

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Коков Е.Г., Жибинов А.С., Гейнц Э.Р., Цехмestрюк Г.С. Магнитное поле и ЭДС малоинерционных магнитоэлектрических машин // Известия Томского политехнического университета. — 2012. — Т. 320. — № 4. — С. 158–162.
2. Каган В.Г. Электроприводы с предельным быстродействием для систем воспроизведения движений. — М.: Энергия, 1985. — 192 с.
3. Кухлинг Х. Справочник по физике / пер. с нем. — М.: Мир, 1982. — 520 с.
4. Копылов И.П., Клоков Б.К., Морозкин В.П. Проектирование электрических машин / под ред. И.П. Копылова. — М.: Энергия, 2005. — 767 с.
5. Алексеев А.Е. Тяговые электрические машины и преобразователи. — Л.: Энергия, 1980. — 444 с.
6. Афанасьев А.А., Бабак А.Г., Волокитина Е.В., Головинин С.Б., Нестерин В.А., Никифоров В.Е., Николаев А.В., Чихняев В.А. Малоинерционный высокоскоростной магнитоэлектрический беспазовый вентильный двигатель // Электричество. — 2007. — № 4. — С. 28–35.
7. Куликов Н.И., Елизарова Т.А., Куликова Т.В., Сухов Д.В., Хрупачев О.Ю. Исследование и разработка быстродействующих вентильных двигателей // Электричество. — 2002. — № 5. — С. 23–32.

Поступила 29.01.2013 г.

УДК 621.313.333.2

ОДНОФАЗНЫЙ АСИНХРОННЫЙ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЬ С ПОВЫШЕННЫМ ПУСКОВЫМ МОМЕНТОМ

О.С. Качин, С.И. Качин

Томский политехнический университет
E-mail: kos@tpu.ru

Описана конструкция однофазного асинхронного электродвигателя с повышенным пусковым моментом, рассмотрены принципы его функционирования. Предложены пути модернизации однофазных асинхронных электродвигателей в направлении снижения энергопотребления. Приведены экспериментальные механические характеристики электродвигателя предложенной конструкции в сравнении с электродвигателем стандартного исполнения. Приведены расчетные значения показателей энергоэффективности для различных вариантов исполнения однофазных асинхронных электродвигателей на базе предложенной конструкции.

Ключевые слова:

Однофазный асинхронный электродвигатель, энергоэффективность, пусковой момент, пусковая обмотка.

Key words:

Single phase induction motor, energy efficiency, starting torque, start winding.

Введение

Однофазные асинхронные электродвигатели (ОАД) малой мощности широко используются в самых различных областях жизнедеятельности современного общества в составе электроприводов для различного рода устройств, питаемых от однофазной сети переменного тока. В первую очередь они получили массовое распространение благодаря использованию в бытовой технике, которая постоянно развивается, приобретает все новые функциональные возможности и интенсивно проникает в жилые и офисные помещения промышленно развитых стран. Данный класс электродвигателей относится к изделиям массового производства и выпускается десятками миллионов штук в год, что определяет повышенный интерес производителей к совершенствованию их конструкций и технологий производства. При этом в русле основных мировых тенденций последних десятилетий наблюдается устойчивое предпочтение параметра энергоэффективности электроприводов над расходами активных материалов и стоимостью их производства.

В этой связи одним из основных эксплуатационных показателей однофазных электродвигателей для бытовой техники является уровень их энергопотребления. Согласно оценкам Министерства экономического развития РФ (доклад Президиуму Госсовета РФ «О повышении энергоэффективности российской экономики») основным потенциалом снижения потребления электрической энергии в «лучших» домохозяйствах обладают холодильные компрессоры (до 50 % всего потенциала). До последнего времени задача снижения электропотребления в жилищном секторе сравнительно успешно решалась путем «импортирования энергоэффективности» из-за рубежа, путем закупки «крупных» бытовых электроприборов (в первую очередь холодильников) с повышенной энергоэффективностью. Так, например, замена устаревших конструкций холодильников на современные энергоэффективные модели может позволить сэкономить до 10 млрд кВт·ч электрической энергии по РФ в год. В связи со стратегической важностью данного показателя Министерством экономического развития РФ планируется к 2020 г. сни-

