

УДК 621.313.323

Снижко А. А., Низимов В. Б.

**ВЛИЯНИЕ ЕМКОСТНОГО НАКОПИТЕЛЯ ЭНЕРГИИ НА СОСТАВЛЯЮЩИЕ МОМЕНТОВ И ТОКОВ СИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ**

Задача пуска мощных синхронных двигателей (СД) не теряет своей актуальности в первую очередь для разворота механизмов со значительным моментом статического сопротивления, таких как шаровые и стержневые мельницы, барабанные окомкователи, дробилки, скребковые конвейеры, а также в условиях питания двигателей от протяженных электрических сетей, что характерно для приводов механизмов буровых установок нефте- и газодобывающей промышленности и турбокомпрессоров газоперекачивающих станций.

Для ее решения разработано значительное количество методов и устройств пуска, многие из которых являются довольно сложными и громоздкими агрегатами [1]. В то же время возможности СД в режиме пуска используются не полностью. В частности обмотка возбуждения с пусковым резистором в режиме асинхронного пуска практически не создает заметного электромагнитного момента, поскольку угол между векторами ЭДС и тока, наводимого в ней, близкий к 90 эл. градусам. Включение емкостного накопителя энергии (ЕНЭ) в контур возбуждения позволяет уменьшить этот угол и, следовательно, увеличить момент, создаваемый обмоткой возбуждения [2].

Однако характер влияния ЕНЭ в контуре возбуждения на процессы, происходящие в обмотках ротора, пока остается не достаточно исследованным.

Целью работы является исследование влияния ЕНЭ в контуре возбуждения на электромагнитные процессы, протекающие в обмотках ротора СД во время асинхронного пуска.

Для двухфазной машины в ортогональных осях  $d-q$  формула для расчета вращающего момента имеет вид:

$$M = \operatorname{Re} [U_{bc}^* I_d - U_{ab}^* I_q], \quad (1)$$

где  $U_{bc}^*$  и  $U_{ab}^*$  – сопряженные комплексы напряжения соответственно на продольном и поперечном плечах [3].

Чтобы привести ее к виду, удобному для расчета по схеме замещения (рис. 1), введем следующие обозначения:

$$\begin{aligned} \dot{U}_{ad} &= \dot{U}_{bc} = \dot{U}_q; & \dot{U}_{ab} &= \dot{U}_{dc} = \dot{U}_d; \\ \dot{U}_{ab} + \dot{I}_O \frac{R_1}{2s-1} - \dot{U}_{ad} &= 0; & \dot{U}_{ab} + \dot{U}_{dc} + \dot{I}_\Pi R_1 &= U; \\ \dot{I}_\Pi &= \frac{1}{2} (\dot{I}_d - j\dot{I}_q); & \dot{I}_O &= \frac{1}{2} (\dot{I}_d + j\dot{I}_q). \end{aligned} \quad (2)$$

Здесь  $\dot{I}_\Pi$  и  $\dot{I}_O$  – токи прямой и обратной последовательности соответственно. После подстановки этих выражений в (1) и проведения некоторых преобразований, получим [4]:

$$\dot{U}_d = \frac{1}{2} \left( \dot{U} - \dot{I}_\Pi R_1 - \dot{I}_O \frac{R_1}{2s-1} \right); \quad (3)$$

$$\dot{U}_q = \frac{1}{2} \left( \dot{U} - \dot{I}_\Pi R_1 + \dot{I}_O \frac{R_1}{2s-1} \right); \quad (4)$$

$$\dot{I}_d = \dot{I}_\Pi + \dot{I}_O; \quad j\dot{I}_q = \dot{I}_O - \dot{I}_\Pi; \quad (5)$$

$$M = U \cdot \text{Re}[\dot{I}_\Pi] - I_\Pi^2 R_1 + I_O^2 \frac{R_1}{2s-1}. \quad (6)$$

Следует отметить, что приведенная формула для момента получена в предположении отсутствия возбуждения, а также не учитывает тормозного момента, возникающего при преждевременном появлении тока возбуждения, как это может иметь место при пуске с глухо подключенным возбудителем [3].

