

ваются достаточно динамично...» и еще «Магнитка – наглядный пример тех положительных перемен, которых удалось добиться в стране за последние годы».

#### Список литературы

1. Никифоров Г.В. Магнитогорский металлургический комбинат в истории России // Изв. вузов. Электромеханика. 2006. № 4. С. 4 – 7.
2. Никифоров Г.В., Карандаев А.С. Совместные разработки ОАО «ММК» и Магнитогорского государственного технического университета в области энергосбережения (Часть 1: Энергосбережение в электроприводе) // Труды IV Международной (XV Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводе «Автоматизированный электропривод в XXI веке: пути развития» (АЭП-2004). Ч. 2. Магнитогорск, 2004. С. 203 – 208.
3. Никифоров Г.В., Карандаев А.С. Совместные разработки ОАО «ММК» и Магнитогорского государственного технического университета в области энергосбережения (Часть 2: Энергосбережение средствами электропривода) // Труды IV Международной (XV Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводе «Автоматизированный электропривод в XXI веке: пути развития» (АЭП-2004). Ч. 2. Магнитогорск, 2004. С. 209 – 215.

4. Журавлев Ю.П. Развитие энергетики ОАО «ММК» в современных условиях // Вестник МГТУ им. Г.И. Носова. 2006. № 2. С. 3 – 5.

#### Bibliography

1. Nikiforov G.V. Magnitogorsky iron-and-steel works in the history of Russia//Izv. High schools. Electromechanics. 2006. № 4. - with. 4–7.
2. Nikiforov G. V, Karandaev A.S. joint of development of open joint-stock company «ММК» and Magnitogorsk state technical university in the field of an energy conservation (the Part 1: the Energy conservation in the electric drive)//Works of IV International (XV All-Russia) conferences on the automatic electric drive «the Automatic electric drive in the XXI century: development paths» (АЭП-2004). Ч. 2. – Magnitogorsk, 2004. – With. 203–208.
3. Nikiforov G. V, Karandaev A.S. joint of development of open joint-stock company «ММК» and Magnitogorsk state technical university in the field of an energy conservation (the Part 2: the Energy conservation electric drive means)//Works of IV International (XV All-Russia) conferences on the automatic electric drive «the Automatic electric drive in the XXI century: development paths» (АЭП-2004). Ч. 2. – Magnitogorsk, 2004. – With. 209–215.
4. Zhuravlyov JU.P. development of open joint-stock company «ММК» power engineering in modern conditions//the Bulletin of MFTU of G.I.Nosova, 2006. № 2. – with. 3–5.

УДК 621.313.333

Корнилов Г.П., Храмшин Т.Р., Карандаева О.И., Губайдуллин А.Р., Галлямов Р.Р.

## СПОСОБЫ ПОВЫШЕНИЯ УСТОЙЧИВОСТИ ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ ПРИ НАРУШЕНИЯХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ\*

Большинство энергетических предприятий - это набор насосных станций для перекачивания потребляемой и потребленной жидкостей; это набор самых разнообразных вентиляторов, дымососов, компрессоров и прочих агрегатов, предназначенных для нагнетания, охлаждения, создания разряжения и т.п.; это очистные сооружения, где также много насосов и трубопроводной (водопроводной и канализационной) сети [1]. Отечественный и зарубежный опыт свидетельствует о высокой эффективности частотно-регулируемого электропривода (ЧРП) в системах водоснабжения, теплоснабжения, вентиляции, воздушного отопления, при производстве электроэнергии и пара. Например, в водоснабжении за счет перехода на частотное регулирование экономия электроэнергии достигает 50%, воды – 15%, тепла – 10%, сокращается вдвое ремонт арматуры, исключаются гидравлические удары, обеспечиваются удобная диспетчеризация и учет энергоносителей. Срок окупаемости новой техники, как правило, не превышает 1 года [2].

Приведенные преимущества не учитывают того факта, что асинхронный двигатель (АД) работает совместно с преобразователем частоты (ПЧ). Незнание ряда особенностей их совместной работы может привести, в лучшем случае, к нерациональному использованию привода, а в худшем – к серьезному снижению надежности электроустановки.