зитель расход электроэнергии на холодильник до 250–280 кВт-ч/год (аналогичный показатель в 2000 г. составлял 387 кВт-ч/год, а в 2007 г. — 325 кВт-ч/год). Государственной программой Российской Федерации «Энергосбережение и повышение энергетической эффективности на период до 2020 года» (Утверждена распоряжением Правительства Российской Федерации от 27 декабря 2010 г. № 2446-р) предусматривается замена устаревших холодильников и морозильников в 2013–2020 гг. на энергетически высокоэффективные в количестве 125,78 млн штук. При этом планируется обеспечить значительную экономию электрической энергии в жилищном секторе на протяжении 10–30 лет (средний срок службы бытовых холодильников в России).

Достижение существенного снижения расхода электроэнергии бытовыми холодильниками возможно лишь при использовании новых материалов, технологий и технических решений, в первую очередь применительно к электроприводу холодильных компрессоров, в качестве электродвигательного устройства которого, как правило, используются однофазные асинхронные электродвигатели с пусковой обмоткой.

Данный тип однофазных электродвигателей отличается тем, что пусковая обмотка подключается к сети лишь на время пуска, имеет малое сечение провода в сравнении с основной обмоткой и занимает менее 1/3 пазового объема статора. При выполнении пусковой обмотки с повышенным активным сопротивлением создается фазосдвигающий эффект токов в обмотках электродвигателя без дополнительного фазосдвигающего элемента, например конденсатора.

Постановка задачи

Одним из основных направлений совершенствования однофазных асинхронных электродвигателей с пусковой обмоткой является улучшение их пусковых характеристик, определяемых величиной пускового момента [1–6]. Важность данного параметра определяется необходимостью уверенного пуска электродвигателя при повышенном моменте нагрузки на валу, создаваемом компрессором не только при номинальных, но и при малых скоростях вращения (в отличие от нагрузки вентиляторного типа). Наличие определенного превышения пускового момента электродвигателя над максимальным моментом нагрузки необходимо также из соображений сохранения условий пуска электропривода даже при снижении напряжения питающей сети, что наиболее часто имеет место в условиях перегрузки систем электроснабжения в пригородной и сельской местности. Данная проблема достаточно актуальна, так как при пониженном напряжении питающей сети нередки случаи возгорания бытовых холодильников с последующим крупным пожаром и значительным материальным ущербом имуществу. Кроме того, наличие запаса по пусковому моменту в ряде случаев

позволяет снижать проектную мощность электродвигателя, что обеспечивает большую его загрузку в номинальном режиме и уменьшение потребления электроэнергии. Таким образом, цель работы заключается в повышении пускового момента однофазных асинхронных электродвигателей с пусковой обмоткой, а также анализ путей повышения их энергоэффективности.

Разработка новых конструкций однофазных асинхронных электродвигателей

В Томском политехническом университете была разработана конструкция однофазного асинхронного электродвигателя, позволяющая повысить пусковой момент, защищенная патентом РФ на изобретение № 2421865 [7]. Согласно конструкции, в полюсных наконечниках основных полюсов, в основных полюсах и в прилегающем к ним ярме статора выполнены сквозные радиальные пазы с воздушным заполнением или с немагнитными вставками, как это изображено на рис. 1.

