

Б.И. Абрамов, Л.Х. Дацковский, И.К. Кузьмин, Ю.В. Шевырёв
К ВОПРОСУ ВЫБОРА ТИПА
ЭЛЕКТРОПРИВОДА ДЛЯ ШАХТНЫХ
ВЕНТИЛЯТОРОВ

Вентиляторная установка является одной из ответственных и энергоемких установок в производственном процессе современного горнорудного предприятия. В настоящее время в качестве перспективных для вентиляторных установок рассматриваются: частотно-регулируемые синхронные и асинхронные электропривода с преобразователями частоты на основе автономных инверторов; частотно-регулируемые синхронные электропривода по схеме «вентильного двигателя». При модернизации электроприводов центробежных вентиляторов с асинхронными двигателями с фазным ротором, ресурс которых еще не выработан, целесообразно применение АВК.

Ключевые слова: вентиляторная установка, синхронный электродвигатель, асинхронный электродвигатель, вентильный двигатель, частотный преобразователь, асинхронный вентильный каскад, тиристорное пусковое устройство.

DOI: 10.25018/0236-1493-2017-7-0-13-21

Вентиляторная установка является одной из ответственных и энергоемких установок в производственном процессе современного горнорудного предприятия. Поэтому при выборе электропривода необходимо учитывать следующие специфические особенности вентиляторных установок (ВУ) [1–2]:

1. Сложность схем шахтного проветривания, большая длина и разветвленность вентиляционной сети и, как следствие, большая доля неопределенности при вычислении исходных параметров системы вентиляции.

2. Длительный процесс вывода вентилятора на максимальные величины производительности и давления (для некоторых рудников этот процесс достигает величины порядка 10 лет), по которым, собственно, и выбирается вентилятор, что приводит к работе вентилятора в режимах отличных от расчетных (номинальных).

3. Дискретность шкалы диаметров вентиляторов, которые могут быть использованы в ВУ, что в разнообразных условиях применения в каждом конкретном случае делает проблематичной эксплуатацию ВУ в зоне максимально возможных значений ее энергетических показателей.

4. Вентиляторы ВУ относятся к классу механизмов с тяжелым длительным режимом пуска (соотношение момента инерции электродвигатель/вентилятор превышает десятки раз, и как результат продолжительность пуска вентилятора с большим диаметром рабочего колеса может достигать несколько минут).

5. Переменная величина естественной тяги, которая изменяется в зависимости от температуры воздуха на поверхности в течение суток, недель, месяцев и сезонов года.

Имеются два типа вентиляторов: осевые и центробежные.

У осевых вентиляторов нашли следующие методы аэродинамического регулирования:

а) поворотом лопаток направляющего аппарата;

б) дросселированием на всасывающей или нагнетательной стороне.

Наибольшее распространение получил первый метод. Этот метод предпочтителен при алгоритме регулирования с поддержанием постоянной производительности. Основным недостатком метода — небольшая глубина экономичного регулирования.

Метод регулирования дросселированием практически не применяется из-за низкой экономичности.

Производительность у осевых вентиляторов регулируется также изменением количества лопаток, установленных на рабочее колесо вентилятора, и углом поворота этих лопаток.

Регулирование производительности осевых вентиляторов типа ВОД изменением их частоты вращения невозможно, что предопределяется нестабильностью участков механических характеристик.

Для вентиляторных установок главного проветривания с центробежными вентиляторами, в отечественной практике, нашел применение регулируемый по скорости электропривод. Это обусловлено QH-характеристикой центробежного вентилятора, позволяющей регулирование производительности изменением скорости вращения вентилятора.

Регулируемый по скорости электропривод турбомеханизмов требует дополнительных затрат, связанных с оснащением двигателя переменного тока преобразователем частоты. Это обстоятельство должно быть учтено при оценке эффективности выбора типа электропривода. Конкретная цифра экономии электроэнергии зависит от графика работы того или иного механизма, но считается с достаточной степенью достоверности, что эта цифра близка к 30% [3].