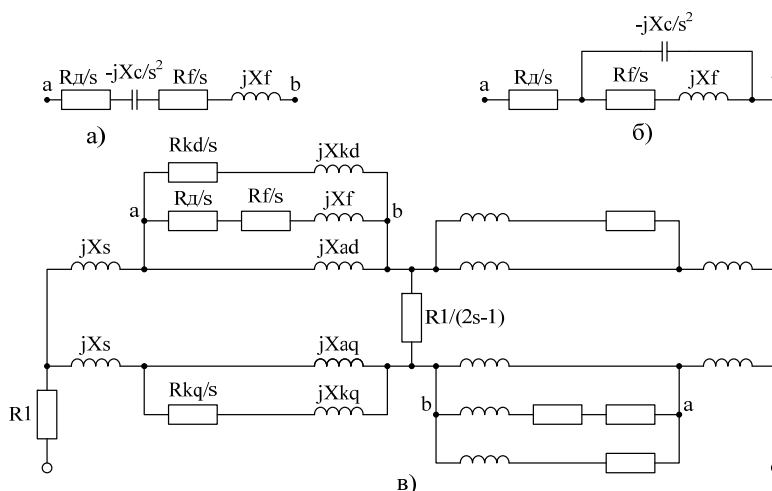


Рис. 1. Схема замещения синхронной машины в асинхронном режиме при отсутствии возбуждения:

а – контур возбуждения с последовательно включенным ЕНЭ; б – контур возбуждения с параллельно подключенным ЕНЭ; в – базовая схема замещения СД

Включение емкостного накопителя в контур возбуждения СД компенсирует индуктивное сопротивление ОВ, что изменяет взаимное расположение векторов напряжения и тока, наводимого в обмотках во время пуска. В результате происходит перераспределение энергии в контурах двигателя и за счет этого повышается пусковой момент. Отражением энергетических процессов в двигателе являются его токи. С помощью выражения (5) определим их для продольного и поперечного контуров ротора.

Чтобы разложить ток  $I_d$  на составляющие  $I_f$  и  $I_{kd}$  – токи контура возбуждения и продольного контура пусковой обмотки соответственно, воспользуемся соотношением:

$$U_{rd} = I_f Z_f = I_{kd} Z_{kd}, \quad (7)$$

где  $U_{rd}$  – напряжение на параллельных ветвях роторных контуров продольной оси схемы замещения. Исходя из этого и учитывая, что  $I_d = I_f + I_{kd}$ , получим:

$$I_f = \frac{Z_{kd} I_d}{Z_f + Z_{kd}}; \quad I_{kd} = I_d - I_f. \quad (8)$$

На основе выражения (6) получим уравнения для определения составляющих моментов от токов каждого из роторных контуров:

$$M_f = 0,5 \dot{U}_{rd} \cdot \text{Re}[\dot{I}_f] - R_{fd} (0,5 |\dot{I}_f|)^2 + \frac{R_{fd}}{2s-1} (0,5 |\dot{I}_f|)^2; \quad (9)$$

$$M_{kd} = 0,5\dot{U}_{rd} \cdot \text{Re}[I_{kd}] - R_{kd} (0,5|I_{kd}|)^2 + \frac{R_{kd}}{2s-1} (0,5|I_{kd}|)^2; \quad (10)$$

$$M_{kq} = 0,5\dot{U}_{rq} \cdot \text{Re}[I_{kq}] - R_{kq} (0,5|I_{kq}|)^2 - \frac{R_{kq}}{2s-1} (0,5|I_{kq}|)^2, \quad (11)$$

где  $R_{fd}$  – суммарное сопротивление обмотки возбуждения и пускового резистора;

$U_{rq}$  – напряжение на параллельных ветвях роторной обмотки по поперечной оси схемы замещения.

Поскольку сема замещения мостовая (рис. 1) и противоположные ее плечи симметричны, то токи в контурах необходимо делить пополам. В результате численного моделирования были получены кривые статических характеристик пуска СД с емкостным накопителем в контуре возбуждения.

