

## ПОТЕРИ В ЧАСТОТНО-УПРАВЛЯЕМОМ АСИНХРОННОМ ДВИГАТЕЛЕ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ЗАКОНАХ РЕГУЛИРОВАНИЯ И ТИПАХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ЧАСТОТЫ

*Стаття присвячена розгляду та аналізу специфіки розрахунків втрат у частотно-керованому асинхронному двигуні при різних законах регулювання (закон пропорційного регулювання, закон квадратичного регулювання, закон регулювання при постійній корисній потужності).*

*В статье рассмотрена и проанализирована специфика расчета потерь в частотно-управляемом асинхронном двигателе при различных законах регулирования (закон пропорционального регулирования, закон квадратичного регулирования, закон регулирования при постоянной мощности).*

### 1. ЗАКОНЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ ЧАСТОТНО-УПРАВЛЯЕМЫХ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Одним из способов повышения эффективности работы асинхронных двигателей, работающих при переменных нагрузках, может быть замена применяемых в настоящее время нерегулируемых асинхронных двигателей на частотно-управляемые.

В основу анализа рабочих свойств частотно-управляемых асинхронных двигателей положен универсальный закон частотного управления. При работе двигателя с постоянными коэффициентом полезного действия, коэффициентом мощности и перегрузочной способностью, необходимо, одновременно с изменением частоты питающего напряжения, регулировать напряжение в зависимости от частоты и момента двигателя по закону [1]

$$\frac{U_1}{U_{1н}} = \frac{f_1}{f_{1н}} \cdot \sqrt{\frac{M_1}{M_n}}, \quad (1)$$

где  $U_1$ ,  $M_1$  - напряжение и момент двигателя при переменной частоте  $f_1$ ;  $U_{1н}$ ,  $M_n$  - напряжение и момент при частоте  $f_{1н}$ , что соответствует номинальному режиму работы.

Рассмотрим некоторые соотношения, характерные для частотно-управляемых двигателей: относительная частота (коэффициент регулирования)

$$\alpha = \frac{f_1}{f_{1н}}, \quad (2)$$

абсолютное скольжение

$$\beta = \frac{f_2}{f_{1н}}, \quad (3)$$

где  $f_2$  - абсолютная частота тока ротора;

относительное скольжение

$$s = \frac{f_2}{f} \cdot \frac{f_2 \cdot f_{1н}}{f_1 \cdot f_{1н}} = \frac{\beta}{\alpha}, \quad (4)$$

относительное напряжение

$$\gamma = \frac{U_1}{U_{1н}}. \quad (5)$$

В общем случае при частотном управлении двигателем напряжение на зажимах статора может регулироваться как в функции относительной частоты  $\alpha$ , так и в функции момента нагрузки. При этом прини-

мается, что абсолютное скольжение  $\beta$  определяется нагрузкой на валу, а относительное напряжение  $\gamma$  есть функция  $\alpha$  и  $\beta$ .

В частном случае, когда  $\gamma$  не зависит от  $\beta$  (что характерно для наиболее распространенных разомкнутых систем частотного управления), величина  $\gamma$  или характер ее зависимости от  $\alpha$  не оказывают влияния на величину критического скольжения  $\beta_{кр}$  [1].

Обычно на практике используют частные законы регулирования в зависимости от назначения и режимов работы асинхронного привода. Рассмотрим основные законы регулирования.

**Закон пропорционального регулирования** (регулирование при постоянстве перегрузочной способности двигателя или регулирование при постоянном моменте) [1].

$$\frac{U_1}{U_{1н}} = \frac{f_1}{f_{1н}}, \quad (6)$$

или в относительных единицах

$$\gamma = \alpha, \quad (7)$$

при этом  $U_1 = U_{1н} \cdot \gamma = U_{1н} \cdot \alpha$ .

Закон используется при регулировании вниз от номинальной частоты вращения.