Известно, что ПЧ «не любит» провалы напряжений, а тем более кратковременные отключения, приводящие к сбрасыванию защиты и отключению элек-

тропривода [2]. Статистика показывает увеличение числа аварийных отключений оборудования, технологические механизмы которого оснащены частотно-регулируемым приводом переменного тока. Причиной этого является увеличение длительности перерывов в работе электродвигателей, питаемых от преобразователей частоты, при кратковременных (1-2 с) нарушениях электроснабжения [3]. На ряде объектов это приводит к многомиллионным потерям, поэтому проводятся разработки по повышению устойчивости ЧРП при кратковременных отклонениях напряжения сети.

Классическим техническим решением, обеспечивающим предотвращение отключения электропривода при нарушении электроснабжения (пропадании или снижении питающего напряжения ниже заданного уровня), является переход на резервное электропитание. При этом используется ручной или автоматический ввод резерва. При автоматическом режиме (рис. 1) производится контроль входного напряжения по двум вводам и при необходимости переключение на резервный ввод [1]. После переключения питания электроприводы вводятся в работу автоматически.

Однако, как показано в [4], автоматическое включение резерва на период паузы 2–3 с не является рациональным решением, а создание собственного быстродействующего АВР проблематично как с точки зрения усложнения схемы электроснабжения, так и внесения проблем в сферу электроснабжения по селективности и равномерности загрузки вводов электропитания.

Низкая устойчивость существующих схем построения преобразователей частоты обусловлена тем, что энергия, накопленная в фильтре звена постоянного тока, недостаточна для поддержания устойчивой

\* Работа проводилась при финансовой поддержке Федерального агентства по науке и инновациям (государственный контракт № 02.740.11.0755).

коммутации вентилях автономного инвертора, в результате чего происходят его опрокидывание и отключение ЧРП. Повышение устойчивости ПЧ при кратковременных нарушениях в системе электропитания может быть обеспечено за счет разработок по следующим направлениям:

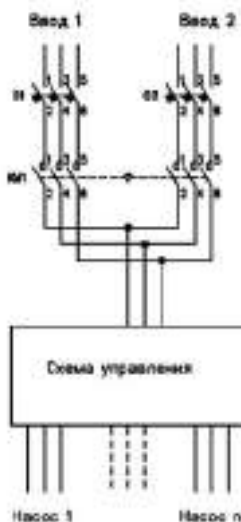


Рис. 1. Схема автоматического перевода насосов на резервное электропитание

1. Совершенствование алгоритмов управления ПЧ.
2. Установка накопителей энергии и аккумулирующих устройств.
3. Электропитание ПЧ от двух вводов.
4. Использование специальных многообмоточных двигателей: вентильного либо асинхронного с двумя статорными обмотками.

В [5] в качестве одной из основных задач при создании высоковольтных ПЧ для регулируемого электропривода названо совершенствование функций микропроцессорного управления:

- автоматический перезапуск (рестарт) ЧРП при восстановлении напряжения после его глубокого снижения или перерыва электроснабжения с быстрым поиском или определением текущей частоты вращения выбегающего электропривода;
- подхват преобразователем частоты вращающегося электродвигателя, что необходимо в системе группового управления несколькими параллельно работающими АД при отключении одного из них от сети электроснабжения и переводе его в режим работы с регулируемой частотой вращения;
- режим синхронного байпаса, обеспечивающего переключение электродвигателя на сеть в режиме точной автоматической синхронизации.

Ниже приводится краткий анализ разработок по перечисленным направлениям.

#### Системы с накопителями энергии

Схема ЧРП с аккумулирующим устройством представлена на рис. 2 [2]. В качестве накопительного устройства могут использоваться аккумуляторные батареи, маховик (либо маховые массы механизма), специальные электронные устройства с электропитанием от сети собственных нужд.

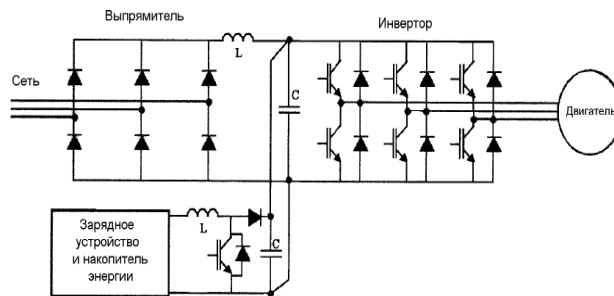


Рис. 2. Схема ЧРП с накопителем энергии

В развитие данной идеи авторами сформулирован новый принцип обеспечения бесперебойного электропитания особо ответственных потребителей без применения быстродействующих АВР и специальных двигателей. Суть его заключается в следующем: каждый преобразователь частоты снабжается двумя комплектами выпрямителей, выходы которых подключены к общему звену постоянного тока (рис. 3). Входы выпрямителей подключены к двум секциям, одна из которых (секция I) является основной и обеспечивает питание в нормальных режимах, дополнительная секция II служит для поддержания работы приводов при провалах напряжения на основной секции.

