

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ НА ПУСКОВЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СИНХРОННЫХ РЕАКТИВНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Е. В. КОНОНЕНКО

(Представлена научным семинаром кафедр электрических машин и общей электротехники)

При проектировании синхронных реактивных двигателей (СРД), удовлетворяющих заданным условиям пуска, необходимо знать влияние различных параметров на работу двигателей. В настоящей статье при исследовании влияния параметров на пусковые характеристики расчеты проводились по методике, изложенной в [1]. Под пусковыми характеристиками подразумеваются зависимости среднего момента M_c и тока статора от скольжения. Исследовано также влияние параметров и скорости вращения на амплитуду пульсирующего момента. В целях сокращения времени все расчеты выполнялись на цифровой вычислительной машине «Проминь».

Проведенные исследования показали, что вид пусковых характеристик СРД в основном определяется величиной и отношением установившихся значений операторных сопротивлений по осям d и q [$x_d(js)$ и $x_q(js)$]. Наличие магнитной несимметрии приводит к тому, что кривая M_c , в отличие от асинхронных двигателей, проходит нулевое значение при $s > 0$, а при синхронной скорости вращения $M_{co} \neq 0$ (рис. 1).

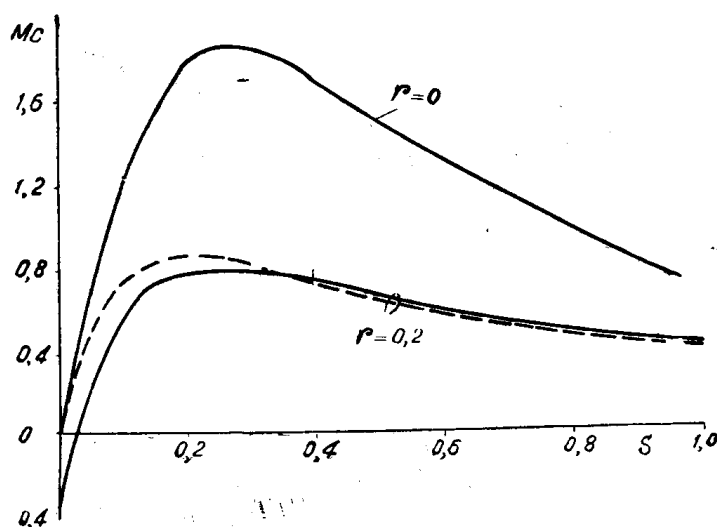


Рис. 1. Механические характеристики СРД, имеющего следующие параметры: $x_d = 2,3$; $x_q = 0,45$; $r = 0,2$; $x_q'' = 0,2$; $T_d = 40$; $T_q = 10$. Пунктирная кривая рассчитана приближенным методом.

Анализируя уравнение для среднего момента СРД, можно найти, что при синхронной скорости

$$M_{co} = -\frac{1}{2} \frac{r(x_d - x_q)^2}{(r^2 + x_d x_q)^2} U^2.$$

Из этого уравнения следует, что M_{co} отрицателен, и его величина зависит от степени магнитной несимметрии, определяемой разностью синхронных индуктивных сопротивлений по осям d и q , и активного сопротивления обмотки статора r . В машинах с неявнополюсным ротором ($x_d = x_q$) $M_{co} = 0$, независимо от величины r .

Рассмотренные свойства пусковых характеристик оказывают существенное влияние на пуск СРД, особенно на завершающем этапе — при втягивании в синхронизм. Применение же приближенных методов расчета пусковых характеристик, основанных на раздельном рассмотрении явлений по осям d и q , не позволяет выявить этих особенностей. На рис. 1 приведены для сравнения механические характеристики СРД, рассчитанные точным [1] и приближенным методами. Формулы для расчета пусковых характеристик приближенным методом приведены в приложении. Сравнивая кривые момента M_c , видим, что пренебрежение активным сопротивлением обмотки статора в рассматриваемом примере приводит к недопустимо большим погрешностям при всех значениях скольжения. Приближенный метод при скольжениях $s = 0,3 \div 1,0$ дает результаты, удовлетворительно совпадающие с точным методом, несмотря на то, что r сравнительно велико. Объясняется это тем, что при принятых значениях параметров операторные сопротивления СРД по осям d и q при $s \geq 0,3$ практически равны между собой, как это видно из рис. 2. В случае, когда $x_d(js) = x_q(js)$, приближенный метод ста-

