ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ВЕНТИЛЬНО-ИНДУКТОРНОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА ШАРОВОЙ МЕЛЬНИЦЫ

АВТОРЫ:

В.Г. ЩЕРБАКОВ,
Д.Т.Н.,
ЮЖНО-РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ (НПИ) ИМЕНИ М.И. ПЛАТОВА

В.Б. ФАМ,
ЮЖНО-РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ (НПИ) ИМЕНИ М.И. ПЛАТОВА

Электроприводы являются ключевым элементом многих технических устройств. До 70 % потребляемой этими устройствами электроэнергии приходится именно на них. Применение регулируемых приводов в сочетании с автоматизацией процессов контроля и управления позволяет существенно уменьшить использование электроэнергии и иных ресурсов системы.

Ключевые слова: вентильно-индукторный двигатель (ВИД); двухпакетный ВИП; вентильно-индукторный электропривод (ВИП); система управления электропривода; динамический процесс.

Внешний вид вентильно-индукторного двигателя 1250 кВт

ЭЛЕКТРОПРИВОД С ВЕНТИЛЬНО-ИНДУКТОРНЫМ ДВИГАТЕЛЕМ 1250 кВт

Шаровые мельницы используют в настоящее время на руднике «Мир» Мирнинского ГОКа в акционерной компании «АЛРОСА» (ПАО) на участке закладочного комплекса для изготовления бетонной смеси. На предприятии применяются мельницы типа МШР-3600×5000 мощностью 1250 кВт. Для таких мощных мельниц должны использоваться синхронные двигатели переменного тока. Такие двигатели устанавливаются для привода мощных шаровых мельниц (Ш-50) и в некоторых случаях на приводах циркуляционных и питательных насосов. При установке тихоходных синхронных двигателей для привода шаровых мельниц исключается редуктор, усложняющий общую кинематическую схему агрегата и загромождающий помещение закладочного комплекса.

Вентильно-индукторный двигатель (ВИД) — это относительно новый тип электромеханического преобразователя энергии, который сочетает в себе свойства и электрической машины, и интегрированной системы регулирования. Как всякий электродвигатель, он обеспечивает преобразование электрической энергии, которая поступает от питающей сети, в механическую энергию, передаваемую в нагрузку. Как система регулируемого электропривода ВИД позволяет осуществлять управление этим процессом в соответствии с особенностями конкретной нагруз-

РАСПОЛОЖЕНИЕ ВЕНТИЛЬНО-ИНДУКТОРНОГО ДВИГАТЕЛЯ 1250 кВт НА АЛМАЗОДОБЫВАЮЩЕМ РУДНИКЕ КОМПАНИИ «АЛРОСА»

Рис. 1

ПАРАМЕТРЫ ВИД 1250 кВт

№	Параметр	Величина
1.	Мощность номинальная, не менее, кВт	1250
2.	Частота вращения номинальная, об./мин.	187,5 ± 5
3.	Входное напряжение номинальное, В	660
4.	Номинальный ток, А	1140
5.	КПД, не менее, %	96

Таблица 1

ИНФОРМАЦИЯ

Вентильно-индукторный привод (ВИП) — новый тип электрических машин с переменным магнитным сопротивлением. Важнейшим преимуществом этих приводов является сохранение высокого значения КПД двигателя, близкого к номинальному (для крупных машин 97–98 %), в часто встречающихся режимах работы с неполной нагрузкой на валу. По сравнению с частотно-регулируемым АД индукторный двигатель имеет более высокий КПД (на 3–5 %) при таких же массогабаритных показателях, т.к. для его управления не требуется широтно-импульсная модуляция напряжения на частоте в 2500 Гц.

ки: регулировать частоту вращения, момент, мощность и т. д.