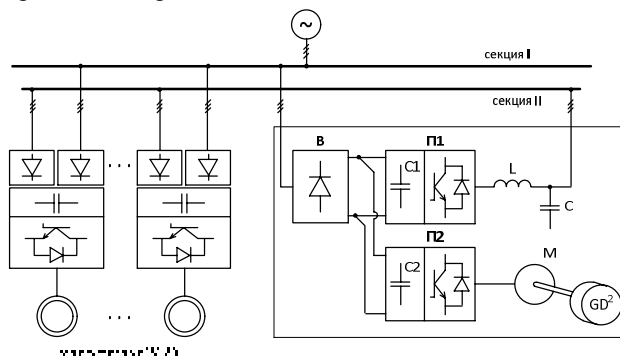


Рис. 3. Схема бесперебойного питания ответственных потребителей с электромеханическим накопителем энергии

Отличительной особенностью данного подхода является то, что электрическую энергию секция II получает не от резервного ввода, а от специального электромеханического накопителя энергии. Задача состоит в обеспечении непрерывности электропитания особо ответственных потребителей при провалах напряжения на основных шинах; она решается благодаря двум принципам, заложенным в конструкцию устройства – это:

- накопление достаточной активной энергии и сохранение ее до перерыва в электропитании;
- использование запасенной энергии путем ее преобразования в электрическую с заданными параметрами.

#### Совершенствование систем управления ЧРП

В непосредственной связи с принципом рассмотренных электроприводов с накопителями электрической энергии находятся способы управления, используемые для поддержания момента электродвигателя

при провалах напряжения энергии собственных вращающихся масс. Однако при этом необходимо исключить торможение двигателя вследствие гашения поля ротора. Это осуществляется за счет отключения его от источника питания на время перерывов электроснабжения, т.е. перевода в режим свободного выбега. Для сокращения длительности таких перерывов наряду с рабочими режимами управления преобразователем предусматриваются специальные режимы управления.

Основным является способ управления преобразователем частоты, согласно которому при нарушении электроснабжения прерывают рабочий режим управления и снижают с ограниченной скоростью выходную частоту, а при возобновлении электропитания повышают ее и восстанавливают рабочий режим управления [6]. Преобразователь, управляемый по этому способу, при кратковременных нарушениях электроснабжения поддерживает на заданном уровне напряжение звена постоянного тока за счет рекуперации энергии инерционного вращения электродвигателя и сопряженного с ним механизма. Такой способ управления при нарушениях электроснабжения характерен для большинства ПЧ, представленных на российском рынке.

Недостаток данного способа управления состоит в следующем. Следствием снижения выходной частоты преобразователя, которое предусматривается в данном способе, является приложение тормозного момента к ротору электродвигателя. Поэтому электродвигатель и приводимый технологический механизм, продолжая инерционное вращение (с постепенной потерей производительности), ускоренно замедляют вращение и при восстановлении электроснабжения начинают разгон с меньшей скорости. В результате время разгона механизма до требуемой скорости вращения увеличивается и соответственно увеличивается длительность перерыва в нормальной работе механизма. Кроме того, следствием ускоренного замедления вращения приводимого механизма является повышение вероятности срабатывания технологической защиты оборудования при кратковременных нарушениях электроснабжения.

Для устранения указанного недостатка в [7] предложен способ управления преобразователем частоты, обеспечивающий улучшение начальных условий разгона электродвигателя и замедление падения скорости вращения приводимого технологического механизма. При управлении ПЧ со звеном постоянного тока и инвертором напряжения с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ) при нарушении электроснабжения прерывают рабочий режим управления, сохраняют выходную частоту, снижают выходное напряжение со скоростью, которую ограничивают, поддерживая на заданном уровне напряжение звена постоянного тока, и запирают инвертор, а после восстановления электроснабжения включают инвертор, повышают выходное напряжение и возобновляют рабочий режим управления. Схемы и описание работы устройств, реализующих способ, представлены в [7, 8].