#### **Закон квадратичного регулирования**

Этот закон может быть получен из общего закона (1) с учетом  $M_1 \equiv f_1^2$ . Тогда

$$\frac{U_1}{U_{1н}} = \frac{f_1^2}{f_{1н}^2}, \quad (8)$$

или в относительных единицах

$$\gamma = \alpha^2, \quad (9)$$

при этом  $U_1 = U_{1н} \cdot \gamma = U_{1н} \cdot \alpha^2$ .

Закон используется при регулировании вниз от номинальной частоты вращения.

**Закон регулирования при постоянной полезной мощности.**

Этот закон может быть получен из общего закона (1) с учетом  $\frac{M_1}{M_n} = \frac{f_{1н}}{f_1}$ . Тогда

$$\frac{U_1}{U_{1н}} = \sqrt{\frac{f_1}{f_{1н}}}, \quad (10)$$

или в относительных единицах

$$\gamma = \sqrt{\alpha}, \quad (11)$$

при этом  $U_1 = U_{1н} \cdot \gamma = U_{1н} \cdot \sqrt{\alpha}$ , где  $\alpha > 1$ .

Закон используется при регулировании вверх от номинальной частоты вращения. Возможна реализация закона  $P_2 = \text{const}$  при ограничении напряжения, т.е.  $U_1 = \text{const}$ .

Выпускаемые частотно-управляемые асинхронные двигатели имеют различные диапазоны регулирования. Например, полный диапазон регулирования 1:22,5, что соответствует частотам  $f_1 = 5 \dots 90$  Гц, при этом диапазон регулирования вниз от номинальной частоты вращения 15:1 при  $f_1 = 60 \dots 5$  Гц, вверх от номинальной частоты вращения 1:1,5 при  $f_1 = 60 \dots 90$  Гц. При регулировании вниз от номинальной частоты используется закон регулирования при постоянном моменте, при регулировании вверх – закон регулирования при постоянной полезной мощности по выражению (10), либо также регулирование при постоянной полезной мощности и  $U_1 = \text{const}$ .

В последнем случае магнитный поток будет уменьшаться с ростом частоты  $f_1$  [2].

Проведенные исследования [2] показали, что при использовании двигателей общего назначения в качестве частотно-регулируемых, их мощность уменьшается на 20...15% в зависимости от величины синхронной частоты вращения. Причиной этого является несинусоидальность питающего напряжения, приводящая к возникновению дополнительных потерь, что увеличивает нагрев двигателей, а также ухудшение условий охлаждения при регулировании вниз от номинальной частоты вращения и самовентиляции двигателей.

В связи с этим, исследование тепловых режимов частотно-управляемых двигателей является весьма актуальным.

## 2. ОСНОВНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И МАГНИТНЫЕ ПОТЕРИ В ДВИГАТЕЛЯХ

Расчет греющих потерь при различных законах регулирования, в первом приближении, проведем, предполагая синусоидальную форму напряжений и токов, наличие дополнительных потерь, возникающих при питании асинхронного двигателя от инвертора напряжений, учтем в дальнейшем.

Основные составляющие греющих потерь:

$P_{эл1}, P_{эл2}$  - электрические потери в обмотках статора и ротора;

$P_{маг}$  - магнитные потери в сердечнике статора;

$P_{мех}$  - механические потери;

$P_{доп}$  - дополнительные потери, связанные со вторичными процессами в двигателе (при синусоидальной форме напряжения и токов, согласно ГОСТ  $P_{доп} = 0,5\%$  от потребляемой мощности).

Магнитные потери  $P_{маг}$  могут быть определены по эмпирической формуле Штейнметца [3]

$$P_{маг} = k \cdot p_{1,0} \cdot \left(\frac{f_1}{50}\right) \cdot B^2 \cdot m. \quad (12)$$

Для рассмотренных законов частотного регулирования получим:

а)  $\gamma = \alpha$ .