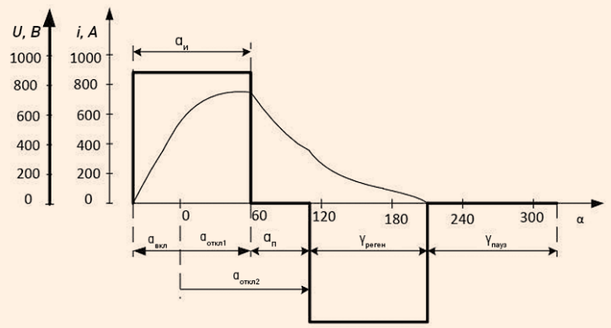
В рамках обновления оборудования алмазодобывающих рудников компании «АЛРОСА» планируется замена изношенного синхронного электропривода ряда шаровых мельниц (мощностью 1250 кВт) на комплектный модульный вентильно-индукторный привод с возможностями плавного пуска и широкого регулирования скорости.

В ООО «МИП «Мехатроника» (ЮРГПУ) впервые в мире был разработан, изготовлен и испытан ВИД для шаровых мельниц мощностью 1250 кВт с частотой вращения 187 мин$^{-1}$ (см. фото на стр. 68). Основные параметры ВИД 1250 кВт приведены в табл. 1 на с. 69, а фотография ВИД 1250 кВт на объекте заказчика — на рис. 1 [4].

ПОЯСНЕНИЯ РАБОТЫ АЛГОРИТМА УПРАВЛЕНИЯ ВИД 1250 кВт

Алгоритм управления для ВИД 1250 кВт отличается от токового регулирования момента следующим. Запуск осуществляется в режиме токоограничения. Далее привод переходит в одноимпульсный режим с параметрами импульса, определяемого по таблице, составленной при проектировании, в которой рассчитаны интервал подачи импульса, его ширина, ширина паузы после импульса (один ключ выключен). Цифровой пропорционально-интегральный регулятор (ПИ-регулятор) стабилизирует заданную скорость, регулируя момент перемещения по таблице. При перемещении вниз по таблице момент возрастает, вверх — уменьшается, при этом для ограничения тока максимальный выход регулятора ограничивается в зависимости от частоты вращения. Для удобства введена относительная шкала перемещения по таблице показателя N = 0–1, где 1 соответствует последняя нижняя строка. Для ограничения скорости выход регулятора N сравнивается с $N_{тек} = n_{тек}/n_{max}$, где $n_{тек}$ — текущая скорость, n_{max} — максимальная скорость, и если выход больше $k \cdot N_{тек}$, то интегральная составляющая ПИ-регулятора принимается равной $k \cdot N_{тек}$ (k — коэффициент выхода $k \geqslant 1$).

РАСЧЕТНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ УГЛЫ УПРАВЛЕНИЯ ВИД 1250 кВт



$a_{вкл}$ — включение двух ключей; $a_{откл1}$ — отключение одного ключа; $a_{откл2}$ — отключение второго ключа и связанных с ними интервалов работы фазы; $a_и = a_{откл1} - a_{вкл}$ — длительность положительного импульса $U_ф$ или работы фазы; $a_п = a_{откл2} - a_{откл1}$ — длительность интервала $U_ф = 0$ при $i_ф > 0$ или закороченного состояния фазы

Рис. 2

На рис. 2 приведены расчетные электрические углы управления. При расчете электрических углов берется за основу ротор. При этом в качестве нулевого положения используется следующее: паз ротора принимает положение, перпендикулярное зубцу статора с обмоткой (положение рассогласованное). Таким образом, для 180 электрических градусов характерно положение, когда зубец ротора находится в состоянии, перпендикулярном зубцу статора с обмоткой (положение согласованное). В качестве положительного принято направление вращения ротора. В этой системе углом включения считается угол при одновременном включении двух ключей полумоста. Если имеется некоторое опережение, то угол отрицательный. Время от начала включения до выключения (закрытия) одного из полупроводниковых ключей (медленная расфорсировка) называется шириной импульса. Время от выключения одного из полупроводниковых ключей (медленная расфорсировка) до выключения обоих ключей (быстрая расфорсировка) называется оконечной паузой. Так как инерция ротора достаточно большая, то для определения углов используется сигнал переключения датчика положения. То есть сначала по датчику определяется текущая скорость, а потом углы управления. Последняя измеренная скорость складывается, например, с четырьмя предыдущими, и делится на пять. При регулировании предполагается, что нагрузочная характеристика

