

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ СРД ДЛЯ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА ТРОЛЛЕЙБУСА

В. А. БАРСКИЙ, Р. В. АФЕНЧЕНКО, Р. А. БЫКАНОВ

Международный консорциум «Энергосбережение», Харьков, Украина
email: office@mke.com.ua

АННОТАЦИЯ. В статье представлены результаты анализа требований к тяговому электроприводу троллейбуса, анализа возможности использования синхронных реактивных двигателей в таком приводе, исследования улучшений характеристик таких двигателей путем изменения их активной части, результаты испытаний полномасштабного экспериментального образца двигателя, выявления требований к преобразователю частоты для питания такого двигателя в приводе троллейбуса.

Ключевые слова: СРД, асинхронный двигатель, электропривод, преобразователь частоты, троллейбус.

RESEARCH OF THE POSSIBILITY OF USING SYNRM FOR TRACTION ELECTRIC DRIVE OF A TROLLEYBUS

V. BARSKIY, R. AFENCHENKO, R. BYKAOV

Mezhdunarodnyi konsortsium «Energoberezhnie», Kharkiv, Ukraine

ABSTRACT. The article presents the results of an analysis of the requirements for a traction electric drive of a trolley bus, an analysis of the possibility of using synchronous jet engines in such a drive, a study of the improvement of the characteristics of such engines by changing their active part, test results of a full-scale experimental model of the engine, identification of the requirements for a frequency converter for powering such an engine in the trolleybus drive.

Keywords: SynRM, asynchronous motor, electric drive, frequency converter, trolleybus.

Введение

Синхронные реактивные электродвигатели (СРД) известны с конца позапрошлого века.

Активное использование в мощных электроприводах таких машин началось после 2010 г.

Сегодня такие компании как «ABB», «KSB», «Siemens» серийно производят электродвигатели данного типа на мощности от 0,55 кВт до 350 кВт и частоты вращения до 3000 об/мин.

В мировой практике такие машины применяются пока только для общепромышленных механизмов – насосов, вентиляторов и других турбомеханизмов, не имеющих перегрузок до основной частоты вращения и не работающих в режимах с «ослаблением поля».

Проведенный анализ показал, что эти наиболее простые машины могут быть применены и в тяговых электроприводах троллейбусов.

Ниже изложены его результаты.

Преимущества и недостатки СРД

СРД обладают следующими преимуществами:

- простая и надежная конструкция ротора, состоящая из тонколистовой электротехнической стали, без короткозамкнутой обмотки и магнитов;

- исключение тепловых потерь в роторе, что создаёт предпосылки для создания закрытых, практически герметичных машин, имеющих повышенную эксплуатационную надёжность и увеличенный срок службы;
- энергоэффективность выше чем у АД – КПД в номинальном режиме на 3÷4%;
- возможность создания и плавного регулирования момента на нулевой частоте вращения, определяемая только током питающего преобразователя;
- низкий момент инерции ротора, что обеспечивает дополнительное снижение потерь на разгон и торможение;
- возможность регулирования частоты вращения в широких пределах, без необходимости гашения постоянного магнитного поля на высоких оборотах;
- уменьшение веса двигателя на массу меди/алюминия ротора, и, соответственно, стоимости на цену меди/алюминия ротора;
- снижение трудоёмкости изготовления двигателя и, соответственно, его стоимости.

К недостаткам СРД можно отнести:

- меньшая перегрузочная способность в сравнении с асинхронным электродвигателем;

© В. А. Барский, Р. В. Афенченко, Р. А. Быканов, 2019

- низкий коэффициент мощности (на уровне $0,65 \div 0,7$) – магнитный поток создается только за счет реактивного тока;
- уменьшение моментов в зоне выше основной частоты вращения по сравнению с асинхронным двигателем.

Определение требований к тяговой характеристике привода троллейбуса

В нормативных требованиях к тяговому приводу троллейбуса регламентируются следующие показатели при номинальном напряжении питания [1]:

- максимальная установившаяся скорость загруженного троллейбуса на горизонтальном участке при эксплуатации;
- требование к преодолению максимального уклона;
- время разгона загруженного троллейбуса на горизонтальном участке до заданной скорости;
- максимально допустимое ускорение.

С другой стороны, могут быть требования конкретных Заказчиков, в которых указываются:

- диапазон изменения питающего напряжения при работе транспортного средства, в котором должно обеспечиваться движение без выполнения требований по обеспечению параметров, заданных для номинального значения напряжения;
- требования к преодолению уклонов с указанием величин уклонов, скорости и ускорения при номинальном напряжении;
- так называемая «скорость сообщения».

