



Н.И. Байдасов



И.Х. Есенов

## Направление совершенствования асинхронной машины с короткозамкнутым ротором

Н.И. Байдасов, И.Х. Есенов

Асинхронные электродвигатели с короткозамкнутым ротором, предложенные Г. Феррарисом и Н. Тесла и перестроенные под трехфазную систему переменного тока М.О. Доливо-Добровольским, ознаменовали эпоху в развитии двигателестроения и широкого применения электропривода переменного тока в различных сферах деятельности человека. Львиная доля приводов современных машин и производственных механизмов реализуется с использованием таких электродвигателей, отличающихся простотой конструкции, технологичностью изготовления и надежностью работы. Однако и сегодня присущие им недостатки (сравнительно низкие пусковой момент и перегрузочная способность, большой пусковой ток, сложность регулирования частоты вращения) ограничивают их применение в приводах, где требуются частые пуски, большие кратности пусковых моментов, реверсы, регулирование (в частности – плавное) частоты вращения. В этих случаях применяют асинхронные электродвигатели с фазным ротором, двигатели постоянного тока или используют специальные конструкции асинхронных электродвигателей с короткозамкнутым ротором. Так, для обеспечения повышенного пускового момента применяют роторы с глубоким пазом (высоким стержнем), двойной «беличьей клеткой» или сложными формами поперечного сечения стержня. Обмотка ротора в виде двойной «беличьей клетки» была предложена еще 120 лет тому назад (1893 г.) М.О. Доливо-Добровольским и находит практическое применение и в настоящее время [1].

Другие конструкции сечения стержня были разработаны позднее, и все они призваны обеспечить повышенное активное сопротивление в режиме пуска за счет эффекта вытеснения тока, то есть сравнительно большой пусковой момент с одновременным снижением пускового тока.

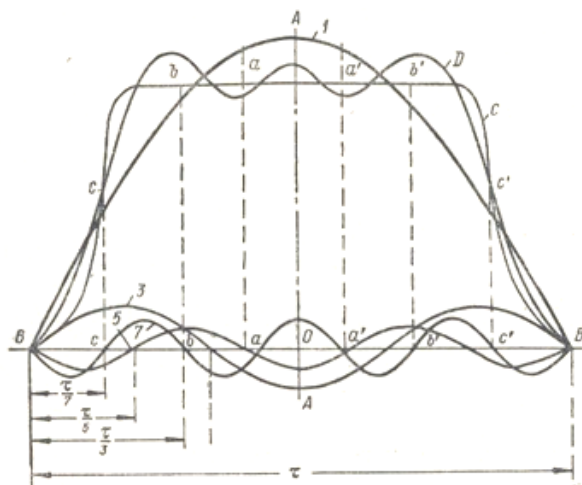


Рис. 1. Кривая распределения магнитного потока под полюсным делением

Анализ процессов, происходящих в обмотке ротора, позволяет констатировать, что причиной незначительности пускового момента АД с короткозамкнутым ротором, как и низкой перегрузочной способности, является несинусоидальность распределения магнитного потока в воздушном зазоре машины. Действительная кривая распределения магнитного потока в зазоре имеет более сложную (искаженную), чем синусоида, форму (рис. 1 [2,3]), в связи с чем и ЭДС обмотки ротора оказывается не синусоидальной (повторяет форму кривой магнитного потока).

При этом, безусловно, более значительным оказывается и эффективное значение ЭДС ( $E > E_{\max(\text{син})} / \sqrt{2}$ ). В моменты, когда мгновенное значение тока в роторе (стержне) становится больше расчетного ( $i > i_{\text{син}}$ ), магнитная цепь машины (начиная с зубцовой зоны) переходит в режим насыщения, и величина тока, ограничиваемая практически лишь активным сопротивлением ротора, резко возрастает (машина переходит в режим, близкий режиму «пик трансформатора»).

\* Байдасов Н.И. – главный инженер ООО «Инновационное предприятие «Просетин».

