

*В.И.МИШИН*, д-р техн. наук, проф., НАУ, Киев

*Р.Н.ЧУЕНКО*, канд. техн. наук, доц., НАУ, Киев

## **ВНУТРЕННЯЯ ЕМКОСТНАЯ КОМПЕНСАЦИЯ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ В АСИНХРОННОМ ДВИГАТЕЛЕ**

Розглянуто ефект внутрішньої ємнісної компенсації реактивної потужності в асинхронному двигуні, заснований на спільному використанні двох обмоток статора двигуна як робочих і компенсуючих при їх включенні за схемою поворотного автотрансформатора на електричну ємність.

Рассмотрен эффект внутренней емкостной компенсации реактивной мощности в асинхронном двигателе, основанный на совмещенном использовании двух обмоток статора как рабочих обмоток двигателя и компенсирующих, при соединении их по схеме поворотного автотрансформатора на электрическую емкость.

Основным недостатком асинхронного двигателя (АД) в соответствии с принципом его действия является потребление им двух видов электрической энергии: активной для преобразования в механическую и тепловые потери и реактивной для создания переменного магнитного поля. При этом реактивная энергия не преобразуется в другие виды, а при изменении переменного тока по величине и направлению происходит обмен ею между источником и потребителем, что загружает все элементы электрической системы непроизводительным реактивным током.

Внутренняя емкостная компенсация реактивной мощности в асинхронной машине (АМ) осуществляется при совмещении функций обмоток статора как рабочих обмоток АМ и компенсирующих при включении их по схеме поворотного автотрансформатора (АТ) на электрическую емкость [1, 2].

Эффект внутренней емкостной компенсации реактивной мощности проявляется во всех режимах компенсированной асинхронной машины (КАМ). Он приводит к ряду особенностей действия физических процессов, благоприятно влияющих на свойства машины, ее технико-экономические показатели.

Конструктивно КАД выполнен на базе серийного асинхронного двигателя, только его обмотка статора делится на две части, пространственно смещенные между собой в пазах сердечника статора на задан-

ный угол  $\theta$  и соединенные по схеме поворотного АТ на электрическую емкость  $C_{\Delta}$  [4, 7, 8].

Из условий технической простоты и обеспечения эффективной работы двигателя этот угол удобно принять равным  $30^{\circ}$ , что делается делением фазной зоны  $60^{\circ}$  обмотки статора базовой машины на две равные части. Одна из полуобмоток фазы принимается за основную и является первичной обмоткой АТ с включением ее на напряжение питающей сети. Другая – дополнительная или вторичная обмотка АТ смещена относительно первичной на угол  $\theta=30^{\circ}$  против направления вращения поля. На рис. 1 представлена принципиальная электрическая схема фазы КАД (а), векторная диаграмма фазы (б) и фрагмент векторной диаграммы с действием дополнительной ЭДС

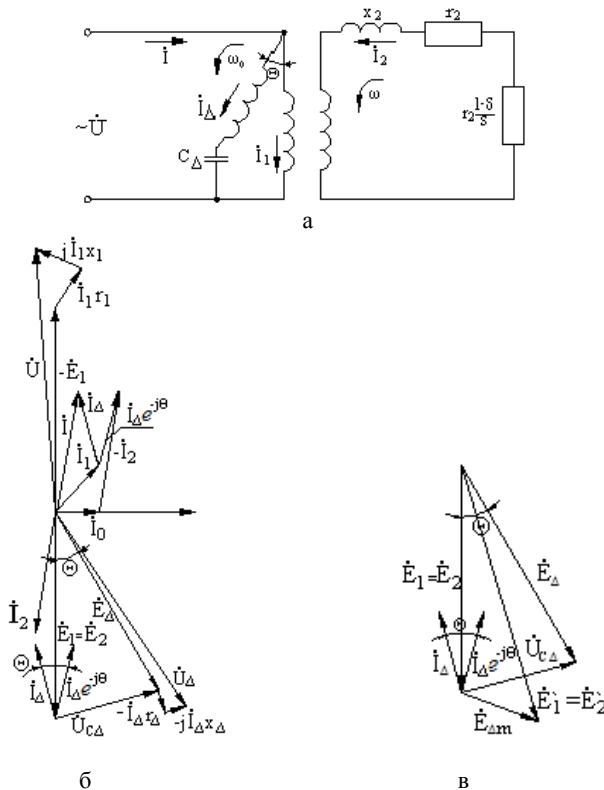


Рис. 1.

