
4. Druzhinin V. V. Magnitnye svoistva elekrotekhnicheskoi stali [Magnetic properties of electrical steel]. Moscow, Energiya, 1974. 240 P.
5. Hiroki Kaihara. Effect of Carrier Frequency and Circuit Resistance on Iron Loss of Non-Oriented Electrical Steel Sheet under Single-Phase Full-Bridge PWM Inverter Excitation / Hiroki Kaihara et al // Electrical Engineering in Japan, 2015. Volume 192, Issue 2. P. 49–56.
6. Kwangyoung Jeong. Measurement of Stator Core Loss of an Induction Motor at Each Manufacturing Process / Kwangyoung Jeong et al. // Journal of Electrical Engineering & Technology, 2014. Vol. 9. P. 742-747.
7. Timofeev I. A. Vliyanie struktury na poteri v ferromagnete [Influence of structure on loss in ferromagnetic material] // Advances in current natural sciences. 2007. Vol. 8. P. 91-94
8. Polivanov K. M. Elektrodinamika veshchestvennykh sred: sbornik statei [Electrodynamics of material environments: digest of articles]. Moscow. Energiya. 2015. 1988. 288 P.
9. Mazurenko L. I. Uchet nasyshcheniya magnitnoi sistemy asinkhronnogo dvigatelya i ego vliyaniya na protsess razgona [Accounting for saturation of induction motor magnetic system and its impact on the process of acceleration] // Transactions of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University. 2007. Vol. 3. Part 2. P. 57-61
10. Pentegov I. V. Universal'naya approksimatsiya krivykh namagnichivaniya elekrotekhnicheskoi stali [Universal magnetization curve of electrical steel] // Electrical Engineering & Electromechanics. 2006. Vol. 1. P. 66-70.
11. Semykina I. Yu. Bezdatchikovoe upravlenie asinkhronnymi elektroprivodami [Sensorless control over induction motors]. Kemerovo. Publishing of Kuzbass State Technical University. 2008. 45 P.
12. Chilikin M. G., Klyuchev V. I., Sandler A. S. Teoriya avtomatizirovannogo elektroprivoda [Theory of automated electrical drive]. Moscow. Energiya. 1979. 616 p.
13. Ostrovlyanchik, V. Yu., Popolzin I. Yu. Opredelenie KPD i koefitsienta moshchnosti asinkhronnogo dvigatelya [Identification of energy converse efficiency and power factor for induction motor] // Avtomatizirovannyi elektroprivod i promyshlennaya elektronika: trudy shestoy vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii [Automated electrical drive and industrial electronics: transactions of the Sixth All-Russian Scientific and Practical Conference]. Publishing of Siberian State Industrial University, 2014. 340 P. P. 97-108
14. Kalinov A. P., Ogar' V. A. Kharakteristiki asinkhronnykh dvigatelei s uchetom nelineinosti krivoi namagnichivaniya [Characteristics of induction motors considering non-linearity of the magnetization curve] // Electrotechnic and computer systems. 2006. Vol. 66. №1. P. 226-229.
15. Belahcen, A. Uncertainty Propagation Of Iron Loss From Characterization Measurements To Computation Of Electrical Machines / A. Belahcen et al. // COMPEL: The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering, Vol. 34 Iss: 3. P. 624 - 636
16. Krug K. A. Osnovy elekrotekhniki. Tom 2. Teoriya peremennykh tokov. [Fundamentals of Electrical Engineering. Volume 2. The theory of alternating current]. Moscow. Gosenergoizdat, 1946. 635 P.

Поступило в редакцию 6.12.2015
Received 20 December 2015