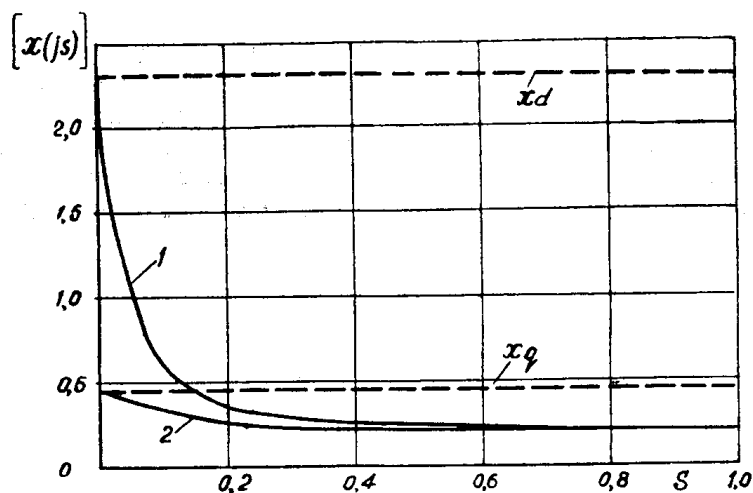


Рис. 2. Зависимости модулей операторных сопротивлений СРД от скольжения. Кривая 1 — для продольной оси; кривая 2 — для поперечной оси.

новится точным. При значениях скольжения меньше 0,3 различие в операторных сопротивлениях по осям d и q увеличивается, что приводит к расхождению результатов расчета момента M_c точным и приближенным методами. Разница в результатах расчета M_c зависит и от величины активного сопротивления обмотки статора. На рис. 3 приведены зависимости момента M_c от r , рассчитанные для двух значений скольжения (0,02 и 0,05). Сравнивая кривые M_c , видим, что применение приближенного метода для расчета пусковых характеристик СРД в области малых скольжений приводит к значительным ошибкам. Сравнение действующих значений тока статора показало, что прибли-

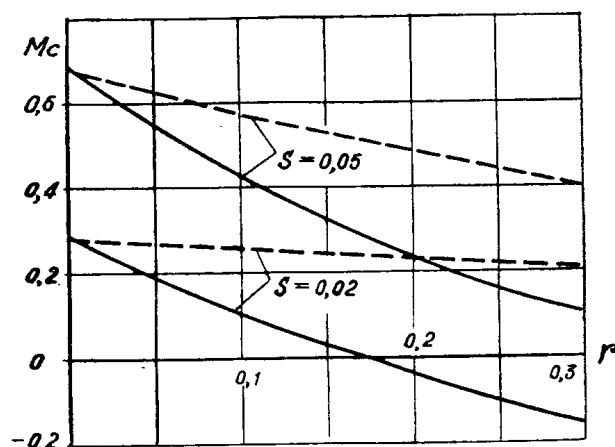


Рис. 3. Зависимости момента M_c от активного сопротивления обмотки статора, рассчитанные точным (сплошные линии) и приближенным (пунктирные линии) методами.

женный метод в рассматриваемом случае дает результаты, практически совпадающие с точным методом во всем диапазоне изменения скольжения.

Кривые изменения амплитуды пульсирующего момента M_n и тока статора для СРД, имеющего такие же, как и в предыдущих случаях, параметры, в зависимости от скольжения и активного сопротивления обмотки статора приведены на рис. 4. Из приведенных данных видно, что амплитуда пульсирующего момента при синхронной скорости вращения практически не зависит от величины активного сопротивления обмотки статора.