СХЕМАТИЧЕСКОЕ ИЗОБРАЖЕНИЕ МОДЕЛИ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ВИД 1250 кВт С ОДНИМ ИМПУЛЬСОМ

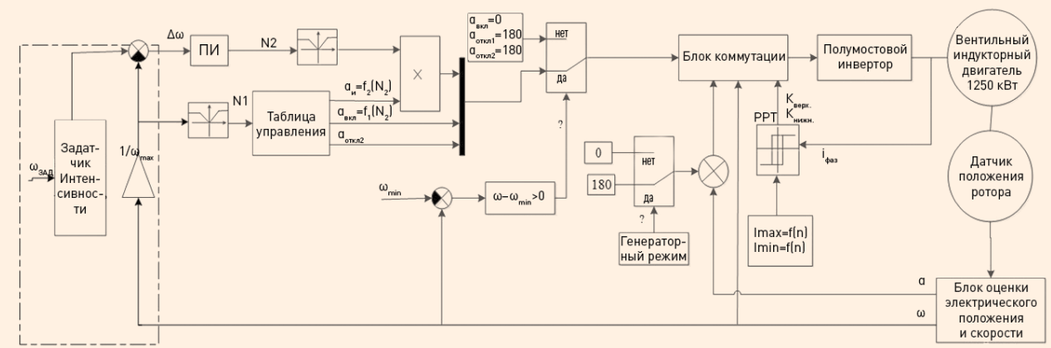
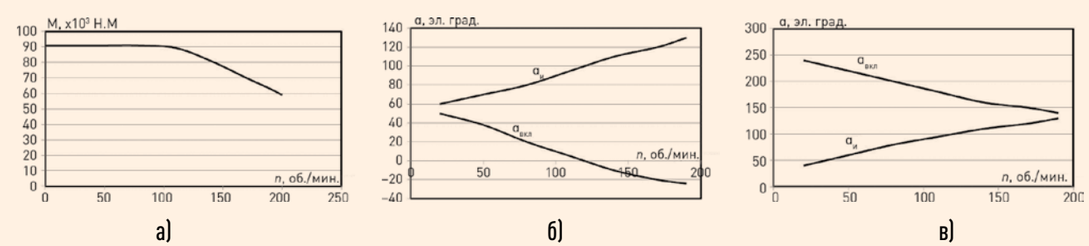


Рис. 3

МЕХАНИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА И ОПТИМАЛЬНЫЕ ПАРАМЕТРЫ УПРАВЛЕНИЯ ВИД 1250 кВт



а) механическая характеристика; б) параметры управления в двигательном режиме; в) параметры управления в генераторном режиме

Рис. 4

совпадает с той, которая использовалась при определении таблицы управления. То есть каждому сочетанию углов по таблице и определенной скорости соответствует определенный момент. При расхождении теоретических и практических характеристик разница компенсируется регулятором.

На рис. 3 представлена структурная схема одноимпульсного управления ВИД 1250 кВт. В данной системе нерегулируемым является входное напряжение в инверторах, при этом выход регулятора скорости влияет на вектор-столбец углов управления с помощью силовых ключей инвертора [2]. С использованием таблицы управления определяются законы трансформации углов управления. Таблицы управления — траектории управления ВИД 1250 кВт в двигательном и генераторном режимах — приведены на рис. 4.

Для того чтобы провести унификацию системы управления ВИД, которые имеют разные значения номинальной частоты вращения, целесообразно использовать относительные показатели n/n_{max}, где n_{max} — максимальная частота вращения определенного образца привода. В условиях $n_{max} > n_{ном}$ час-

ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ДИНАМИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ВИП 1250 кВт СПОСОБОМ ВЗАИМНОГО НАГРУЖЕНИЯ ВИД–ВИГ