В городском цикле большую часть времени средняя скорость троллейбуса при номинальном напряжении составляет $25 \div 26$ км/ч. Это и есть скорость сообщения. До этой скорости тяговый электродвигатель работает до номинальной частоты питания (50 Гц). При повышении скорости, вплоть до предельной (конструкционной), осуществляется переход в зону ослабления поля с уменьшением момента – чем больше скорость, тем меньше момент на валу электродвигателя.

Реально транспортное средство практически всегда работает в условиях ненормальных напряжений. При этом его характеристики в нормативных документах не оговариваются.

Согласно нормативным требованиям к контактной сети изменения питающего напряжения при эксплуатации могут находиться в пределах от 400 В до 720 В.

Как известно, изменение питающего напряжения приводит к изменению механической характеристики электродвигателей более чем существенно – у АД зависимость момента от напряжения квадратичная. При посадке напряжения от номинального (550 В) значения до минимального (400 В) значения момент уменьшается в 1,9 раза.

Характеристики СРД существенно отличаются от характеристик АД.

В связи с этим оказалось необходимым вывить конкретные требования к тяге электропривода троллейбуса безотносительно типа электродвигателя.

Необходимый момент определяется суммой момента сопротивления движению по сухому асфальту на горизонтальном участке без ускорения, момента для обеспечения ускорений и момента для преодоления уклонов (подъемов).

В качестве примера ниже приведена последовательность определения требований к тяге односекционного троллейбуса.

Параметры транспортного средства приведены в табл. 1.

Таблица 1 – Параметры транспортного средства

№ п/п	Наименование параметра	Ед. изм.	Значение
1.	Полная масса	т	18
2.	Передаточное отношение редуктора	о.е.	9,817
3.	КПД трансмиссии	о.е.	0,96
4.	Диаметр колеса	м	0,933
5.	Номинальное напряжение контактной сети	В	550
6.	Минимальное напряжение контактной сети	В	400
7.	Максимальное напряжение контактной сети	В	720
8.	Номинальное значение скорости (скорость сообщения)	км/ч	26
9.	Максимальная рабочая скорость	км/ч	65
10.	Предельная (конструкционная) скорость	км/ч	75
11.	Номинальная мощность тягового электродвигателя	кВт	180
12.	Частота вращения тягового электродвигателя при номинальной нагрузке	об/мин	1470
13.	Номинальный момент тягового электродвигателя	Нм	1170

Расчетная кривая удельного момента сопротивления движению в зависимости от скорости транспортного средства приведена на рис. 1.

Расчетная формула [2]:

$$w_o = 12 + 0,004 V^2, \quad (1)$$

где V – скорость движения транспортного средства, км/ч.

Представляется важным отметить, что момент сопротивления для обеспечения всего диапазона скоростей троллейбуса не превосходит 25% от номинального момента тягового электродвигателя, то-есть он относительно мал.

В результате проведенного анализа требований к тяговым приводам троллейбусов было установлено максимальное значение необходимого максимального момента – 1,5 Мн.

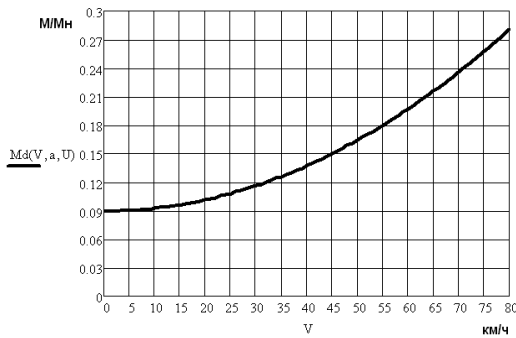


Рис. 1 – Удельный момент сопротивления

При рассмотрении других составляющих момента, который должен обеспечивать тяговый электродвигатель односекционного троллейбуса было установлено:

- уклоны величиной 2,5; 10; 12; 16% требуют, соответственно, 0,19; 0,74; 0,89; 1,18 Мн;
- ускорения величиной от 0,2 до 1,5 м/с² требуют, соответственно, от 0,15 до 1,14 Мн.

Учитывая вышеуказанные значения были определены возможные сочетания указанных нагрузок:

1) до номинальной частоты питающего напряжения (50 Гц) тягового двигателя и соответствующей скорости 26 км/ч:

- статический момент – 0,11 Мн;
- преодоление уклона 16% – 1,18 Мн;
- обеспечение ускорения 0,2 м/с² – 0,15 Мн.

Всего – 1,44 Мн.