Способ имеет развития и уточнения для частных случаев его реализации, которые состоят в том, что [7]:

– момент запирающего инвертора устанавливают путем отсчета заданной задержки от момента снижения

выходного напряжения до заданной величины или от момента фиксации нарушения электроснабжения;

– после восстановления электроснабжения выходную частоту устанавливают равной или пропорциональной ее сохраненному значению или в соответствии с фактической частотой вращения электродвигателя, питаемого преобразователем;

– после восстановления электроснабжения повышают выходное напряжение со скоростью, которую ограничивают, поддерживая на заданном уровне пусковой ток электродвигателя, питаемого преобразователем.

#### Использование ПЧ с двумя вводами

Ряд авторов предлагает решение рассматриваемых проблем электропривода средствами самого электропривода. Поэтому в [9, 10] предложены системы ЧРП, обеспечивающие безостановочную работу ответственных механизмов с использованием электропитания от двух или более вводов, одновременное нарушение по которым маловероятно. Так, в [9] поставленная задача решается тем, что создается резервирование автономного инвертора напряжения на уровне звена постоянного тока. Для этого частотный преобразователь снабжается вторым звеном постоянного тока, входы которого через автоматический выключатель подключены к резервному источнику питания, например к другой секции питающей сети (рис. 4, а). В случае просадки напряжения на одном из питающих вводов напряжение на входе фильтра остается неизменным, что обеспечивает стабильную работу инвертора.

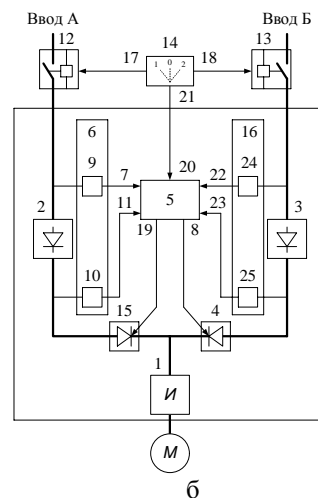
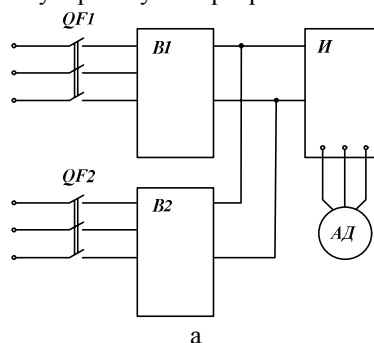


Рис. 4. Схемы электроприводов с двухвходовыми ПЧ: а – согласно [9]; б – согласно [10]

В [10] отмечены недостатки данного устройства, основным из которых является бесконтрольное переключение электропитания ПЧ с одного ввода на другой при колебаниях величины напряжения на вводах или динамическом изменении потребления тока инвертором. Ввиду отсутствия приоритетности электропитания данного электропривода от определенного ввода, могут иметь место осложнения для электропитания других потребителей. В результате надежность работы электропривода при нарушениях электроснабжения снижается.

Для устранения указанного недостатка разработан двухвходовой ПЧ, в котором повышение надежности обеспечивается путем исключения бесконтрольного переключения электропитания с ввода на ввод [10]. В условиях нормального электроснабжения один из вводов используется в качестве основного (приоритетного), а другой – в качестве резервного; при нарушении электроснабжения по основному вводу осуществляется автоматическое переключение с основного ввода на резервный.

Схема электропривода, обеспечивающего техническую реализацию способа, представлена на **рис. 4, б**. При наличии напряжения на обоих вводах электропитание инвертора 1 осуществляется от приоритетного ввода, например ввода *A* через выпрямитель 2 и ключ 15, при этом ключ 4 закрыт, а выпрямитель 3 находится в режиме горячего резерва, то есть на его выходе имеется выпрямленное напряжение. Электропитание выбранного приоритетного ввода контролируется соответствующим блоком 6 или 16 контроля. Нарушение электропитания по приоритетному вводу *A* блок 5 обнаруживает по сигналу, поступающему на его информационный вход от блока 6. В соответствии с этим сигналом блок 5 формирует команду на замыкание ключа постоянного тока и выдает ее на свой выход 8 или 19 в зависимости от сигнала на своем управляющем входе 20, несущего информацию о сделанном выборе приоритетного ввода. Если приоритетным выбран ввод *A*, питающий выпрямитель 2, то блок 5 выдает указанную команду на выход 8 и включает ключ 4. Если приоритетным выбран ввод *B*, питающий выпрямитель 3, блок 5 выдает указанную команду на выход 19 и включает ключ 15.

