

## СНИЖЕНИЕ ПОТЕРЬ В ПУСКОВЫХ РЕЖИМАХ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ ПРИ СКАЛЯРНОМ ЧАСТОТНОМ УПРАВЛЕНИИ

Существует достаточно обширная группа механизмов, работа которых связана с частыми включениями/отключениями. К их числу могут быть отнесены турбомеханизмы, некоторые транспортные механизмы (кантователи, манипуляторы, механизмы подъемных кранов) и др., частые включения (отключения) которых обусловлены технологическими требованиями.

Задача повышения энергоэффективности отдельного электропривода (ЭП) за счет оптимизации режима работы двигателя решается применительно к двум видам режимов работы двигателя – установившимся и переходным (пусковые, тормозные режимы, режимы, связанные с изменением частоты вращения двигателя). Основной эффект от энергосбережения достигается за счет оптимизации энергопотребления в установившихся режимах работы. Однако, если работа двигателя в основном проходит в переходных режимах, оптимизация энергопотребления в таких режимах выходит на первый план.

Наибольшее применение в указанных механизмах находит ЭП на основе трехфазного асинхронного двигателя (АД). При использовании частотно-регулируемого пуска можно обеспечить как плавный разгон АД, так и снижение затрат энергии при пуске, причем, как показано в [1], повышения энергоэффективности управления в переходном режиме можно достичь уже за счет выбора темпа изменения заданной частоты от исходного до конечного значения. В то же время можно предположить, что снижения потерь в переходном режиме можно достичь путем коррекции в этом режиме зависимости, отражающей закон скалярного частотного управления.

Пусть имеется АД с короткозамкнутым ротором, описываемый системой 9-ти нелинейных дифференциальных и алгебраических уравнений в синхронной системе координат статора [2]:

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\vec{\Psi}_S}{dt} &= \vec{U}_S - R_S \vec{I}_S - j\omega_S \vec{\Psi}_S; & \frac{d\vec{\Psi}_R}{dt} &= -R_R \vec{I}_R - j(\omega_S - \omega_R) \vec{\Psi}_R; \\ \vec{\Psi}_S &= \vec{\Psi}_m + L_{S\sigma} \vec{I}_S; & \vec{\Psi}_R &= \vec{\Psi}_m + L_{R\sigma} \vec{I}_R; \\ \vec{\Psi}_m &= f\left(\vec{I}_m\right) \vec{I}_m; & \vec{I}_m &= \vec{I}_S + \vec{I}_R - \vec{I}_0; & R_m \vec{I}_0 &= \frac{d\vec{\Psi}_m}{dt}; \\ M &= \frac{3}{2} z_p \operatorname{Im}\left[\vec{\Psi}_S \vec{I}_S^*\right] & M - M_C &= \frac{J_\Sigma}{z_p} \cdot \frac{d\omega_R}{dt}, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где  $\vec{U}_S$  – обобщенный вектор напряжения статора;  $\vec{I}_S$ ,  $\vec{I}_R$ ,  $\vec{I}_m$ ,  $\vec{I}_0$  – обобщенные векторы токов статора, ротора, намагничивания и тока потерь в стали;  $\vec{\Psi}_S$ ,  $\vec{\Psi}_R$ ,  $\vec{\Psi}_m$  – обобщенные векторы потокосцеплений статора, ротора и главного;  $M$ ,  $M_C$  – электромагнитный момент двигателя и момент сил сопротивления;  $\omega_S$ ,  $\omega_R$  – угловые частоты вращения электромагнитных полей статора и ротора;  $R_S$ ,  $R_R$  – активные сопротивления обмоток статора и ротора;  $R_m$  – эквивалентное активное сопротивление цепи замыкания тока потерь в стали, включенной последовательно с основным контуром намагничивания;  $L_{S\sigma}$ ,  $L_{R\sigma}$  – индуктивности рассеяния обмоток статора и ротора;  $f\left(\vec{I}_m\right)$  – функциональная зависимость, определяющая значение модуля главного магнитного потокосцепления АД в функции модуля тока намагничивания;  $J_\Sigma$  – суммарный момент инерции электромеханической системы;  $z_p$  – количество пар полюсов двигателя.

