

ПУСК СРРД С КОРОТКОЗАМКНУТОЙ ОБМОТКОЙ НА РОТОРЕ

А. А. БУЙМОВ, Б. П. ГАРГАНЕЕВ, Г. М. ГОЛОШЕВСКИЙ, Е. В. КОНОНЕНКО

Для удовлетворения промышленности в электроприводе с низкой скоростью вращения применяются электродвигатели с электромагнитной редуцией скорости. Различаясь по конструкции и по принципу действия, они имеют один общий недостаток — плохие пусковые свойства. Пуск этих двигателей осуществляется с помощью различных отключающихся и неотключающихся, электрических и механических пусковых устройств. Выбор пускового устройства зависит от многих факторов, таких как число обмоток двигателя, направление вращения ротора, вид напряжения и т. д. Основными требованиями, предъявляемыми к пусковым устройствам, являются надежность и простота конструкции и отсутствие скользящих контактов.

Синхронные реактивные редукторные двигатели (СРРД) позволяют применять в качестве пускового устройства короткозамкнутую обмотку на роторе. Применение этой обмотки возможно в двигателях при соотношении зубцов статора и ротора, удовлетворяющем равенству $z_2 = z_1 + 2p$, так как только в этом случае направление вращения ротора и магнитного поля статора совпадают.

Дополнительный момент пускового устройства должен иметь максимальное значение при неподвижном роторе и уменьшается до нуля при синхронной скорости вращения. Однако пусковые устройства, за исключением механических и встроенных пусковых электродвигателей, работают на основной волне магнитного поля и при номинальной синхронной скорости их момент не равен нулю. При этом величина общего электромагнитного момента в синхронном режиме возрастает, а условия синхронизации могут ухудшиться, так как под действием момента от пускового устройства ротор ускоряется и в большинстве случаев начинает вращаться со скоростью, возможной для пускового устройства. Отключение пускового устройства в этом случае необходимо, хотя оно усложняет конструкцию машины и снижает надежность ее работы.

Пусковая короткозамкнутая обмотка ротора может использоваться для улучшения пуска синхронного реактивного редукторного двигателя без отключения ее в синхронном режиме. Изменением величины активного сопротивления обмотки ротора можно получить различные пусковые характеристики. Однако кроме параметров короткозамкнутой обмотки на пуск синхронного реактивного редукторного двигателя оказывают влияние и другие параметры. Поэтому исследование пусковых

режимов работы СРРД целесообразно проводить с помощью полной системы дифференциальных уравнений.

Вывод системы уравнений, которая описывает поведение СРРД с учетом параметров короткозамкнутой обмотки ротора, приведен в литературе [1, 2]. При переменной скорости вращения ротора эта система уравнений нелинейна и исследование переходных электромеханических процессов встречает определенные трудности. Наиболее просто их можно исследовать моделированием на аналоговых вычислительных машинах (АВМ). Применение АВМ требует минимального времени для получения решения и обеспечивает необходимую точность и наглядность процессов, так как интересующие зависимости могут быть получены непосредственно в виде осциллограмм.

Система уравнений СРРД в относительных единицах и в виде, удобном для моделирования, может быть записана так:

$$\begin{aligned}
 p \psi_d &= -U \sin \theta + \psi_q k_p \omega_p - r i_d; \\
 p \psi_q &= U \cos \theta - \psi_d k_p \omega_p - r i_q; \\
 p \psi_{rd} &= (k_p - 1) \omega_p \psi_{rq} - r_r i_{rd}; \\
 p \psi_{rq} &= (k_p - 1) \omega_p \psi_{rd} - r_r i_{rq}; \\
 i_d &= \frac{x_{rd}}{x_d x_{rd} - x_{ad}^2} \psi_d - \frac{x_{ad}}{x_d x_{rd} - x_{ad}^2} \psi_{rd}; \\
 i_q &= \frac{x_{rq}}{x_q x_{rq} - x_{aq}^2} \psi_q - \frac{x_{aq}}{x_q x_{rq} - x_{aq}^2} \psi_{rq}; \\
 i_{rd} &= \frac{x_d}{x_d x_{rd} - x_{ad}^2} \psi_{rd} - \frac{x_{ad}}{x_d x_{rd} - x_{ad}^2} \psi_d; \\
 i_{rq} &= \frac{x_q}{x_q x_{rq} - x_{aq}^2} \psi_{rq} - \frac{x_{aq}}{x_q x_{rq} - x_{aq}^2} \psi_q; \\
 p \omega_p &= \frac{1}{H} (\psi_d i_q - \psi_q i_d) + \frac{1}{H} \cdot \frac{k_p - 1}{k_p} (\psi_{rd} i_{rq} - \psi_{rq} i_{rd}) - \\
 &\quad - \frac{1}{H} k_M \omega_p - \frac{1}{H} M_c; \\
 p \theta &= \omega_1 - k_p \omega_p.
 \end{aligned} \tag{1}$$

Данная система уравнений (1) при заданных параметрах и напряжении U состоит из десяти уравнений и содержит десять переменных $\psi_d, \psi_q, \psi_{rd}, \psi_{rq}, i_d, i_q, i_{rd}, i_{rq}, \omega_p, \theta$. Время t является независимой переменной.