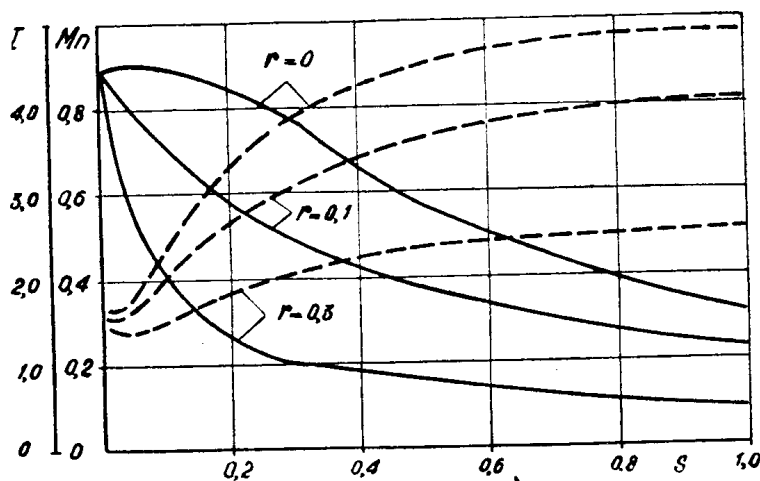


Рис. 4. Кривые изменения амплитуды пульсирующего момента (сплошные линии) и тока статора (пунктирные линии) от скольжения.

Вид механических характеристик зависит от параметров роторной обмотки. Для подтверждения этого на рис. 5 приведено семейство характеристик, рассчитанных для СРД, имеющих параметры: $x_d=2,3$; $x_q=0,45$; $x''_d=0,2$; $x''_q=0,2$; $\gamma=0,06$; $T_d=0,25 T_d$. Из приведенных данных видно, что при отсутствии на роторе пусковых обмоток ($T_d=0$) СРД не может развить скорости более полусинхронной. При увеличении постоянных времени обмотки ротора пусковые характеристики двигателя улучшаются, так как провал в кривой момента при скоро-

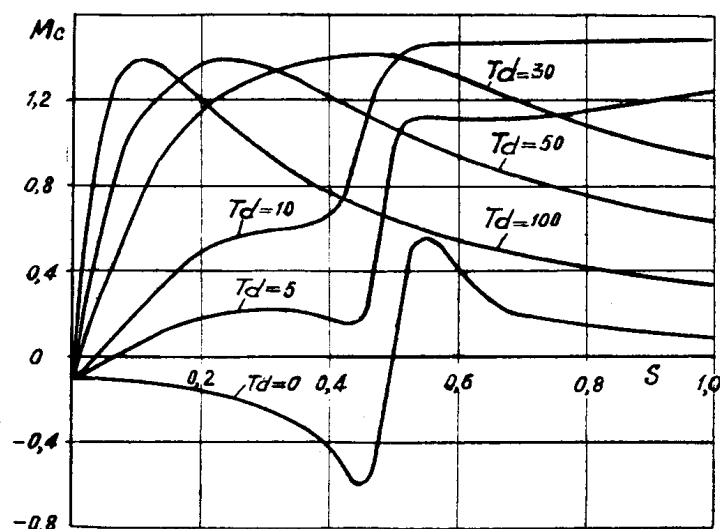


Рис. 5. Влияние параметров роторной обмотки на механические характеристики СРД.

сти вращения более полусинхронной становится меньше. При $T_d \geq 30$ провала в механической характеристике не обнаруживается. Объясняется это тем, что при увеличении постоянных времени обмотки ротора разница между операторными сопротивлениями по осям d и q в асинхронном режиме уменьшается.