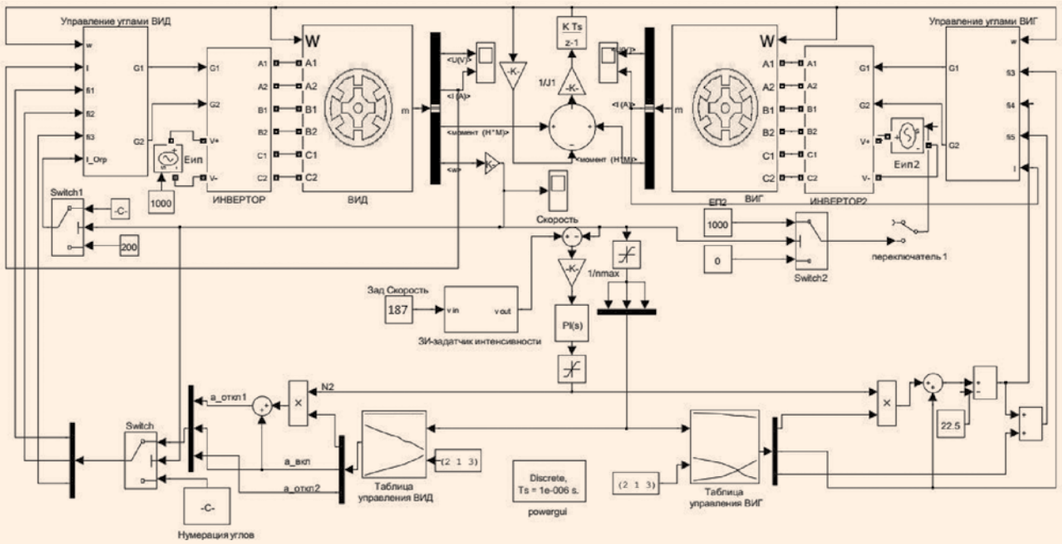


Рис. 5

тота вращения путем регулировки может быть как ниже, так и выше номинальной.

В рамках алгоритма одноимпульсного управления с помощью блока коммутации осуществляется управление силовыми ключами инвертора путем сравнивания заданных значений $a_{ком}$ с текущей величиной угла поворота ротора *a*. При этом импульсным датчиком положения ротора (ДПР) выдается квантованное по уровню значение *a*, которое в условиях невысокой разрешающей способности ДПР, находящегося в конструкции ВИД, не может напрямую быть применено в блоке коммутации. Специальный блок, необходимый для оценки скорости и электрического положения, реализованный программным способом в системе управления ВИП БМ, позволяет восстанавливать сигнал имеющегося значения угла поворота *a* и также проводить оценивание текущего уровня частоты вращения *n*. Однако данный блок не позволяет получить достоверные оценки *a* и *n* в условиях вращения с частотами менее определенного минимального значения n_{min}. В связи с этим, работая на невысоких частотах, фазы коммутируются непосредственно согласно сигналам ДПР [4].

Основу разрабатываемой математической модели составляют две системы уравнений. Первая — это система дифференциальных уравнений, которые описывают электромеханические процессы в *m*-фазном ВИД. В систему включены уравнения динамики механической системы и уравнения электрического равновесия контуров, которые служат для учета в математической модели электромеханических процессов. Уравнения представлены с использованием нормального вида Коши относительно производных:

$$\begin{cases} \dfrac{d\psi_k}{dt} = u_k - r_k i_k; \\ \dfrac{d\omega}{dt} = \dfrac{Z_2}{J}(M - Mc); \\ \dfrac{d\alpha}{dt} = \omega, \end{cases} \qquad (1)$$

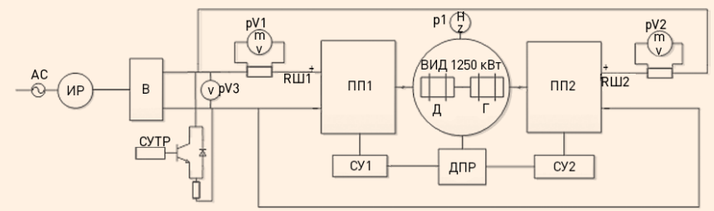
где: k — номер фазы по порядку, $k = 1...m$; u_k — напряжение на k-й обмотке; r_k — активные сопротивления k-й обмотки; ψ_k — потокосцепление k-й обмотки; ω — угловая частота вращения ротора; i_k — ток k-й обмотки; J — сумма моментов инерции ротора и нагрузки; Z_2 — количество зубцов ротора; M, M_C — момент сопротивления нагрузки и электромагнитный момент двигателя; a — угол,

который характеризует положение ротора относительно статора.

Рассмотрим в работе имитационную модель, которая реализована в среде MATLAB с использованием его приложения Simulink путем модификации классической модели в библиотеке Matlab Simulink.