Структурная схема модели, реализующая операции и составленная в соответствии с уравнениями (1), приведена на рис. 1.

Представленная схема модели позволяет исследовать различные режимы работы СРРД и оценивать влияние параметров на переходные процессы в машине. Установкой коэффициентов передачи могут изменяться величины активных сопротивлений обмоток статора и ротора, величины синхронных индуктивных сопротивлений по осям d, q , величина механической постоянной вращающихся масс и другие параметры.

Использование короткозамкнутой обмотки ротора для пуска СРРД возможно в том случае, когда кривая асинхронного момента имеет специальную форму. Это значит, что величина максимального асинхрон-

ного момента должна быть смещенной в сторону отрицательных значений скорости вращения ротора. В этом случае асинхронный момент будет наибольшим только в начале пуска и по мере возрастания скорости ротора уменьшается. Необходимость уменьшения асинхронного момента вызвана тем, что при достижении ротором синхронной скорости величина переменной составляющей момента должна быть больше постоянной составляющей. Иначе ротор под действием асинхронного момента будет вращаться с обычной для асинхронного двигателя скоростью.

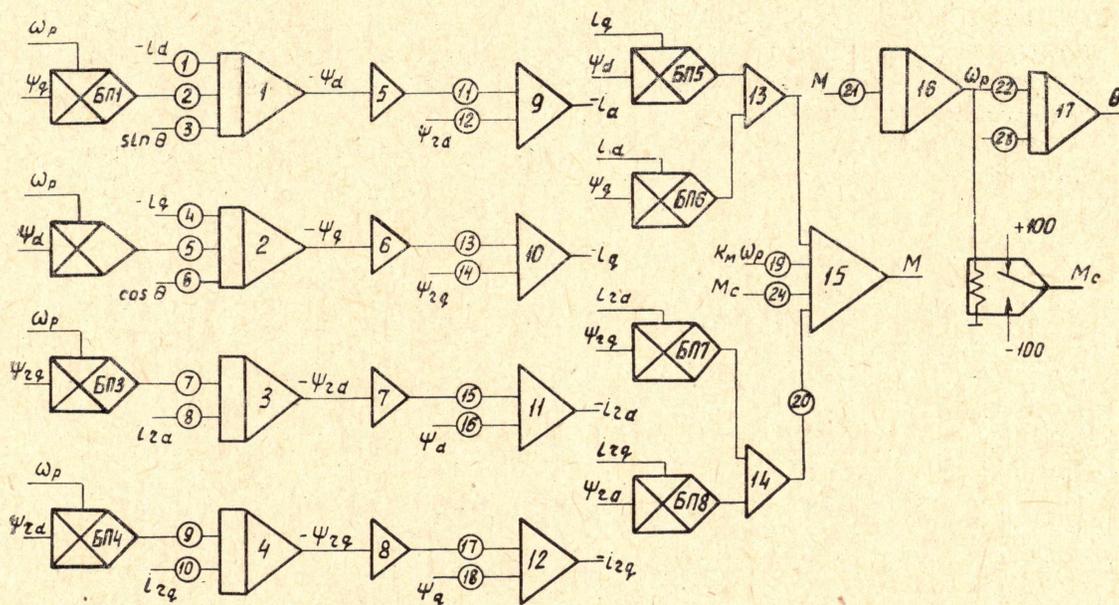


Рис. 1. Структурная схема модели СРРД

Из теории асинхронных двигателей известно, что получить механическую характеристику с большим значением критического скольжения можно при увеличении активного сопротивления обмотки ротора. Поэтому для пуска СРРД короткозамкнутая обмотка ротора изготавливается из материалов с большим удельным сопротивлением или имеет малое сечение стержней.

