

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МАССИВНЫХ ВКЛЮЧЕНИЙ В РОТОРЕ СРРД НА ЕГО ХАРАКТЕРИСТИКИ

А. А. БУЙМОВ, Г. М. ГОЛОШЕВСКИЙ, Р. П. ЛААС

Представлена научным семинаром кафедр электрических машин и общей электротехники

Интенсивное развитие современной техники и особенно таких ее отраслей, как радиоэлектроника, авиация, атомная и ракетная техника, звуко- и видеозапись, фотография и связь обусловило необходимость создания, широкого развития и внедрения в производство высоконадежных тихоходных синхронных микроэлектроприводов с высокой степенью равномерности скорости вращения. В связи с этим все более широкое применение получают синхронные микродвигатели с электромагнитной редукцией скорости и одной обмоткой на статоре, так называемые синхронные реактивные редукторные двигатели (СРРД).

Синхронные реактивные редукторные двигатели обладают рядом весьма существенных достоинств, основными из которых являются тихоходность, большая надежность, возможность плавного частотного регулирования скорости, простота и технологичность конструкции. Но широкое применение таких двигателей сдерживается недостаточно хорошими пусковыми свойствами, отсутствием рекомендаций по выбору и проектированию оптимальных конструкций с улучшенными пусковыми характеристиками, недостаточным развитием теории, в частности вопросов пуска.

Пуск синхронных реактивных редукторных двигателей, не имеющих специальных пусковых устройств, возможен только на холостом ходу, при этом ротор должен выполняться с небольшим моментом инерции (по типу полого ротора), а двигатель — иметь низкие скорости вращения (до  $100 \div 200$  оборотов в минуту). Для уверенного пуска двигателей под нагрузкой необходимо снабжать его специальными пусковыми устройствами, например дополнительными пусковыми отключающимися и неотключающимися обмотками, расположенными как в пазах статора, так и ротора, иногда применяются встроенные пусковые асинхронные двигатели [1]. Если часть активной длины ротора выполнить из магнитотвердого материала, то величина пускового момента увеличится за счет гистерезисного момента, речь идет о так называемом гистерезисном пуске [2]. Возможен и асинхронный пуск синхронных реактивных редукторных двигателей. Асинхронный момент, помогающий синхронному моменту разогнать ротор до редукторной скорости, создается за счет токов, наводимых либо в короткозамкнутой обмотке, включенной в пазы шихтованного ротора, либо в массивном теле ротора, изготовленного из ферромагнитного материала [3].

Здесь не ставится цели перечислить все существующие в настоящее время в электротехнике устройства и способы для пуска редук-

торных двигателей; необходимость уверенного, быстрого пуска СРРД обусловила появление сравнительно большого количества этих способов. Каждый из них имеет свои недостатки, здесь и увеличение веса, увеличение габаритов, снижение энергетических показателей и ухудшение технологичности двигателей; каждый имеет и определенные преимущества. Последний же из упомянутых способов пуска, а именно асинхронный, выглядит наиболее интересным, поэтому на кафедре общей электротехники Томского политехнического института проводится работа по исследованию асинхронного пуска синхронных реактивных редукторных двигателей при помощи массивного ротора, а также короткозамкнутой обмотки, вложенной в пазы шихтованного ротора.

Исследования процесса пуска посредством короткозамкнутой роторной обмотки показали, что подобного рода пусковое средство СРРД не является универсальным. Короткозамкнутая клетка способствует значительному увеличению номинального момента машины и ее перегрузочной способности, но при всем этом с увеличением асинхронной составляющей результирующего электромагнитного момента уменьшается его синхронная составляющая, что объясняется демпфирующим действием обмотки ротора [4].

Вышеуказанное, однако, не компрометирует идею асинхронного пуска СРРД в целом; асинхронный пуск, осуществляемый с помощью массивного ротора, лишен перечисленных недостатков. Конечно, этот способ не избежал их вообще, в частности, применение массивного ротора неизбежно связано с дополнительными потерями и нагревом двигателя — это ухудшает его энергетические показатели. Тем не менее в отечественной и зарубежной литературе появляются сообщения, свидетельствующие о попытках использовать массивные и составные (комбинированные) роторы для синхронных реактивных двигателей [5], так что идея применить массивный ротор для пуска синхронного двигателя, в том числе и редукторного типа, не нова. Реализация ее требует, однако, детального исследования и тщательного изучения.

