

РАСЧЕТ ТОКА ДВИГАТЕЛЯ ДВОЙНОГО ПИТАНИЯ ДЛЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДА СИСТЕМ ВОДО- И ГАЗОСНАБЖЕНИЯ С УЧЕТОМ НЕСИНУСОИДАЛЬНОСТИ НАПРЯЖЕНИЯ РОТОРА

И.В. Бочкарев, К.К. Келебаев

Получены аналитические выражения для расчета тока двигателя двойного питания с учетом несинусоидальности напряжения питания ротора. Проведено исследование влияния способа модуляции выходного напряжения ТПЧ и режима работы двигателя на степень искажения токов при помощи интегральной характеристики – коэффициента искажения тока.

Ключевые слова: машина двойного питания; тиристорный преобразователь частоты; коэффициенты искажения токов статора и ротора.

Специфика работы различных систем водо- и газоснабжения позволяет использовать в них электроприводы на основе асинхронных двигателей (АД) с фазным ротором и тиристорных преобразователей частоты (ТПЧ) в роторных цепях. Одним из преимуществ таких АД является возможность регулирования частоты вращения с рекуперацией энергии скольжения в питающую сеть. Наиболее универсальным вариантом такого электропривода является машина двойного питания (МДП), в которой обмотки статора подключаются к одному источнику переменного по амплитуде и частоте напряжения, а обмотки ротора – к другому. В обычной практике обмотки статора подключены к питающей сети стабильной частоты, а роторные обмотки к ТПЧ, с помощью которых становится возможным независимо регулировать активную мощность (частоту вращения и момент), а также реактивную мощность в обмотке статора АД. Электропривод на базе МДП имеет следующие достоинства: возможность двухзонного регулирования и, как следствие этого, уменьшенную установленную мощность ТПЧ при том же диапазоне регулирования; возможность регулирования коэффициента мощности; отсутствие колебаний электромагнитного момента. Эти электроприводы отличает высокий уровень надежности с учетом возможности перехода при необходимости в нерегулируемый режим.

Основная сложность реализации МДП в том, что ток ротора АД имеет переменную частоту f_s , пропорциональную скольжению S , а выходная частота ТПЧ для создания поля, способного взаимодействовать с полем ротора АД,

должна изменяться в пределах от 0 до $f_s \cdot S_{max}$. Для насосов, требующих регулирования подачи в пределах $\pm 40\%$, во многих случаях оказывается экономически целесообразным применение дешевых и компактных каскадных схем, в которых преобразуется только энергия скольжения, подводимая к обмоткам ротора.

Предположение бесконечного числа пульсаций в кривой выходного напряжения ТПЧ позволяет считать, что оно повторяет по форме напряжение управления [1]. Анализ состава выходного напряжения U_2 при различных управляющих напряжениях U_y приведен в [1], где даются формулы разложения U_2 в ряд Фурье для фазы нагрузки трехфазного преобразователя.

Используя метод векторно-гармонического исследования работы асинхронного двигателя в так называемом квазипериодическом режиме [2], каждую гармоническую составляющую напряжений и токов представляем вектором с соответствующей амплитудой и частотой вращения. При прямоугольном напряжении управления и соединении нагрузки в звезду без нулевого провода обобщенный вектор U_2 получаем в виде ступенчатой кривой, формула разложения в ряд Фурье которой имеет следующий вид:

$$U_{2np} = \frac{4}{\pi} U_{2m} r \left[\sin \omega_2 t + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{6n \pm 1} \sin((6n \pm 1)\omega t) \right], \quad (1)$$

где r – степень регулирования величины напряжения; U_{2m} – амплитуда анодного напряжения.

Проекция обобщенного вектора напряжения ротора на оси d, q находим, используя правила преобразования координат:

$$U_{2dnp} = U_{2a}; U_{2dnp} = \frac{1}{\sqrt{3}}(U_{2a} - U_{2c}). \quad (2)$$

В результате получаем:

$$U_{2dnp} = \frac{4}{\pi} U_{2m} r (\sin \omega_2 t + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{6n \pm 1} \sin((6n \pm 1)\omega_2 t));$$

$$U_{2qnp} = -\frac{4}{\pi} U_{2m} r (\sin \omega_2 t \pm \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{6n \pm 1} \sin((6n \pm 1)\omega_2 t)).$$

Так как уравнения МДП записаны в синхронных осях, представим U_2 в осях x, y :

$$\left. \begin{aligned} U_{2x} &= U_{2d} \cos \omega_2 t + U_{2q} \sin \omega_2 t; \\ U_{2y} &= -U_{2d} \sin \omega_2 t + U_{2q} \cos \omega_2 t. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