На рис. 5 продемонстрирована математическая модель ВИД 1250 кВт с двумя пакетами в процессе испытания с использованием способа обоюдного нагружения пакетов. При использовании такого режима регулятор скорости вентильно-индукторного генератора (ВИГ) находится в насыщении, функционирует только регулятор тока в функции углов управления коммутацией ВИГ с целью организации тормозного момента на валу ВИД. Рассмотренная модель исследования динамических процессов ВИД позволяет изучать динамические процессы на холостом ходу и взаимного нагружения ВИД–ВИГ. Дополняя формальное дублирование блоков разделением системы управления на отдельные подсистемы «Управление углами ВИД» и «Управление углами ВИГ» были осуществлены такие изменения параметров управления. Модель механической части в виде масштабируемого элемента с коэффициентом 1/*J* и блоком интегратора, которые характеризуются отрицательной обратной связью с коэффициентом *B*, вынесена из блоков ВИД в общую схему. Питание блоков ИНВЕРТОР 1 и 2 поступает от общего источника питания Еип1. Задатчик интенсивности (ЗИ) представляет собой нелинейное устройство, которое включается в цепь задания регулируемых величин и ограничивает темп (интенсивность) изменения во времени сигнала задания скорости.

ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ СХЕМА ИСПЫТАНИЙ ВИД 1250 кВт ПОД НАГРУЗКОЙ



ИР — индукционный регулятор; В — выпрямитель; СУТР — схема управления тормозным резистором R_t; ПП1, ПП2 — полупроводниковые преобразователи; СУ1, СУ2 — микропроцессорные системы управления; ДПР — датчик положения ротора; ВИД 1250 кВт — индукторный двигатель; pV1, pV2, RШ1, RШ2 — милливольтметры и шунты для измерения тока; pV3 — вольтметр; p1 — частотомер

Рис. 6

ИЗМЕНЕНИЕ ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ ВИД 1250 кВт НА ХОЛОСТОМ ХОДУ ПРИ ПУСКЕ И РАЗГОНЕ ДО НОМИНАЛЬНОЙ ВЕЛИЧИНЫ

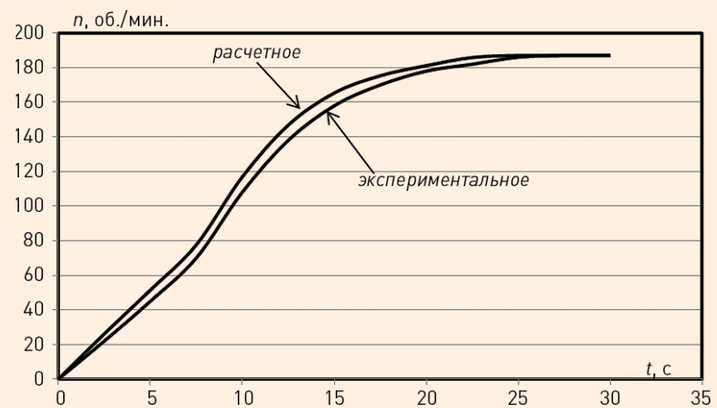


Рис. 7

При проведении испытаний ВИД 1250 кВт на нагрузку была использована двухпакетность конструкции самого двигателя ВИД с двумя трехфазными обмотками на статоре, имеющими пространственный сдвиг на 180 электрических градусов, исходя из требований Регистра обеспечения электропитанием от двух независимых полупроводниковых преобразователей. Такая конструкция, принятая в ВИД 1250 кВт, позволила снизить пульсации момента. По сути, в одном корпусе размещены две идентичные трехфазные

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ДИНАМИЧЕСКОГО РЕЖИМА ВИД 1250 кВт СПОСОБОМ ВЗАИМНОГО НАГРУЖЕНИЯ ВИД–ВИГ