Для упрощения анализа ограничимся значениями  $\alpha \geq 0,5$ , при которых не требуется корректировка  $\gamma$  для сохранения постоянства максимального момента, а, следовательно, магнитный поток  $\Phi \approx \text{const}$ .

$$P_{маг\alpha} = P_{магн} \cdot \left(\frac{\alpha \cdot f_{1н}}{f_{1н}}\right)^n = P_{магн} \cdot \alpha^n, \quad (13)$$

где  $P_{магн}$  - магнитные потери при  $U_{1н}$ ,  $f_{1н}$ ;  $n$  - показатель степени, определяемый маркой стали.

б)  $\gamma = \alpha^2$ .

Текущее значение магнитного потока  $\Phi_\alpha$

$$\Phi_\alpha \approx \frac{\alpha^2 \cdot U_1}{4,44 \cdot f_1 \cdot \alpha \cdot W_1 \cdot k_{об1}} = \Phi_n \cdot \alpha, \quad (14)$$

где  $\Phi_n$  - значение магнитного потока при  $U_{1н}$ ,  $f_{1н}$ , при этом  $B^2$  в (12) пропорционально  $\Phi_\alpha^2$ ,

$$P_{маг\alpha} = P_{магн} \cdot \alpha^2 \cdot \alpha^n = P_{магн} \cdot \alpha^{(n+2)}. \quad (15)$$

в)  $\gamma = \sqrt{\alpha}$ .

Текущее значение магнитного потока  $\Phi_\alpha$

$$\Phi_\alpha \approx \frac{\sqrt{\alpha} \cdot U_1}{4,44 \cdot f_1 \cdot \alpha \cdot W_1 \cdot k_{об1}} = \frac{\Phi_n}{\sqrt{\alpha}}, \quad (16)$$

тогда

$$P_{маг\alpha} = P_{магн} \cdot \frac{1}{\alpha} \cdot \alpha^n = P_{магн} \cdot \alpha^{(n-1)}. \quad (17)$$

Механические потери  $P_{мех}$  можно определить по соотношению

$$P_{мех} = P_{мехн} \cdot \alpha, \quad (18)$$

где  $P_{мехн}$  - механические потери при  $f_1 = f_{1н}$ , определяемые по [3];  $k=1 \dots 1,5$  - коэффициент, определяемый габаритами двигателя и конструкцией подшипниковых узлов.

Расчет электрических потерь в обмотках статора и ротора  $P_{эл1}, P_{эл2}$  может быть выполнен с помощью "Г" - образной схемы замещения, представленной на рис. 1.

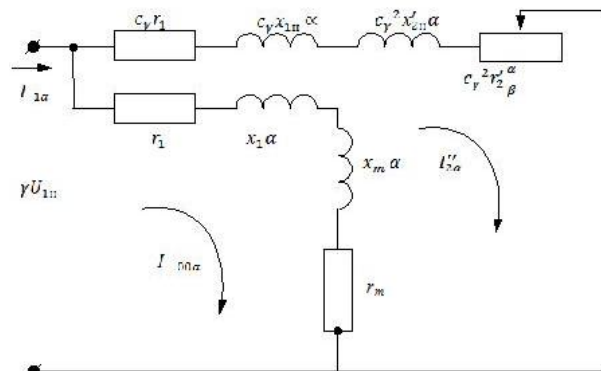


Рис. 1. "Г"-образная схема замещения частотно-управляемого асинхронного двигателя

Принято:

$r_1, r'_2$  - активные сопротивления обмоток статора и ротора (приведенного);

$x_{1H}, x'_{2H}$  - индуктивные сопротивления рассеивания обмоток статора и ротора (приведенного, неподвижного) при  $f_1 = f_{1H}$ ;

$x_m$  - индуктивное сопротивление взаимоиндукции, определяемое по результатам магнитного расчета при  $f_1 = f_{1H}$  в зависимости от текущего значения напряжения  $U_1 = U_{1H} \cdot \gamma$ . В качестве примера на рис. 2 приведена зависимость  $x_m = f(U_1)$  двигателя АИ160S4 (15 кВт, 380/660 В,  $2p = 4$ ).