В результате получаем проекции вектора на синхронные оси

$$\left. \begin{aligned} U_{2x} &= \frac{4}{\pi} U_{2m} r \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{6n \pm 1} \sin 6n\omega_2 t; \\ U_{2y} &= -\frac{4}{\pi} U_{2m} r \left(1 \pm \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{6n \pm 1} \cos 6n\omega_2 t \right). \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

При синусоидальном напряжении управления и $m_1 = \infty$ на ротор АД подается напряжение, в синхронных осях определяемое как

$$U_{2x} = U_{2m} \sin \omega_2 t; U_{2y} = U_{2m} \cos \omega_2 t.$$

Величина ν -ой гармонической составляющей напряжения ротора при прямоугольном сигнале управления равна по составляющим:

$$U_{2\nu x} = \frac{4}{\pi} U_{2m} r \frac{1}{\nu} \sin(\nu \mp 1)\omega_2 t,$$

$$U_{2\nu y} = \mp \frac{4}{\pi} U_{2m} r \frac{1}{\nu} \cos(\nu \mp 1)\omega_2 t,$$

где $\nu = 6n \pm 1$; (+) – для гармоник прямой последовательности; (-) – для гармоник обратной последовательности.

Абсолютное значение вектора ν -ой гармонической:

$$U_{2\nu T} = \frac{4}{\pi} U_{2m} r \frac{1}{\nu}.$$

Решая основные дифференциальные уравнения обобщенной электрической машины относительно ν -тых гармонических токов при пренебрежении активным сопротивлением статора и подставляя в полученные решения значения

$U_{2x\nu}$ и $U_{2y\nu}$, получим формулы для проекций на синхронные оси высших гармонических токов АД при питании несинусоидальным напряжением со стороны ротора:

$$\left. \begin{aligned} i_{x1\nu\Sigma} &= -k_S \sum_{n=1}^{\infty} \frac{A_n}{r_2^2 + \omega_{2\nu}^2 L_r^2 \sigma^2} [r_2 \sin(6n\omega_2 t) \mp \omega_{2\nu} L_r \sigma \cos(6n\omega_2 t)]; \\ i_{y1\nu\Sigma} &= k_S \sum_{n=1}^{\infty} \frac{A_n}{r_2^2 + \omega_{2\nu}^2 L_r^2 \sigma^2} [\omega_{2\nu} L_r \sigma \sin(6n\omega_2 t) \mp r_2 \cos(6n\omega_2 t)]; \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

$$i_{x2\nu\Sigma} = -\frac{1}{k_S} i_{x1\nu\Sigma}; \quad i_{y2\nu\Sigma} = -\frac{1}{k_S} i_{y1\nu\Sigma},$$

где $A_n = \frac{4}{\pi(6n \pm 1)} U_{2m} r$ – для прямоугольной формы напряжения управления.

Для определения мгновенных значений токов МДП в реальных координатах статора и ротора необходимо провести преобразования, обратные (3):

$$\left. \begin{aligned} \left| \begin{aligned} i_{1\alpha v} \\ i_{1\beta v} \end{aligned} \right| &= \left| \begin{aligned} \cos(\omega_1 t) & -\sin(\omega_1 t) \\ \sin(\omega_1 t) & \cos(\omega_1 t) \end{aligned} \right| \left| \begin{aligned} i_{1xv} \\ i_{1yv} \end{aligned} \right| \\ \left| \begin{aligned} i_{2dv} \\ i_{2qv} \end{aligned} \right| &= \left| \begin{aligned} \cos(\omega_2 t) & -\sin(\omega_2 t) \\ \sin(\omega_2 t) & \cos(\omega_2 t) \end{aligned} \right| \left| \begin{aligned} i_{2xv} \\ i_{2yv} \end{aligned} \right| \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

На рис. 1, 2 показаны кривые мгновенных значений токов при прямоугольной форме напряжения управления (для двигателя 200 кВт).

Меньшие, чем при частотном управлении, искажения токов АД объясняются тем, что преобразованию подвергается лишь часть мощности двигателя $P_s = P_r S$.