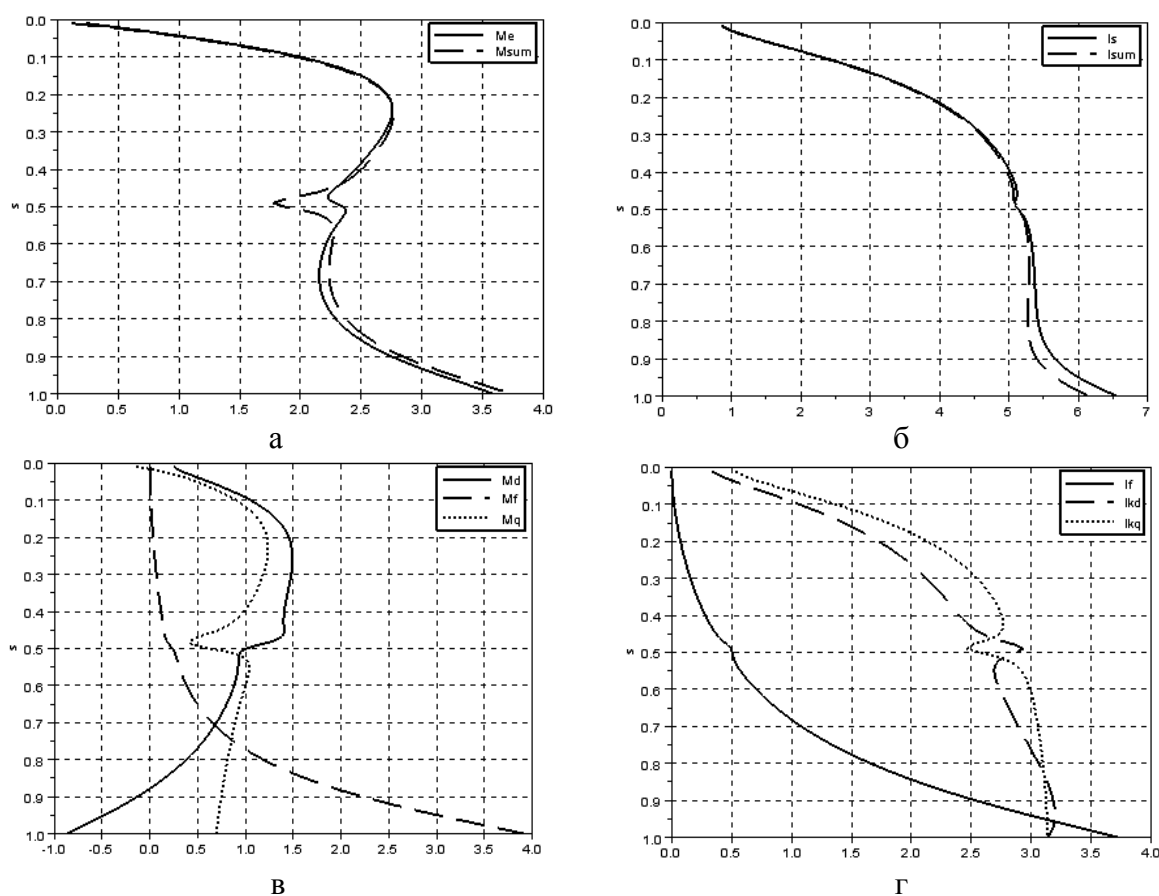


Рис. 2. Пусковые характеристики СД при пуске с ЕНЭ емкостью 75 мкФ, последовательно подключенным к ОВ:

- а – электромагнитный момент двигателя и суммарный момент от его роторных контуров;
- б – ток двигателя и суммарный ток от контуров ротора;
- в – моменты от роторных контуров;
- г – токи роторных контуров

Как следует из анализа полученных расчетных зависимостей, при последовательном включении емкостного накопителя в обмотку возбуждения, ток в ней в начальный момент пуска более чем в 3,5 раза превышает номинальный (рис. 2), так же, как и создаваемый ею момент. С дальнейшим разгоном двигателя эти значения спадают к нулю вследствие увеличения емкостного сопротивления накопителя, носящего обратную квадратичную зависимость от скольжения. Ток демпферной обмотки в продольном контуре схемы замещения

также увеличивается, но момент создаваемый последней незначительный. Токи поперечного контура схемы замещения незначительно превышает трехкратный, а момент, создаваемый им, находится в пределах номинального.

При параллельном подключении накопителя к обмотке возбуждения ток в последней в начале пуска достигает 6-го значения от номинального, а момент, создаваемый ею, составляет 3,5 номинальных значений (рис. 3). В процессе разгона двигателя, ток и момент этой обмотки также уменьшаются, но более интенсивно, чем в предыдущем случае. Ток в продольной демпферной обмотке ограничивается на уровне двукратного, а момент, создаваемый ею, немного превышает номинальный. Поперечный демпферный контур развивает момент на уровне номинального, а ток, протекающий в нем, не превышает трехкратного значения.