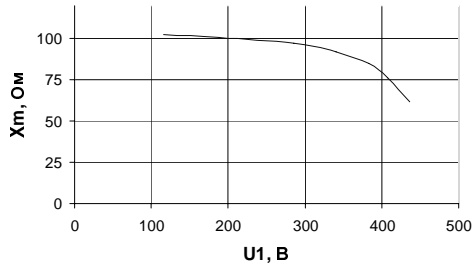


Рис. 2. Зависимость индуктивного сопротивления взаимоиндукции от напряжения  $U_1$  при  $f_1=f_{1ном}$  двигателя АИ160S4

$c_\gamma = 1 + \frac{x_1}{x_m}$  - коэффициент корректировки параметров при переходе от "Т" - образной схемы замещения к "Г" - образной. Значения  $c_\gamma$  уточняются при изменении  $U_1$ , т.к. меняется  $x_m$ .

$r_m$  - фиктивное активное сопротивление, потери в котором при токе  $I_{00\alpha}$  равны магнитным потерям двигателя

$$P_{маг\alpha} = 3 \cdot I_{00\alpha}^2 \cdot r_m \quad (19)$$

Ток идеального холостого хода  $I_{00\alpha}$  из схемы замещения при заданном  $U_1 = U_{1H} \cdot \gamma$  и соответствующем значении  $\alpha$

$$I_{00\alpha} = \frac{U_{1H} \cdot \gamma}{\sqrt{(r_1 + r_m)^2 + \alpha^2 \cdot (x_{1H} + x_m)^2}} \quad (20)$$

Значение  $r_m$  можно определить методом последовательных приближений по известным значениям  $\gamma U_1$ ,  $\alpha x_1$ ,  $\alpha x_m$ ,  $r_1$ , и  $P_{маг\alpha}$ . Задаваясь первым приближением  $r_m$ , например  $r_m$  при  $U_{1H}$ ,  $f_{1H}$ , определим  $I_{00\alpha}$  по (20) и соответствующее значение  $P_{маг\alpha}$  по (19). Сравнивая полученное значение  $P_{маг\alpha}$  с найденным в зависимости от закона регулирования по (13), (15), (17), корректируем  $r_m$  в необходимом направлении и повторяем расчет до достижения заданной точности. Полученное таким образом значение  $r_m$  используем для окончательного расчета  $I_{00\alpha}$  при заданном  $\gamma$  и  $\alpha$ .

Активная составляющая тока холостого хода

$$I_{00\alpha_a} = I_{00\alpha} \cdot \cos\varphi_{00} = \frac{\gamma \cdot U_{1H} \cdot (r_1 + r_m)}{(r_1 + r_m)^2 + \alpha^2 \cdot (x_{1H} + x_m)^2} \quad (21)$$

Реактивная составляющая тока холостого хода

$$I_{00\alpha_p} = I_{00\alpha} \cdot \sin\varphi_{00} = \frac{\gamma \cdot U_{1H} \cdot (x_{1H} + x_m)}{(r_1 + r_m)^2 + \alpha^2 \cdot (x_{1H} + x_m)^2} \quad (22)$$

Ток рабочего контура "Г" - образной схемы замещения, с учетом  $s = \frac{\beta}{\alpha}$

$$I_{2\alpha}'' = \frac{U_{1H} \cdot \gamma}{\sqrt{(c_\gamma \cdot r_1 + c_\gamma^2 \cdot r'_2 \cdot \frac{\alpha}{\beta})^2 + (\alpha \cdot c_\gamma \cdot x_{1H} + \alpha \cdot c_\gamma^2 \cdot x'_{2H})^2}} \quad (23)$$

где  $\gamma = \alpha$ ,  $\gamma = \alpha^2$ ,  $\gamma = \sqrt{\alpha}$  в зависимости от закона регулирования.