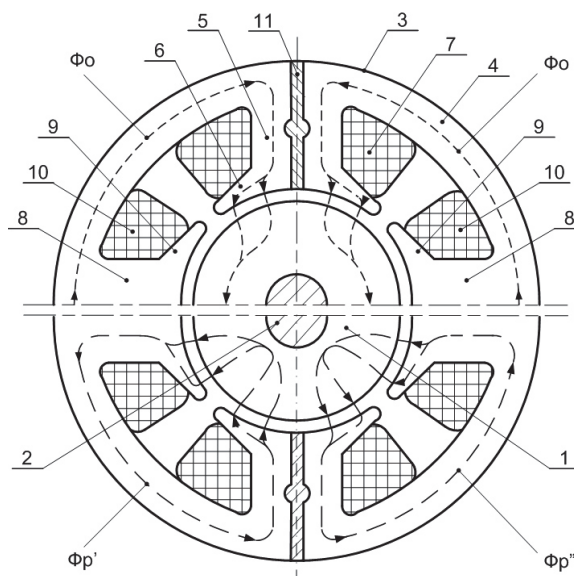


Рис. 1. Активная часть однофазного асинхронного электродвигателя предлагаемой конструкции с отображением силовых линий магнитного поля основных полюсов Φ_o (верхняя половина статора) и силовых линий магнитного поля ротора Φ_r (нижняя половина статора): 1 – ротор, 2 – вал, 3 – статор, 4 – ярмо, 5 – основной полюс, 6 – полюсный наконечник основного полюса, 7 – основная обмотка, 8 – вспомогательные полюсы, 9 – полюсные наконечники вспомогательных полюсов, 10 – вспомогательная обмотка, 11 – сквозной радиальный паз

Как следует из рис. 1, основной магнитный поток Φ_o проходит аналогично его прохождению в традиционных конструкциях статора однофазных асинхронных электродвигателей. Основное конструктивное отличие состоит в том, что за счет применения радиальных пазов, магнитный поток поперечной реакции ротора Φ_r оказывается разделен на две составляющие и представляет совокупность двух магнитных потоков, Φ_r' и Φ_r'' , как это

показано на рис. 1. Причем каждый из указанных магнитных потоков почти в два раза меньше магнитного потока Φ_p , возникающего в электродвигателях традиционной конструкции, поскольку они создаются уменьшенной (ориентировочно в два раза) магнитодвижущей силой (МДС) ротора. Соответственно, каждый из магнитных потоков, Φ_p и Φ_p' , охватывает меньшее число проводников ротора, в результате чего величина индуктивности ротора в конструкции предлагаемого однофазного асинхронного электродвигателя уменьшается почти в два раза по сравнению с однофазным электродвигателем традиционной конструкции. Вместе с тем выполнение сквозных радиальных пазов в полюсных наконечниках основных полюсов, в основных полюсах и в прилегающем к ним ярме статора в предложенной конструкции однофазного асинхронного электродвигателя практически не влияет на величину основного магнитного потока, создаваемого основной обмоткой, и на электромагнитные параметры основной фазы статора.

Таким образом, увеличение магнитного сопротивления для магнитного потока, создаваемого токами ротора, сопровождается снижением величины индуктивного сопротивления фазы ротора и, соответственно, повышением пускового момента электродвигателя, поскольку момент критический и скольжение критическое при этом возрастают. Следовательно, предложенная конструкция однофазного асинхронного электродвигателя позволяет

улучшать его пусковые характеристики в сравнении с известными техническими решениями.

Однофазный электродвигатель предложенной конструкции работает следующим образом. При включении основной фазы с основными обмотками 7 и вспомогательной фазы с вспомогательными обмотками 10 (имеют большее соотношение активного и индуктивного сопротивлений либо включены последовательно с конденсатором) в сеть переменного напряжения создаются два пульсирующих магнитных потока, сдвинутых в пространстве и во времени. Силовые линии магнитных полей, генерируемых основными обмотками 7 и вспомогательными обмотками 10, статора 3 проходят через ярмо 4, основные полюсы 5 с их полюсными наконечниками 6, вспомогательные полюсы 8 с их полюсными наконечниками 9. Суммарное магнитное поле статора 3 будет вращаться в пространстве и наводить в короткозамкнутой обмотке ротора 1 ЭДС, под действием которых в короткозамкнутой обмотке ротора 1 будут протекать токи и создавать магнитный поток ротора 1. Взаимодействие магнитных потоков статора 3 и ротора 1 создает вращающий момент на роторе 1. Причем наличие сквозных радиальных пазов 11 приводит к уменьшению индуктивного сопротивления обмотки ротора 1, что сопровождается изменениями во взаимодействии магнитных потоков статора 3 и ротора 1 и увеличением пускового момента электродвигателя. В результате пуск электродвигателя при за-