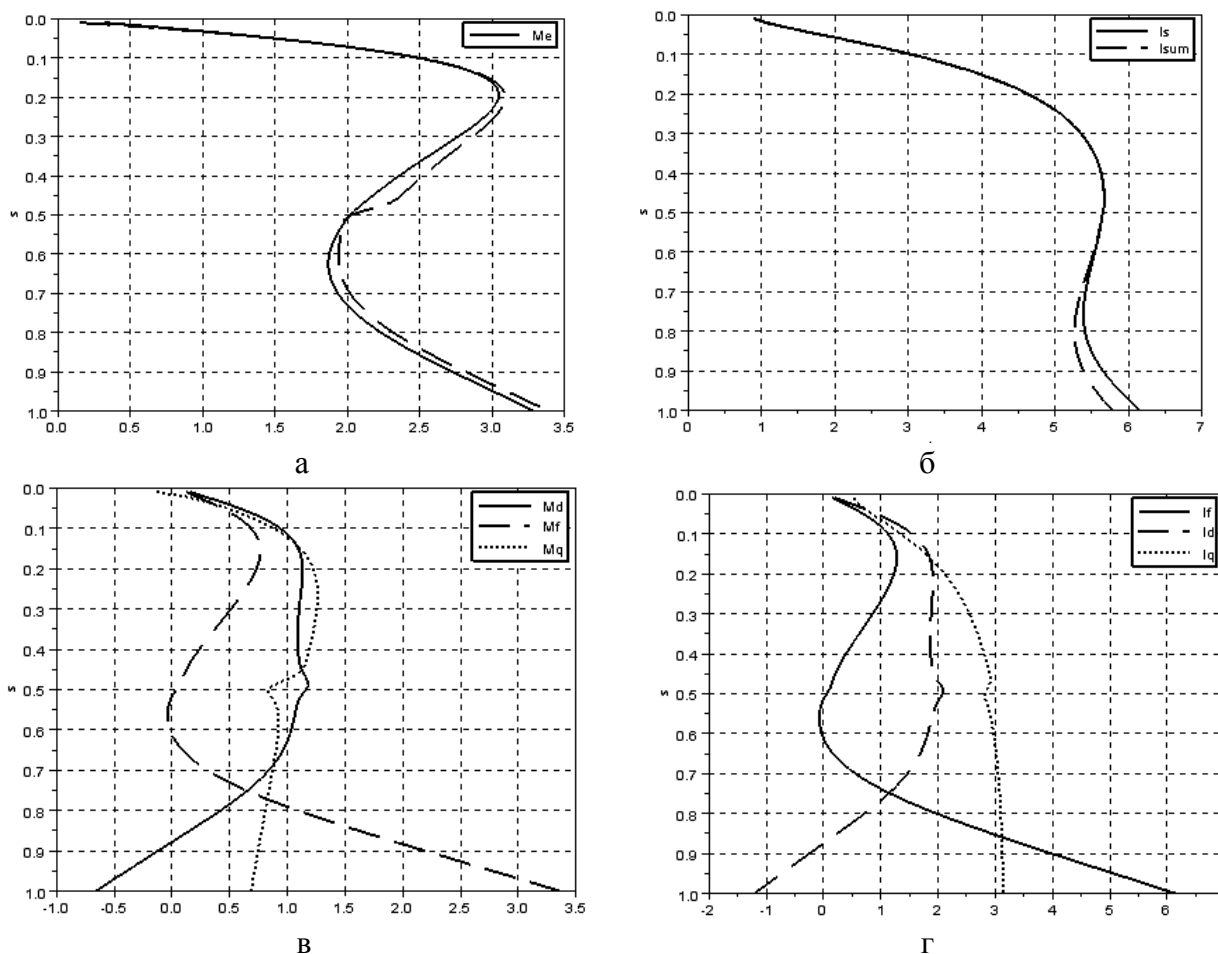


Рис. 3. Пусковые характеристики СД с параллельно подключенным ЕНЭ номиналом в 300 мкФ:

- а – электромагнитный момент двигателя и суммарный момент от его роторных контуров;
- б – ток двигателя и суммарный ток от контуров ротора;
- в – моменты от роторных контуров;
- г – токи роторных контуров

Исходя из анализа расчетных зависимостей резистивного пуска СД при кратности добавочного сопротивления  $R_D = 4R_f$ , представленных на рис. 4, следует, что момент создаваемый обмоткой возбуждения в начале пуска двигателя составляет 0,3 номинального и возрастает до 0,8. Ток, протекающий в этой обмотке, увеличивается в процессе разгона с 0,55 до 1,3 от номинального. Наибольший момент, порядка 1,2 номинального, создает поперечный контур демпферной обмотки, он же несет и основную токовую нагрузку – трехкратную по отношению к номинальному значению.