Комплектный регулируемый электропривод центробежных вентиляторов вентустановок главного проветривания (ГВУ)

Начиная с первых промышленных поставок использовались варианты реализации регулируемых электроприводов, основные из которых следующие [1—3]: вентилятор с электроприводом по схеме асинхронного вентильного каскада; вентилятор с электроприводом по схеме «машины двойного питания»; вентилятор с электроприводом по схеме вентильно-машинного каскада (в том числе комбинированного вентильно-машинного каскада для вентилятора ВЦД-47 «Север»); вентилятор с электроприводом на основе каскада Шербиуса с коллекторной машиной; вентилятор с электроприводом на основе каскада Кремера.

В настоящее время в качестве перспективных для вентустановок ГВУ рассматриваются: частотно-регулируемые синхронные электропривода по схеме «вентильного двигателя»; частотно-регулируемые асинхронные электропривода с преобразователями частоты на основе автономных инверторов. При модернизации применяются регулируемые асинхронные электропривода по схеме АВК.

В таблице приведена сравнительная характеристика регулируемых электроприводов центробежных вентиляторов.

Частотно-регулируемый синхронный электропривод по схеме «вентильного двигателя»

Электропривод по схеме «вентильного двигателя» получил большое распространение для данного класса механизмов [4—6, 7—10].

В схеме «вентильного двигателя» используется преобразователь с естественной коммутацией с промежуточным звеном постоянного тока.

В двигательном режиме управляемый выпрямитель передает мощность

Варианты выполнения регулируемых электроприводов ГВУ с центробежными вентиляторами ВЦД-42.5 (ВПЦД-4.5)

Тип электропривода	Преимущества	Недостатки
<p>Частотнорегулируемый синхронный электропривод по схеме «Синхронный двигатель — преобразователь частоты со звеном постоянного тока (по схеме «вентильного двигателя») с входным силовым преобразовательным трансформатором».</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Плавный пуск. 2. Экономичное энергопотребление за счет регулирования скорости от 125—450 об/мин по мере выхода на максимальную производительность, а также за счет суточного и сезонного регулирования производительности. 3. Реализация СД с двумя трехфазными статорными обмотками, сдвинутыми друг относительно друга на 30 э.п. град., улучшает механическую совместимость СД и вентилятора. 4. Входной силовой трансформатор с двумя вентильными обмотками реализует работу силового выпрямителя ПЧ относительно питающей сети по эквивалентной 12-пульсной схеме 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Потребление реактивной мощности определяется диапазоном регулирования частоты вентустановки. 2. Спектр гармонически потребляемого сетевого тока содержит высшие гармоники: 11-я гармоника — 9%, 13-я — 7.7% и т.д. 3. Усиленная демпферная обмотка СД
<p>Частотно-регулируемый асинхронный электропривод по схеме «Асинхронный двигатель с к.з. ротором — преобразователь частоты со звеном постоянного напряжения с входным многообмоточным трансформатором».</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Плавный пуск. 2. Экономичное энергопотребление за счет регулирования скорости от 250—450 об/мин по мере выхода на максимальную производительность, а также за счет суточного и сезонного регулирования производительности. 3. Хорошая электромагнитная совместимость 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Малая величина воздушного зазора в асинхронном двигателе. 2. Наличие подшипниковых токов электродвигателя и от части рабочего механизма. 3. Усложнения конструкции входного преобразовательного трансформатора
<p>Регулируемый электропривод по схеме «асинхронно-вентильного каскада» с входным преобразовательным трансформатором. Преобразователь выполнен относительно питающей сети по эквивалентной 6-пульсной схеме.</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Мощность преобразователя определяется диапазоном частоты регулирования вентустановки. 2. Регулирование скорости в диапазоне от 250 до 450 об/мин с помощью диодно-транзисторного преобразователя, включенного в роторные цепи. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Величина коэффициента мощности в номинальном режиме -0,84. 2. Пуск с помощью резисторов, включенных в роторные цепи.

в цепь постоянного тока, а преобразователь, соединенный со статорными обмотками синхронного двигателя работает в режиме инвертора тока. Коммутация тиристоров инвертора осуществляется за счет ЭДС двигателя, которая наводится в обмотках статора при вращении ротора. Последовательность коммутации при выбранном направлении вращения определяется угловым положением ротора, которое вычисляется в системе управления.

