

**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-

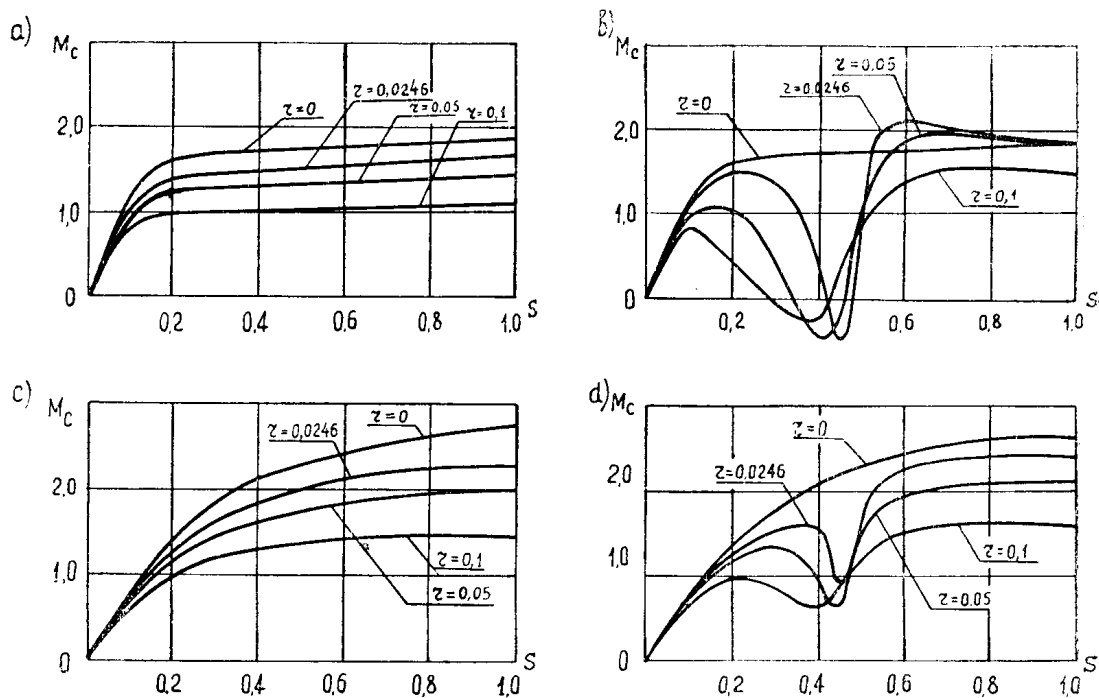


Рис. 1. Механические характеристики синхронных двигателей: а) расчет приближенным методом (машина № 1); б) расчет точным методом (машина № 1); в) расчет приближенным методом (машина № 2); д) расчет точным методом (машина № 2)

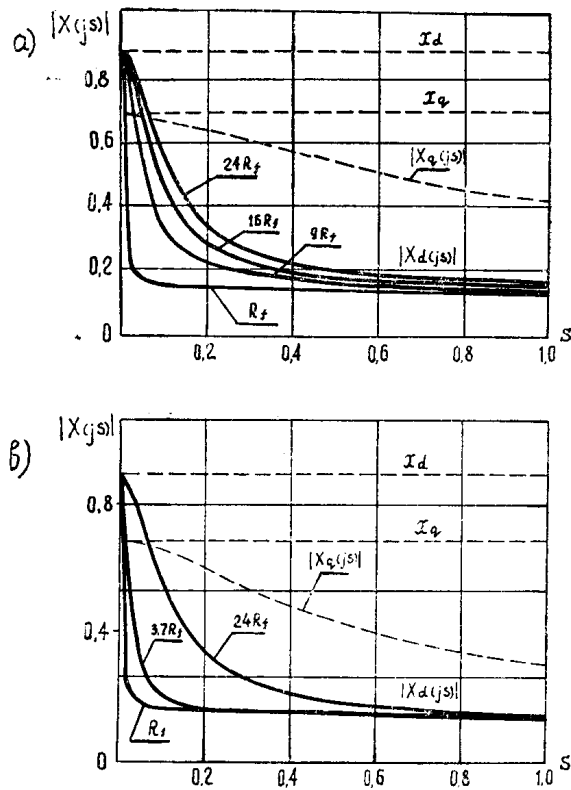


Рис. 2. Зависимости модулей установившихся значений операторных сопротивлений от скольжения при различных сопротивлениях внешней цепи: а) для машины № 1, в) для машины № 2

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 γ .

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 $X_d(js)$ и $X_q(js)$ 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-