\*\* Есенов И.Х. – к. т. н., зав. кафедрой энергетики ФГОУ ВПО Горский ГАУ.

Медь и алюминий обмоток статора и ротора работают как нагревательный элемент с чисто активной компонентой нагрузки, а на вал передается минимум энергии.

Энергия, преобразуемая в теплоту в обмотке ротора [1],

$$P = z \cdot I_{cm}^2 \cdot r$$

где  $z$  – число стержней «беличьей клетки»;

$I_{cm}$  – ток стержня ротора;

$r$  – сопротивление фазы вторичной обмотки.

Величина  $r$  определяется известным выражением

$$r = r_{cm} + \frac{r_k}{2 \sin^2 \frac{P\pi}{z}}$$

где  $r_k$  – сопротивление участка короткозамкнутого кольца между соседними стержнями «беличьей клетки»;

$r_{cm}$  – сопротивление стержня.

В случаях, когда угол между соседними стержнями достаточно мал, можно принимать, что

$$\sin \frac{P\pi}{z} \gg \frac{P\pi}{z}$$

и значение  $r$  вычислять по упрощенной формуле

$$r \gg r_{cm} + \frac{z^2 r_k}{2\pi^2 p^2} = r_{cm} + \frac{z^2 r_k}{20p^2}$$

На практике такое упрощение используют, если  $z/\pi > 6$  [1].

Действующее значение его тока стержня вычисляют, полагая форму его синусоидальной, то есть в предположении

$$i_{cm} = I_{cm \max} \sin \omega t$$

А поскольку форма тока из-за насыщения магнитной цепи машины искажается (принимает пикообразную форму), действующее значение оказывается гораздо больше (рис.2).

При такой форме кривой тока в роторе (стержнях), характеризуемой тем, что в режимах, отличных от расчетного, магнитопровод насыщен, индуктивное сопротивление ротора мало (практически равно активному) и потери – значительные.

Из приведенного анализа следует, что для получения высоких энергетических показателей

асинхронной машины с короткозамкнутым ротором необходимо форму тока ротора приближать к синусоидальной.

Решение этой задачи защищено патентом России [4] и международной заявкой [5]. Оно достигнуто изменением конструкции обмотки ротора, при этом обмотка статора оставлена неизменной. Обмотка реконструированного ротора была изготовлена из медных стержней, а соединения выполнены не в виде короткозамыкающих колец, а по схеме, приведенной на рис.3 (в качестве примера приведена двухполюсная машина с 9 пазами в роторе).

Обмотка ротора содержит восемнадцать изолированных токопроводящих стержней 2 и 3, размещенных попарно в девяти пазах 4. Концы каждого стержня 2 из одного паза соединены с концами каждого соответствующего стержня 3 из другого паза, который сдвинут по периметру ротора на расстояние, определяемое величиной, ближайшей к половине полюсного деления статора, образуя, таким образом, отдельные короткозамкнутые витки из последовательно соединенных стержней 2 и 3.

Испытания электродвигателя с экспериментальным ротором показали уменьшение потребляемого тока на одну треть и тепловых потерь во вторичной цепи в 2,2 раза. Правда, снизился и коэффициент мощности за счет возросшего индуктивного сопротивления обмоток при менее насыщенной стали.  $\cos \phi$  достиг паспортного значения при перегрузке машины в 1,65 раза. Эта мощность и стала ее новой номинальной мощностью. Пусковые (провальные) токи соответственно уменьшились, машина стала меньше греться и шуметь.