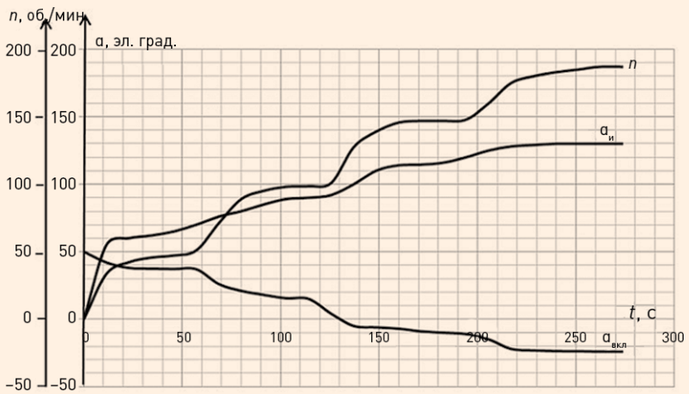


Рис. 8

индукторные электрические машины, каждая из которых может работать и в двигательном, и генераторном режимах. За счет этого обеспечивается самонагружение, что исключает дорогостоящую нагрузочную стендовую установку. Эта технология испытаний позволяет экономить потребление электроэнергии, особенно при ресурсных испытаниях, за счет возврата электрической энергии, вырабатываемой генератором, в сеть небольшой мощности, соизмеримой с мощностью потерь в полупроводниковом преобразователе и в ВИД 1250 кВт. Функциональная схема испытаний ВИД 1250 кВт под нагрузкой приведена на рис. 6 [3].

На рис. 7 на с. 73 показаны расчетная и экспериментальная зависимости изменения скорости от времени при пуске и разгоне до номинальной величины 187 мин$^{-1}$ на холостом ходу, из которых видно, что отклонение между имитацией и экспериментом составляет меньше 5 %.

Небольшое различие результатов моделирования и эксперимента можно объяснить неполным расчетом моментов инерции и трения в имитационной модели.

Результаты моделирования динамического режима ВИД 1250 кВт способом взаимного нагружения ВИД–ВИГ приведены на рис. 8. Они показывают изменения параметров управления ВИД 1250 кВт за время разгона до номинальной скорости.

ВЫВОДЫ

Имитационная модель динамических процессов ВИД 1250 кВт 187 мин$^{-1}$ при использовании способа взаимного нагружения ВИД–ВИГ позволяет осуществлять комплекс исследований моделирования динамического режима ВИД 1250 кВт. Моделирование динамических процессов необходимо для упрощения процессов исследования динамического режима.

Расчеты показали, что двигатель обеспечивает проектную мощность в 1250 кВт при частоте вращения 187 мин$^{-1}$, и данный тип электропривода вполне конкурентноспособен с применяемыми в настоящее время синхронными двигателями в шаровых мельницах. Альтернативой вышеуказанным типам двигателей являются ВИД, обладающие следующими достоинствами: более высокая надежность (отсутствуют обмотка и контактные кольца на роторе), простота и технологичность конструкции (сосредоточенные катушки фаз статора, зубчатый безобмоточный ферромагнитный ротор), высокий КПД, приемлемые массогабаритные показатели, более низкая стоимость в производстве.

ЛИТЕРАТУРА

1. Фам Ван Бьен. Методика экспериментального определения электромагнитных параметров вентильно-индукторной электромашины большой мощности модели / Фам Конг Тао, Фам Ван Бьен и др. // Практическая силовая электроника. 2018. № 3 (71). С. 16–20.
2. Птах Г.К., Звездунов Д.А., Мустафаев Р.Р., Шаповалов В.С. Разработка вентильно-индукторного двигателя мощностью 1250 кВт для электропривода магистрального ленточного конвейера и его внедрение на КЛМ-4500 // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 2017. Т. 60. № 4. С. 13–18.
3. Антипов В.Н., Грозов А.Д., Иванова А.В. Исследование моделей вентильно-индукторного двигателя // Электричество. 2018. № 6. С. 60–65.
4. Пахомин С.А., Крайнов Д.В., Реднов Ф.А., Коломейцев В.Л., Прокопец И.А., Макаров Л.Н. Сравнение энергетических характеристик вентильно-индукторного и асинхронного электроприводов мощностью 15 кВт // Электричество. 2017. № 1. С. 44–47.
5. Колпахчьян П.Г., Щербаков В.Г., Кочин А.Е., Шайхиев А.Р. Бездатчиковое управление линейной вентильно-индукторной электрической машиной возвратно-поступательного действия // Электротехника. 2017. № 6. С. 48–54.