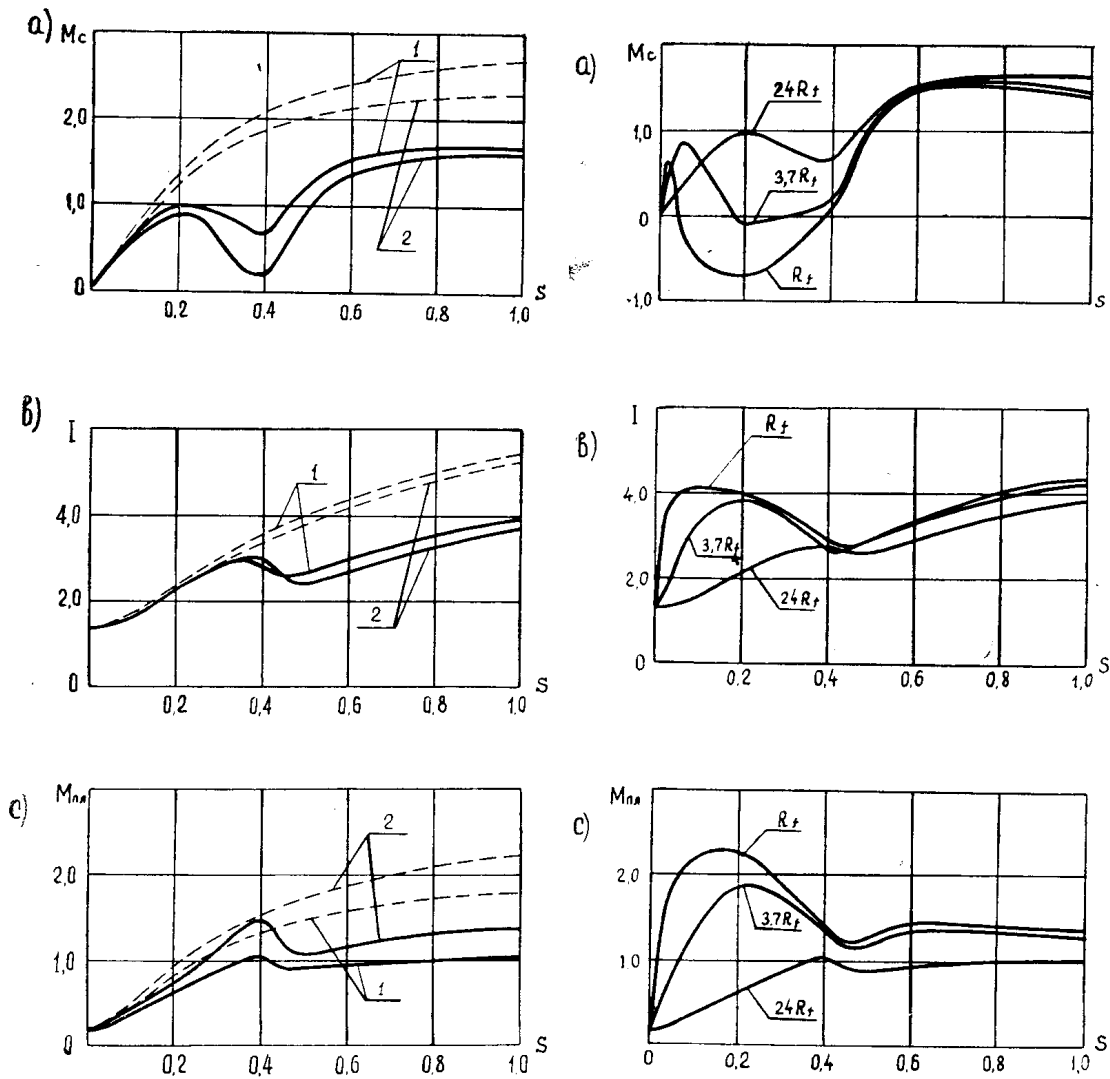


Рис. 3. Пусковые характеристики машин, во внешнюю цепь которых включено сопротивление, равное $24 R_f$: а) кривая 1 (машина № 2); в) кривая 2 (машина № 1). Параметры машин по продольной оси одинаковы. Сплошные линии — $r=0,1$; пунктирные линии — $r=0$

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;

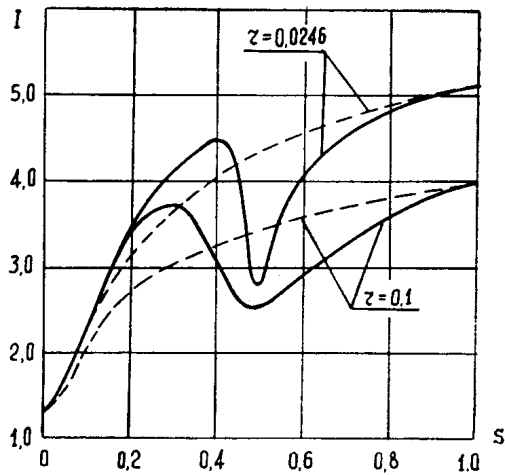


Рис. 5. Кривые изменения тока статора для машины № 1; расчет приближенным методом (пунктирные линии), расчет точным методом (сплошные линии)

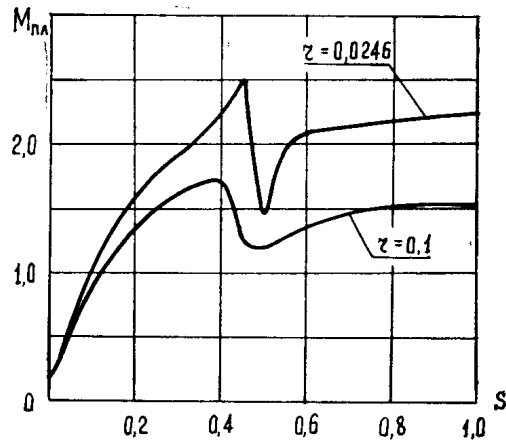


Рис. 6. Кривые изменения амплитуды пульсирующего момента для двигателя с неполной демпферной обмоткой (машина № 1) от скольжения, рассчитанные точным методом для различных γ

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 пусковых 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. B. 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).