Эффекты действия внутренней емкостной компенсации реактивной мощности могут быть выявлены и оценены по результатам расчета характеристик КАД.

Основой для такого расчета принята обобщенная математическая модель асинхронной машины, составленная на классических принципах [3], с учетом различной пространственно-временной ориентации токов нескольких обмоток статора и ротора, приведенных к единой оси основной обмотки статора, с учетом электрических емкостей в контурах цепей статора, что увеличивает на единицу порядок дифференциальных уравнений модели [5].

Частным вариантом этой модели является система алгебраических уравнений электрического равновесия контуров одной фазы статора и ротора КАД в установившемся процессе симметричного режима. Результаты расчетов при постоянных параметрах Т-образной схемы базовой машины [5, 9] приняты для выявления и анализа процессов в КАД, особенностей [6] их свойств, характеристик, возможностей повышения эффективности.

Указанная система уравнений для контуров фазы КАД по схеме рис. 1, а представлена в виде:

$$\begin{cases} U_{\Delta} = -R_1 I_1 + j\omega L_1 I_1 + j\omega X_1 X_1 \cos\theta; \\ U_{\Delta} = -U_{C\Delta} + U_{C\Delta} = -R_{\Delta} I_{\Delta} + j\omega X_{\Delta} I_{\Delta} + j\omega X_1 I_1 \cos\theta - j\omega X_{C\Delta} I_{C\Delta}; \\ 0 = -R_2 I_2 + j\omega L_2 I_2, \end{cases}$$

где  $Z_1 = r_1 + jX_1 = Z_{\Delta}$  – собственные внутренние сопротивления двух одинаковых обмоток статора;  $Z_2 = \frac{r_2}{s} + jX_2$  – сопротивление фазы ротора по схеме замещения;  $R_1, X_1$  – собственные сопротивления единой обмотки статора базовой машины [9].

Приведем некоторые результаты расчета и их краткий анализ на примере КАД, выполненного на базе асинхронного двигателя 4А71В2.

На рис. 2 представлены графики расчетных зависимостей пускового момента  $M_{\text{пуск}}$  и тока  $I_{\text{пуск}}$  от величины и знака угла  $\theta$ . Они дополняют обоснование уже принятой величины угла  $\theta=30^\circ$ . Показано, что при  $\theta=30^\circ \dots 90^\circ$  пусковой момент КАД максимален и величина его зависит также от величины принятой емкости  $C_{\Delta}$  (сопротивления  $X_{C\Delta}$ ). Но при  $\theta=30^\circ$  минимален пусковой ток двигателя и максимально отношение  $M_{\text{пуск}}/I_{\text{пуск}}=0,7 \dots 0,75$ , определяющее эффективность пусковой операции двигателя. При  $\theta=60^\circ \dots 90^\circ$  увеличивается пусковой ток статора и это отношение уменьшается, у базового АД оно составляет  $0,55 \dots 0,6$ .

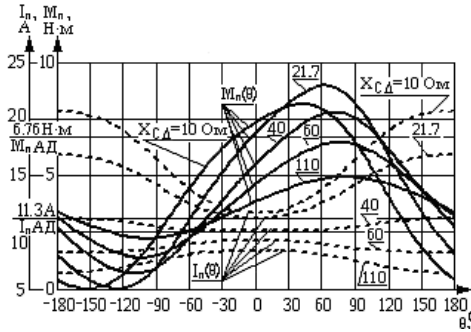


Рис. 2.