Обозначим

$$(c_\gamma \cdot r_1 + c_\gamma^2 \cdot r'_2 \cdot \frac{\alpha}{\beta}) = R_{p.к.};$$

$$(\alpha \cdot c_\gamma \cdot x_{1H} + \alpha \cdot c_\gamma^2 \cdot x'_{2H}) = X_{p.к.}$$

Тогда активная составляющая тока рабочего контура

$$I_{2\alpha_a}'' = \frac{U_{1H} \cdot \gamma \cdot R_{p.к.}}{R_{p.к.}^2 + X_{p.к.}^2} \quad (24a)$$

Реактивная составляющая тока рабочего контура

$$I_{2\alpha_p}'' = \frac{U_{1H} \cdot \gamma \cdot X_{p.к.}}{R_{p.к.}^2 + X_{p.к.}^2} \quad (24б)$$

Активная и реактивная составляющие тока статора  $I_{1\alpha}$

$$I_{1\alpha_a} = I_{00\alpha_a} + I_{2\alpha_a}'';$$

$$I_{1\alpha_p} = I_{00\alpha_p} + I_{2\alpha_p}''.$$

Ток статора

$$I_{1\alpha} = \sqrt{I_{1\alpha_a}^2 + I_{1\alpha_p}^2} \quad (25)$$

Электрические потери в обмотках статора и ротора соответственно

$$P_{эл1} = m_1 \cdot I_{1\alpha}^2 \cdot r_1 \cdot m_{t1}, \quad (26)$$

$$P_{эл2} = m_1 \cdot (I_{2\alpha}'' )^2 \cdot r'_2 \cdot m_{t2}, \quad (27)$$

где  $m_{t1}, m_{t2}$  - коэффициенты, зависящие от температуры нагрева обмоток статора и ротора.

Расчет потерь проводится для значений абсолютного скольжения  $\beta$

$$0 < \beta < \beta_{кр},$$

где  $\beta_{кр}$  при  $r_1 \neq 0$

$$\beta_{кр} = \alpha \cdot s_{кр} = \frac{c_\gamma \cdot r'_2 \cdot \alpha}{\sqrt{r_1^2 + \alpha^2 \cdot (x_{1H} + c_\gamma \cdot x_{2H})^2}}, \quad (28)$$

при уменьшении  $\alpha$ ,  $\beta_{кр}$  тоже уменьшается. При законе регулирования  $\gamma = \sqrt{\alpha}$  и  $\alpha > 1$ , можно пренебречь  $r_1$ , тогда

$$\beta_{кр} = \frac{c_{\gamma} \cdot l_2'}{x_{1н} + c_{\gamma} \cdot x_{2н}} = \text{const.} \quad (29)$$

При законе пропорционального регулирования  $\gamma = \alpha$ , при уменьшении  $\alpha$ , проявляется влияние падения напряжения на активном сопротивлении статора  $r_1$ , в результате магнитный поток уменьшается, а, значит, уменьшается и момент двигателя. Поэтому, при  $\alpha \leq 0.5$  необходимо компенсировать падение напряжения на  $r_1$ . В этом случае

$$\underline{U}_1 = \underline{U}_{1н} \cdot \alpha + I_1 \cdot r_1. \quad (30)$$

При этом магнитный поток не зависит от  $\alpha$  и определяется только величиной нагрузки на валу.

### 3. ДОБАВОЧНЫЕ ПОТЕРИ В ДВИГАТЕЛЯХ ОТ ВЫСШИХ ГАРМОНИК ПИТАЮЩЕГО НАПРЯЖЕНИЯ

В настоящее время, за счет применения широтно-импульсной модуляции (ШИМ) обеспечивается практически синусоидальная форма напряжения, подводимого к двигателю, однако, в эксплуатации находится большое количество электроприводов на базе частотно-управляемых асинхронных двигателей, у которых ШИМ отсутствуют, а, значит, подводимое к двигателю напряжение имеет ступенчатую (несинусоидальную) форму. Следует иметь в виду, что применение ШИМ не снимает проблему добавочных потерь, а увеличение частоты несущей ШИМ приводит к увеличению динамических потерь в силовых ключах и осложнению негативных волновых процессов в системе асинхронный двигатель – преобразователь частоты [5]. По данным [6] при использовании инверторов на базе полностью управляемых IGBT, преобразующих выходное напряжение в последовательность прямоугольных импульсов высокой частоты с крутым фронтом (ШИМ), негативные волновые процессы приводят к выходу из строя изоляции обмотки статора через 2...3 года эксплуатации.