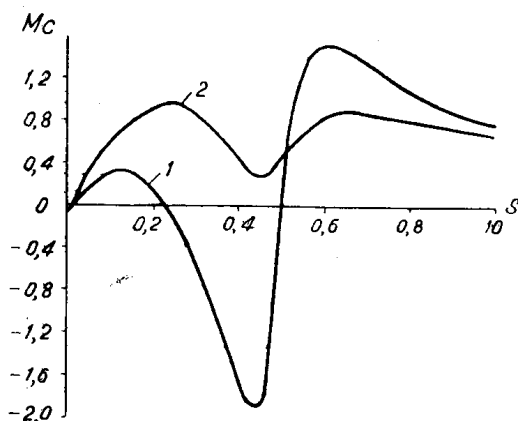


Рис. 6. Механические характеристики СРД, имеющих следующие параметры $x_d = 2,3$; $x_q = 0,45$; $x_d'' = 0,2$; $x_q'' = 0,2$; $r = 0,06$; Кривая 1 — $T_d = 0$, $T_q = 10$; кривая 2 — $T_d = 40$, $T_q = 0$.

Исследования показали также, что обмотки по продольной и поперечной осям ротора оказывают различные влияния на пусковые характеристики. На рис. 6 приведены механические характеристики СРД, имеющих на роторе обмотки только по продольной или по поперечной осям. Из кривых видно, что при наличии на роторе обмотки только по поперечной оси (кривая 1) момент M_c при скольжениях, лежащих в пределах $0,23 \div 0,5$, отрицателен. Если же на роторе имеется обмотка только по продольной оси (кривая 2), в зоне полусинхронной скорости механическая характеристика имеет провал, но момент M_c остается положительным. Объясняется это тем, что в первом случае разница операторных сопротивлений по осям d и q значительна при любых значениях скольжения, в то время как для второго случая эта разница при $s \geq 0,1$ значительно меньше, как это следует из рис. 2.

Исследования показывают также, что активное сопротивление обмотки статора оказывает значительно меньшее влияние на величину провала в кривой момента, чем постоянные времени обмотки ротора, как это следует из сравнения рис. 7, а и б.

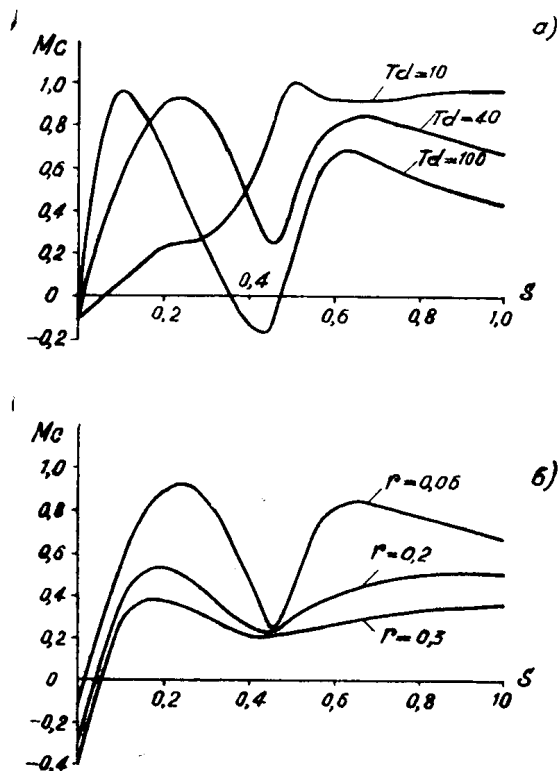


Рис. 7. Механические характеристики СРД, имеющих параметры: $x_d = 2,3$; $x_q = 0,45$; $x_d'' = 0,2$; $x_q'' = 0,2$; $T_q = 0$.
 а) $r = 0,06$; $T_d = 10$; 40; 100.
 б) $T_d = 40$; $r = 0,06$; 0,2; 0,3.

Сопротивление рассеяния обмоток ротора и величина воздушного зазора оказывают на пусковые характеристики СРД такое же влияние, как в асинхронном двигателе.

Выводы

Проведенные исследования показали, что вид пусковых характеристик СРД определяется в основном магнитной и электрической несимметрией ротора. Провал в кривой среднего момента определяется разностью операторных сопротивлений $x_d(js)$ и $x_q(js)$, а его величина зависит от активного сопротивления обмотки статора.