Пренебрегая электромагнитными переходными процессами, момент вращения СРРД с обмоткой на роторе можно представить в виде двух составляющих

$$M = M_m \sin 2(\theta - \theta_0) + M_n. \quad (2)$$

Первая составляющая момента представляет собой переменную величину, зависящую от угла θ , который определяет в установившемся синхронном режиме величину нагрузки, а в других режимах — положение оси q относительно вектора напряжения. Амплитуда переменной составляющей M_m в основном зависит от величины синхронного момента двигателя без обмотки на роторе. Величина постоянной составляющей M_n определяется параметрами короткозамкнутой обмотки ротора и представляет собой асинхронный момент. Поэтому, несмотря на то, что обмотка ротора оказывает влияние на переменную составляющую момента, а активное сопротивление обмотки статора — на постоянную составляющую, для упрощения терминологии условимся называть в дальнейшем переменную составляющую — синхронным моментом, а постоянную

ную — асинхронным. И при анализе влияния параметров двигателя на пуск будет рассматриваться вопрос, как влияют те или иные параметры на величину синхронного и асинхронного момента.

Переменная составляющая момента СРРД при неподвижном роторе изменяется с двойной частотой питающего напряжения, как и в обычных синхронных реактивных двигателях. По мере увеличения скорости ротора частота пульсаций момента уменьшается и становится равной нулю при синхронной скорости вращения ротора. Увеличение скорости вращения ротора выше синхронной сопровождается возрастанием частоты пульсаций момента.

Постоянная составляющая момента с увеличением скорости уменьшается и становится равной нулю при скорости ротора, равной скорости вращения магнитного поля (если не учитывать влияние активного сопротивления обмотки статора).

Исследование влияния параметров на пуск СРРД дает представление о количественных и качественных изменениях процесса пуска. Ка-

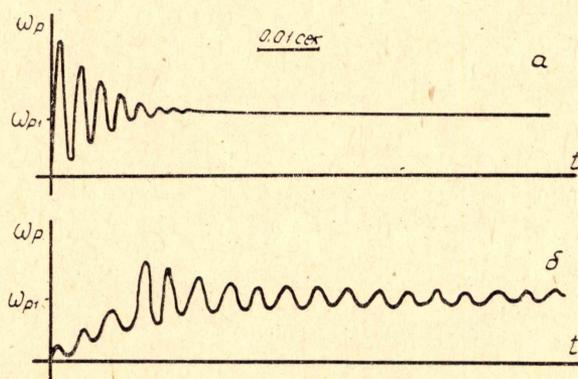


Рис. 2. Расчетные осциллограммы пуска СРРД при $H=5$ эл. сек, $\frac{x_d}{x_q}=1,4$, $a-r_r=3,6$, $б-r_r=7$

чество пуска следует оценивать временем, за которое ротор достигает синхронной скорости, возможностью втягивания ротора в синхронизм и длительностью затухания колебаний скорости вращения ротора после втягивания в синхронизм. При исследовании влияния параметров на процесс пуска в большом диапазоне изменялись активные сопротивления обмоток статора и ротора.

Анализ расчетных и экспериментальных осциллограмм показывает, что изменение величины активного сопротивления обмотки статора в реальных пределах практически не оказывает влияния на время ускорения ротора до синхронной скорости и на втягивание ротора в синхронизм. Длительность затухания колебаний скорости после втягивания ротора в синхронизм с увеличением активного сопротивления обмотки статора возрастает.

Активное сопротивление обмотки ротора оказывает значительное влияние на процесс пуска СРРД. При малых значениях сопротивления обмотки ротора увеличивается асинхронный момент двигателя и процесс пуска протекает как у обычного асинхронного двигателя. Действие синхронного момента проявляется лишь в том, что в кривой момента и скорости появляются пульсации.

Увеличение активного сопротивления обмотки ротора сопровождается уменьшением асинхронного момента и становится возможным втя-

гивание ротора СРРД в синхронизм. На рис. 2 представлены расчетные осциллограммы пуска СРРД, а на рис. 3— экспериментальные. Из этих осциллограмм можно сделать вывод, что с увеличением активного сопротивления обмотки ротора возрастает время, за которое ротор достигает подсинхронной скорости, а также длительность затухания колебаний скорости после втягивания ротора в синхронизм.