Для исследования работы синхронных реактивных редукторных двигателей с массивным ротором было испытано несколько макетных образцов двигателей такого типа. Статор двигателя аналогичен статору обычной асинхронной машины с некоторой модернизацией зубцовой зоны, ротор двигателя собран из изолированных друг от друга пластин; конфигурация пластины показана на рис. 1. Для экспериментальных

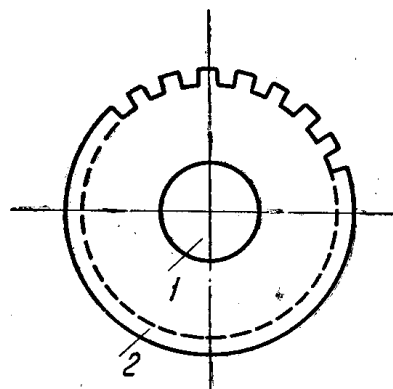


Рис. 1. Конфигурация роторных пластин: 1 — отверстие под вал; 2 — зубцовая зона

исследований было изготовлено несколько роторов, имеющих различную толщину пластин  $\Delta$ , начиная с  $\Delta=0,5$  мм и кончая полностью массивным ротором с  $\Delta=60$  мм. Двигатель имеет следующую геометрию:

$$\begin{array}{llll} D_1=54 \text{ мм}, & L_1=48 \text{ мм}, & D_2=53,6 \text{ мм}, & L_2=60 \text{ мм}, \\ \delta=0,2 \text{ мм}, & Z_1=24, & Z_2=26, & \end{array}$$

Массивный ротор синхронного редукторного реактивного двигателя разгоняется под действием результирующего электромагнитного момента, который состоит, во-первых, из синхронной составляющей момента, обусловленной зубчатым строением статора и ротора (рис. 1); величина этой составляющей момента зависит от геометрии зубцовой зоны и практически не зависит от величины  $\Delta$ . Второй составляющей результирующего электромагнитного момента является асинхронный момент, возникающий вследствие появления вихревых токов в сердечнике ротора. Известно, что вихревые токи возникают в любом электромагнитном сердечнике при изменении магнитного потока, пронизывающего этот сердечник. Момент от вихревых токов, означенный выше как асинхронная составляющая результирующего момента, по своей природе аналогичен основному электромагнитному моменту, возникающему в обычной асинхронной машине, например, с фазным ротором, поскольку также является результатом взаимодействия вихревого тока с вращающимся магнитным полем. Только роль обмотки в этом случае играет сам массивный ротор, в котором вращающееся магнитное поле будет индуцировать токи. Асинхронная составляющая момента, а следовательно и результирующий момент в целом, в сильной степени зависят от величины  $\Delta$ . Выявление характера зависимости пускового момента СРРД в асинхронном режиме и энергетических его показателей в синхронном режиме от величины  $\Delta$  и является предметом настоящих исследований.

Эксперимент по измерению пускового момента был проведен при заторможенном роторе, т. е. при  $s=1$  с помощью рычажных весов. Результаты эксперимента представлены на рис. 2 для нескольких значений питающего напряжения при частоте 50 гц.

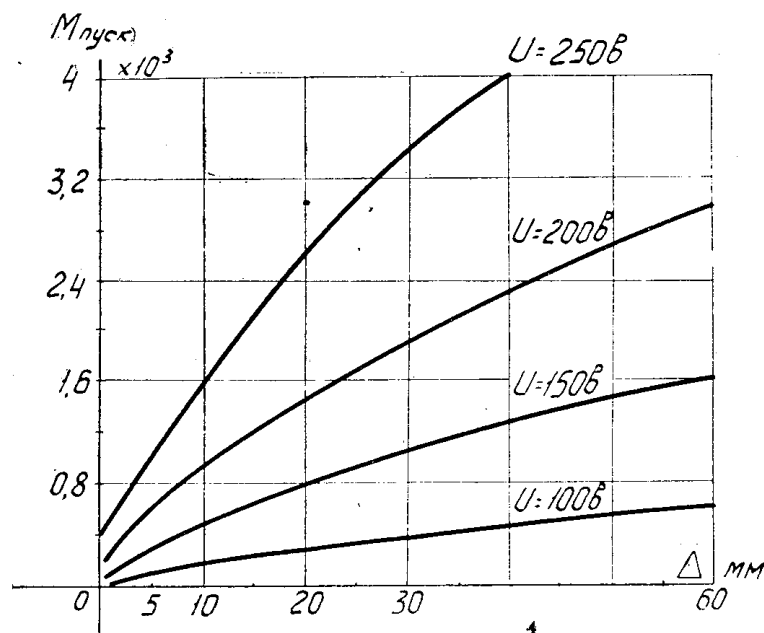


Рис. 2. Зависимость пускового момента СРРД от толщины роторных пластин при различных напряжениях

График (рис. 2) наглядно демонстрирует значительное увеличение пускового момента синхронного редукторного реактивного двигателя с увеличением толщины пластин, из которых собран ротор. С увеличением питающего напряжения этот рост момента становится интенсивней.