В [10] также представлены упрощенные варианты преобразователей частоты, реализующих рассмотренный принцип регулирования.

#### **Электропривод на базе вентильно-индукторного двигателя**

В [11–14] задача обеспечения устойчивости электропривода при нарушениях электроснабжения решается за счет применения многофазного вентильно-индукторного электродвигателя (ВИД) с независимой обмоткой возбуждения. Известными преимуществами такого класса ВИД являются [12]: отсутствие магнитов на роторе, расширенный диапазон работы при регулировании в цепи независимой обмотки возбуждения, высокая надежность, большая перегрузочная способность, обеспечивающая запас по мощности электродвигателя. Эти достоинства позволяют обеспечить внутреннее оперативное резервирование мощности на случай отказов в преобразователях и возможность кратковременного продолжения работы в

аварийных режимах с использованием заложенного резерва мощности, повышая тем самым надежность работы привода.

Наличие нескольких фидеров сетевого питания и введение устройств автоматического включения резерва, трансформаторов, устройства распределения силового питания, преобразователей частоты, станции управления двигателем и интеллектуальных модулей, позволяют задать необходимый режим работы в случае аварийного провала напряжения на одном из фидеров, а также автоматически переключиться на другой фидер с кратковременным использованием во время переключения заложенного резерва по мощности электродвигателя. Вследствие этого электропривод продолжает работать без остановки и потери мощности. При восстановлении напряжения на аварийном фидере обеспечивается обратное переключение и возвращение электропривода в исходный режим работы. Таким образом, обеспечивается непрерывность работы электропривода.

Разработана серия устройств, реализующих изложенный принцип. Согласно [11] в электропривод на базе многофазного ВИД 10 (**рис. 5, а**) с независимой обмоткой возбуждения 8 введены устройства автоматического включения резерва 1, трансформаторы 2, устройство распределения силового питания 3 с коммутационной и защитной аппаратурой, станция управления двигателем 6, преобразователи частоты 4, каждый из которых имеет выходы для питания независимой обмотки возбуждения электродвигателя, а также информационные выходы, подключенные к выходу датчика положения ротора 9, все преобразователи частоты соединены между собой локальной промышленной сетью, к которой подключены интеллектуальные модули 5.

Для повышения надежности работы одна часть электропривода получает питание от ФИДЕРА1, а вторая – от ФИДЕРА2. С силовых выходов устройств автоматического включения резерва питание подается на входы трансформаторов напряжения 2, в процессе работы последних напряжение появляется на их выходах и далее передается на независимые входы устройства распределения силового питания 3. В случае провала напряжения на одном из фидеров сетевого питания происходит быстрое автоматическое переключение на другой фидер. Во время этого переключения задается необходимый режим работы электропривода с кратковременным использованием заложенного резерва мощности электродвигателя, вследствие чего электропривод продолжает работать без остановки и потери мощности. После переключения на второй фидер необходимость использования резерва по мощности исчезает, и электропривод работает в номинальном режиме. При восстановлении напряжения на аварийном фидере происходит переключение обратно на него, и электропривод возвращается в исходный режим работы, таким образом, обеспечивается непрерывность работы электропривода.

Предложенный вентильно-индукторный электропривод позволяет создать сложные системы электроприводов непрерывного действия с повышенными требованиями к надежности.