Модель (1) предполагает, что координаты и параметры обмоток ротора приведены к статору, а также справедливость допущений о симметричности АД, о синусоидальном распределении МДС вдоль окружности воздушного зазора, о сосредоточенности и неизменности параметров обмоток, об абсолютной жесткости кинематической связи между двигателем и механизмом. Наличие потерь в стали, ввиду их относительно небольшой величины, учтено приближенным методом [2].

Рассматривается задача перевода АД из начального состояния  $\omega(0) = \omega_{нач}$  в конечное состояние  $\omega(t_p) = \omega_{кон}$  при минимальном значении энергии потерь, выделяющейся в виде тепла в элементах двигателя:

$$\Delta W = 3 \int_0^{t_p} (I_S^2 R_S + I_R^2 R_R + I_0^2 R_m) dt = \min . \quad (2)$$

Аналитическое решение поставленной задачи не представляется возможным без принятия допущений, искажающих конечный результат, поэтому для численного решения задачи поставлен вычислительный эксперимент на основе модели АД (1). Выполнен анализ зависимости энергии потерь (2) от закона скалярного частот-

ного управления, темпа изменения сигнала заданной частоты, реактивного момента статического сопротивления и момента инерции ЭП. Ниже представлены основные результаты решения задачи для случая перевода АД из неподвижного состояния ( $\omega_{нач} = 0$ ) в конечное, соответствующее номинальной частоте напряжения статора.

В качестве основного управляющего воздействия была принята заданная угловая частота напряжения, изменяющаяся по линейному закону в функции времени:

$$\omega_S = \omega_{S,3} t / t_p . \quad (3)$$

В первом приближении в качестве законов управления рассматриваются зависимости вида

$$U_{Sfm}(\omega_S, \alpha) = k \omega_S^\alpha , \quad (4)$$

где  $k = U_{Sfm,H} / \omega_{S,H}^\alpha = const$  – номинальный параметр.

В ходе эксперимента фиксировалось значение энергии потерь (2) в функции  $\alpha$  и продолжительности разгона на  $t_p$ . В качестве критерия завершения разгона принималось время достижения скоростью АД 5%-ного отклонения расчетного заданного значения.

Результаты эксперимента проиллюстрированы на рис.1 на примере пуска серийного АД 4А-112-М4 (5,5 кВт, 380 В, 1448 об/мин, 10,4 А) для электромеханической системы с моментом инерции  $J_\Sigma = 2J_{об}$ .

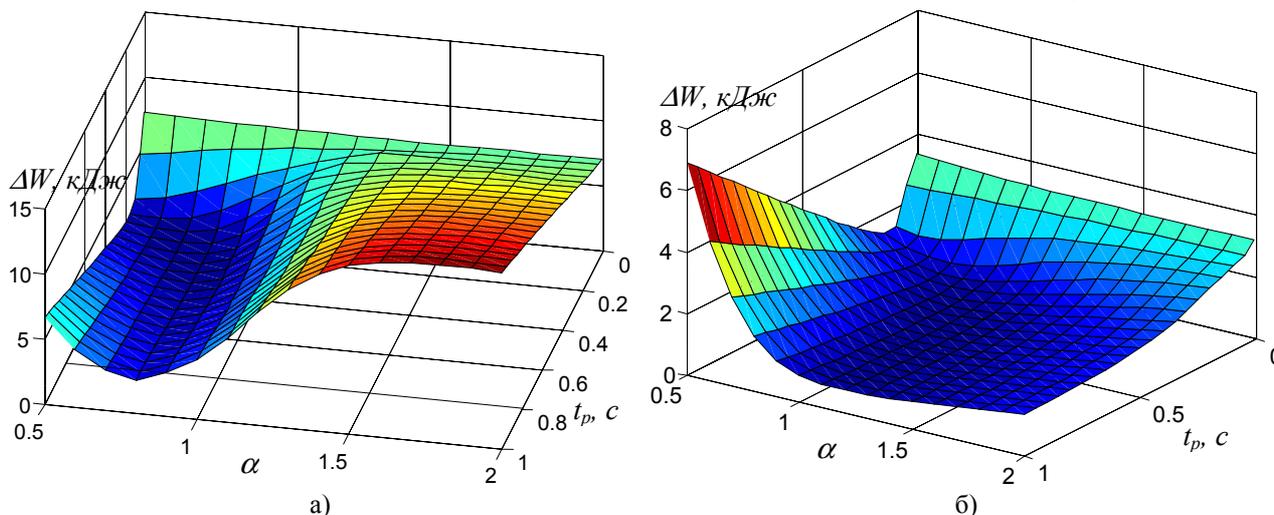


Рис.1 Зависимости  $\Delta W = f(\alpha, t_p)$  для пуска двигателя 4А-112-М4 ( $J_\Sigma = 2J_{об}$ ):

$$a - \text{при } M_C = M_H = const ; \quad b - \text{при } M_C = M_H (\omega / \omega_{0H})^2 .$$

Анализ приведенных зависимостей показывает, что за счет выбора закона частотного управления в сочетании с темпом изменения сигнала задания на частоту можно достичь снижения энергии потерь, выделившейся за время пуска.

