

РАБОТА СРРД С КОРОТКОЗАМКНУТОЙ ОБМОТКОЙ НА РОТОРЕ В СИНХРОННОМ УСТАНОВИВШЕМСЯ РЕЖИМЕ

А. А. БУЙМОВ, Г. М. ГОЛОШЕВСКИЙ, Е. В. КОНОНЕНКО

(Представлена научным семинаром кафедр электрических машин и аппаратов
и общей электротехники)

Синхронный режим является основным эксплуатационным режимом работы синхронного реактивного редукторного двигателя СРРД и поэтому синхронному режиму в опубликованных статьях уделяется большое внимание [1, 2, 3]. Однако эти исследования в основном посвящены расчету рабочих характеристик двигателя в синхронном режиме, построению векторных и круговых диаграмм, составлению схем замещения. Такой же вопрос, как влияние параметров на момент вращения СРРД остается малоизученным, а между тем присутствие короткозамкнутой клетки в пазах ротора, как средства для уверенного пуска двигателя, делает задачу исследования этого влияния еще более сложной и актуальной.

В отечественной литературе встречаются работы, посвященные составлению уравнений синхронного реактивного редукторного двигателя, которые учитывают наличие обмотки на роторе [5, 4]. В этих статьях выведены уравнения СРРД, которые являются универсальными в том смысле, что при известных напряжениях и моменте сопротивления они полностью определяют поведение СРРД с короткозамкнутой обмоткой на роторе и могут использоваться при исследовании как переходных, так и установившихся режимов работы.

Уравнения равновесия напряжений установившегося синхронного режима могут быть получены из основных уравнений, выведенных в [4], подстановкой $p=0$. Согласно принятым в [4] допущениям учитываются только основные гармонические токов и напряжений фазовых обмоток статора. Поэтому их мгновенные величины можно заменить действующими.

С учетом короткозамкнутой обмотки на роторе система уравнений равновесия напряжений для установившегося синхронного режима, то есть при $k_p \omega_p = 1$, принимает вид

$$\begin{aligned} -U \sin \theta &= -\psi_q + r I_d; \\ U \cos \theta &= \psi_d + r I_q; \\ 0 &= -\psi_{rq} \cdot n + r_r \cdot I_{rd}; \\ 0 &= \psi_{rd} \cdot n + r_r \cdot I_{rq}, \end{aligned} \quad (1)$$

где

$n = \frac{k_p - 1}{k_p}$ — скорость вращения магнитного поля относительно ротора в относительных единицах.

Подставляя значения потокосцеплений

$$\begin{aligned}\psi_d &= x_d \cdot I_d + x_{ad} \cdot I_{rd}; \\ \psi_q &= x_q \cdot I_q + x_{aq} \cdot I_{rq}; \\ \psi_{rd} &= x_{ad} \cdot I_d + x_{rd} \cdot I_{rd}; \\ \psi_{rq} &= x_{aq} \cdot I_q + x_{rq} \cdot I_{rq}\end{aligned}\quad (2)$$

в уравнения (1) и решая их совместно, получим выражение токов для всех обмоток двигателя:

$$\begin{aligned}I_d &= \frac{x_q \cos \theta - r \sin \theta}{x_d x_q + r^2} U - \frac{x_{ad} \cdot x_q \cdot I_{rd} - x_{aq} \cdot r \cdot I_{rq}}{x_d \cdot x_q + r^2}; \\ I_q &= \frac{x_d \sin \theta + r \cos \theta}{x_d x_q + r^2} U - \frac{x_d \cdot x_{aq} \cdot I_{rq} + x_{ad} \cdot r \cdot I_{rd}}{x_d x_q + r^2}; \\ I_{rq} &= \frac{nU}{A^2 - BC} \cdot \frac{Ax_{aq}(r \cos \theta + x_d \sin \theta) - Bx_{ad}(x_q \cos \theta - r \sin \theta)}{x_d x_q - r^2}; \\ I_{rd} &= \frac{nU}{A^2 - BC} \cdot \frac{Cx_{aq}(r \cos \theta + x_d \sin \theta) - A \cdot x_{ad}(x_q \cos \theta - r \sin \theta)}{x_d x_q + r^2}\end{aligned}\quad (3)$$

где

$$\begin{aligned}A &= \frac{n \cdot x_{ad} \cdot x_{aq} \cdot r}{x_d x_q + r^2} + r r; \\ B &= \frac{-x_d \cdot x_{aq}^2 \cdot n}{x_d \cdot x_q + r^2} + x_{rq} \cdot n; \\ C &= \frac{x_q \cdot x_{ad}^2 \cdot n}{x_d x_q + r^2} - n \cdot x_{rd}.\end{aligned}$$

Выражения для токов статора I_d, I_q состоят из двух составляющих. Одной составляющей являются токи СРРД без обмотки на роторе, а другая составляющая обусловлена параметрами двигателя и токами роторных контуров. Токи роторных контуров I_{rd}, I_{rq} являются сложной функцией напряжения, угла нагрузки и параметров двигателя. При увеличении активного сопротивления R_r величина токов ротора уменьшается и при $R_r = \infty$, что означает отсутствие роторных контуров, оба тока равны нулю.