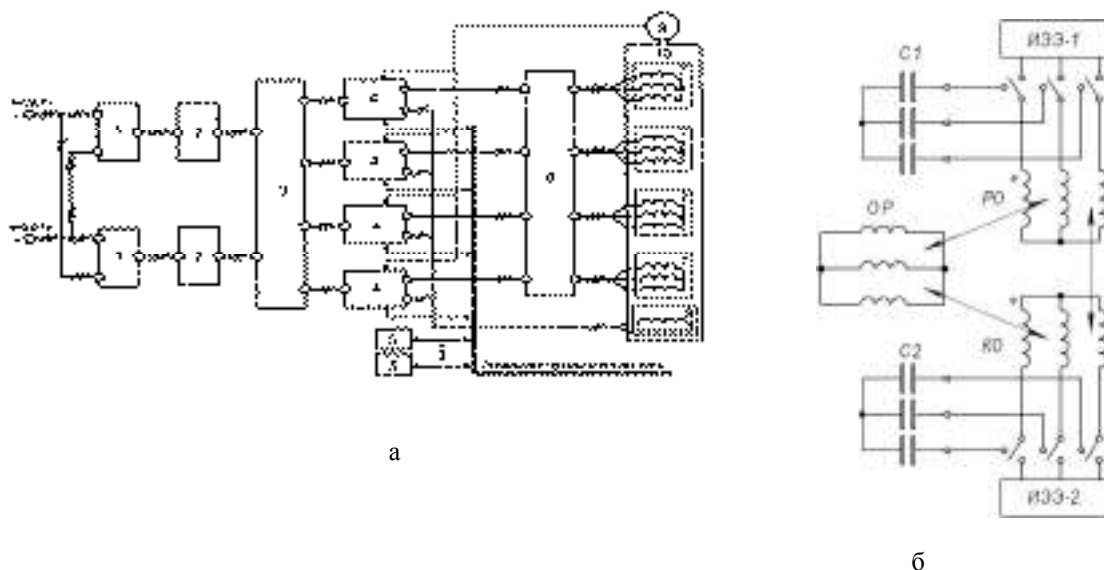


Рис. 5. Схемы электроприводов с питанием от двух секций шин: а – на базе ВИД; б – на базе АД с двумя статорными обмотками

Рассмотренный электропривод, а также решения, предложенные в [13, 14], основаны на рациональном использовании преимуществ многофазного ВИД, позволяющих обеспечить внутреннее оперативное резервирование мощности на случай отказов в преобразователях и возможность кратковременного продолжения работы в аварийных режимах с использованием заложенного резерва мощности, повышая тем самым надежность работы электропривода.

Оригинальное решение, которое представляется перспективным многим специалистам, предложено автором [15]. На базе разработанного и исследованного АД с индивидуальной компенсацией реактивной мощности предлагается схема асинхронного электропривода с питанием от двух источников электрической энергии (рис. 5, б). В настоящее время проводятся исследования предложенного электропривода и ведется подготовка к его промышленному внедрению. Разрабатываются варианты использования данного АД в электроприводах с частотным регулированием скорости.

#### Список литературы

1. Проекты АСУ технологических процессов и установок с применением частотно-регулируемых приводов. URL: <http://www.promdrive.ru/load/33.pdf>
2. Фролов Ю.М. Состояние и тенденции развития электропривода. URL: <http://www.v-itec.ru/electrotech/2006/01/pdf/2006-01-01.pdf>
3. Тарасов Д.В. Требования к частотно-регулируемым электроприводам насосов и вентиляторов при аварийных режимах в системе электроснабжения котельных // Электрические станции. 2006. №1. С. 52–56.
4. Крылов Ю.А. Разработка энерго-ресурсосберегающих технологий в топливно-энергетическом хозяйстве города на основе современного электропривода: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. М.: МЭИ, 2004. 40 с.
5. Лазарев Г. Частотно-регулируемый электропривод насосных и вентиляторных установок – эффективная технология энерго- и ресурсосбережения на тепловых электростанциях // Силовая электроника. 2007. №3. С. 41–48.
6. Преобразователь частоты: руководство по эксплуатации / Компания Emotron. 2004.
7. Пат. 2344538 РФ, МПК H02P 1/00. Способ управления преобразователем частоты при нарушениях электроснабжения / А.А. Ионов, Ю.А. Крылов, А.Н. Ремезов и др. Оpubл. 2009. Бюл. №2.
8. Пат. 72589 РФ, МПК H02P 27/08. Преобразователь частоты / А.А.

