

## АНАЛИЗ ПРОЦЕССОВ ИЗМЕНЕНИЯ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ ПРИ РЕГУЛИРОВАНИИ ЧАСТОТЫ

Е. В. КОНОНЕНКО, Ю. Г. МЕЩЕРЯКОВ

(Представлена научным семинаром кафедр электрических машин  
и общей электротехники)

Раскрытие сущности процессов изменения реактивной мощности асинхронной машины при регулировании частоты необходимо для выработки правильного решения в вопросах выбора экономичного режима работы и соответствующих законов частотного управления. Применяемые в настоящее время законы управления не предусматривают получения наилучшей величины коэффициента мощности при условии сохранения высокого к. п. д. в широком диапазоне регулирования, в связи с чем не может быть достигнута и высокая экономичность двигателя. Для улучшения использования двигателя необходимо иметь достаточно полное представление об особенностях распределения реактивной энергии в нем при изменении режима работы. Подобные вопросы не нашли заметного отражения в теории частотного регулирования.

В настоящей работе ставится задача исследования характера изменения реактивной мощности в рабочем диапазоне регулирования, и определяются условия работы двигателя с минимальным запасом реактивной мощности.

Характер изменения реактивной мощности удобно раскрыть путем исследования зависимости реактивной мощности от абсолютного скольжения. Принятие скольжения в качестве независимой переменной облегчает аналитическое решение задачи, сохраняет физический смысл процессов. Скольжение, в сущности, является экономическим показателем рабочего режима двигателя, определяющим значения к. п. д. и коэффициента мощности. Кроме того, скольжение является регулируемым параметром. Системы частотного управления, построенные по принципу регулирования скольжения, получают широкое распространение на практике. Поэтому использование скольжения в качестве независимой переменной не только облегчает исследование процессов в двигателе, но и имеет прямой практический смысл.

Исследование проводится при допущении, что двигатель питается синусоидальным, симметричным трехфазным напряжением, имеет линейную магнитную цепь. Для анализа используется «Т»-образная схема замещения с постоянными параметрами. Параметры двигателя выражаются в относительных единицах. В качестве базовых величин приняты номинальные значения напряжения на зажимах статора  $U_{1H}$ , тока статора  $I_{1H}$ , синхронной скорости вращения магнитного поля  $\omega_{1H} = \frac{2\pi f_{1H}}{p}$ ; а также базовое сопротивление  $z_0 = \frac{U_{1H}}{I_{1H}}$ ; базовая мощ-



ность  $P_6 = m_1 I_{1H} U_{1H}$ ; базовый момент  $M_6 = \frac{m_1 I_{1H} U_{1H}}{\omega_{1H}}$ ; базовый магнитный поток  $\Phi_6 = \frac{2\pi U_{1H}}{c_e \omega_{1H} p}$  ( $p$  — число пар полюсов;  $m_1$  — число фаз;  $c_e$  — постоянная, включающая число витков и обмоточный коэффициент).

Параметры двигателя в относительных единицах:  $u = \frac{U_1}{U_{1H}}$  — напряжение на зажимах статора;  $i_1 = \frac{I_1}{I_{1H}}$  — ток статора;  $i_2' = \frac{I_2'}{I_{1H}}$  — ток ротора;  $i_0 = \frac{I_0}{I_{1H}}$  — намагничивающий ток;  $\alpha = \frac{\omega_1}{\omega_{1H}} = \frac{f_1}{f_{1H}}$  — частота тока статора;  $\beta = \frac{\omega_1 - \omega_2}{\omega_{1H}}$  — абсолютное скольжение;  $\omega = \frac{\omega_2}{\omega_{1H}}$  — скорость вращения ротора;  $\mu = \frac{M}{M_6}$  — момент на валу;  $\varphi = \frac{\Phi}{\Phi_6}$  — магнитный поток в воздушном зазоре,  $q = \frac{Q}{P_6}$  — реактивная мощность;  $r_1, x_1, r_2', x_2', r_0, x_0$  — параметры схемы замещения, отнесенные к  $Z_6$ .

В качестве независимых переменных приняты абсолютное скольжение, скорость вращения ротора и момент на валу. Параметры двигателя выражаются через независимые переменные следующим образом.

