

## ИССЛЕДОВАНИЕ АСИНХРОННОГО РЕЖИМА СИНХРОННЫХ ЯВНОПОЛЮСНЫХ МАШИН

Е. В. Кононенко, Т. В. Чешева

(Представлена научным семинаром кафедр электрических машин  
и общей электротехники)

В настоящей статье приведены результаты исследований асинхронного режима двух синхронных явнополюсных двигателей, отличающихся друг от друга наличием неполной (машина № 1) и полной (машина № 2) демпферной обмотки на роторе. Номинальная мощность каждой машины 7,5 кВа,  $U_n=400$  в,  $2p=6$ ,  $n_n=1000$  об/мин. Параметры машины и экспериментальные характеристики асинхронного режима  $[M_c=f(s); I=f(s)]$  для этих машин были опубликованы в [1]. Использование результатов работы [1] позволило, не проводя эксперимента, провести анализ асинхронного режима машин с различной несимметрией ротора. [2]. Использование для расчетов цифровой вычислительной машины сделало возможным проведение довольно широких исследований влияния параметров машины и степени несимметрии ротора на пусковые характеристики синхронных машин. Поскольку расчеты асинхронного режима (имеются в виду статические пусковые характеристики, то есть зависимости среднего асинхронного момента и тока статора от скольжения) проводились по трем методам [2]: точным, приближенным и комбинированным, то результаты данных исследований дали возможность оценить применимость и степень точности каждого из этих методов.

Расчеты точным методом проводились на цифровой вычислительной машине М20. Приближенным и комбинированным методом пусковые характеристики рассчитывались вручную с использованием значений операторных сопротивлений  $X_d(js)$  и  $X_q(js)$ , рассчитанных по общим формулам [2] на цифровой вычислительной машине. Следует отметить, что все расчеты велись в диапазоне скольжений от 0 до 1,0 для 16 значений с увеличенным количеством точек в области полусинхронной скорости, при четырех значениях активного сопротивления обмотки статора:  $r=0; 0,0246; 0,05; 0,1$ . В цепь обмотки возбуждения обеих машин включались дополнительные сопротивления различных значений, равные  $3,7 R_f$  ( $R_f$  — сопротивление обмотки возбуждения),  $9 R_f$ ,  $16 R_f$ ,  $24 R_f$ . Расчеты выполнялись в относительных единицах.

Проведенные исследования позволили сделать вывод о том, что раздельное рассмотрение явлений по продольной  $d$  и поперечной  $q$  осям ротора (приближенный метод) справедливо лишь тогда, когда обмотка статора является сверхпроводящей ( $r=0$ ), то есть потокосцепление статора обратной последовательности равно нулю, или когда ротор выполнен симметричным [ $X_d(js)=X_q(js)$ ]. В реальных двигателях с несимметричным ротором приближенный метод расчета является не-

точным. Пользуясь приближенным методом, нельзя, например, обнаружить провал в кривой электромагнитного момента вращения, пульсирующего момента и тока статора при полусинхронной скорости.

Исследования показали, что вид пусковых характеристик синхронной явнополюсной машины в основном определяется величиной и отношением установившихся значений операторных сопротивлений  $X_d(js)$  и  $X_q(js)$ . Наличие магнитной несимметрии приводит к тому, что кривая среднего асинхронного момента  $M_c$ , в отличие от асинхронных двигателей, проходит нулевое значение при  $s > 0$ , а при синхронной скорости вращения  $-M_{co} \neq 0$ . Величина  $M_{co}$  зависит от степени магнитной несимметрии, определяемой разностью синхронных индуктивных сопротивлений по  $d$  и  $q$  осям, и активного сопротивления обмотки статора  $r$

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

Рассматриваемые свойства пусковых характеристик оказывают существенное влияние на пуск двигателя, особенно на завершающем этапе — при втягивании в синхронизм. Применение же приближенных методов расчета не позволяет выявить этих особенностей. На рис. 1 приведены для сравнения механические характеристики обеих машин, рассчитанные точным и приближенным методами. Сравнивая эти характеристики, видим, что пренебрежение активным сопротивлением обмотки статора в рассматриваемых примерах приводит к недопустимо большим погрешностям. Объясняется это прежде всего разностью установившихся значений операторных сопротивлений по осям ротора при соответствующих скольжениях. Изменение модулей этих сопротивлений представлено на рис. 2. В случае, когда  $X_d(js) = X_q(js)$ , приближенный метод становится точным. На рис. 1 представлены кривые  $M_c = f(s)$  для четырех значений  $r$ . Из рис. 1 видно, что значения пускового момента уменьшаются с увеличением  $r$ . Кроме того, с увеличением  $r$  уве-