В ходе испытаний были выполнены измерения, по результатам которых построены за-

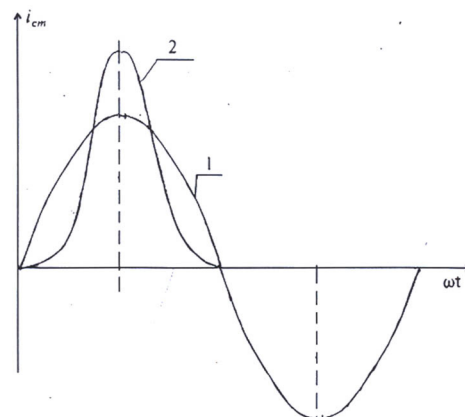


Рис.2. Характер тока в стержне ротора АМ:  
1 – расчетная форма тока стержня;  
2 – фактическая форма тока

висимости потребляемой и выдаваемой на вал мощностей от частоты вращения для обычного (серийного) и нового двигателя (рис.4) и осуществлено их сравнение. В результате установлено существенное увеличение габаритной мощности машины, снижение потребляемой мощности во всем диапазоне частот вращения  $0 < n < n_{ном}$ , а также потерь мощности (особенно на частотах, меньших, чем номинальное значение).

Последнее открывает возможность использования такого двигателя в приводе электро-транспортных машин.

Воспроизводимость и повторяемость машины не вызывает сомнений, так как от моделирована на машине мощностью 0,8 кВт и проверена на машине мощностью 2,2 кВт.

Следует отметить, что при такой конструкции ротора машина сравнительно легко возбуждается и может с успехом работать в режиме генератора. Это позволяет утверждать, что, осуществляя подобную модернизацию короткозамкнутого ротора любого асинхронного двигателя, даже самого «энергоэффективного» (с высоким КПД), мы получаем новый мотор-генератор удвоенной габаритной мощности, более высокой энергоэффективности (с уменьшенными в 9 раз потерями вторичной цепи), способный выдержать повторяющиеся трехкратные перегрузки (ПВ до 20 %) и более чем четырехкратные секундные перегрузки.

Опытный образец машины, изготовленный на базе серийного двигателя мощностью 55 кВт, был испытан на стенде Новочеркасского электровозостроительного завода. В ходе испытаний установлено: реконструированный двигатель в режиме короткого замыкания потребляет от сети 270 кВт, а потери в первичной обмотке составляют 100 кВт, остальные потери оказываются незначительными (порядка 10 %). То есть эта машина может работать с мощностью на валу

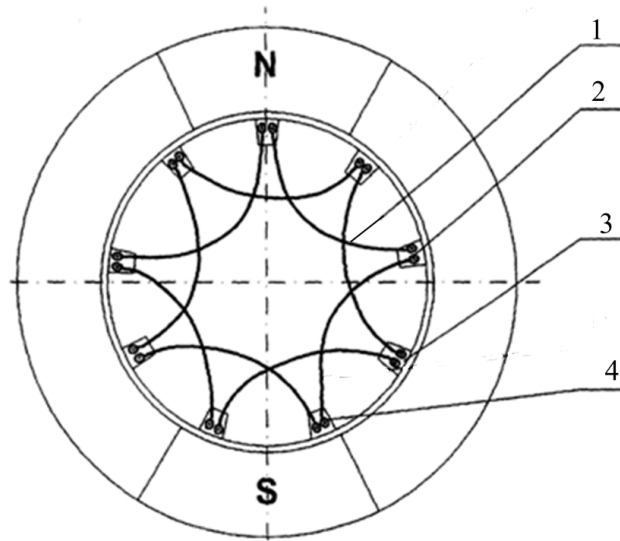


Рис. 3. Схема соединения стержней ротора: 1 – стержень роторной обмотки; 2, 3 – концы последовательно соединенных стержней; 4 – пазы ротора

160 кВт при ПВ до 40 % (транспортный режим) и 220 кВт – в секундном режиме. Обычная (серийная) машина в указанных условиях обеспечивает на валу около 65 кВт с ПВ 40 %, а при нагрузке порядка 70 кВт – опрокидывается.