Так как величина P_s изменяется в процессе регулирования подачи и напора на выходе центробежного насоса (ЦН), а также зависит от закона управления реактивной мощности МДП, определить влияние способа модуляции выходного напряжения ТПЧ и режима работы МДП на степень искажения токов АД можно при помощи интегральной характеристики – коэффициента искажения тока, который равен отношению действующих значений первой гармонической к полному току статора при несинусоидальном питании:

$$k_{u1} = I_{1(1)} / I_1. \quad (6)$$

Аналогично для тока ротора:

$$\left. \begin{aligned} I_2 &= \sqrt{I_{2(1)}^2 + \sum_{\nu \neq 1}^{\infty} \frac{I_{2\nu}^2}{2}}; \\ k_{u2} &= I_{2(1)} / I_2. \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

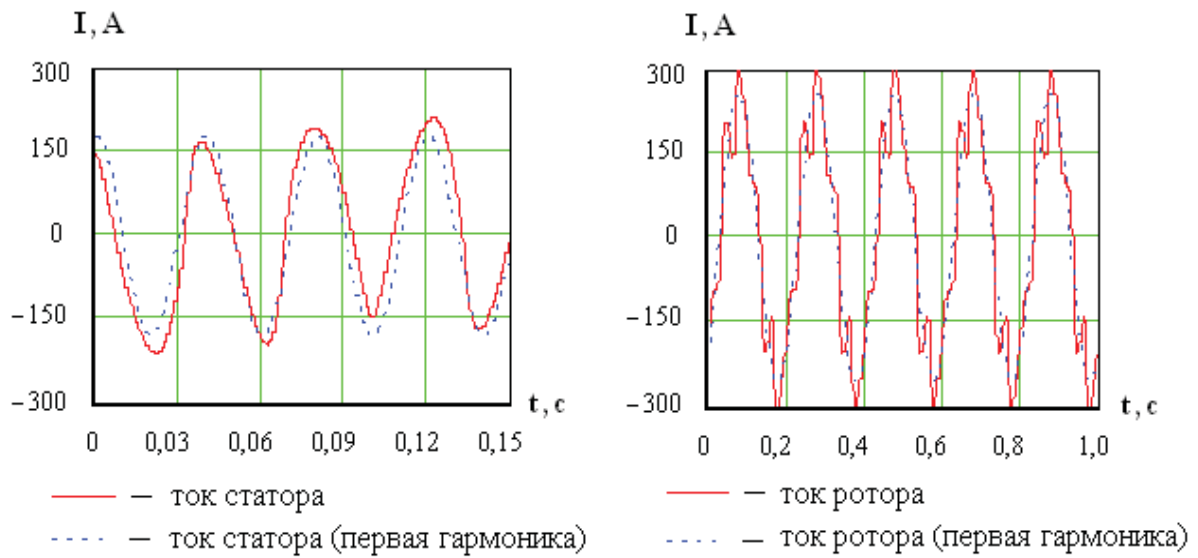


Рис. 1. Токи двигателя МДП при $s = 0,2$.

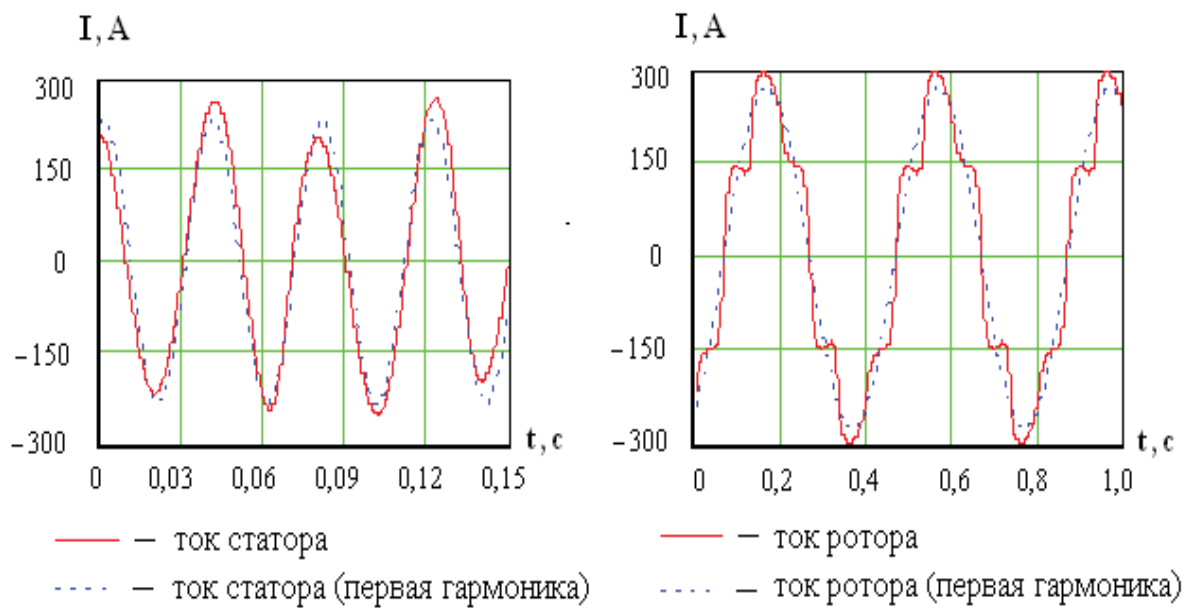


Рис. 2. Токи двигателя МДП при $s = 0,1$.