При  $U=200$  В, напряжении, близком к номинальному, увеличение толщины пластин от  $\Delta=0,5$  до  $\Delta=5$  дает трехкратное увеличение пуско-

вого момента, а использование толщины листов  $\Delta=20$  мм дает семикратное увеличение пускового момента по сравнению с обычным шихтованным ротором. Таким образом, можно констатировать значительное улучшение пусковых свойств синхронного реактивного редукторного двигателя, как следствие применения массивного ротора. Очевидно, что главную роль при пуске синхронного реактивного редукторного двигателя с массивным ротором играет асинхронная составляющая момента, она призвана довести ротор до синхронной редукторной скорости, причем должна быть такой величины, чтобы в момент перехода в синхронный режим уступить доминирующую роль синхронному моменту. Для достижения такого оптимального соотношения между составляющими момента необходимо иметь вполне определенные параметры ротора.

Известно, что параметры массивного ротора — активное  $r_2$  и индуктивное  $x_2$  сопротивления — ввиду сильно выраженного поверхностного эффекта значительно зависят от скольжения. Так, в случае  $f_1=50$  гц при пуске асинхронной машины с массивным ротором ( $s=1$ ) эквивалентная глубина проникновения тока в роторе составляет 3 мм, а при  $s=0,02$  — уже 20 мм [6]. В отличие от асинхронных машин рассматриваемый синхронный реактивный редукторный двигатель работает в диапазоне скольжения от 1 до 0,9. Поэтому глубина проникновения тока в тело ротора не будет существенно изменяться, но тем не менее при пуске двигателя и изменении скольжения от 1,0 до 0,9 параметры массивного ротора меняются: уменьшается активное сопротивление и увеличивается индуктивное [6].

Соответственно упомянутому изменению параметров уменьшается асинхронная составляющая момента. Главной и наиболее трудной задачей является такая оптимизация параметров, при которой асинхронная составляющая при скольжении 0,9 уменьшается по величине настолько, что будет неспособна увеличить скорость вращения выше синхронной редукторной и не помешает синхронизации.

Проведенные эксперименты с роторами, имеющими различную толщину пластин  $\Delta$ , показали, что, начиная с  $\Delta=20$  мм, возможен сверхсинхронный режим работы — двигатель разгоняется до скорости, намного превышающей редукторную. Вероятность такого режима увеличивается с увеличением  $\Delta$  и при полностью массивном роторе становится стопроцентной. Из рис. 2 видно, что пусковой момент полностью массивного ротора ( $\Delta=60$  мм) значительно превосходит пусковой момент при меньших значениях толщины роторных пластин. Анализ же рабочих характеристик (рис. 3 и рис. 4) убеждает, что увеличение вращающего момента  $M$  и  $\cos \varphi$  с увеличением толщины роторных пластин обязательно связано с увеличением потребляемой мощности  $P_1$  и неизбежно приводит к уменьшению к. п. д. Исследования показали, что максимальный момент двигателя увеличивается лишь до определенного предела, затем начинает уменьшаться, то же самое происходит и с энергетическим к. п. д. (рис. 4).

Все это позволяет сделать вывод, что наиболее рациональной толщиной пластин для такой конструкции ротора является  $\Delta=5\div 15$  мм.

Рассматривая идею асинхронного пуска СРРД при помощи массивных включений в роторе, необходимо сказать, что ротор может быть оформлен в конструктивном отношении по-разному, например собран из массивных пластин, как в данном случае, где толщина роторных пластин должна определяться при оптимизации параметров. Ротор также может быть выполнен в виде массивного стального стакана, то есть речь идет о разновидности полого ротора. Наконец, это может быть обычный шихтованный ротор синхронного реактивного редукторного двигателя, но в этот ротор необходимо включать определенной формы, размеров и материала массивные элементы.