Дальнейший анализ показал, что разработанная обмотка ротора может быть усовершенствована дополнительно. В одном из вариантов усовершенствованного ротора, условно названного нами ротором второго поколения, токи высших гармоник удалось уменьшить в 5,2 раза по сравнению с серийной машиной, что обеспечило уменьшение тепловых потерь в нем в 9 раз. Почему не в  $(5,2^2 = 27)$  раз? Мы полагаем, что это обусловлено временем действия тока, превышающего расчетное значение, а оно, по нашему мнению, уменьшилось на треть каждого полупериода, поэтому мощность потерь



Рис. 4. Характеристики асинхронного двигателя с реконструированной обмоткой ротора

снижается не в 27, а в ( $27/3 = 9$ ) раз. Снижение в токе ротора высших (тормозных) гармоник позволило снизить и тормозные явления. Машина стала способной выдерживать значительные (трехкратные) перегрузки с меньшими тепловыми, чем у обычной (серийной) машины, потерями. При перегрузке в 300 % двигатель с экспериментальным ротором имеет такие же потери, как двигатель с серийным ротором при перегрузке в 23 %. А секундная перегрузка может быть более чем четырехкратной и лимитируется лишь неизменной обмоткой статора.

После реконструкции за счет снижения тока, потребляемого от сети, снижаются потери и в первичной обмотке, существенно (до 9 раз) уменьшаются потери во вторичной обмотке, снижаются (в перспективе исключаются) тормозные эффекты, обусловленные действием высших гармоник.

### ВЫВОДЫ

1. Асинхронные с к.-з. ротором машины отличаются простотой конструкции, технологичностью изготовления, удовлетворительными техническими характеристиками, что в итоге обеспечило им широкое использование в приводах машин и производственных механизмах.

2. Ряд недостатков, в том числе сравнитель-

но низкий пусковой момент, невысокая перегрузочная способность, сложность регулирования частоты вращения, ограничивают их применение в приводах подъемно-транспортных машин, прокатных станков и т. д., отличающихся значительными моментами сопротивления в режиме пуска, перегрузками в рабочем режиме и/или требующих реверсов.

3. Указанные недостатки в значительной степени обусловлены насыщением магнитопровода машины и частично (или полностью) могут быть устранены посредством реконструкции обмотки ротора.

4. Предложенный вариант реконструкции обмотки ротора позволяет на треть снизить ток ротора и в 2,2 раза потери энергии в нем при одновременном снижении (за счет уменьшения потребляемого тока) потерь в обмотке статора, что позволяет увеличить габаритную мощность машины в 1,65 раза.

5. Дальнейшее усовершенствование короткозамкнутой обмотки ротора позволит существенно снизить ток ротора (стержней) и на базе АМ с к.-з. ротором получить машину, эффективно работающую в приводах подъемно-транспортных машин, электротранспорта, а также в приводах других механизмов и машин с более высокими энергетическими характеристиками.

### ЛИТЕРАТУРА

1. **Вольдек А.И.** Электрические машины. Учебник для студентов высш. техн. учебн. заведений. Изд. 2-е, перераб. и доп. – Л.: Энергия, 1974 г. 840 с.

2. **Зимин В.И., Каплан М.А. и др.** Обмотки электрических машин. Изд. 4-е перераб. – Л.: Госэнергоиздат, 1954 г. , 576 с.

3. **Ярослав Кучера, Йозеф Галл.** Обмотки электрических вращательных машин. Пер. Е. Калинин, П. Кованиц, Н. Михевич. – Чехословацкая академия наук, 1963 г. 981 с.

4. **Патент России 2393613.** Способ повышения эффективности работы асинхронной короткозамкнутой электрической машины и асинхронная короткозамкнутая электрическая машина (варианты) / Байдасов Н.И. – Опубл. в Б.И., 2010, № 18.

5. **WIPO Patent Application WO/2011/002334.** Method for increasing the operating efficiency of asynchronous short-circuited electric machines, and an asynchronous short-circuited electric machine (variants). / BAYDASOV, Nikolay Ivanovich – 06.01.2011.