Процесс втягивания ротора в синхронизм накладывает основное ограничение на уменьшение активного сопротивления обмотки ротора, а следовательно, и на увеличение асинхронного момента. Для надежного

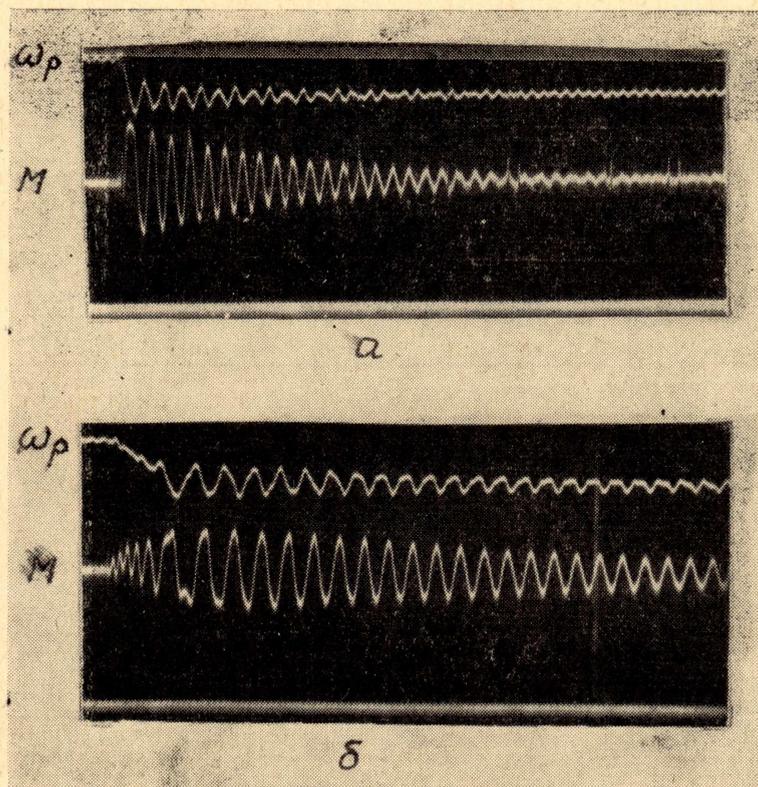


Рис. 3. Экспериментальные осциллограммы пуска СРРД при $H=10$ эл. сек, $\frac{x_d}{x_q}=1,4$, а — $r_r=5$, б — $r_r=10$

пуска двигателя на холостом ходу активное сопротивление обмотки ротора должно быть увеличено в 5—10 раз по сравнению с допустимыми значениями в установившемся синхронном режиме при равных прочих параметрах [3].

Работа в переходных режимах и пуск СРРД существенно зависят от величины момента инерции H (или механической постоянной вращающихся масс). Величина ее определяется как конструкцией самого двигателя, так и приводимым механизмом. Из расчетных и экспериментальных осциллограмм (рис. 4, 5) видно, что при увеличении H возрастает время ускорения ротора до синхронной скорости. Это можно объяснить тем, что для ускорения ротора с возросшими маховыми массами до синхронной скорости требуется больше энергии. При постоянной мощности время ускорения увеличивается.

С увеличением механической постоянной вращающихся масс втягивание ротора в синхронизм может стать невозможным, и он разгоняется до установившейся асинхронной скорости. Это вызвано тем, что с приближением скорости ротора к синхронной на ротор, кроме моментов нагрузки и трения, действуют переменная и постоянная составляющие электромагнитного момента. Ротор в этом случае ускоряется и создается избыточный динамический момент, пропорциональный H и ускорению ротора $\frac{d\omega_p}{dt}$. При $\Theta=0$ переменная составляющая момента также равна нулю. Однако динамический момент и

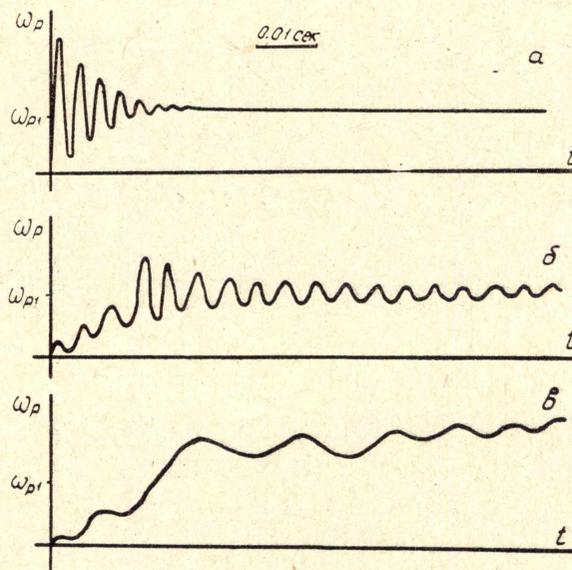


Рис. 4. Расчетные осциллограммы пуска СРРД при $r_r = 4$, $\frac{x_d}{x_q} = 1,4$, а — $H = 5$ эл. сек, б — $H = 15$ эл. сек, в — $H = 25$ эл. сек

постоянная составляющая электромагнитного момента остаются положительными и продолжают действовать на ротор ускоряющим образом. Скорость ротора при этом превышает синхронную. Угол Θ начинает изменяться от нуля в сторону отрицательных значений и переменная составляющая момента становится также отрицательной. Под действием отрицательного момента скорость ротора понижается. Если при отрицательных значениях угла Θ скорость не уменьшается ниже синхронной, то ротор не втягивается в синхронизм и вращается с асинхронной скоростью. При понижении скорости до синхронной или ниже ротор втягивается в синхронизм и процесс пуска заканчивается колебаниями скорости относительно синхронной.