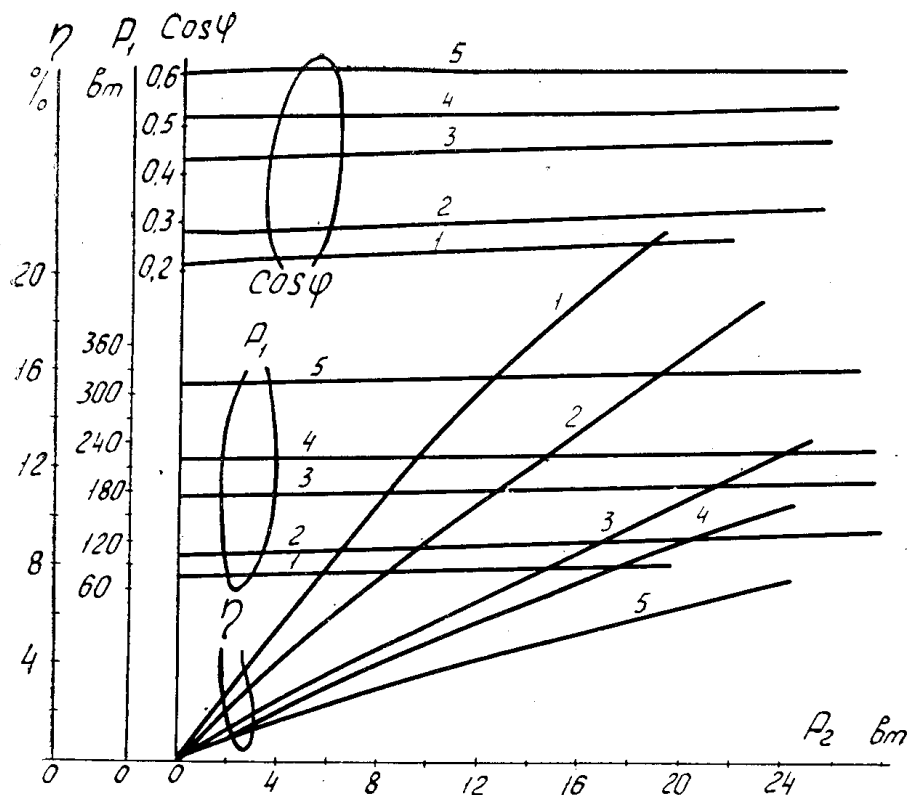


Рис. 3. Рабочие характеристики СРРД при различных толщинах роторных пластин: 1 —  $\Delta=0,5$  мм; 2 —  $\Delta=5$  мм; 3 —  $\Delta=20$  мм; 4 —  $\Delta=30$  мм; 5 —  $\Delta=60$  мм

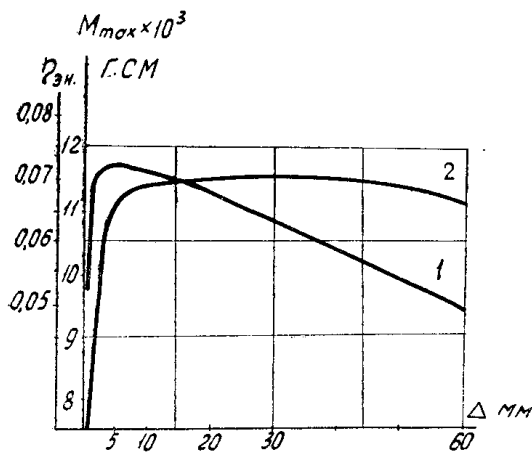


Рис. 4. Зависимости энергетического к. п. д. [1] и максимального момента [2] от толщины роторных пластин при  $U=250$  в

### Выводы

1. Пусковой момент значительно увеличивается при уменьшении толщины роторных пластин. Таким образом, оказалось вполне возможным улучшить работу двигателя в пусковом режиме, используя идею асинхронного пуска СРРД с помощью массивного ротора.

2. Момент, развиваемый двигателем, растет не беспрестанно. Начиная с  $\Delta=30$  мм, потребляемая мощность в большей степени расходуется на покрытие потерь в СРРД, чем на увеличение момента; следствием этого является снижение энергетических показателей и уменьшение максимального момента.

3. Подбирая толщину массивных пластин, можно получить двигатель с заданным пусковым моментом и удовлетворительными энергетическими показателями. В рассмотренной конструкции «слоистого ротора» наиболее выгодной толщиной роторных пластин является  $\Delta = 5 \div 15$  мм, при этом двигатель надежно работает в синхронном режиме и уверенно запускается даже под нагрузкой.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Owczarek Jerzy. Miniaturów silnik impulsowe Wiadomości Elektrotechniczne, 1958, № 4.
2. А. С. Куракин. Пуск синхронных редукторных электродвигателей. Доклады научно-технической конференции по итогам научно-исследовательских работ за 1966—1967 гг. МЭИ, 1967.
3. А. С. Куракин. Короткозамкнутая клетка, как пусковое средство синхронных редукторных двигателей. «Электромеханика», 1969, № 1.
4. А. А. Буймов, Г. М. Голошевский, Е. В. Кононенко. Пуск СРРД с короткозамкнутой обмоткой на роторе. Известия ТПИ, т. 284, 1973.
5. M. S. Sarma, G. Soni. Experimental Study of Solid-Rotor and Composite-Rotor Induction Motors. „Rower apparatus and Systems”, 1972, Vol PAS-91, № 5, стр. 1812—1821.
6. А. И. Вольдек. Электрические машины. М.-Л., «Энергия», 1966, стр. 562.