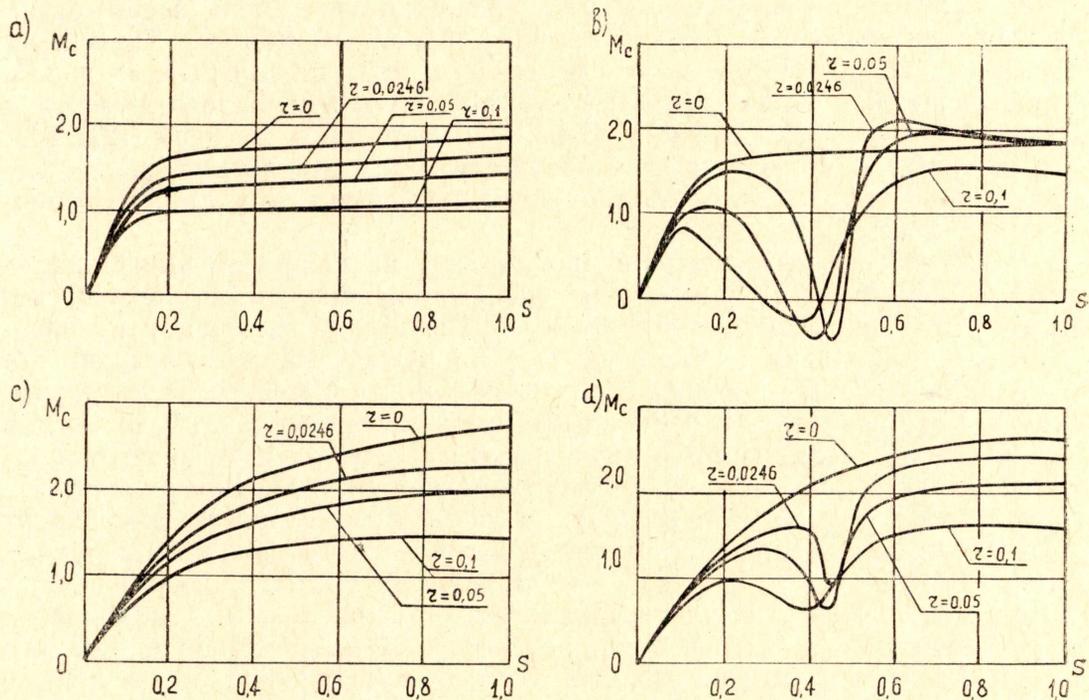


Рис. 1. Механические характеристики синхронных двигателей: а) расчет приближенным методом (машина № 1); б) расчет точным методом (машина № 1); в) расчет приближенным методом (машина № 2); д) расчет точным методом (машина № 2)

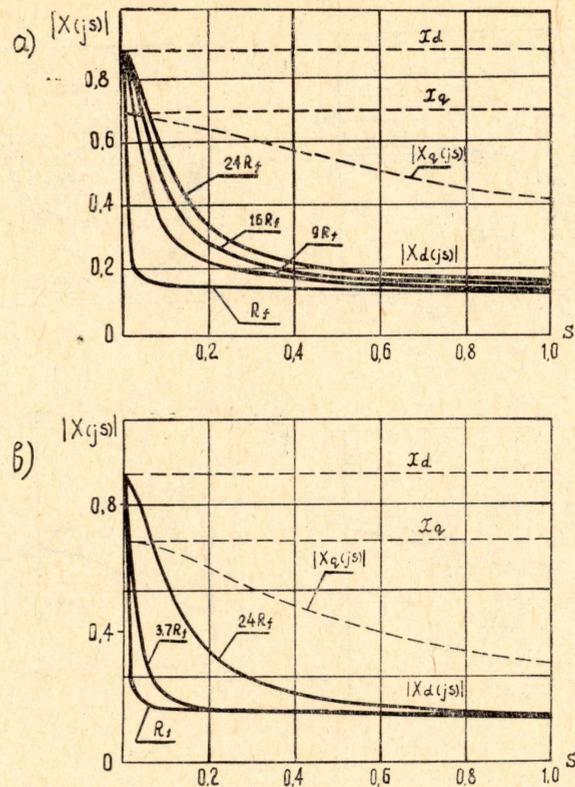


Рис. 2. Зависимости модулей установившихся значений операторных сопротивлений от скольжения при различных сопротивлениях внешней цепи: а) для машины № 1, б) для машины № 2

личивается зона провала в области полусинхронной скорости, а вершина провала смещается в область малых скольжений. Расхождение характеристик  $M_c = f(s)$ , рассчитанных точным и приближенным методами, увеличивается с увеличением  $\gamma$ .

