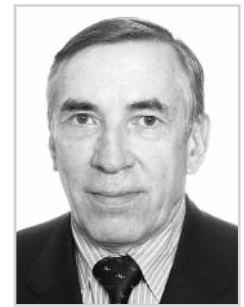




УДК 621.313.17

ГРЕБЕНИКОВ В.В., докт. тех. наук, ст. науч. сотр.,
Институт электродинамики НАН Украины, г. Киев
КОНТОРОВИЧ Л.Н., канд. тех. наук, тех. директор
ПАО "Запорожтрансформатор", г. Запорожье,

ПРИВОД РПН НА ОСНОВЕ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ С ЦИФРОВЫМ УПРАВЛЕНИЕМ



ГРЕБЕНИКОВ В.В.



КОНТОРОВИЧ Л.Н.

Разработан и изготовлен новый привод регулятора напряжения под нагрузкой (РПН) силовых трансформаторов. Вместо асинхронного электродвигателя в приводе РПН применен электродвигатель с постоянными магнитами, вал которого непосредственно (без редуктора) соединен с валом РПН; реализована возможность дистанционного контроля состояния выполнения переключения РПН по положению, скорости, времени, току, напряжению. По величине тока, потребляемого электродвигателем, можно осуществлять мониторинг состояния переключателя.

Устройство регулирования напряжения силовых трансформаторов под нагрузкой (РПН) по своему исполнению является сложным узлом силового трансформатора. Авария РПН может привести к серьезному повреждению трансформатора, до 40 % аварий трансформаторов связано с повреждениями РПН [4].

В существующих приводах РПН, как выпускаемые ПАО "Запорожтрансформатор", так и другими фирмами в качестве приводного двигателя используется асинхронный двигатель. По условиям функционирования привод РПН должен обеспечивать поворот вала РПН на определенное число оборотов. Это обеспечивается за счет применения в приводе РПН, электромеханических устройств с множеством взаимодействующих между собой деталей, снабженных флажками, втулками, пружинами, защелками, хвостовиками, зубьями. В процессе работы все эти элементы быстро изнашиваются, залипание контактов приводит к "убеганию" РПН в крайнее положение [4]. Наличие большого количества взаимодействующих между собой деталей требует очень высокой точности выполнения, что сопряжено с большими трудозатратами и высокой трудоемкостью при изготовлении такого привода. Малейшее отклонение в размерах флажков, втулок, пружин, защелок, хвостовиков, зубьев приведет к снижению надежности привода, нестабильной его работе, что, в свою очередь, приведет к нарушению работы силового трансформатора. Асинхронный двигатель, используемый в приводах РПН, работает в старт-стопном режиме, наиболее тяжелом режиме для асинхронных двигателей.

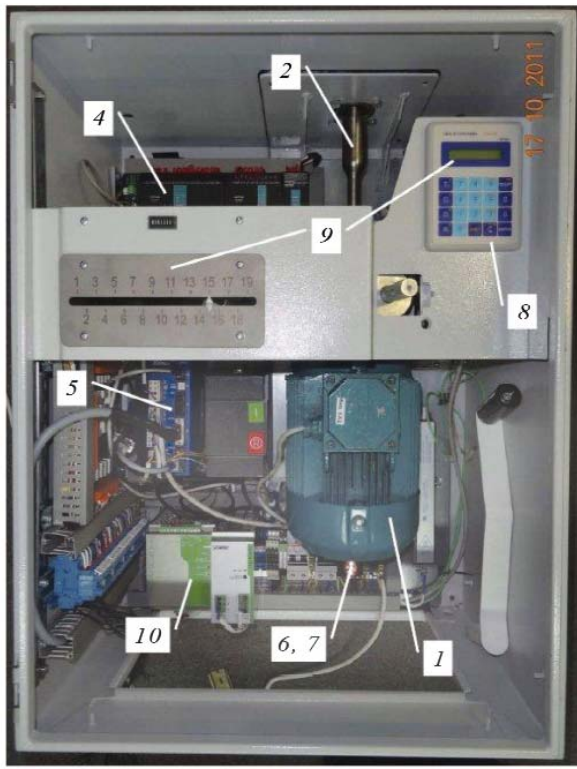
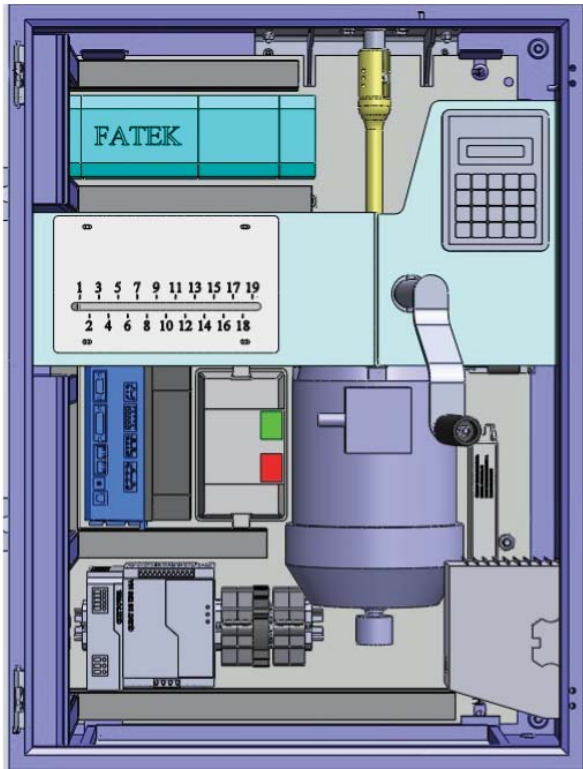
По инициативе ПАО "Запорожтрансформатор" и ООО "Энергоавтоматизация" разработан принципиально новый привод РПН на базе вентильного двигателя с постоянными магнитами (ВДПМ) [2, 3]. В новом приводе РПН вал управляемого двигателя с постоянными магнитами непосредственно соединяется с валом переключате-