Несинусоидальность напряжения при частотном регулировании асинхронных двигателей приводит к возникновению добавочных потерь в обмотках и магнитопроводе от действия высших гармоник тока и магнитного потока, созданных высшими гармониками питающего напряжения [2, 4].

Число полюсов обмотки статора для высших гармоник тока такое же, как и для основной гармоники. Частота вращения магнитных полей создаваемых высшими гармониками тока  $n_v = n_1 \cdot v$ , где  $v$  – номер гармоники. Величина скольжения

$$s_v = \frac{n_1 \cdot v \pm n_2}{n_1 \cdot v} \approx 1 + \frac{1}{v}.$$

Следовательно, в первом приближении, можно принять, что скольжение для высших гармоник равно единице, т.е. для них ротор неподвижен.

При расчете добавочных потерь в обмотках необходимо учитывать изменение активных и индуктивных сопротивлений обмоток за счет эффекта вытеснения тока [4]. При вспынной обмотке статора влиянием эффекта вытеснения тока можно пренебречь. Если же обмотка статора выполнена из прямо-

угольных проводников, то влияние эффекта вытеснения тока на активное сопротивление обмотки статора должно учитываться, т.к. коэффициент увеличения активного сопротивления статора для высших гармоник  $K_{1rv}$  достигает 1,5...2,0 в зависимости от номера гармоники и конструкции обмотки. Для обмотки ротора учет влияния эффекта вытеснения тока обязателен во всех случаях.

Ограничимся рассмотрением короткозамкнутой обмотки ротора из алюминия А7.

Приведенная высота стержня ротора

$$\xi_{v2} = 0,0118 \cdot \frac{q_{ст}}{b_{ст}} \cdot \sqrt{6 \cdot k \cdot f_{ном}}, \quad (31)$$

где  $q_{ст}$ ,  $b_{ст}$  – сечение и средняя ширина стержня соответственно (здесь и в дальнейшем размеры в мм);  $k$  – принимает значения 1; 2; 3 (из выражения для номеров высших гармоник  $v=6k \pm 1$ )

Если  $\xi_{v2} > 2$ , то коэффициент увеличения активного сопротивления ротора

$$K_{2rv} = 1 + (\xi_{v2} - 1) \cdot \frac{l_2}{l_{w2}}, \quad (32)$$

где  $l_2$  – длина стержня ротора;  $l_{w2} = l_2 + 2b_{kk}$ ;  $b_{kk}$  – ширина короткозамкнутого кольца обмотки ротора.

В качестве примера  $K_{2rv}$  значения были рассчитаны для асинхронного двигателя АИ160S4 (15 кВт, 380/660 В,  $2p=4$ )

$k=1; v=5;7$	$K_{2rv} = 5,833$
$k=2; v=11;13$	$K_{2rv} = 8,165$
$k=3; v=17;19$	$K_{2rv} = 9,953$

Если  $\xi_{v2} < 2$ , то коэффициент уменьшения индуктивного сопротивления рассеяния ротора

$$K_{2xv} = 1 + \left( \frac{1,5}{\xi_{v2}} - 1 \right) \cdot \frac{l_2}{l_{w2}}. \quad (33)$$

Для двигателя АИ160S4:

$k=1; v=5;7$	$K_{2xv} = 0,374$
$k=2; v=11;13$	$K_{2xv} = 0,325$
$k=3; v=17;19$	$K_{2xv} = 0,303$

При расчете высших гармоник тока намагничивающим контуром в схеме замещения можно пренебречь в связи с малостью амплитуд высших гармоник напряжения и повышенной частотой. Кроме того, для высших гармоник тока индуктивные сопротивления значительно больше активных. Поэтому можно принять

$$I_{1v} = I_{2v}'' = \frac{U_{1н} \cdot \gamma}{V^2 \cdot (x_{1н} \cdot \alpha + x_{2н}' \cdot \alpha \cdot K_{2xv})}, \quad (34)$$

где  $U_{1н} \cdot \gamma$  – действующее значение первой гармоники напряжения.