Выражение для электромагнитного момента

$$M = (\psi_d \cdot I_q - I_d \cdot \psi_q) - \frac{k_p - 1}{k_p} (I_{rd} \psi_{rq} - I_{rq} \psi_{rd}). \quad (4)$$

после подстановки значений потокосцеплений (2) принимает вид

$$\begin{aligned}M &= (x_d - x_q) I_d I_q + (x_{ad} - n x_{aq}) I_{rd} \cdot I_q + \\ &+ (n x_{ad} - x_{aq}) I_d I_{rq} + n (x_{rd} - x_{rq}) I_{rd} I_{rq}.\end{aligned}\quad (5)$$

Подставляя значение токов I_d, I_q, I_{rd}, I_{rq} в (5), после преобразований, достаточно громоздких для того, чтобы их не помещать в этой статье, выражение для электромагнитного момента вращения можно представить в виде

$$M = M_m \sin(2\theta + \nu_1) + M_n. \quad (6)$$

Из выражения (6) видно, что электромагнитный момент при синхронной скорости вращения ротора можно представить как сумму двух составляющих. Первая составляющая момента представляет собой переменную величину в зависимости от угла нагрузки θ , вторая — постоянную, не зависящую от нагрузки. Амплитуда переменной составляющей момента M_m и постоянная составляющая M_n при наличии на роторе короткозамкнутой обмотки представляют собой сложные зависимости напряжения и параметров двигателя. Проанализировать эти составляющие момента в общем виде невозможно и поэтому при исследовании за основу был принят численный метод анализа.

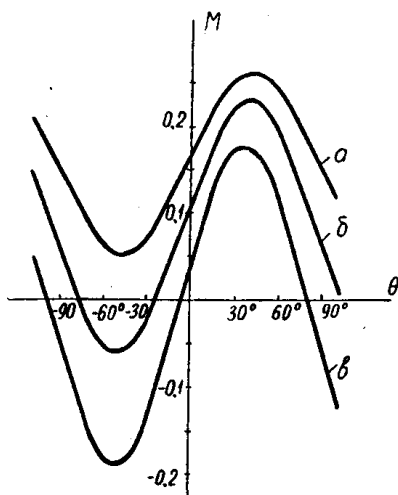


Рис. 1. Зависимость момента СРРД от θ при $\frac{x_d}{x_q} = 1,5$, $r = 0,1$ и различных r_r ; а — $r_r = 0,3$; б — $r_r = 0,7$; в — $r_r = \infty$.

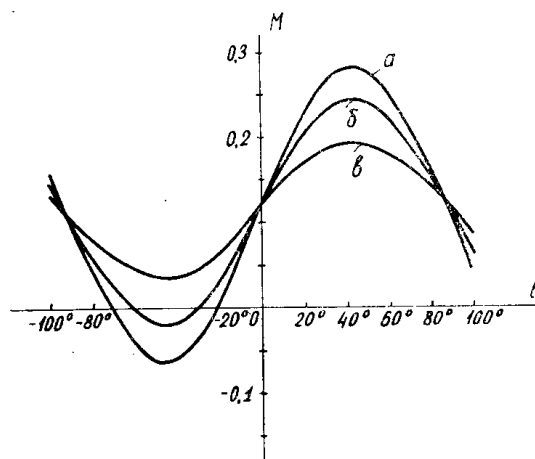


Рис. 2. Зависимость момента СРРД от θ при $r = 0,1$; $r_r = 0,5$ и различных $\frac{x_d}{x_q}$; а — $\frac{x_d}{x_q} = 1,75$; б — $\frac{x_d}{x_q} = 1,5$; в — $\frac{x_d}{x_q} = 1,25$.

Постоянную составляющую в выражении электромагнитного момента (6) назовем асинхронной составляющей момента, так как она аналогична моменту нормального асинхронного короткозамкнутого двигателя и обязана своим возникновением в основном взаимодействию магнитного поля статора с токами I_{rd}, I_{rq} , протекающими в эквивалентных обмотках ротора. Эта обмотка на роторе оказывает значительное влияние на энергетические показатели СРРД. Если в машине без обмотки на роторе вся электромагнитная мощность, передаваемая через воздушный зазор, расходуется на создание электромагнитного момента (согласно допущениям потери в стали не учитываются), то при наличии обмотки ротора часть энергии расходуется на потери в ее активном сопротивлении.