Минимальные значения рабочих токов и потерь мощности в обмотках при определенной емкости также соответствуют  $\theta=30^\circ$ . Поэтому последующие исследования свойств и характеристик КАД проводим при пространственном сдвиге обмоток статора КАД относительно друг друга, равном  $\theta=30^\circ$ .

Введение в цепь ротора электромагнитным путем дополнительной ЭДС приводит к увеличению основной ЭДС ротора, его пускового тока (при скольжении  $s=1$ ) и пускового момента.

Под действием повышенного пускового момента происходит ускоренный разгон двигателя по более высокой по сравнению с базовым АД механической характеристике с выходом в установившемся процессе с постоянным моментом нагрузки в точку с меньшим скольжением  $s'$ , чем при работе базового АД.

С другой стороны, увеличение ЭДС основной обмотки статора, уравновешенной постоянным напряжением сети, ослабляет рост пускового тока, а также снижает его рабочие токи. Уменьшение рабочих токов обмоток статора и ротора в пределе до активных составляющих уменьшает потери мощности в обмотках.

Двигатель становится энергосберегающим, с повышенным пусковым моментом практически при неизменном пусковом токе статора, регулируемым по величине  $\cos\phi$ . Рис. 3 частично иллюстрирует этот эффект механическими характеристиками КАД, построенными при  $0 \leq s \leq 1$  и различных  $C_\Delta$  ( $\Delta C_\Delta$ ). Так, в зависимости от величины емкости  $C_\Delta$  ( $X_{C\Delta}$ ) пусковой момент КАД превышает пусковой момент базовой машины на 20 – 25%, а номинальное скольжение  $s'_H$  уменьшается от  $s_H=0,061 - 0,063$  базового двигателя до  $s'_H=0,048 - 0,06$  в КАД при  $M_H=3,74 \text{ Н}\cdot\text{м}=\text{const}$ .

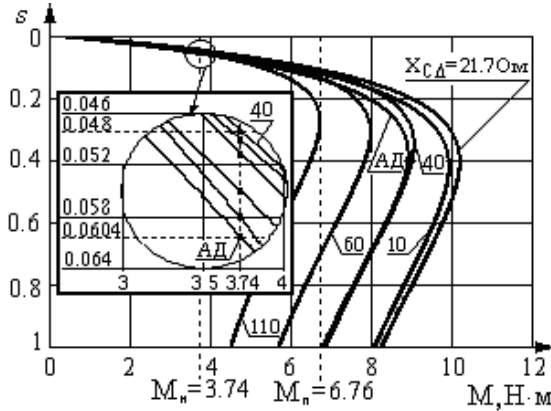


Рис. 3.

Расчетные графики изменения токов КАД в зависимости от величины емкости  $C_{\Delta}$  при постоянной номинальной нагрузке ( $M_n = \text{const}$ ,  $s'_n = \text{var}$ ) представлены на рис. 4. Зависимости токов  $I_1$  и  $I_{\Delta}$  пересекаются в точке, называемой точкой нормального емкостного возбуждения КАД. Учитывая подмагничивающее действие емкостного тока при создании магнитного потока будем называть его и в целом намагничивающий ток током возбуждения асинхронной машины.

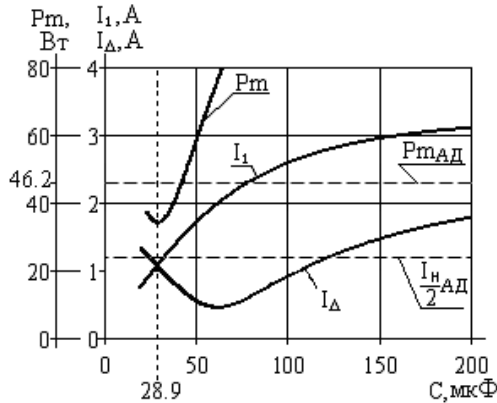


Рис. 4.