Электрические потери в обмотках статора и ротора от всех высших гармоник тока

$$P_{\Sigma 1v} = \sum_{v=6k \pm 1}^{v=19} (m_1 \cdot I_{1v}^2 \cdot r_1 \cdot m_{t1}), \quad (35)$$

$$P_{\Sigma 2v} = \sum_{v=6k \pm 1}^{v=19} (m_1 \cdot (I_{2v}'')^2 \cdot r_2' \cdot K_{2rv} \cdot m_{t2}), \quad (36)$$

где  $K=1; 2; 3$ .

Практикой установлено [4], что необходим учет гармоник с  $v$  не более 19.

Наиболее существенное влияние оказывала бы третья гармоника, но при соединении обмотки статора в звезду, третья и кратные трем гармоники отсутствуют. Поэтому для частотно-управляемых асинхронных двигателей соединение обмотки статора в звезду обязательно.

Для двигателей АИ160S4:  $p_{эл1v}=12\%p_{эл1}$  из (26);  $p_{эл2v}=70\%p_{эл2}$  из (27).

Высшие гармоники напряжения создают магнитные поля, обуславливающие добавочные потери в магнитопроводе. Поскольку скольжение ротора по отношению к этим полям будет близко к единице, магнитные потери будут иметь место и в роторе. По аналогии с основными магнитными потерями при частотном регулировании можно принять

$$P_{\text{маг}_v} = P_{\text{маг}_\alpha} \cdot \left(\frac{B_v}{B_1}\right)^2 \cdot \left(\frac{f_v}{\alpha \cdot f_{1H}}\right) \cdot \frac{m_c + m_p}{m_c}, \quad (37)$$

где  $P_{\text{маг}_\alpha}$  – основные магнитные потери;  $B_v$ ,  $B_1$  – индукция от потока высшей гармоники и от потока основной гармоники;  $f_v$ ,  $\alpha \cdot f_{1H}$  – частота напряжения высшей гармоники и основной гармоники;  $m_c$ ,  $m_p$  – массы стали статора и ротора.

В первом приближении [2]

$$B_v = \frac{U_v}{f_v} = \frac{U_1}{f_1} \cdot \frac{1}{v^2} = B_1 \cdot \frac{1}{v^2}. \quad (38)$$

Суммируя потери от всех гармоник, получим

$$P_{\text{маг}_v} = P_{\text{маг}_\alpha} \cdot \frac{m_c + m_p}{m_c} \cdot \sum_{v=6k \pm 1}^{\infty} v^{-(4-n)}. \quad (39)$$

С увеличением номера гармоники добавочные магнитные потери резко убывают. Для двигателя АИР16S4:  $p_{\text{маг}_v}=6,7\%$  от  $p_{\text{маг}_n}$  из (13).

Данные расчета добавочных потерь от высших гармоник тока и магнитного потока показывают, что эти потери оказывают существенное влияние на тепловое состояние частотно-управляемого асинхронного двигателя.

#### 4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО МОМЕНТА ОТ АБСОЛЮТНОГО СКОЛЬЖЕНИЯ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ЗАКОНАХ РЕГУЛИРОВАНИЯ

Величины греющих потерь частотно-управляемого асинхронного двигателя при различных законах регулирования определяются величиной высшего момента на валу, частотой питающего напряжения, т.е.  $\alpha$  и величиной питающего напряжения  $U_1$ , т.е.  $\gamma$ .

В связи с этим, при расчете греющих потерь в каждой точке диапазонов регулирования частоты вращения и нагрузки на валу необходимо иметь зависимости электромагнитного момента от абсолютного скольжения  $\beta$ .