Влияние параметров демпферной обмотки на пусковые характеристики синхронной машины можно проследить по рис. 3. Здесь изображены зависимости  $M_c = f(s)$ ,  $I = f(s)$  и  $M_{пл} = f(s)$  (пульсирующий момент) для обеих машин, во внешнюю цепь которых включено сопротивление, равное  $24R_f$ . Параметры демпферной обмотки по поперечной оси у машины с полной демпферной обмоткой почти в два раза меньше, чем у машины с неполной демпферной обмоткой, и разница в установившихся значениях операторных сопротивлений  $X_d(j s)$  и  $X_q(j s)$  значительно уменьшилась, что видно из рис. 2, 3. Это обстоятельство привело к уменьшению величины провала в области полусинхронной скорости на механической характеристике (при  $\gamma = 0$ ) и уменьшению пульсирующего момента при пуске. На величину тока статора это обстоятельство почти не сказалось (незначительно увеличился пусковой ток у машины с полной демпферной обмоткой).

Влияние дополнительного сопротивления, включенного в цепь обмотки возбуждения, на пуск синхронных двигателей можно проследить на рис. 4. Чем больше величина сопротивления обмотки статора, тем более заметно влияние дополнительного внешнего сопротивления в области малых скольжений и тем менее оно сказывается при пуске [ $M_c = f(s)$ ]. Установлено также, что чем большей несимметрией ротора обладает машина, тем большее значение минимального дополнительного сопротивления необходимо включить во внешнюю цепь, чтобы ма-

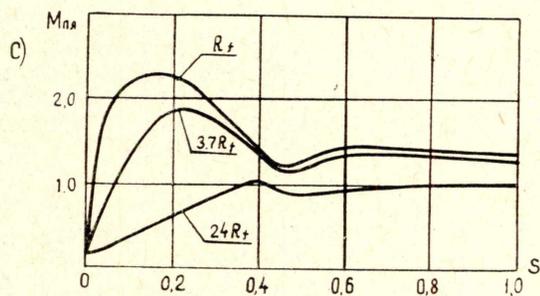
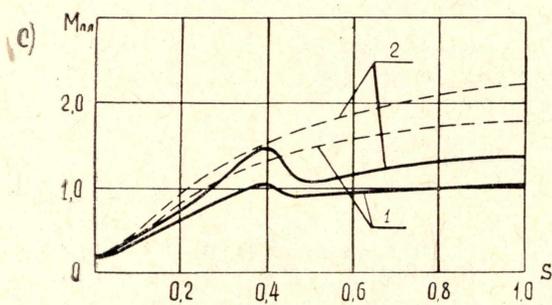
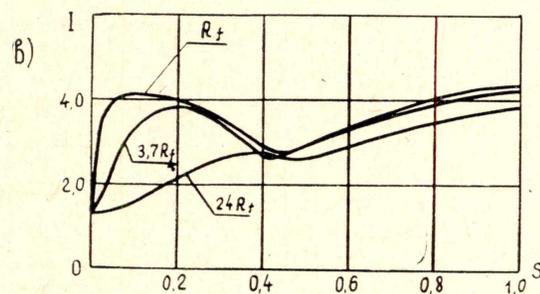
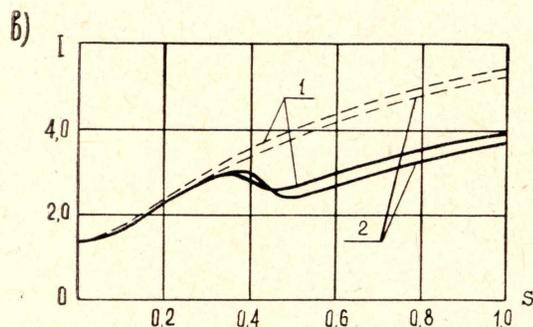
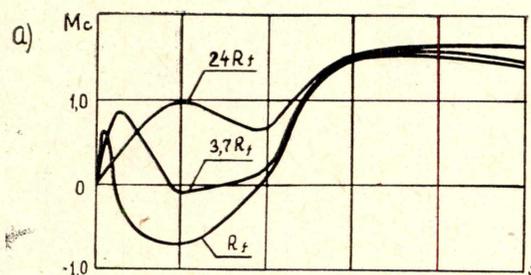
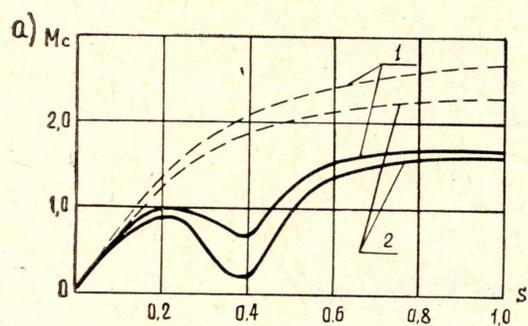


Рис. 3. Пусковые характеристики машин, во внешнюю цепь которых включено сопротивление, равное  $24 R_f$ : а) кривая 1 (машина № 2); в) кривая 2 (машина № 1). Параметры машин по продольной оси одинаковы. Сплошные линии —  $r=0,1$ ; пунктирные линии —  $r=0$

Рис. 4. Пусковые характеристики синхронных машин в зависимости от дополнительного сопротивления, включаемого в цепь обмотки возбуждения

шина могла преодолеть область полусинхронной скорости и достигнуть полной синхронной скорости. Увеличение сопротивления возбуждения уменьшает провал в механической и токовой характеристиках и приводит к уменьшению пульсирующего момента в области малых скольжений, что является важным положительным фактом.