Расчеты, приведенные для установившегося синхронного режима работы СРРД с пусковой обмоткой на роторе по уравнениям (3), (4), показывают, что активное сопротивление обмотки ротора оказывает су-

щественное влияние на величину результирующего электромагнитного момента вращения. На рис. 1 представлены кривые момента, рассчитанные для 3-х случаев: без обмотки ротора ($r_r = \infty$) и при сопротивлении обмотки $r_r = 0,7$ и $r_r = 0,3$.

Электромагнитный момент при $r_r = 0,7$ изменяется от максимального положительного значения до максимального отрицательного в генераторном режиме. И если увеличение максимального момента в двигательном режиме целесообразно для увеличения перегрузочной способности машины и улучшения ее использования, то уменьшение момента в генераторном режиме отрицательно сказывается на динамическом свойстве двигателя.

Увеличение асинхронной составляющей момента путем уменьшения активного сопротивления обмотки ротора возможно лишь до определенного предела. Это видно из кривой момента при $r_r = 0,3$ (рис. 1, а). При $r_r = 0,3$ кривая момента не имеет отрицательных значений при данной скорости вращения ротора, а это значит, что на холостом ходу для СРРД с такими параметрами невозможен синхронный режим работы. Пуск и синхронный режим в этом случае возможны только при наличии статического тормозного момента.

На рис. 2 представлены зависимости результирующего электромагнитного момента от угла θ при различных значениях отношения синхронных индуктивных сопротивлений по осям d, q . Так же, как и для двигателей без пусковой обмотки, это отношение характеризует геометрию зубцовой зоны двигателя. Из приведенных кривых следует, что увеличение $\frac{x_d}{x_q}$ позволяет повысить максимальный момент в двигательном

режиме, а также уменьшить величину момента при отрицательных значениях угла θ . Большие значения отрицательного момента в свою очередь позволяют применить пусковую клетку с меньшей величиной активного сопротивления, а следовательно, и с большей величиной асинхронного момента. Другими словами, увеличение отношения $\frac{x_d}{x_q}$ в любом случае положительно влияет на характеристики машины.

Анализ приведенных кривых момента, рассчитанных для различных параметров (рис. 1, 2), показывает, что изменение параметров не влияет на форму кривой момента, она во всех случаях синусоидальна, а изменяется только амплитуда переменной составляющей момента и величина постоянной составляющей.

Для синхронного режима амплитуду переменной составляющей момента всегда необходимо увеличивать, так как она в большей степени определяет основные показатели машины. Величина постоянной составляющей результирующего момента должна быть достаточной для ускорения ротора в процессе пуска, но меньше амплитуды переменной составляющей результирующего момента, так как в противном случае двигатель не сможет работать в синхронном режиме вхолостую.

На рис. 3 представлены зависимости амплитуды переменной составляющей результирующего момента, рассчитанные для отношения $\frac{x_d}{x_q} = 1,5$ при изменении величины активного сопротивления обмотки ротора. Как видно из кривых, увеличение r от 0,6 до 2,0 сопровождается увеличением амплитуды от 0,08 до 0,151 при активном сопротивлении обмотки статора 0,1. Физически это объясняется демпфирующим действием обмотки ротора на магнитное поле статора и степень демпфирования увеличивается при уменьшении активного сопротивления ротора.

Таким образом, применяя пусковую короткозамкнутую обмотку на роторе, мы уменьшаем величину переменной составляющей момента. С уменьшением активного сопротивления роторной обмотки ее влияние усиливается.

Величина постоянной составляющей момента с увеличением активного сопротивления обмотки ротора уменьшается (рис. 4). Причем из представленных расчетных кривых момента видно, что влияние активного сопротивления ротора значительно сильнее проявляется в области малых значений r_r , намного слабее от $r_r = 1,2$ и выше.

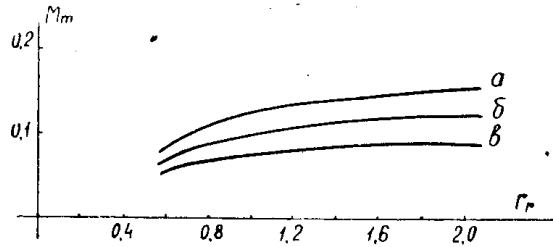


Рис. 3. Зависимость амплитуды переменной составляющей момента от r_r при $\frac{x_d}{x_q} = 1,5$ и при различных r , а — $r = 0,1$; б — $r = 0,2$; в — $r = 0,3$

Активное сопротивление обмотки статора оказывает несколько меньшее влияние на переменную составляющую момента. Из рис. 5 видно, что увеличение сопротивления от $r = 0,1$ до $r = 0,2$ для отношения $\frac{x_d}{x_q} = 1,5$ снижает амплитуду переменной составляющей на 20%.