Приближенный метод расчета пусковых характеристик дает удовлетворительные результаты лишь в случаях, когда разница операторных сопротивлений по осям d и q невелика. При $s \leq 0,1$ расчет момента необходимо выполнять точным методом, независимо от величины электрической несимметрии ротора.

Приложение

Расчет пусковых характеристик СРД приближенным методом

При расчете пусковых характеристик приближенным методом допускаем возможность раздельного рассмотрения явлений по продоль-

ной и поперечной осям ротора СРД. Выражения для комплексов тока по осям d и q в этом случае могут быть определены по эквивалентным схемам, аналогичным известным схемам замещения асинхронных двигателей, или аналитически:

$$\begin{aligned}\bar{i}_d &= \frac{1}{r + jx_d(js)} U e^{j(st + \delta_0)} ; \\ \bar{i}_q &= \frac{1}{r + jx_q(js)} U e^{j(st + \delta_0)} .\end{aligned}\quad (1)$$

Установившиеся значения операторных сопротивлений СРД по осям d и q можно представить в виде [2]

$$\begin{aligned}jx_d(js) &= j \frac{x_d + jsx_d''T_d}{1 + jsT_d} = R_{ds} + jX_{ds} , \\ jx_q(js) &= j \frac{x_q + jsx_q''T_q}{1 + jsT_q} = R_{qs} + jX_{qs} ,\end{aligned}\quad (2)$$

где

$$\begin{aligned}R_{ds} &= \frac{(x_d - x_d'')sT_d}{1 + s^2T_d^2} ; & X_{ds} &= \frac{x_d + s^2x_d''T_d^2}{1 + s^2T_d^2} ; \\ R_{qs} &= \frac{(x_q - x_q'')sT_q}{1 + s^2T_q^2} ; & X_{qs} &= \frac{x_q + s^2x_q''T_q^2}{1 + s^2T_q^2} ;\end{aligned}$$

Учитывая (2), уравнения (1) можно преобразовать

$$\bar{i}_d = I_d e^{j(st + \delta_0 - \varphi_d)} ; \quad \bar{i}_q = I_d e^{j(st + \delta_0 - \varphi_q)} , \quad (3)$$

где

$$I_d = \frac{1}{\sqrt{(r + R_{ds})^2 + X_{ds}^2}} ; \quad I_q = \frac{1}{\sqrt{(r + R_{qs})^2 + X_{qs}^2}} .$$

Нетрудно доказать, что действующее значение тока в обмотке статора в этом случае равно

$$I = \sqrt{\frac{1}{2} (I_d^2 + I_q^2)} \quad (4)$$

Комплексы потокосцеплений по осям d и q определяются уравнениями

$$\begin{aligned}\bar{\psi}_d &= x_d(js) \bar{i}_d ; \\ \bar{\psi}_q &= x_q(js) \bar{i}_q .\end{aligned}$$

Средний момент при принятых допущениях определяется как

$$M_c = \frac{1}{2} (M_d + M_q) = \frac{1}{2} (I_d^2 R_{ds} + I_q^2 R_{qs}) , \quad (5)$$

где

$$\begin{aligned}M_d &= \operatorname{Re}[j\bar{\psi}_d i_d^*] = \operatorname{Re}[jx_d(js) \bar{i}_d \bar{i}_d^*] = I_d^2 \operatorname{Re}[jx_d(js)] ; \\ M_q &= \operatorname{Re}[j\bar{\psi}_q i_q^*] = \operatorname{Re}[jx_q(js) \bar{i}_q \bar{i}_q^*] = I_q^2 \operatorname{Re}[jx_q(js)] .\end{aligned}$$

ЛИТЕРАТУРА

1. Е. В. Кононенко. Расчет пусковых характеристик синхронных реактивных двигателей. В настоящем сборнике.
2. А. И. Вагнов. Основы теории переходных процессов синхронной машины, ГЭИ, 1960.