Например, для случая номинальной загрузки двигателя ( $M_C = M_H = const$ ) минимальное значение энергии потерь составляет 1500 Дж (рис.1а), что достигается за счет задания закона управления (4) с параметром  $\alpha = 0,7$  при темпе изменения сигнала задания (3), определяемом значением  $t_p = 0,25$  с. Указанное значение энергии потерь в 5 раз меньше аналогичного значения при прямом пуске АД, и, как минимум, в 2,5 раза меньше значения  $\Delta W$  при пуске по закону  $U_{Sfm} / \omega_S = const$  ( $\alpha = 1$ ), рекомендованного в данном случае с точки зрения сохранения перегрузочной способности двигателя (закон Костенко).

Аналогичный по характеру результат получен для механизма, характеризующимся моментом сопротивления, изменяющимся в квадратичной зависимости в функции скорости ( $M_C = k_1 \omega^2$ ), представленный на рис.1б. Можно заметить, что при расчетной номинальной нагрузке электропривода применение закона управления (4) с параметром  $\alpha = 1$  при значении  $t_p = 0,4$  с дает значение энергии потерь 650 Дж, что в 4,5 раза меньше, чем при прямом пуске, и, как минимум, в 2 раза меньше значения  $\Delta W$  при пуске по закону  $U_{Sfm} / \omega_S^2 = const$  ( $\alpha = 2$ ).

Установлено также, что в случае имеющейся фактической частичной загрузки АД (запас при выборе мощности двигателя, составляемый 20...30%) наибольшее снижение энергии потерь достигается при больших значениях  $\alpha$  по сравнению со случаем номинальной загрузки АД. В частности, при  $M_C = 0,7M_H = const$  минимальное значение  $\Delta W$  (1100 Дж) достигается при  $\alpha = 0,8$  и  $t_p = 0,3$  с (рис.2), что в 5 раз меньше, чем при прямом пуске, и в 1,5 раза и более раз меньше, чем при управлении по закону  $U_{Sfm} / \omega_S = const$ .

С точки зрения работы АД изменение закона управления (4) за счет увеличения параметра  $\alpha$  до определенной степени приводит к увеличению электромагнитного момента двигателя за счет увеличения магнитного потока, что сокращает продолжительность пуска и уменьшает время стоянки двигателя под током, что и вызывает снижение энергии потерь. При дальнейшем увеличении  $\alpha$  на переходный процесс при пуске начинает оказывать влияние насыщение магнитной цепи двигателя, что приводит к росту тока и к увеличению энергии потерь.

Эффект, подобный вносимому снижением параметра  $\alpha$  по сравнению с законом Костенко, особенно для двигателей малой мощности, достигается за счет использования принципа «IR-компенсации», который заключается в формировании повышенной амплитуды напряжения на статор двигателя при том же значении частоты с целью компенсации падения напряжения в активном сопротивлении обмотки статора

$$U_{sfm} = U_{sfm.3} + k_k I_S R_S,$$

обычно за счет организации положительной обратной связи по току. В последнем выражении  $k_k > 0$  – степень компенсации, сверху ограниченная условием устойчивости системы.

На рис.3 проиллюстрировано влияние значения коэффициента  $k_k$  на величину энергии потерь за время разгона для закона управления  $U_{sfm}/\omega_S = const$  ( $\alpha = 1$ ) при номинальной нагрузке двигателя. Так, при 60%-ной компенсации падения напряжения в активном сопротивлении статора АД ( $k_k = 0,6$ ) и обеспечении времени  $t_p = 0,3$  с можно обеспечить минимальное значение энергии потерь, равное 1550 Дж, что примерно в 2,5 раза меньше, чем в случае отсутствия IR-компенсации (при  $k_k = 0$ ).