9. Ионов, Ю.А. Крылов, А.Н. Ремезов и др. Оpubл. 2008. Бюл. №11.
9. Пат. 32333 РФ, МПК H02P 5/00. Устройство регулирования частоты напряжения питания электродвигателей переменного тока / С.Н. Станкевич, Ю.А. Крылов. Оpubл. 2003. Бюл. №25.
10. Пат. 80713 РФ, МПК H02M 5/40. Преобразователь частоты для электропривода непрерывного действия / Ю.А. Крылов, Т.П. Крылова. Оpubл. 2005. Бюл. №5.
11. Пат. 53515 РФ, МПК H02M 5/40. Вентильно-индукторный электропривод / В.Н. Остриров, Д.Е. Корпусов, В.Ф. Козаченко и др. Оpubл. 2006. Бюл. №16.
12. Козаченко В.Ф., Остриров В.Н., Русаков А.М. Перспективные системы экскаваторного электропривода на базе вентильно-индукторных двигателей с независимым возбуждением // Докл. науч.-метод. семинара. М.: Изд-во МЭИ, 2004. С. 101–112.
13. Пат. 66129 РФ, МПК H02M 5/40. Электропривод для непрерывных процессов / А.В. Сорокин, А.Н. Ремезов, Ю.И. Кочанов. Оpubл. 2007. Бюл. № 24.
14. Пат. 2368059 РФ, МПК H02M 5/40. Устройство для питания вентильно-индукторного электродвигателя / А.В. Сорокин, А.Н. Ремезов, Ю.И. Кочанов. Оpubл. 2009. Бюл. № 26.
15. Мугалимов Р.Г. Асинхронные двигатели с индивидуальной компенсацией реактивной мощности и электроприводы на их основе: монография. Магнитогорск: Изд-во МГТУ им. Г.И. Носова, 2011. 250 с.

#### Bibliography

1. Designs of an automatic control system of processes and installations with application of frequency-controlled drives. <http://www.promdrive.ru/load/33.pdf>.
2. Frolov JU.M. State and trends of development of the electric drive.- <http://www.v-itec.ru/electrotech/2006/01/pdf/2006-01-01.pdf>
3. Tarasov D.V. Demand to adjustable-frequency electric drives of pumps and ventilating fans at crash conditions in system of an electrical supply of boiler-houses//Electrical stations. - 2006, №1. - With. 52-56.
4. Krylov JU.A. Development energy resource-saving production engineering in a fuel and energy equipment of a city on the basis of the modern electric drive: the Abstract dis. ... Drs. teh. Sciences. M: МЭИ. 2004. - 40 with.
5. Lazarev G. Adjustable-frequency electric drives of pump and fan installations - effective production engineering power- and resource-saving on thermal power stations//Power electronics. - 2007, №3. - with. 41-48.
6. Company Emotron. The Frequency converter. The operating manual. - 2004
7. The Way of running of the frequency converter at losses of supply / A.A. Ionov, JU.A.Krylov, A.N.Remezov, etc./the Patent of the Russian Federation № 2344538, МПК H02P 1/00. Print. 2009. Pat. №2.
8. The Frequency converter / A.A. Ionov, JU.A.Krylov, A.N.Remezov, etc./the Patent of the Russian Federation № 72589, МПК H02P 27/08. Print. 2008. part №11.
9. The Arrangement of frequency control of a supply voltage of electric motors of an alternate current / S.N.Stankevich, JU.A.Krylov//the Patent of the Russian Federation № 32333, МПК H02P 5/00. Print. 2003. Pat. №25.
10. The Frequency converter for the electric drive of continuous operation / JU.A.Krylov, Etc. Krylov//the Patent of the Russian Federation № 80713,

- МПК H02M 5/40. Print. 2005. Pat. №5.
11. Valve-inductor the electric drive / V.N.Ostrirov, D.E.Korpusov, V.F.Kozachenko, etc./the Patent of the Russian Federation № 53515, МПК H02M 5/40. Print. 2006. Pat. №16.
  12. Kozachenko V. F., Ostrirov V. N., Rusakov A.M. Perspective's system excavating the electric drive on baseline valve-inductor separately excited motors. Doc. nauch.-method. A seminar. - M: Publishers MEI, 2004. - With. 101-112.
  13. The Electric drive for continuous processes/A.V. Sorokin, A.N.Remezov, JU.I.head/the Patent of the Russian Federation № 66129, МПК H02M 5/40. Print. 2007. Pat. № 24.
  14. The Arrangement for power supply valve-inductor the electric motor/A.V. Sorokin, A.N.Remezov, JU.I.head/the Patent of the Russian Federation № 2368059, МПК H02M 5/40. Print. 2009. Pat. № 26.
- Mugalimov R.G. Asynchronous motor with an individual reactive power compensation and electric drives on their ground: the monography. - Mag-nitogorsk: МГТУ Publishers, 2011. - 250 with.