2) выше основной скорости (26 км/ч) нормируется только время разгона до 50 км/ч на горизонтальном участке при номинальном напряжении питающей сети – до 20 с. Это соответствует среднему ускорению 0,7 м/с². Для обеспечения такого ускорения необходим момент 0,5 Мн. В сумме с моментом сопротивления при скорости 50 км/ч ($f=100$ Гц) это составляет 0,69 Мн.

Широко применяемые тяговые асинхронные приводы имеют при номинальном напряжении питания и частоте 100 Гц момент, не превосходящий значения 0,5 Мн.

Очевидно, разгон до 50 км/ч происходит с изменяющимся ускорением – максимальным 1,2 м/с² до 50 Гц и постепенно уменьшающимся по мере роста частоты.

Таким образом, требование обеспечения разгона за 20 с до скорости 50 км/ч, которое указано в технических характеристиках троллейбуса, означает, что электродвигатель должен обеспечивать такие моменты до и выше основной скорости, которые обеспечивали бы требуемое время разгона при ограничении ускорений заданной величиной 1,2 м/с².

Это – одна из задач создания тягового привода троллейбуса, включающего, кроме двигателя, силовой преобразователь и систему управления.

Современные системы тягового электропривода, использующие АД с ПЧ и устройствами управле-

ния, до основной скорости обеспечивают поддержание необходимых моментов при допустимых значениях напряжения питающей сети.

Электропривод на основе СРД, как видно из вышеизложенного, тоже до основной скорости (частоты 50 Гц) обеспечивает требуемые моменты.

Требования к режимам выше основной скорости в нормативных документах отсутствуют – кроме того, что скорость 60±65 км/ч должна достигаться в эксплуатационных режимах, а более высокая, конструкционная – при испытаниях троллейбуса.

Тяговая характеристика электропривода троллейбуса должна быть выше кривой момента сопротивления в функции скорости. Насколько – не оговаривается. Это – неслучайно, так как в этих режимах электропривод работает при непредсказуемых значениях напряжения питающей сети.

В качестве необязательного ориентира могут быть взяты характеристики АД при частотах питания выше 50 Гц. Хотя они далеки от желательных (по мере роста частоты быстро уменьшается и их жесткость, и опрокидывающий момент).

Исходя из всего вышеуказанного, можно сформулировать следующие обязательные требования к тяговому электроприводу троллейбусов на основе СРД:

- при работе до основной скорости значение момента должно быть не менее 1,5 Мн;
- при работе выше основной скорости момент электродвигателя должен быть выше момента сопротивления движению минимум на 10%.

В 2015-2016 г.г., совместно с европейским электромашиностроительным заводом был спроектирован и испытан экспериментальный образец тягового электродвигателя для троллейбуса, мощностью 180 кВт 1500 об/мин.

В ходе проектирования было принято следующее:

- в качестве статора для СРД был применен статор асинхронного двигателя, серийного выпускаемого этим заводом;
- конструкция ротора TLA (Transversally Laminated Anisotropic) [3] – ротор с поперечной шихтовкой пакета и немагнитными барьерами.

В ходе работы решались следующие задачи:

- создания методики расчета СРД, предназначенного для тягового электропривода;
- выполнения электромагнитных расчетов (методом конечных элементов) с 20-ю различными конфигурациями ротора. Результаты расчетов показывают, что при одном и том же токе статора достигается от 77 до 104% момента, развиваемого тяговым асинхронным двигателем, статор которого взят за основу;
- определения требований к тяговому преобразователю;
- разработки алгоритмов управления тяговым преобразователем;

- разработана конструкторская документация и изготовлен первый вариант такой машины на базе статора от асинхронного прототипа;
- проведен цикл испытаний и замеры параметров изготовленного двигателя по совместной программе;
- изготовления экспериментального образца мощностью 180 кВт, 1500 об/мин;
- экспериментальных измерений характеристик образца в диапазонах частот от 3 до 117 Гц и питающего напряжения до 650 В;
- экспериментального подтверждения механической прочности пластин ротора во всем диапазоне частот вращения (включая угонную – 5000 об/мин).

Результаты испытаний образца СРД приведены в графическом виде (см. рис. 2 и рис. 3) и в табл. 2.