В 2001 г. ОАО «Электропривод» выполнил технико-экономическое обоснование по регулируемому электроприводу ГВУ с вентиляторами ВЦД-42.5 по схеме «асинхронно-вентильного каскада» и «вентильного двигателя», тип соответственно АКС-17-76-12УХЛ4 и 4Т-292-12Н (производства ЧКД «Электротехника»). Приводные двигатели мощностью 3150 кВт, номинальной частотой вращения 460 об/мин.

Сравнение двух типов регулируемых электроприводов показало, что электропривод по схеме «вентильного двигателя»

при увеличенных на 8,3% затратах на электрооборудование относительно варианта с АВК обеспечивает: годовую экономию электроэнергии в размере 3 725 190 кВт·ч; более высокую надежность, обусловленную высокой надежностью синхронного двигателя по сравнению с асинхронным двигателем с фазным ротором; большую глубину регулирования скорости (460 об/мин — 125 об/мин для ВД против 460 об/мин — 330 об/мин для АВК).

ОАО «Электропривод» совместно с фирмой «ЧКД-Электротехника» (Чехия) осуществили разработку и поставку электрооборудования для регулируемого электропривода вентиляторов ВЦД-42.5 по схеме вентильного двигателя для ГВУ в ОАО «ГМК «Норильский никель».

В 2004 г. ВУ введена в эксплуатацию. ВУ включает в свой состав два центробежных вентилятора типа ВЦД-42,5 (условно — основной и резервный) двухстороннего всасывания с регулируемой частотой вращения от 125 до 500 об/мин.

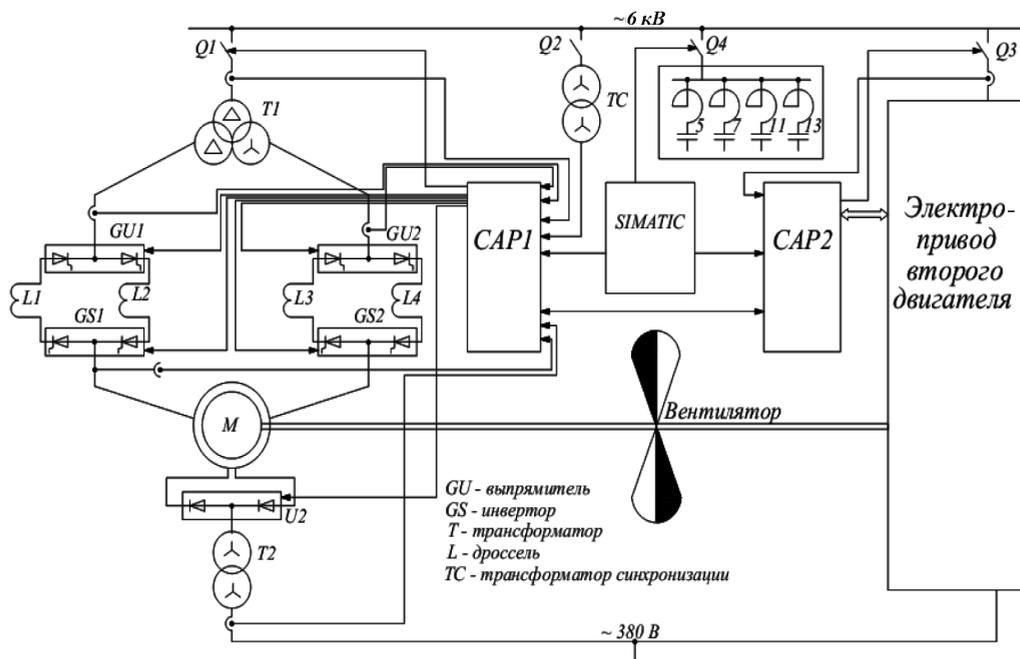


Рис. 1. Структурная схема вентилятора

Основные параметры вентилятора типа ВЦД-42,5 следующие: номинальная мощность 4350 кВт, номинальный момент 83 215 Нм, время разгона от нулевой до номинальной скорости 180 с.