### Выводы.

1) Повышения энергоэффективности частотного управления АД в пусковых режимах можно достичь как за счет выбора темпа изменения сигнала задания частоты напряжения статора, так и за счет коррекции закона частотного управления. Это позволяет сократить продолжительность пускового режима и снизить количество теплоты, выделяемой в элементах конструкции двигателя при пуске.

2) При известных внутренних параметрах ЭП и параметрах режима его работы (коэффициент загрузки двигателя, значение момента инерции, зависимость момента сопротивления в функции скорости) за счет предварительного проведения вычислительного эксперимента можно определить значения  $\alpha$  и  $t_p$ , при которых выделявшаяся за время пуска энергия потерь будет минимальной. Наилучший в этом смысле закон частотного управления описывается выражениями (3) и (4) и отличается от рекомендованного с точки зрения сохранения жесткости характеристик и перегрузочной способности меньшими значениями  $\alpha$  и  $t_p$ .

3) Применение частичной компенсации падения напряжения в активном сопротивлении обмотки статора при пуске приводит к улучшению энергоэффективности пуска за счет сокращения времени разгона двигателя при условии отсутствия насыщения магнитной цепи двигателя.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Браславский И.Я. Энергосберегающий асинхронный электропривод / И.Я. Браславский, З.Ш. Ишматов, В.Н. Поляков; Под ред. И.Я. Браславского. – М.: Издательский центр «Академия», 2004. – 256 с.
2. Карась С.В. Анализ процессов в асинхронном двигателе с учетом потерь в стали методом математического моделирования / Карась С.В., Ковалев Е.Б., Толочко О.И., Чекавский Г.С. // Збірник наукових праць ДонДТУ. Серія: «Електротехніка і енергетика». – Вип. 21. – Донецьк: ДонДТУ, 2000. – С. 182 – 187.

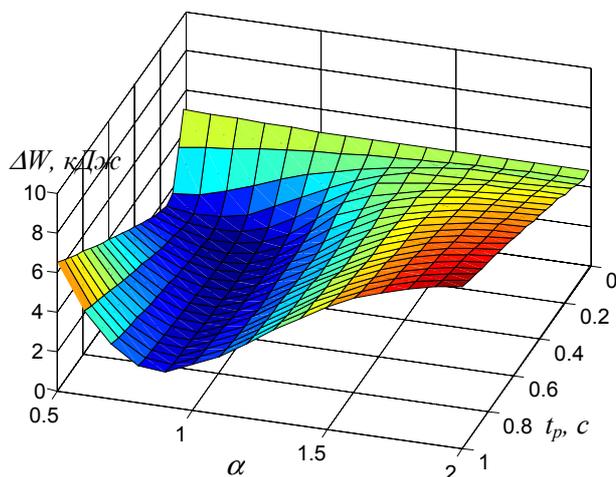


Рис. 2 Зависимости  $\Delta W = (\alpha, t_p)$  для пуска двигателя 4А-112-М4 ( $J_\Sigma = 2J_{\text{дв}}$ ) при  $M_C = 0,7M_H = const$ .

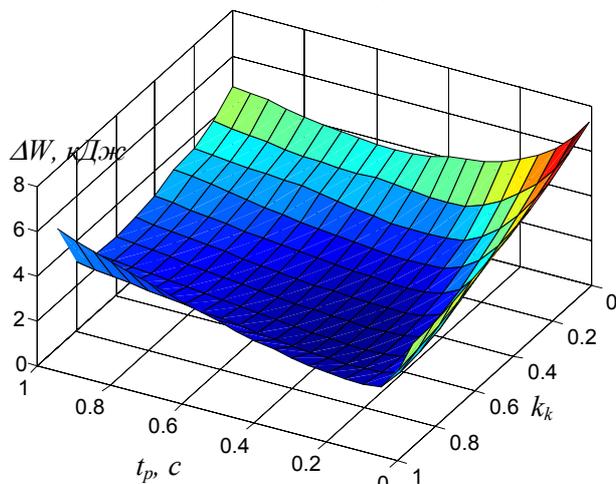


Рис.3 Зависимости  $\Delta W = (k_k, t_p)$  для пуска двигателя 4А-112-М4 ( $J_\Sigma = 2J_{\text{дв}}$ ) при законе управления  $U_{sfm}/\omega_S = const$  ( $\alpha = 1$ ) при  $M_C = M_H = const$ .