Сравнение действующих значений тока статора также указывает на расхождение кривых  $I=f(s)$ , рассчитанных точным и приближенным методами, особенно это расхождение проявляется в области полусинхронной скорости (рис. 5). Величина провала, которая не может быть обнаружена приближенным расчетом при весьма заметном  $r$ , в основном зависит от значения активного сопротивления обмотки статора: с увеличением  $r$  провал в кривой тока сглаживается, а пусковой ток уменьшается.

Из кривых (рис. 5 и 6) видно, что амплитуда пульсирующего момента и тока статора при синхронной скорости и вращения практически не зависит от величины активного сопротивления обмотки статора;

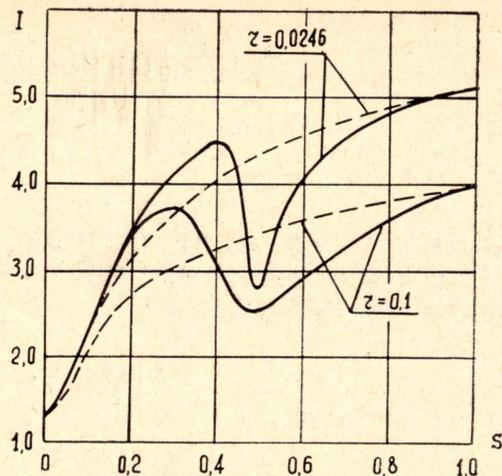


Рис. 5. Кривые изменения тока статора для машины № 1; расчет приближенным методом (пунктирные линии), расчет точным методом (сплошные линии)

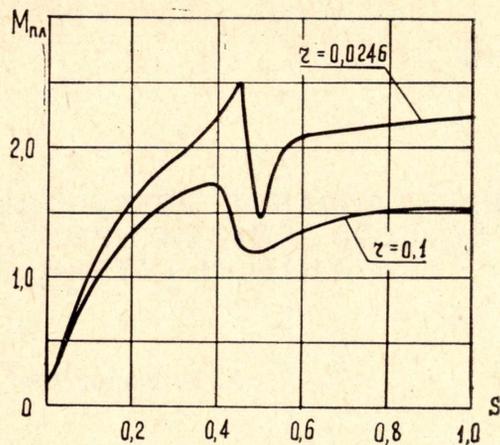


Рис. 6. Кривые изменения амплитуды пульсирующего момента для двигателя с неполной демпферной обмоткой (машина № 1) от скольжения, рассчитанные точным методом для различных  $\gamma$

значение же  $M_{пл}$  достигает значительной величины в зависимости от параметров машины и степени несимметрии ротора.

Для тех же синхронных машин были рассчитаны статические пусковые характеристики и комбинированным методом [2]. Результаты расчета сведены в табл. 1 для машины № 1 — с неполной демпферной обмоткой и активным сопротивлением обмотки статора, равным 0,0246. Анализ результатов расчета показал нецелесообразность использования комбинированного метода для расчета статических ха-

Таблица 1

$M_c$	s					
	0	0,2	0,4	0,48	0,6	1,0
Точный метод	-0,001	1,36	0,45	0,02	2,08	1,88
Приблж. метод	0	1,39	1,48	1,52	1,54	1,63
Комбинир. метод	0,79	1,9	1,24	-3,03	3,42	2,85

рактеристик синхронных машин. Для убедительности сделанного вывода в таблице приведены значения среднего асинхронного момента, рассчитанные для соответствующих скольжений точным и приближенным методами. Поскольку характеристики  $I=f(s)$ , рассчитанные комбинированным методом, являются аналогичными тем, что рассчитаны приближенным методом, то сделанный нами вывод о нецелесообразности применения комбинированного метода касается в основном только моментных характеристик синхронных машин.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. В. J. Chalmers, A. K. Agarwal. Importance of direct and quadrature — axis damper impedances in starting performance of salient-pole motors, Proc. IEE, v. 113, № 4, 1966.
2. Е. В. Кононенко., Т. В. Чешева. О методах расчета пусковых характеристик синхронных явнополюсных машин (настоящий сборник).