На рис. 1 приведена структурная схема частотно-регулируемого синхронного электропривода для одного вентилятора. Для привода вентилятора используются два синхронных двигателя (СД), работающие на общий вал.

Для решения проблемы электромагнитной совместимости электроприводов с питающей энергосистемой используется четырехзвенное ФКУ с фильтрами 5-й, 7-й, 11-й и 13-й гармоник, подключенное к шине 6 кВ, к которой подсоединены помимо двух частотно-регулируемых электроприводов вентилятора еще ряд потребителей. Основная величина компенсирующей мощности заложена в звеньях фильтров 11-й и 13-й гармоник.

Выравнивание нагрузок между двумя двигателями выполняется применением одного общего для двух систем регулирования регулятора скорости с обратной связью по скорости также от одного двигателя. Выходной сигнал регулятора скорости поступает на регуляторы тока обоих двигателей.

Система регулирования и управления синхронным приводом [12] является цифро-аналоговой и выполняет следующие задачи: логические функции по управлению электроприводом; регулирование скорости электропривода в диапазоне от 25 до 100%; частотный пуск двигателя; торможение электропривода с рекуперацией энергии в сеть; ограничение тока и момента; реализация системы импульсно-фазового управления тиристорами; выравнивание нагрузок между двигателями, работающими на общий вал; диагностирование преобразователя частоты и системы автоматического регулирования; защита преобразователей и двигателей; аварийная и

предупредительная сигнализация о нарушениях в работе электропривода.

Система автоматизации вентиляторной установки выполняет следующие основные функции: местное и дистанционное управление механизмами вентиляторной установки; местная и дистанционная информация о состоянии вентиляторной установки; местная и дистанционная предупредительная и аварийная сигнализации о нарушениях в работе; местная и дистанционная индикация и регистрация измеренных параметров.

Электропривод с преобразователем частоты с автономным инвертором напряжения типа «Robicon Perfect Harmony»

Преобразователи частоты по схеме «Robicon» применяются для частотно-регулируемых электродвигателей высокого напряжения. Важным достоинством этих преобразователей является возможность применения их для стандартных двигателей на 6 кВ и 10 кВ [11].

На рис. 2 приведена схема трехфазного преобразователя частоты типа «Perfect Harmony» производства фирмы «Siemens» с пофазным суммированием выходных напряжений однофазных мостовых АИН, управляемых по алгоритму ШИМ, питающихся от трехфазных мостовых диодных выпрямителей, подключенных к соответствующим вентильным трехфазным обмоткам многообмоточного входного силового трансформатора.

Преобразователь частоты типа Perfect Harmony обеспечивает: выходное напряжение близкое к синусоидальному; малую величину реактивной мощности; высокую отказоустойчивость: при выходе из работы одной из ячеек в преобразователе осуществляется ее шунтирование за 250 мкс; не предъявляет повышенных требований к изоляции электродвигателя.

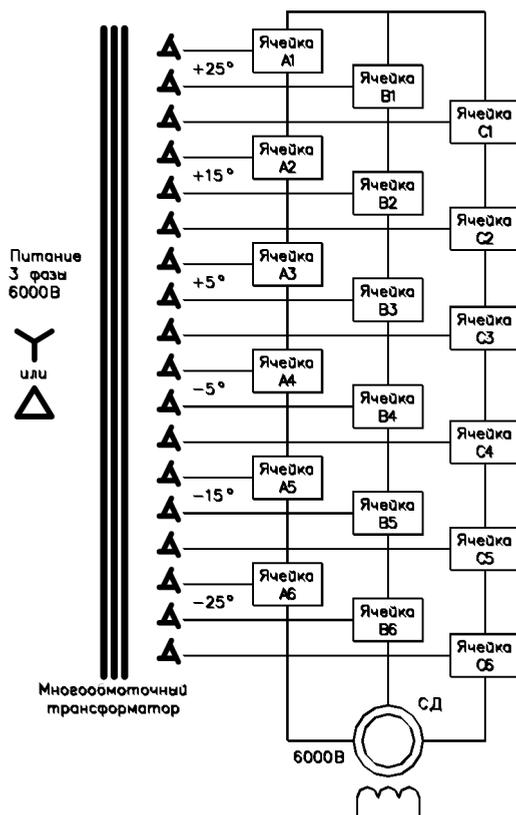


Рис. 2. Структурная схема трехфазного преобразователя частоты типа Perfect Harmony

Рассматриваемый преобразователь частоты не обеспечивает режим рекуперативного торможения в частотно-регулируемом электроприводе.