Действующее значение тока ротора:

$$i_2' = \sqrt{\frac{\mu \beta}{r_2'}}. \quad (1)$$

Комплекс тока статора определяется через ток ротора и параметры двух параллельных ветвей схемы замещения  $\dot{z}_0 = r_0 + jx_0$  и  $\dot{z}_2' = \frac{r_2'}{\beta} + jx_2'$ :

$$\bar{i}_1 = \bar{i}_2' \frac{\dot{z}_2' + \dot{z}_0}{z_0}; \quad (2)$$

$$\left| \frac{\dot{z}_2' + \dot{z}_0}{z_0} \right| = \sqrt{\frac{\left( r_0 + \frac{r_2'}{\beta} \right)^2 + (x_0 + x_2')^2}{r_0^2 + x_0^2}}, \quad (3)$$

Действующее значение тока статора после подстановки (1) и (3) в (2)

$$i_1 = \sqrt{\frac{\mu \beta}{r_2' z_0^2} \left[ \left( r_0 + \frac{r_2'}{\beta} \right)^2 + x_{02}^2 \right]}, \quad (4)$$

где

$$z_0^2 = r_0^2 + x_0^2; \quad x_{02} = x_0 + x_2'.$$

Величина э. д. с. в обмотке статора

$$e_1 = i_2' z_2' \alpha = \alpha \sqrt{\frac{\mu \beta}{r_2'} \left[ \left( \frac{r_2'}{\beta} \right)^2 + x_2'^2 \right]}. \quad (5)$$



Намагничивающий ток

$$i_0 = \frac{e_1}{z_0 \alpha} = \sqrt{\frac{\mu \beta}{r_2' z_0^2} \left[ \left( \frac{r_2'}{\beta} \right)^2 + x_2'^2 \right]}. \quad (6)$$

Магнитный поток в воздушном зазоре

$$\varphi = \frac{e_1}{\alpha} = \sqrt{\frac{\mu \beta}{r_2'} \left[ \left( \frac{r_2'}{\beta} \right)^2 + x_2'^2 \right]}. \quad (7)$$

Частота тока статора  $\alpha = \omega + \beta$ . (8)

Реактивная мощность, потребляемая двигателем из сети, может быть представлена в виде суммы мощностей магнитного поля в воздушном зазоре  $q_0 = x_0 \alpha i_0^2$  и полей рассеяния статора  $q_1 = x_1 \alpha i_1^2$  и ротора  $q_2 = x_2' \alpha i_2'^2$ :

$$q = \alpha (x_0 i_0^2 + x_1 i_1^2 + x_2' i_2'^2). \quad (9)$$

После замены токов и частоты в (9) их выражениями (1), (4), (6), (8) функция реактивной мощности получает вид, удобный для исследования:

$$q = \mu (\omega + \beta) \left( c_1 \beta + c_2 \frac{1}{\beta} + c_3 \right). \quad (10)$$

Величины  $c_1 \div c_3$  зависят только от активных и индуктивных сопротивлений двигателя и являются постоянными членами:

$$c_1 = \frac{x_2'}{r_2'} \left[ 1 + \frac{x_0 x_2'}{z_0^2} + \frac{x_1 (r_0^2 + x_{02}^2)}{z_0^2 x_2'} \right];$$

$$c_2 = \frac{r_2' (x_0 + x_1)}{z_0^2}; \quad c_3 = \frac{2x_1 r_0}{z_0^2}.$$

Функция реактивной мощности от скольжения (10) исследуется на экстремум. Из условия  $\frac{\partial q}{\partial \beta} = 0$  находится минимум функции. Ему соответствует уравнение третьей степени относительно  $\beta$ :

$$2\beta^3 + \omega \beta^2 - \frac{c_2}{c_1} \omega = 0. \quad (11)$$

В результате решения уравнения (11) находится закон регулирования скольжения, обеспечивающий работу двигателя с наименьшим запасом реактивной энергии. В зависимости от величины скорости вращения получаются две расчетные формулы. В области высоких значений, примерно при  $\omega > 0,3$ , скольжение рассчитывается по формуле:

$$\beta_q = \frac{\omega}{6} \left\{ 2 \cos \left[ \frac{\pi}{3} - \frac{1}{3} \arccos \left( 1 - \frac{108 c_2}{c_1 \omega^2} \right) \right] - 1 \right\}. \quad (12)$$