ля РПН, что позволило существенным образом упростить конструкцию привода РПН в целом (Рис. 1). Поскольку двигатель с постоянными магнитами управляется с обратной связью по току, скорости и положению, то это позволило повысить точность отработки задания и тем самым повысить надежность работы привода РПН.

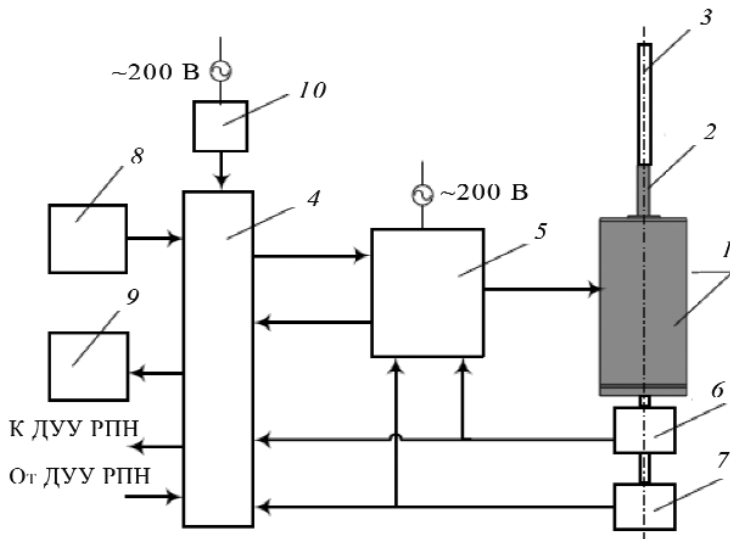
Привод устройства РПН (Рис. 1) содержит вентильный электродвигатель 1 с постоянными магнитами, выходной вал 2 которого непосредственно соединен с приводным валом 3 устройства РПН. Привод содержит также программируемый логический контроллер 4, блок 5 силовой коммутации обмоток вентильного двигателя с постоянными магнитами, датчик 6 угла коммутации обмоток вентильного двигателя, датчик 7 положения и скорости вала вентильного двигателя, панель 8 управления, панель 9 индикации положения устройства РПН, источник 10 бесперебойного питания. Управление приводом осуществляется в автономном режиме от панели управления 8, в дистанционном режиме от дистанционного устройства управления (ДУУ) приводом РПН [2, 3].

Для привода РПН был разработан вентильный двигатель с постоянными магнитами (Рис. 2). В настоящее время этот тип электродвигателей является наиболее перспективным из применяемых в регулируемых приводах малой и средней мощности [1].

К конструктивным и технико-эксплуатационным преимуществам таких двигателей можно отнести то, что у них отсутствуют скользящие электрические контакты и узлы, требующие обслуживания, за счет чего повышается их ресурс и надежность по сравнению с двигателями постоянного тока. ВДПМ характеризуется большой перегрузочной способностью по моменту (кратковременно кратность максимального момента рав-