Длительность затухания колебаний скорости ротора после втягивания в синхронизм увеличивается с ростом механической постоянной вращающихся масс. Частота колебаний при этом уменьшается.

Многочисленные расчеты и эксперименты показывают, что короткозамкнутая обмотка ротора не является универсальным пусковым средством СРРД. Увеличение пускового асинхронного момента с помощью уменьшения активного сопротивления обмотки ротора до $r_r = 10-15$ улучшает пуск двигателя при моменте сопротивления на валу, равном

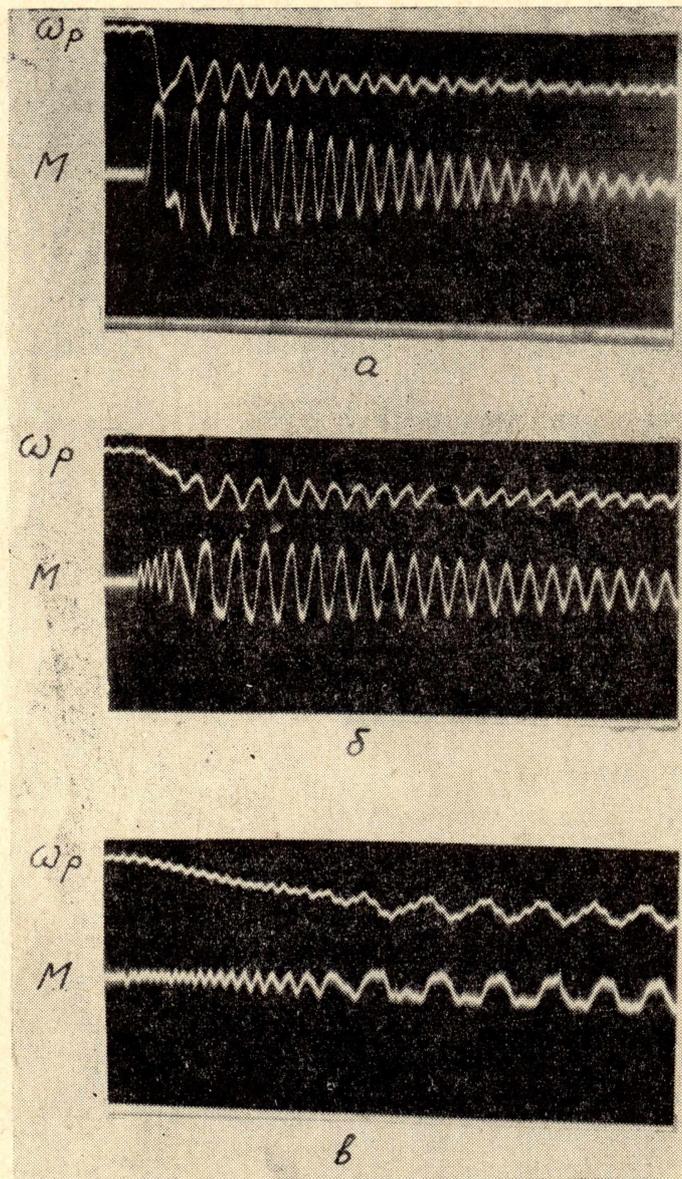


Рис. 5. Экспериментальные осциллограммы пуска СРРД при $r_r=10$, $\frac{x_d}{x_q}=1,5$, а — $H=5$ эл. сек, б — $H=7$ эл. сек, в — $H=10$ эл. сек

40—50% от номинального. С дальнейшим уменьшением сопротивления обмотки ротора улучшается пуск при больших значениях момента нагрузки, но при этом становится невозможным пуск на холостом ходу и при малых нагрузках.

ЛИТЕРАТУРА

1. П. Ю. Каасик, Б. В. Сидельников. Метод математического анализа нестационарных режимов субсинхронных реактивных двигателей. Тр. вузов Литовской ССР, «Электроника и автоматика», VI, 1970.

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

3. А. А. Буймов, Г. М. Голошевский, Е. В. Кононенко. Работа СРРД с короткозамкнутой обмоткой на роторе в синхронном установившемся режиме. Настоящий сборник.