Электропривод по схеме «асинхронно-вентильного каскада» (АВК)

При реконструкции электроприводов центробежных вентиляторов типа ВЦД приводной двигатель, которых (асинхронный двигатель с фазным ротором) не выработал ресурс, целесообразно применение АВК.

Пуск АД двигателя — реостатный. По окончании пуска реостат отключается. В рабочем режиме выпрямленный ток ротора АД инвертируется в питающую сеть посредством тиристорного преобразователя (работающего в инверторном режиме) и трансформатора. Регулирова-

ние частоты вращения осуществляется управлением инвертора (тиристорный мост и преобразовательный трансформатор), ведомого сетью.

С помощью программируемого контроллера, входящего в состав оборудования комплектного тиристорного устройства (КТУ), выполняется весь комплекс функций логического управления электроприводом по схеме АВК.

В случае неисправности каскада имеется возможность отключения АВК от двигателя, и переключения в режим работы на пусковых реостатах. В этом случае вентиляторная установка продолжает работу без системы регулирования и может быть остановлена целенаправленными действиями оператора.

Следует отметить, что вследствие потерь в цепи ротора, максимальная ско-

рость двигателя в режиме работы с АВК ограничена 95% от номинальной скорости. Выход на номинальную скорость и работу от сети АД происходит включением контактора, который замыкает коротко трехфазную обмотку ротора.

По схеме АВК модернизированы электроприводы центробежных вентиляторов типа ВЦД-42,5 с двигателями 2×3150 кВт, 500 об/мин, 6,0 кВ.

Комплектный электропривод шахтных вентиляторных осевыми вентиляторами [12]

Для приводов осевых вентиляторов с асинхронным двигателем с к.з. ротором, а также с синхронным двигателем без демпферной обмотки возможно только применение тиристорного пускового устройства, реализующего «мягкий» пуск посредством изменения величины, подводимого к приводному двигателю напряжения. По такой схеме выполнены электроприводы осевых вентиляторов с приводным асинхронным двигателем с к.з. ротором мощностью 800 кВт, 500 об/мин, 6,0 кВ в ОАО «ГМК «Норильский никель» Пусковое устройство фирмы «Solcon», Израиль.

За счет возможности регулирования напряжения на зажимах двигателя обеспечивается формирование заданного ограничения тока и момента двигателя в процессе пуска.

В то же время такая система обладает рядом недостатков. Наиболее существенным является большое энерговыделение в двигателе в процессе пуска. По сравнению с прямым пуском в режиме плавного пуска исключаются колебания момента большой амплитуды при стоящем двигателе, исключается ударный ток в момент включения. Однако не исключаются значительные колебания момента при подходе к синхронной скорости (при асинхронном приводном двигателе). При пуске не полностью сни-

маются проблемы воздействия на питающую сеть: амплитуды фазных токов в процессе пуска, примерно, 3–4 кратности по отношению к амплитуде номинального тока.

Для пуска мощных синхронных двигателей, оснащенных демпферной обмоткой, целесообразна реализация частотного пуска по схеме «вентильного двигателя». Перед пуском напряжение 6 кВ подается на сетевой выпрямитель. После разгона двигателя до номинальной скорости система управления производит отключение тиристорного преобразователя от сети (посредством вакуумного контактора ввода), синхронизацию с питающей сетью. После этого СД включается в сеть напрямую через вакуумный контактор прямого пуска. Такой способ пуска имеет следующие преимущества: пусковой момент (ток) в процессе пуска может быть задан независимо от других параметров с ограничениями, позволяющими минимизировать величины ускорений и время пуска, типичная величина тока $(0,5...1,5)I_{н}$; так как способ основан на синхронном пуске, то вибрационные моменты практически отсутствуют за исключением кратковременного интервала в начале процесса пуска; способ обеспечивает плавный пуск; механические и электрические напряжения на двигателе сведены к минимуму, что увеличивает срок его работы.