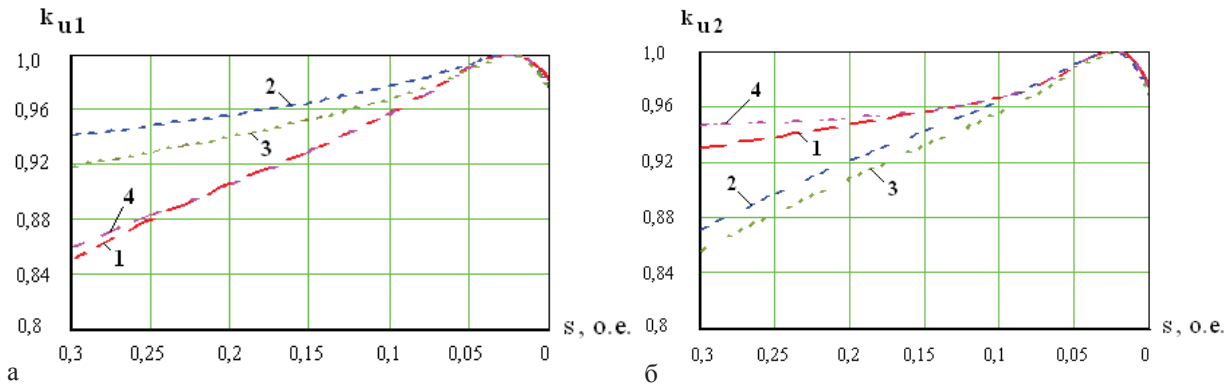


Рис. 3. Коэффициенты искажения тока статора (а) и тока ротора (б) в различных режимах работы МДП: 1 – $Q_1 = 0$; 2 – $Q_2 = 0$; 3 – $\Delta P - \min$; 4 – $I_2 = I_{2н}$.

Модуль вектора суммы высших гармонических токов равен:

– для статора

$$I_{lv\Sigma} = k_S \sum_{n=1}^{\infty} \frac{A_n}{\sqrt{r_2^2 + \omega_{2v}^2 L_r^2 \sigma^2}}; \quad (8)$$

– для ротора

$$I_{2v\Sigma} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{A_n}{\sqrt{r_2^2 + \omega_{2v}^2 L_r^2 \sigma^2}}. \quad (9)$$

Соответственно, коэффициенты искажения токов статора и ротора:

$$\left. \begin{aligned} k_{u1AD} &= \frac{I_{1(1)}}{\sqrt{I_{1(1)}^2 + \frac{1}{2} \left(k_S \sum_{n=1}^{\infty} \frac{A_n}{\sqrt{r_2^2 + \omega_{2v}^2 L_r^2 \sigma^2}} \right)^2}}; \\ k_{u2AD} &= \frac{I_{2(1)}}{\sqrt{I_{2(1)}^2 + \frac{1}{2} \left(\sum_{n=1}^{\infty} \frac{A_n}{\sqrt{r_2^2 + \omega_{2v}^2 L_r^2 \sigma^2}} \right)^2}}. \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

Результаты расчетов k_u для различных режимов работы МДП и форм управляющего напряжения приведены на рис. 3 (Q_1 и Q_2 – реактивные мощности, потребляемые со стороны статора и ротора; ΔP – потери мощности в меди двигате-

ля). Во всем диапазоне регулирования скорости ЦН при прямоугольной модуляции k_{u1AD} достаточно высок (0,98÷0,99 для двигателя 200 кВт), однако в области номинальной и синхронной скоростей имеет наибольшее и наименьшее значения. Коэффициенты искажения токов повышаются с увеличением ω от $\omega = 0,5$ до $\omega = \omega_n$ и при $\omega = \omega_n$ кривая имеет максимум. Это объясняется наименьшим значением напряжения, подаваемого на ротор АД для обеспечения такой скорости. Минимум же функция имеет при $\omega = \omega_0$, когда индуктивное сопротивление высшим гармоникам токов равно нулю.

Наиболее высокое значение k_{uAD} обеспечивается при управлении МДП по минимуму мощности роторной цепи, однако в целом закон управления реактивной мощностью незначительно влияет на степень искажения токов АД.

Литература

1. Сандлер А.С., Гусяцкий Ю.М. Тиристорные инверторы с широтно-импульсной модуляцией для управления асинхронными двигателями. М.: Энергия, 1969. 96 с.
2. Титов В.Г., Хватов С.В. Асинхронный вентильный каскад с повышенными энергетическими показателями: Учеб. пособие. Горький: ГТУ, 1978. 83 с.