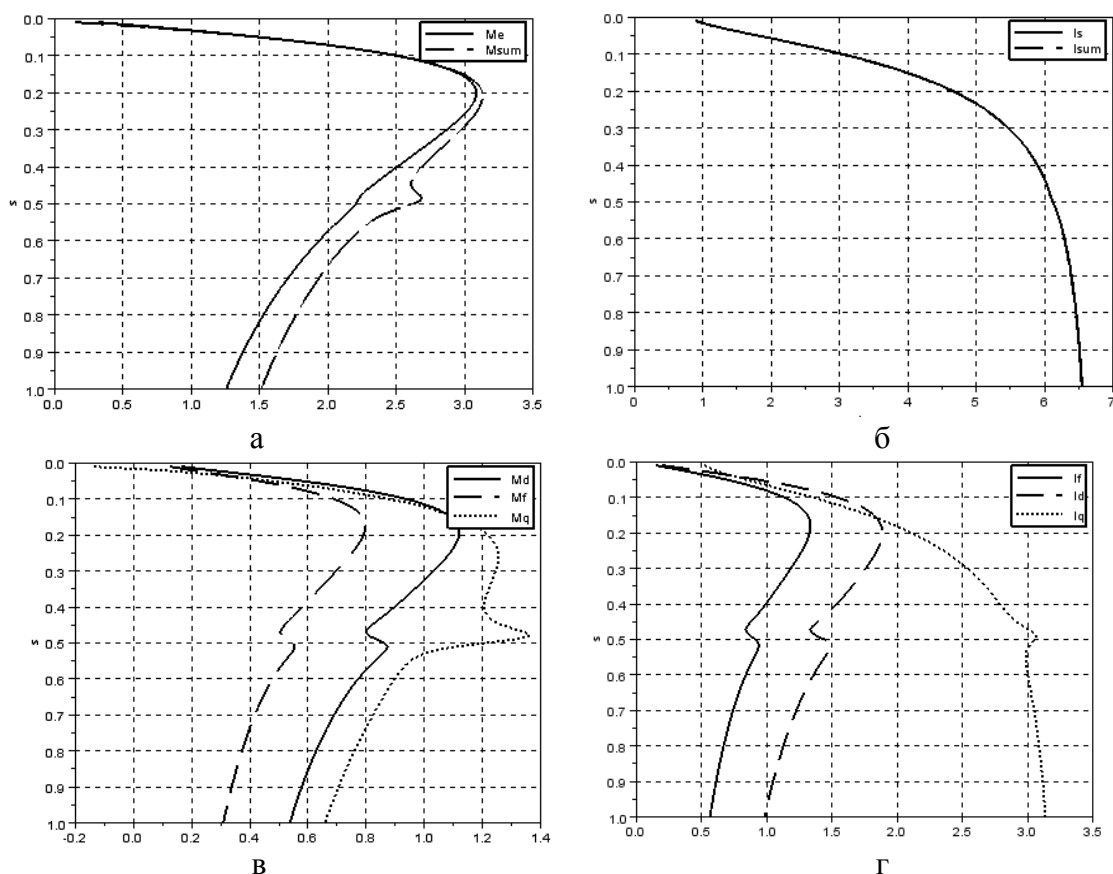


Рис. 4. Пусковые характеристики синхронного двигателя при пуске с четырехкратным добавочным резистором:

а – электромагнитный момент двигателя и суммарный момент от его роторных контуров; б – ток двигателя и суммарный ток от контуров ротора; в – моменты от роторных контуров; г – токи роторных контуров

## ВЫВОДЫ

Как следует из анализа полученных пусковых характеристик, включение ЕНЭ способствует перераспределению токов в продольных контурах схемы замещения, увеличивая ток, протекающий через обмотку возбуждения, и уменьшая токовую нагрузку на продольный контур пусковой обмотки. При этом ЕНЭ на поперечный демпферный контур влияния не оказывает. Таким образом, применение емкостных накопителей энергии позволяет существенно увеличить момент обмотки возбуждения в режиме пуска СД, уменьшая при этом токовую нагрузку на демпферную обмотку и, следовательно, увеличивая срок ее службы.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Черный А. П. Пусковые системы нерегулируемых электроприводов / А. П. Черный, А. И. Гладырь, Ю. Г. Осадчук, И. Р. Курбанов, А. Н. Вошун // Пусковые системы нерегулируемых электроприводов : монография. – Кременчуг : ЧП А. В. Щербатых, 2006. – 280 с.
2. Низимов В. Б. Влияние емкостных накопителей энергии на статические характеристики асинхронного пуска синхронных двигателей / В. Б. Низимов, Р. В. Низимов // Науковий вісник НГА України. – Дніпропетровськ : НГА, 2001 г. – № 2. – С. 74–78.
3. Толмач И. М. Расчет пусковых характеристик синхронных двигателей по схеме замещения / И. М. Толмач // Электричество. – 1956. – № 1. – С. 32–36.
4. Сивокобыленко В. Ф. Анализ пусковых характеристик синхронных двигателей при подключении емкости к обмотке возбуждения / В. Ф. Сивокобыленко, Эль Кадиуи Эль Идрисси Мохаммед // Электротехника. – 1997. – № 6. – С. 26–28.