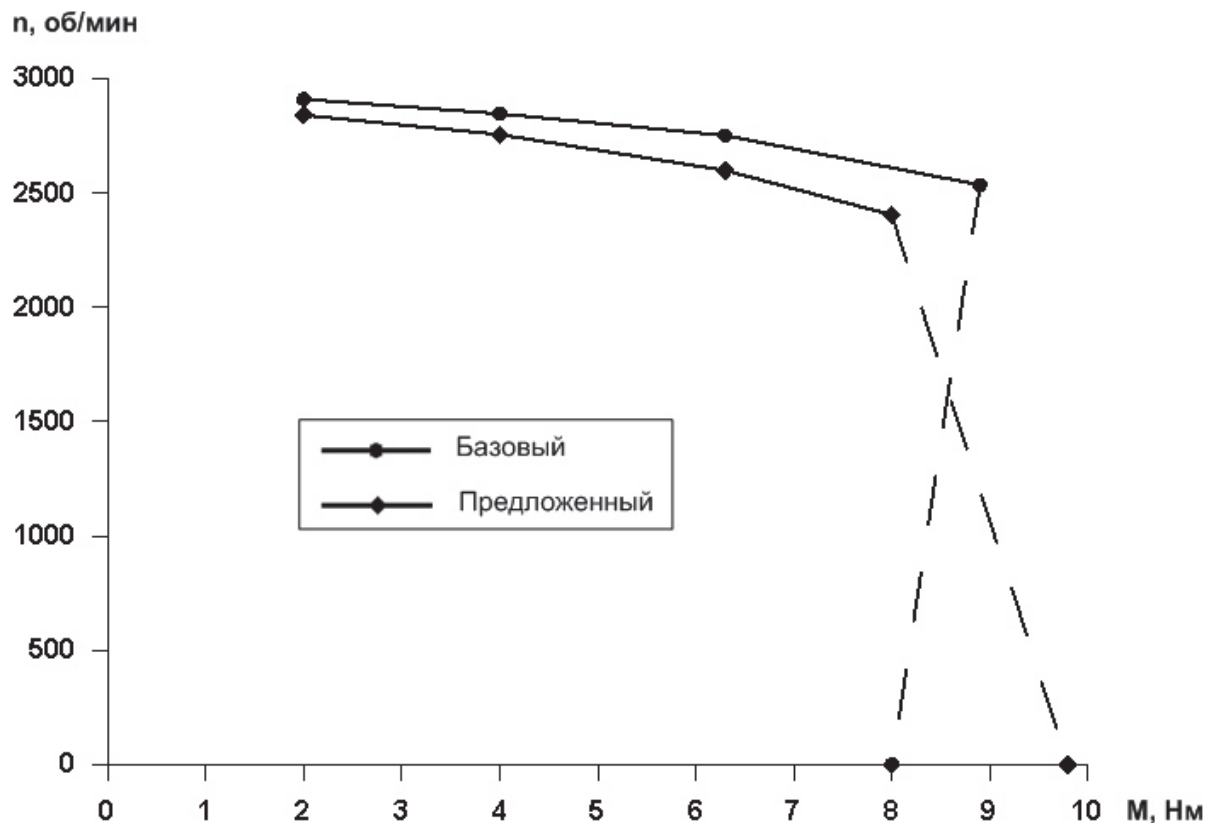


Рис. 2. Экспериментальные механические характеристики ОАД традиционной конструкции в сравнении с предложенной конструкцией ОАД

данной нагрузке на валу 2 осуществляется за более короткий промежуток времени, либо может быть выполнен с увеличенной нагрузкой на валу 2. После выхода электродвигателя в рабочий режим вспомогательная фаза с вспомогательными обмотками 10 может быть отключена, поскольку при рабочей скорости вращения может обеспечиваться достаточный вращающий электромагнитный момент при работе лишь основной фазы с основными обмотками 7 (для электродвигателя с пусковой обмоткой).