Характер влияния отношения синхронных индуктивных сопротивлений по продольной и поперечной осям на амплитуду переменной со-

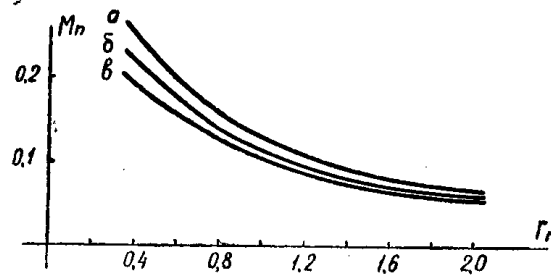


Рис. 4. Зависимость постоянной составляющей момента от r_r при $r = 0,1$ и при различных $\frac{x_d}{x_q}$; а — $\frac{x_d}{x_q} = 1,35$; б — $\frac{x_d}{x_q} = 1,5$; в — $\frac{x_d}{x_q} = 1,75$

ставляющей результирующего момента показан на рис. 5. Кривые а, б, с рассчитаны при различных значениях сопротивления обмотки статора в зависимости от величины отношения $\frac{x_d}{x_q}$. Из этих кривых видно, что с

увеличением отношения $\frac{x_d}{x_q}$ величина амплитуды момента значительно возрастает. На величину же постоянной составляющей отношение $\frac{x_d}{x_q}$ оказывает противоположное действие.

Из анализа приведенных расчетных кривых следует, что амплитуда переменной составляющей результирующего электромагнитного момента в установившемся синхронном режиме работы уменьшается с увеличением активного сопротивления обмотки статора и возрастает при увеличении активного сопротивления обмотки ротора и отношения $\frac{x_d}{x_q}$,

Физически это можно объяснить тем, что с увеличением сопротивления статора уменьшается электромагнитная мощность, передаваемая через воздушный зазор, а следовательно, и электромагнитный момент вращения. Возрастание амплитуды переменной составляющей момента при увеличении r_r связано с тем, что при малых сопротивлениях обмотки ротора степень демпфирования магнитных полей статора больше, что вызывает уменьшение переменной составляющей момента.

Величина постоянной составляющей главным образом зависит от величины активного сопротивления обмотки ротора. Это объясняется

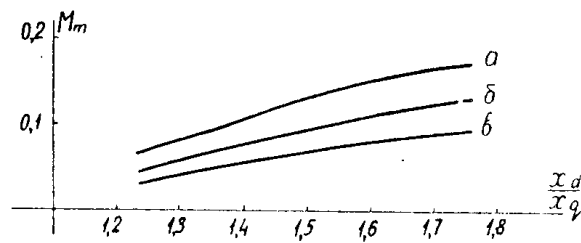


Рис. 5. Зависимость амплитуды переменной составляющей момента от $\frac{x_d}{x_q}$ при $r_r = 0,5$ и при различных r ; а — $r = 0,1$; б — $r = 0,2$; в — $r = 0,3$

тем, что с уменьшением сопротивления увеличивается асинхронный момент, который в основном и определяет величину постоянной составляющей.

Из представленных кривых (рис. 2, 3) видно, что в режиме холостого хода СРРД с обмоткой на роторе работает при отрицательных значениях угла θ . Величина этого угла в режиме холостого хода зависит от соотношения переменной и постоянной составляющих момента. Чем больше величина постоянной составляющей, тем больше значение отрицательного угла θ . С увеличением нагрузки происходит уменьшение θ до 0, а затем снова увеличение в сторону больших положительных значений. При увеличении нагрузки выше $\theta_{кр}$, при котором результирующий момент имеет максимальное значение, ротор двигателя выпадает из синхронизма. Значение момента при $\theta_{кр}$ характеризует перегрузочную способность СРРД.

ЛИТЕРАТУРА

1. П. Ю. К а а с и к. Уравнение для исследования режимов работы тихоходных безредукторных электрических машин. Сб. «Электродвигатели малой мощности», Л., Изд. АН СССР, 1970.

2. Р. П. Л а а с, А. А. Б р ы н ь к о. Общие уравнения и установившийся режим тихоходного синхронного реактивного двигателя. Сб. «Устройства электропитания и электропривода малой мощности», т. 2, М., «Энергия», 1968.

3. А. С. Куракин, Ф. М. Юферов. Особенности проектирования синхронных редукторных двигателей реактивного типа. «Электротехника», 1968, № 4.

4. А. А. Буймов, Е. В. Кононенко. Основные уравнения синхронных реактивных редукторных двигателей. Известия ТПИ, т. 229, 1972.

5. П. Ю. Каасик, Б. В. Сидельников. Метод математического анализа нестационарных режимов субсинхронных реактивных двигателей. Научные труды вузов, Литовская ССР. «Электротехника и автоматика», 1970, № 6.