По такой схеме выполнены электроприводы осевых вентиляторов с приводными синхронными двигателями мощностью 5300 кВт, 750 об/мин, 6,0 кВ в ОАО «ГМК «Норильский никель».

В заключение статьи авторы считают своим долгом отметить значительный вклад в развитие современного электропривода для шахтных вентиляторов канд. техн. наук В.И. Рогового, многие идеи которого реализованы в рассмотренных системах электропривода.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Онищенко Г. Б., Юньков М. Г.* Электропривод турбомеханизмов. — М.: Энергия, 1972. — 240 с.
2. *Бочаров К. П.* Регулируемый электропривод шахтных центробежных вентиляторов ВЦД 32 и ВЦД 40 / Автоматизированный электропривод в народном хозяйстве. Труды V Всесоюзной конференции по автоматизированному электроприводу. Т. 2. Электропривод в машиностроении. — М.: Энергия, 1971. — С. 285—287.
3. *Онищенко Г. Б., Рожанковский Ю. В.* Регулируемый электропривод шахтных вентиляторов / Автоматизированный электропривод в народном хозяйстве. Труды V Всесоюзной конференции по автоматизированному электроприводу. Т. 2. Электропривод в машиностроении. — М.: Энергия, 1971. — С. 282—285.
4. *Дацковский Л. Х., Бирюков А. В., Вайнтруб О. Ш., Роговой В. И.* и др. Регулируемый электропривод переменного тока шахтных вентиляторных установок / Сборник научных трудов ОАО «Электропривод.» — М., 2002. — С. 188—201.
5. *Дацковский Л. Х., Роговой В. И.* Электроприводы с синхронными двигателями / Машиностроение. Энциклопедия. Т. IV-2. Электропривод, гидро- и виброприводы. — М.: Машиностроение, 2012. — С. 319—367.
6. *Колоколкин А. М.* Высоковольтный частотно-регулируемый электропривод синхронных двигателей с бесщеточным возбуждением // Электротехника. — 2014. — № 1. — С. 28—30.
7. *Current-mode control for sensorless BOCM drive with intelligent commutation tuning* // IEEE Trans. Power Electron. — 2002. — № 5. — Pp. 747—756.
8. *Large variable-speed drives using synchronous motors and frequency converters.* // *Alstom review.* — 1986. — № 6. — Pp. 57—66.
9. *Harmonic losses in LCI-fed synchronous motors.* // IEEE Trans. Ind. Appl. — 2002. — № 4. — Pp. 948—954.
10. *Fatter W., Ripperger N.* Transvektor-Regelung für feld-orientieriem Betrieb einer Asinchronmaschine // Siemens-Z. — 1971. — bd 45. — № 10. — P. 761—764.
11. *Medium-Voltage AC-Converter ROBICON Perfect Harmony GenIII NXG Control Manual, Programming and Operating Manual 09/2012.*
12. *Абрамов Б. И., Дацковский Л. Х., Кузьмин И. К., Придатков А. Г., Лиморенко П. М.* Устройства плавного пуска в электроприводах горных механизмов // Электротехника. — 2014. — № 1. — С. 19—27. **ПТЭ**

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

*Абрамов Борис Иванович*¹ — доктор электротехники, генеральный директор,

*Дацковский Лев Ханинович*¹ — кандидат технических наук, руководитель отделения горного электропривода,

*Кузьмин Иван Константинович*¹ — кандидат технических наук, зав. лабораторией,

Шевырёв Юрий Вадимович — доктор технических наук, профессор, НИТУ «МИСиС», e-mail: uvshev@yandex.ru,

¹ ООО «Электротехническая промышленная компания».

ISSN 0236-1493. Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'. 2017. No. 7, pp. 13—21.