Эффект увеличения пускового момента в предложенной конструкции однофазного электродвигателя подтверждается сравнением экспериментальных механических характеристик одного из типов электродвигателей, представленных на рис. 2. Электродвигатель предлагаемой конструкции отличается от прототипа уменьшенным в 1,7 раза значением индуктивного сопротивления фазы ротора. Приведенные данные получены в ходе испытаний опытных образцов электродвигателей на экспериментальной базе Томского электротехнического завода. Полученные результаты подтверждают повышение пускового момента при снижении индуктивности ротора, а также некоторое снижение частоты вращения на рабочем участке механической характеристики. Из приведенных на рис. 2 данных следует, что пусковой момент в электродвигателе предложенной конструкции повышен на 22,5 % в сравнении с традиционной конструкцией ОАД. Следует отметить, что пунктиром на рис. 2 отмечен переход от пуска электродвигателя (с задействованной пусковой обмоткой) на рабочую механическую характеристику.

Таким образом, применение предлагаемого однофазного асинхронного электродвигателя позволяет повысить пусковой момент, что может обеспечить надежный пуск электродвигателя при наличии нагрузки на валу, близкой по величине к номинальной или даже превышающей ее, а также при снижении напряжения питающей сети относительно номинального значения.

Предлагаемый путь повышения величины пускового момента ОАД с пусковой (вспомогательной) обмоткой благодаря снижению индуктивности короткого замыкания вследствие конструктивных изменений в магнитопроводе статора позволяет осуществлять как проектирование новых электродвигательных устройств с улучшенными техническими характеристиками и эксплуатационными параметрами, так и модернизацию существующих конструкций данного типа электродвигателей.

Основными направлениями модернизации ОАД с пусковой обмоткой для холодильных агрегатов могут быть повышение их устойчивости к понижению напряжения питания в сравнении с его номинальным значением и снижение потребления электрической энергии при заданной величине механической энергии, отдаваемой на нагрузку.

В первом случае не требуется каких-либо дополнительных изменений в элементах ОАД поми-

мо описанных выше новаций в конструкции магнитопровода статора. При этом величина пускового момента (по расчетным данным) может быть увеличена на 20...28 %, что позволяет иметь дополнительный 11-процентный запас на снижение напряжения питающей сети (превышает предельно допустимое значение установившегося отклонения напряжения в системах электроснабжения общего назначения). Это позволяет распространить использование холодильников с модернизированным подобным образом электроприводом в тех местностях, где ранее качество электроснабжения не позволяло их безаварийную эксплуатацию, что в ряде случаев не только приводит к выходу из строя холодильного компрессора, но и возгоранию электропроводки и возникновению пожаров, как правило, с большими материальными потерями.

Модернизация ОАД с пусковой обмоткой в направлении снижения энергопотребления имеет несколько путей реализации. Возможен вариант, когда одновременно с предлагаемыми изменениями конструкции статора уменьшается удельное сопротивление элементов беличьей клетки до величины, обеспечивающей сохранение пускового момента электродвигателя на заданном уровне. В этом случае можно ожидать снижения электрических потерь в ОАД на 10...16 % и повышения выходной мощности на 4...6 % (вследствие уменьшения скольжения в рабочем режиме). Экономия потребляемой холодильным компрессором электрической энергии, по предварительным оценкам, только от реализации указанных конструктивных изменений может составить порядка 13 %. Это несколько больше, чем суммарное плановое снижение расхода электроэнергии на холодильник к 2020 г. (около 11 %) с учетом всех предполагаемых усовершенствований его составных элементов, включая повышение теплоизоляционных свойств корпуса холодильника.