В диапазоне малых скоростей вращения применяется формула:

$$\beta_q = \sqrt[3]{-\sigma_{1\omega} + \sigma_{2\omega}} + \sqrt[3]{-\sigma_{1\omega} - \sigma_{2\omega}} - \frac{\omega}{6}. \quad (13)$$

где

$$\sigma_{1\omega} = \left( \frac{\omega}{6} \right)^3 - \frac{c_2 \omega}{2c_1};$$

$$\sigma_{2\omega} = \sqrt{\sigma_{1\omega}^2 + \left( \frac{\omega}{6} \right)^6}.$$



Таким образом, для обеспечения работы двигателя с наименьшим запасом реактивной энергии необходимо регулировать скольжение в зависимости от скорости вращения. Характер изменения момента нагрузки не влияет на оптимальный (в смысле минимума реактивной мощности) закон регулирования скольжения (12), (13) при принятых здесь допущениях.

Смысл зависимости оптимального скольжения от скорости можно объяснить влиянием оптимального значения скольжения на величину частоты тока статора, которая устанавливается в зависимости от требуемой скорости вращения и величины оптимального скольжения. При работе двигателя на высокой скорости влияние скольжения на величину частоты относительно невелико, и если им пренебречь, то есть независимой переменной считать частоту, то, как следует из формулы (10) с учетом (8), минимум реактивной мощности будет наблюдаться при одном значении скольжения для любой скорости. Однако такое положение не будет соответствовать действительной картине явлений в случае глубокого регулирования скорости вниз от номинальной, когда величина скольжения становится соизмеримой с величиной скорости, что и учитывается принятием скорости в качестве независимой переменной. Зависимости реактивной мощности от скольжения  $q(\beta)$  для разных скоростей вращения при номинальном моменте нагрузки приведены на рис. 1. Зависимость скольжения от скорости  $\beta_q(\omega)$  удовлетворяющая условиям минимума реактивной мощности, приведена на рис. 2. Расчет сделан по формулам (10), (12), (13) для двигателя А051-4.

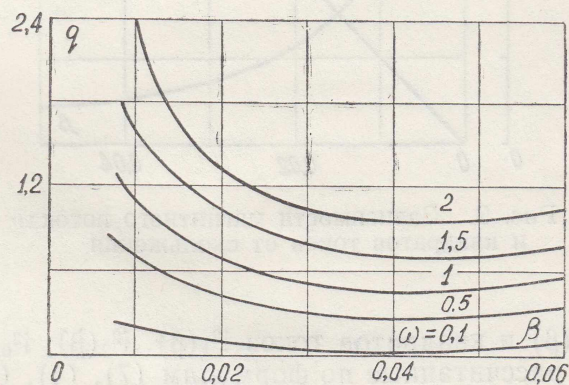


Рис. 1. Зависимость реактивной мощности от скольжения для разных скоростей вращения

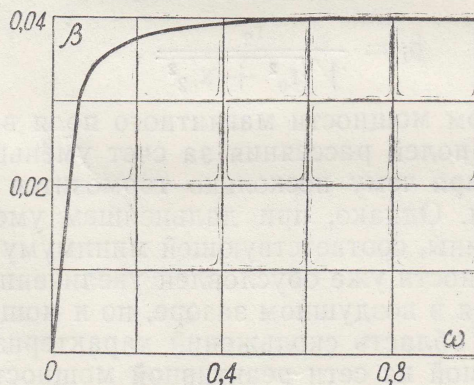


Рис. 2. Зависимость скольжения от скорости, соответствующая минимуму реактивной мощности



Согласно рис. 1, область малых скольжений  $\beta < s_n$  соответствует работе двигателя с повышенным запасом реактивной энергии. Уменьшение скольжения от номинальной величины сопровождается заметным ростом реактивной мощности, особенно интенсивным в зоне малых скольжений. Это связано с тем, что уменьшение скольжения при условии постоянства вращающего момента должно быть скомпенсировано наращиванием мощности магнитного поля в воздушном зазоре. Последнее может быть осуществлено лишь за счет увеличения намагничивающего тока. При этом магнитный поток принимает значения, превосходящие номинальную величину. На рис. 3 приведены зависимости маг-