УДК 621.333

Омельченко Е.Я.

## МАГНИТОДВИЖУЩИЕ СИЛЫ ДВУХФАЗНЫХ ОБМОТОК АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

В настоящее время для подвижного состава, используемого для металлургической промышленности, разрабатываются и испытываются системы регулируемого электропривода по системе «преобразователь частоты – асинхронный двигатель» на базе двухфазных асинхронных короткозамкнутых двигателей. Разработка новых систем электропривода и анализ существующих требует разработки строгих математических моделей электрических машин [1]. Важную роль при этом играет конфигурация магнитного поля, которая зависит от конфигурации магнитной цепи и свойств магнитных материалов, от конструкции обмоток, уложенных в пазы, и токов, протекающих по фазам обмоток. От правильности расчета магнитной индукции вдоль зазора зависят величина и форма индуцируемых в обмотках ЭДС, а также величина и характер электромагнитного момента машины, используемых при математическом моделировании электропривода.

Целью статьи является разработка методики расчета результирующих магнитодвижущих сил и волны магнитодвижущих сил, их анализ в зависимости от конструкции и количества фаз обмоток. Для этого необходимо разработать методику расчета магнитодвижущих сил распределенных многослойных обмоток двухфазных машин, выполнить гармонический анализ полученных кривых и оценить результаты.

Построение МДС фазной обмотки обычно [2–4] выполняется с учетом распределения катушек по пазам, но не учитывается распределение катушки по ширине паза. Имеющиеся результаты показывают, что на ширине пазового деления величина МДС, а значит, и величина магнитной индукции остаются постоянными. Переход величины МДС от одного паза к другому происходит по оси паза скачком. Есть участки, когда по всей ширине паза МДС равна нулю. Однако реальное магнитное поле в зазоре имеет более равномерную картину, поэтому полученные результаты не совсем точны. Представление катушечной группы, полностью распределенной вдоль зазора на длине  $q$  [2], дает более равномерную картину распределения МДС. Однослойная фазная обмотка в этом случае описывается трапецеидальной периодической волной, а двухслойные обмотки имеют более сложные формы, зависящие от коэффициента укорочения.

Этот подход можно считать более правильным и его следует рассмотреть более подробно с учетом пазового деления и схем расположения катушечных групп.

Чтобы рассчитать форму пространственной обмоточной функции в зависимости от схемы обмотки, необходим анализ формирования намагничивающих сил в зависимости от ширины проводников, ширины паза, величины скоса пазов. Зазор электрической машины постоянен, существенно меньше размеров пазов и зубцов, поэтому магнитное поле в зазоре  $\delta$  будем считать как плоско-параллельное, а описание намагничивающих сил, индукций вдоль воздушного зазора будем выполнять, используя линейную развертку по углу  $\Theta$ .

Стоячая волна МДС элементарной катушки, состоящей из одного витка тонкого провода, пропускающего постоянный ток  $i$ , имеет прямоугольную симметричную форму с амплитудой  $i/2$  и периодом  $2\tau$  ( $F=\pm i/2$ ). Изменение знака МДС происходит в точках заложения проводников. Анализ влияния толщины проводника на форму волны МДС выполняется по этапам:

- проводник представляется прямоугольником с высотой  $h$  и шириной  $b$ ;
- прямоугольник по вертикали разбивается на элементарные проводники высотой  $h$  и основанием  $\Delta b$ , стремящимся к нулю;
- плотность тока во всех элементарных проводниках одинаковая.

В этом случае МДС каждого элементарного проводника будет иметь прямоугольную симметричную форму с амплитудой  $i\Delta b/(2b)$ . МДС каждого элементарного проводника сдвинута по отношению с соседней на  $\Delta b$ . Результирующая МДС проводника равна сумме МДС элементарных проводников и представляется при  $\Delta b \rightarrow 0$  в виде симметричной трапеции высотой  $i/2$ . Горизонтальная проекция наклонного участка трапеции равна ширине проводника  $b$ . В конкретном случае на интервале от 0 до  $b$  линейная плотность тока прямоугольного проводника  $A=i/b=const$ . Высота проводника  $h$  на линейную плотность не влияет. Аналогичные рассуждения справедливы для группы проводников, уложенных в прямоугольный паз, где в качестве параметров  $b$  и  $h$  будут фигурировать ширина и высота паза.