Более радикальным вариантом модернизации ОАД является выполнение беличьей клетки ротора из меди или из сплавов с близким к ней удельным сопротивлением (латунь, бронза) наряду с описанными выше изменениями конструкции статора и при необходимости другими усовершенствованиями, обеспечивающими сохранение пускового момента электродвигателя на требуемом уровне. В этом случае мощность на валу электродвигателя может быть увеличена на 8...10 %, а экономия потребляемой электроэнергии составит около 22 %.

Наибольший эффект по снижению энергопотребления ОАД холодильных агрегатов может быть получен при комплексной оптимизации конструкций всех элементов электромеханической системы преобразования электрической энергии в механическую, в том числе кривошипно-шатунного механизма, на котором теряется до 20 % механической энергии. Проведенный анализ показывает, что комплексная оптимизация электромагнитной и механической частей электропривода холодильного компрессора на основе инновационных кон-

структурских решений может позволить сэкономить до 30...40 % потребления электроэнергии, что соответствует 20–30-летнему этапу эволюционной модернизации бытовой холодильной техники в направлении энергосбережения.

Выводы

- Предлагаемые конструкторские решения, направленные на изменение индуктивных параметров ОАД, имеют теоретическое обоснование их технической эффективности и открывают новые возможности для улучшения основных эксплуатационных показателей электроприводов для бытовой холодильной техники, которые обладают значительными экономическими перспективами, в том числе вследствие повышения энергоэффективности модернизированной техники.
- В предложенной конструкции однофазного асинхронного электродвигателя удалось достигнуть повышения пускового момента за счет снижения величины индуктивного сопротивления фазы ротора на 22,5 %. Таким образом, применение предлагаемого однофазного асинхронного электродвигателя с повышенным пу-

сковым моментом может обеспечить надежный пуск электродвигателя при наличии нагрузки на валу, близкой к номинальной или даже превышающей ее, а также при снижении напряжения питающей сети относительно номинального значения.

- Проведенный анализ на примере компрессора холодильного оборудования показывает, что при оптимизации электромагнитной части возможно повысить энергоэффективность до 20 %, а комплексная оптимизация электромагнитной и механической частей электропривода может позволить сэкономить до 40 % электроэнергии.
- В целях максимальной реализации заложенного потенциала в предлагаемых технических решениях целесообразно разработать математические модели различных вариантов их выполнения применительно к одному из базовых типов ОАД с пусковой обмоткой, произвести оптимизацию конструкций, изготовить опытные образцы усовершенствованных электроприводов и провести их всесторонние испытания с целью подтверждения проектных решений и внесения корректив в конструктивные параметры модернизированных электродвигателей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абрамов А.Д., Куделько А.Р. Однофазный асинхронный электродвигатель с повышенным пусковым моментом // Электричество. – 1990. – № 12. – С. 67–69.
2. Однофазный электродвигатель: пат. 2028024 Рос. Федерация. № 5000293/07; заявл. 16.08.91; опубл. 27.01.95, Бюл. № 7. – 6 с.
3. Статор однофазного асинхронного электродвигателя: пат. 1410203 Рос. Федерация. № 4167693; заявл. 26.12.86; опубл. 15.07.88, Бюл. № 26. – 7 с.
4. Однофазный асинхронный электродвигатель: пат. 2010410 Рос. Федерация. № 4948371/07; заявл. 24.06.91; опубл. 30.03.94, Бюл. № 18. – 6 с.
5. Веларде Н.М. Исследование однофазных асинхронных двигателей с пусковой ферромагнитной обмоткой в установившихся и переходных режимах: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Москва, 1995. – 20 с.
6. Коротков Л. Асинхронные двигатели: перспективы совершенствования // Рынок Электротехники. – 2006. – № 4. – С. 171–176.
7. Однофазный электродвигатель: пат. 2421865 Рос. Федерация. № 2010114481/07; заявл. 12.04.10; опубл. 20.06.11, Бюл. № 17. – 10 с.

Поступила 04.03.2013 г.