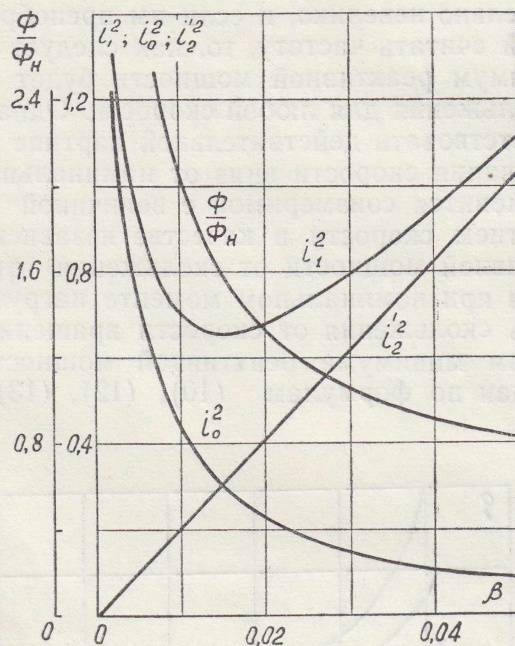


Рис. 3. Зависимости магнитного потока и квадратов токов от скольжения

нитного потока  $\phi(\beta)$  и квадратов токов  $i_1^2(\beta)$ ,  $i_2^2(\beta)$ ,  $i_0^2(\beta)$  от абсолютного скольжения, рассчитанные по формулам (7), (4), (1), (6) для двигателя А051-4 с номинальным моментом на валу. Из рис. 3 хорошо видно влияние характера изменения токов в рабочей зоне скольжений на реактивную мощность. В зоне скольжений от номинального до величины, соответствующей минимуму тока статора

$$\beta_1 = \frac{r_2'}{\sqrt{r_0^2 + x_{02}^2}}, \quad (14)$$

одновременно с ростом мощности магнитного поля в воздушном зазоре снижается мощность полей рассеяния за счет уменьшения токов статора и ротора, благодаря чему несколько тормозится рост суммарной реактивной мощности. Однако, при дальнейшем уменьшении скольжения, начиная с величины, соответствующей минимуму тока статора (14), рост реактивной мощности уже обусловлен увеличением не только мощности магнитного поля в воздушном зазоре, но и мощности поля рассеяния статора. Данная область скольжений характеризуется резким возрастанием потребляемой из сети реактивной мощности, что необходимо учитывать при выборе и оценке экономичности режимов работы двигателя с минимальными потерями и минимальным током, которые осуществляются при малых скольжениях.



При увеличении скольжения сверх значения, соответствующего минимуму реактивной мощности, суммарная величина реактивной мощности возрастает медленнее, чем в предыдущем случае, вследствие уменьшения мощности магнитного поля в воздушном зазоре при увеличении мощности полей рассеяния.

В зоне высоких скоростей вращения, примерно начиная с  $\omega = 0,3 \div 0,4$ , минимум реактивной мощности достигается при скольжениях, близких к номинальному.

Для сохранения минимума реактивной мощности во всем диапазоне регулирования следует регулировать скольжение при изменении скорости согласно рис. 2. Из-за увеличения влияния скольжения на величину частоты в области малых скоростей вращения понижение скорости должно сопровождаться нарастающим уменьшением скольжения.

Область высоких скоростей вращения характеризуется малым изменением скольжения. Предельную величину скольжения, удовлетворяющую условиям минимума реактивной мощности при  $\omega \rightarrow \infty$ , можно рассчитать по формуле, полученной из (10) в предположении  $\omega \gg \beta$ :

$$\beta = \sqrt{\frac{x_0 + x_1}{x_0 x_2'^2 + x_1 (x_0 + x_2') + x_a' x_0^2}} \quad (15)$$

Предельная величина скольжения (15) незначительно превышает номинальное значение.

### Выводы

1. В зоне рабочих скольжений при частотном регулировании величина потребляемой двигателем реактивной мощности изменяется в широких пределах.
2. При достаточно высокой скорости вращения работа двигателя с малыми скольжениями порядка величины, соответствующей минимуму тока, сопровождается значительным возрастанием потребляемой реактивной мощности.
3. Для поддержания высокого коэффициента мощности целесообразно с возрастанием скорости вращения увеличивать скольжение до значений, отличающихся от номинального не более чем на (15—20%).