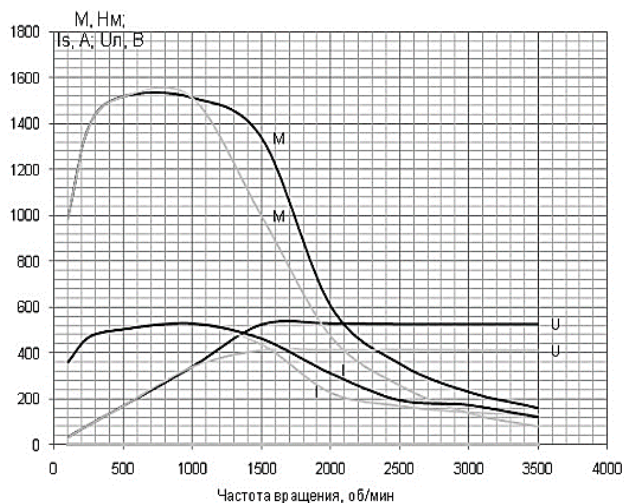


Рис. 2 - Выходные характеристики двигателя

Светлые линии (левые) – при номинальном напряжении.
Темные линии (правые) – при повышенном напряжении.

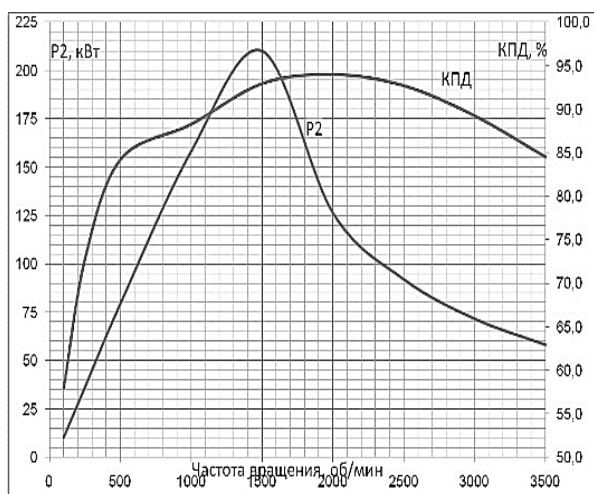


Рис. 3 - Характеристики мощности на валу и КПД

Таблица 2 - Результаты испытаний

Частота вращения, об/мин	Питающее напряжение, В	Ток нагрузки, А	$K_m (M/M_n)$, о.е.	Кратность тока ($I_{нар}/I_n$), о.е.	Кратность напряжения ($U_{нар}/U_n$), о.е.
100	35	409	0,9	1,32	0,08
	87	389	1	1,25	0,21
250	87	550	1,28	1,77	0,21
	175	342	0,9	1,10	0,42
500	170	596	1,36	1,92	0,40
	344	375	0,99	1,21	0,82
1000	341	528	1,29	1,70	0,81
	416	313	0,74	1,01	0,99
1500	413	420	0,85	1,35	0,98
	525	378	1,02	1,22	1,25
	519	544	1,41	1,75	1,24
2000	414	311	0,41	1,00	0,99
	523	363	0,73	1,17	1,25
	643	382	1	1,23	1,53
2500	631	544	1,17	1,75	1,50
	416	193	0,22	0,62	0,99
	522	282	0,42	0,91	1,24
3000	651	428	0,74	1,38	1,55
	413	173	0,12	0,56	0,98
	523	252	0,25	0,81	1,25
3500	651	364	0,44	1,17	1,55
	412	119	0,07	0,38	0,98
	524	174	0,16	0,56	1,25
	649	244	0,3	0,79	1,55

На выходной характеристике приведены параметры работы экспериментального двигателя при частотах вращения от 100 до 3500 об/мин. Зона малых частот вращения и высокого момента ограничены возможностями стенда, на котором проводились испытания – допустимый ток составлял 550 А (при номинальном токе асинхронного прототипа 315 А).

Как видно по характеристике мощности и КПД, у экспериментального образца максимум КПД составлял 95%, а зона значений КПД более 85% находится в диапазоне мощностей от 155 до 200 кВт, и в диапазоне частот от 500 до 3500 об/мин.

Максимальная кратность момента составила 1,4 от номинального момента. Получение больших кратностей было ограничено возможностями испытательного стенда по току.

Для получения номинального момента при номинальной частоте вращения потребовалось повышение питающего напряжения на 25%.

Эти испытания подтвердили принципиальную возможность обеспечения требований тяговой характеристики без увеличения габаритов активной части АД, но – при значительно большем токе, низком КПД и высоких, относительно номинального, значений напряжения питания.

В связи с этим появилась необходимость поиска технических решений, радикально улучшающих характеристики привода с СРД.

Для оценки возможности улучшения характеристик СРД были проведены модельные исследования:

- влияния изменения величины воздушного зазора;
- влияния изменения диаметра и длины пакета статора и ротора;
- изменения параметров обмотки, размеров и конфигурации пазов, применения пазовых магнитных клиньев;
- оптимизации ротора – выбора оптимальной конфигурации пластин.