UDC 62-573: 621.313.323

B.I. Abramov, L.K. Datskovsky, I.K. Kuzmin, Yu.V. Shevryev

SELECTING TYPE OF ELECTRIC DRIVE FOR MINE FANS

Mining fan installation is a responsible and energy-intensive installation in the manufacturing process of modern mining facility. Currently, as promising for fan systems are considered: frequency-

controlled asynchronous and synchronous electric drives with frequency converters; frequency-controlled synchronous motors with LCI (Load Commutated Inverter).

When upgrading of electric centrifugal fans with asynchronous motors with slip-ring motors, those service life are not yet worked out, it is advisable to use wound-rotor slip recovery systems.

Key words: fan installation, synchronous motor, induction motor, LCI motor, frequency converter, wound-rotor slip recovery system, soft starter.

DOI: 10.25018/0236-1493-2017-7-0-13-21

AUTHORS

Abramov B.I.¹, Doctor of Electrical Engineering,
General Director,

Datskovsky L.K.¹, Candidate of Technical Sciences,
Head of the Department of Mining of Electric Drive,

Kuzmin I.K.¹, Candidate of Technical Sciences,
Head of Laboratory,

Shevyrev Yu.V., Doctor of Technical Sciences, Professor,
National University of Science and Technology «MISiS»,
119049, Moscow, Russia, e-mail: uvshev@yandex.ru,

¹ Electrotechnical Industrial Company Ltd.,
129626, Moscow, Russia.

REFERENCES

1. Onishchenko G. B., Yun'kov M. G. *Elektroprivod turbomekhanizmov* (Electric drives of turbogears), Moscow, Energiya, 1972, 240 p.

2. Bocharov K. P. *Avtomatizirovanny elektroprivod v narodnom khozyaystve. Trudy V Vsesoyuznoy konferentsii po avtomatizirovannomu elektroprivodu*. T. 2. Elektroprivod v mashinostroenii (Automated electric drive in national economy. Proceedings of V All-Union Conference on Automated Electric Drive. Vol. 2. Electric drive in machine building), Moscow, Energiya, 1971, pp. 285–287.

3. Onishchenko G. B., Rozhankovskiy Yu. V. *Avtomatizirovanny elektroprivod v narodnom khozyaystve. Trudy V Vsesoyuznoy konferentsii po avtomatizirovannomu elektroprivodu*. T. 2. Elektroprivod v mashinostroenii (Automated electric drive in national economy. Proceedings of V All-Union Conference on Automated Electric Drive. Vol. 2. Electric drive in machine building), Moscow, Energiya, 1971, pp. 282–285.

4. Datskovskiy L. Kh., Biryukov A. V., Vayntrub O. Sh., Rogovoy V. I. *Sbornik nauchnykh trudov OAO «Elektroprivod»* (Collection of scientific papers by Elektroprivod JSC), Moscow, 2002, pp. 188–201.

5. Datskovskiy L. Kh., Rogovoy V. I. *Mashinostroenie. Entsiklopediya. T. IV-2. Elektroprivod, gidro- i vibroprivody* (Machine building. Encyclopedia. Vol. IV-2. Electric, hydro- and vibro-drives), Moscow, Mashinostroenie, 2012, pp. 319–367.

6. Kolokolkin A. M. *Elektrotehnika*. 2014, no 1, pp. 28–30.

7. Current-mode control for sensorless BOCM drive with intelligent commutation tuning. *IEEE Trans. Power Electron.* 2002, no 5, pp. 747–756.

8. Large variable-speed drives using synchronous motors and frequency converters. *Alstom review*. 1986, no 6, pp. 57–66.

9. Harmonic losses in LCI-fed synchronous motors. *IEEE Trans. Ind. Appl.* 2002, no 4, pp. 948–954.

10. Fatter W., Ripperger N. Transvektor-Regelung für feld-orientieriem Betrieb einer Asinchronmaschine. *Siemens-Z.* 1971. bd 45, no 10, pp. 761–764.

11. *Medium-Voltage AC-Converter ROBICON Perfect Harmony GenIIIe NXG Control Manual, Programming and Operating Manual 09/2012*.

12. Abramov B. I., Datskovskiy L. Kh., Kuz'min I. K. Pridatkov A. G., Limorenko P. M. *Elektrotehnika*. 2014, no 1, pp. 19–27.