Режим нормального емкостного возбуждения в данном примере расчета КАД при номинальной нагрузке ( $M_n = \text{const}$ ) возникает при

$C_{\Delta}=28,9$  мкФ на фазу ( $X_{C\Delta}=110$  Ом) и характеризуется тем, что токи  $I_1$  и  $I_{\Delta}$  обмоток статора равны по величине, что обеспечивает обмоткам одинаковый тепловой режим; относительно напряжения сети ток  $I_{\Delta}$  имеет опережающий характер,  $I_1$  – отстающий. Приближаясь за счет емкостной компенсации к активным они становятся меньше соответствующих номинальных токов базового АД на 6% (в том числе и ток  $I_2$  ротора). Потери мощности в обмотках снижаются на 12% и являются минимальными в данном режиме.

Аналогичные эффекты имеют место и при пуске КАД, где нормальное возбуждение соответствует равенству пусковых токов ветвей статора и почти наибольшему пусковому моменту (наибольший момент возникает при полной компенсации). Однако в связи со свойством АД увеличивать пусковой ток, емкость для благоприятного пуска КАД должна превышать емкость при номинальной нагрузке в 4 – 5 раз.

Внутренняя емкостная компенсация в асинхронных машинах вызывает и другие эффекты, такие как:

- удвоение числа фаз обмоток статора при одинаковых пространственном и временном сдвиге токов двух трехфазных систем, что приводит к уменьшению тока холостого хода, исключению 5 и 7-й пространственных гармоник поля;

- переход машины в режим динамического торможения при отключении КАД от источника питания и действия электромагнитных контуров с емкостью;

- перевод КАМ в режим генератора при изменении знаков скольжения и угла пространственного сдвига между обмотками статора, работа компенсированного автономного асинхронного генератора со стабильным напряжением и частотой при изменении нагрузки;

- работа КАМ с двойным внутренним емкостным возбуждением с форсировкой возбуждения шунтированием вторичной обмотки АТ дополнительной емкостью и т.п.

Компенсированный асинхронный двигатель можно рекомендовать как энергосберегающий при длительной постоянной нагрузке, для пуска электроприводов с большими инерционными массами исполнительных механизмов, а при автоматическом регулировании емкости или при использовании варикондов – для любых режимов работы.

Внутренняя емкостная компенсация реактивной мощности в асинхронных машинах может быть выполнена без существенного изменения технологии производства а также при капитальном ремонте.

**Список литературы:** 1. *Вольдек А.И.* Электрические машины. – Л.: Энергия, 1978. – 832 с. 2. *Копылов И.П.* Электрические машины. – М.: Высшая школа, 2002. – 607 с. 3. *Копылов И.П.* Математическое моделирование электрических машин. – М.: Высшая школа, 2001. – 327 с. 4. *Мишин В.И., Лут Н.Т.* Асинхронные электродвигатели с улучшенными энергетическими и пускорегулировочными характеристиками // Вісник Національного технічного університету "ХПІ". – Харків: НТУ "ХПІ". – 2001. – №17. С. 110-112. 5. *Мишин В.И., Чуенко Р.Н., Кулинич А.Н.* Принципы расчета характеристик в асимметричных режимах компенсированного асинхронного двигателя // Електротехніка і Електромеханіка. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2006. – №1 – С. 36-41. 6. *Мишин В.И., Чуенко Р.Н., Кулинич А.Н.* Особенности физических процессов в компенсированном асинхронном двигателе // Електротехніка і Електромеханіка. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2004. – №4. С. 48-53. 7. Пат. 56330 України, МПК Н02К 17/34. Трифазний асинхронний електродвигун / В. І. Мішин, Р.М. Чуенко, Б. М. Кафтан – Заявл. 15.05.2003; Опубл. Бюл. №15. 8. Пат. 68049 А України, МПК Н02К 17/34. Трифазний асинхронний електродвигун / В.І. Мішин, Б.М. Кафтан. – Заявлено 02.05.2004; Опубл. Бюл. №7. 9. Асинхронные двигатели серии 4А Справочник (А. Э. Кравчик, М. М. Шлаф и др.). – М.: Энергопромиздат, 1982. – 504 с.

*Поступила в редколлегию 1.09.2009*