Основные цели этих поисковых расчетов:

- получение КПД не менее 95% при обеспечении требований к тяговой характеристике;
- определение требований к тяговому преобразователю.

В результате были найдены оптимальные решения по СРД, позволяющие получить перегрузочную способность на уровне 1,5 от номинального момента и КПД 96% (у применяемых АД – не более 93%).

Выводы

Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что при правильном выборе технических решений при проектировании и обеспечении требуемых питающих напряжений и алгоритмов управления элект-

трические машины типа СРД перспективны для троллейбусов, так как при закрытом исполнении (благодаря уменьшению тепловыделений и холодному роторе) имеют более высокие эксплуатационные и энергетические характеристики.

Список литературы

1. **ДСТУ 4905:2008.** Колісні транспортні засоби. Тролейбуси пасажирські. Загальні технічні вимоги.
2. **Байрыева Л.С., Шевченко В.В.** Электрическая тяга: Городской наземный транспорт: Учебник для техникумов. – М.: Транспорт, 1986 г. – 206 с.
3. **Reza Rajabi Moghaddam.** Synchronous Reluctance Machine (SynRM) Design. Royal Institute of Technology, Department of Electrical Engineering Electrical Machines and Power electronics. – Stockholm, 2007.

References (transliterated)

1. **DSTU 4905:2008.** Kolisni transportni zasobi. Trolejbusi pasazhirs'ki. Zagal'ni tehnicni vimogi.
2. **Bajryeva L.S., Shevchenko V.V.** Elektricheskaja tjaga: Gorodskoj nazemnyj transport: Uchebnik dlja tehnikumov. – M.: Transport, 1986 g. – 206 s.
3. **Reza Rajabi Moghaddam.** Synchronous Reluctance Machine (SynRM) Design. Royal Institute of Technology, Department of Electrical Engineering Electrical Machines and Power electronics. – Stockholm, 2007.

Сведения об авторах (About authors)

Барский Виктор Алексеевич – доктор технических наук, профессор; Международный консорциум «Энергосбережение», председатель правления – главный конструктор; г. Харьков, Украина; e-mail: office@mke.com.ua.

Viktor Barskiy – Doctor of Technical Sciences, Professor; Mezhdunarodnyi konsortsium «Energoberezhenie», Chairman of the Board - Chief Designer; g. Kharkiv, Ukraine; e-mail: office@mke.com.ua.

Афенченко Роман Владимирович – Международный консорциум «Энергосбережение», ведущий инженер; г. Харьков, Украина; e-mail: office@mke.com.ua.

Roman Afenchenko – Mezhdunarodnyi konsortsium «Energoberezhenie», Leading Engineer; g. Kharkiv, Ukraine; e-mail: office@mke.com.ua.

Быканов Роман Анатольевич – Международный консорциум «Энергосбережение», ведущий инженер; г. Харьков, Украина; e-mail: office@mke.com.ua.

Roman Bykanov – Mezhdunarodnyi konsortsium «Energoberezhenie», Leading Engineer; g. Kharkiv, Ukraine; e-mail: office@mke.com.ua.

Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:

Барский, В. А. Исследование возможности применения СРД для тягового электропривода троллейбуса / **В. А. Барский, Р. В. Афенченко, Р. А. Быканов** // *Вестник НТУ «ХПИ»*, Серия: *Электрические машины и электромеханическое преобразование энергии*. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2019. – № 20 (1345). – С. 189-193. – doi:10.20998/2409-9295.2019.20.28.

Please cite this article as:

Barskiy, V., Afenchenko, R., Bykanov, R. Research of the possibility of using synrm for traction electric drive of a trolleybus. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: Electric machines and electromechanical energy conversion*. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2019, **20** (1345), 189-193, doi:10.20998/2409-9295.2019.20.28.

Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Барський, В. О. Дослідження можливості застосування СРД для тягового електропривода троллейбуса / **В. О. Барський, Р. В. Афенченко, Р. А. Быканов** // *Вісник НТУ «ХПІ»*, *Серія: "Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії"*. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2019. – № 20 (1345). – С. 189-193. – doi:10.20998/2409-9295.2019.20.28.

АНОТАЦІЯ. У статті представлені результати аналізу вимог до тягового електроприводу троллейбуса, аналізу можливості використання синхронних реактивних двигунів в такому приводі, дослідження поліпшень характеристик таких двигунів шляхом зміни їх активної частини, результати випробувань повномасштабного експериментального зразка двигуна, виявлення вимог до перетворювача частоти для живлення такого двигуна в приводі троллейбуса.

Ключові слова: СРД, асинхронний двигун, електропривод, перетворювач частоти, троллейбус

Надійшла (received) 08.08.2019