В качестве базового используем выражение для электромагнитного момента в номинальном режиме:

$$M_{\text{эм}} = \frac{m_1 \cdot P_2 \cdot U_{1H}^2 \cdot c_\gamma \cdot \frac{r_2'}{s}}{2\pi f_{1H} \left[ \left( c_\gamma \cdot r_1 + c_\gamma^2 \cdot \frac{r_2'}{s} \right)^2 + \left( c_\gamma \cdot x_1 + c_\gamma^2 \cdot x_2' \right)^2 \right]} \quad (40)$$

с учетом  $s = \frac{\beta}{\alpha}$ ;  $U_1 = U_{1H} \cdot \gamma$ ;  $f_1 = f_{1H} \cdot \alpha$  получим:

$$M_{\text{эм}} = \frac{m_1 \cdot P_2 \cdot (U_{1H} \cdot \gamma)^2 \cdot c_\gamma \cdot r_2'}{2\pi f_{1H} \cdot \beta \left[ \left( c_\gamma \cdot r_1 + c_\gamma^2 \cdot r_2' \cdot \frac{\alpha}{\beta} \right)^2 + \alpha^2 \left( c_\gamma \cdot x_1 + c_\gamma^2 \cdot x_2' \right)^2 \right]}. \quad (41)$$

Используя (41) можно получить зависимости  $M_{\text{эм}}=f(\beta)$ , где  $\beta=0 \dots \beta_{\text{пуск}}$  при различных значениях  $\alpha$  и различных законах регулирования:  $\gamma = \alpha$ ;  $\gamma = \alpha^2$ ;  $\gamma = \sqrt{\alpha}$  и  $P_2 = \text{const}$  при  $U_1 = \text{const}$ . При пуске двигателя, когда относительное скольжение  $s = 1$ , абсолютное скольжение  $\beta_{\text{пуск}} = \alpha$ .

Одновременно с расчетом  $M_{\text{эм}}=f(\beta)$ , используя (23) и (25) получим зависимости  $I_{2\alpha}'' = f(\beta)$  и  $I_{1\alpha} = f(\beta)$  для расчета электрических потерь в обмотках ротора и статора.

Таким образом, получены расчетные выражения для определения всех составляющих греющих потерь асинхронного двигателя при частотном регулировании, что позволит исследовать тепловое состояние двигателя в различных режимах работы.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Петрушин В.С. Асинхронные двигатели в регулируемом электроприводе. Учебное пособие. – Одесса: Наука и техника, 2006. – 320 с.
2. Радин В.И., Брускин А.Э., Зорохович А.Е. Электрические машины. Асинхронные машины. Москва "Высшая школа" 1988. – 324 с.
3. Гольдберг О.Д., Гурин Я.С., Свириденко И.С. Проектирование электрических машин. Москва "Высшая школа" 1984. – 431 с.
4. Курбасов А.С., Седов В.И., Сорин Л.Н. Проектирование тяговых электродвигателей. Москва "Транспорт" 1987. – 535 с.
5. Зайцев А.М., Захаров А.В., Кобелев А.С. Новая серия частотно-регулируемых асинхронных двигателей общего применения разработки ОАО "НИПТИЭМ". "Электротехника" №9, 2008 г. – С. 2-10.
6. Вербовой П.Ф., Заболотный А.П., Сьянов А.М. "Асинхронные двигатели для тиристорного электропривода". – К: "Наукова думка", 1994 г., 243 с.

Поступила 25.11.2008

Осташевский Николай Александрович., к.т.н., проф.,

Иваненко Виталий Никитович, к.т.н., проф.,

Петренко Александр Николаевич

Национальный технический университет

"Харьковский политехнический институт"

Украина, 61002, Харьков, ул. Фрунзе, 21, НТУ "ХПИ",

кафедра "Электрические машины"

тел. (0572) 707-65-14; сайт: <http://users.kpi.kharkov.ua/kem/>