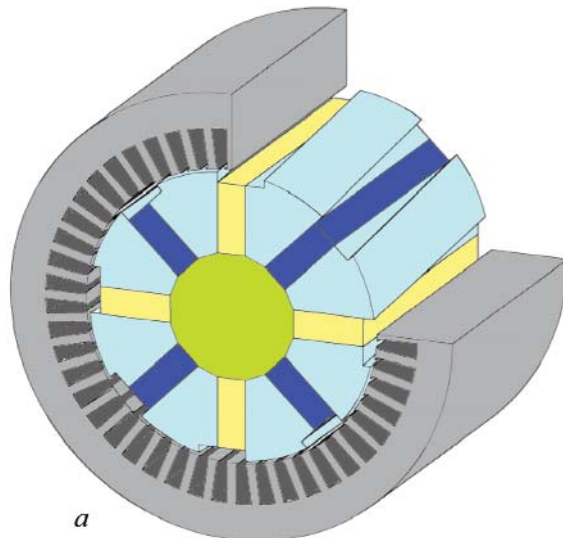


а

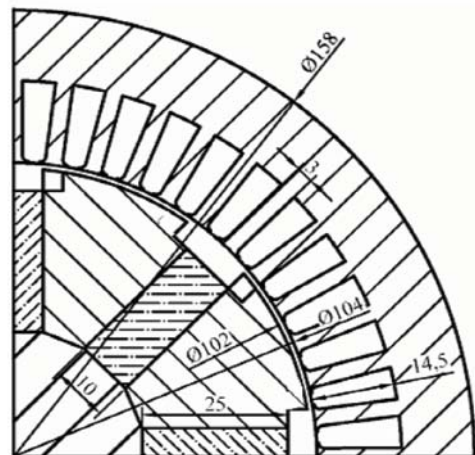


б

Рис. 1. Усталостные поломки стяжных шпилек сердечника: а – общий вид привода РПН, б – Структурная схема привода РПН



а



б

Рис. 2. Магнитная система электрогенератора электродвигателя
а – общий вид магнитной системы электрогенератора; б – размеры магнитной системы



на 5 и более), а величина развиваемого при этом электромагнитного момента имеет линейную зависимость от тока нагрузки, а значит, по величине тока можно определять момент нагрузки на валу устройства РПН и таким образом осуществлять мониторинг работы устройства РПН. На Рис. 3 приведена моментная характеристика экспериментального образца ВДПМ при частоте вращения $n_d = 200$ об/мин.

Минимальное значение тока холостого хода и рабочих токов в ВДПМ позволяет достаточно точно измерять нагрузку на привод и оптимизировать режим работы. КПД вентильных двигателей превышает 90 % и мало изменяется при изменении нагрузки по мощности и при колебаниях напряжения питающей сети (у асинхронных двигателей такой мощности максимальный КПД составляет не более 86 % и зависит от изменений нагрузки). Отсутствие у ВДПМ обмоток на роторе обуславливает отсутствие тепловыделения ротором. Это позволяет приводу работать в нестандартных режимах с возможными пе-

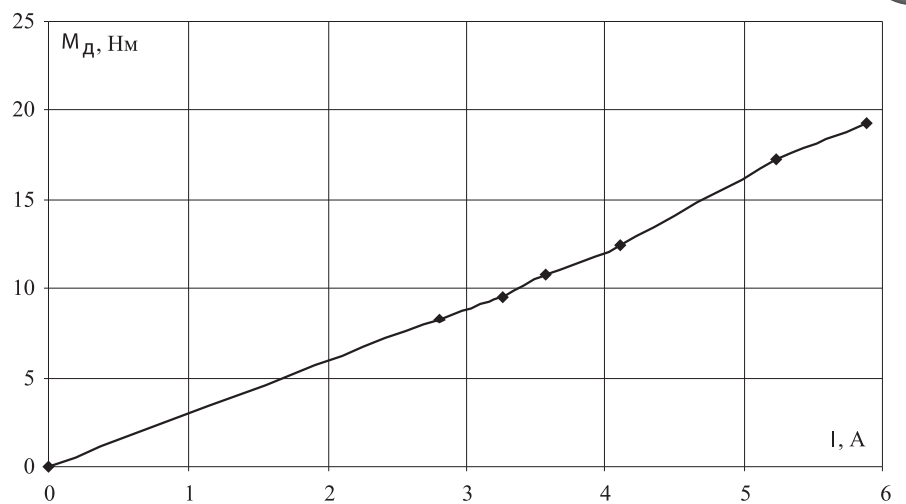


Рис. 3. Зависимость крутящего момента от тока двигателя при постоянной частоте вращения вала $n_d = 200$ об/мин.

регрузками. ВДПМ имеет значительный срок службы и высокую надежность, срок службы увеличивается также за счет возможности оптимизации режимов работы по скорости и нагрузке. ВДПМ имеет минимальные массогабаритные показатели при прочих равных условиях, более простую схему преобразователя по сравнению с асинхронными, а значит, стоимость преобразователя при соизмеримой мощности будет меньше. Магнитная система ВДПМ состоит из постоян-

Таблица 1. Сводная таблица результатов испытаний привода РПН

Наименование параметров	Значение параметра
Номинальное напряжение питания двигателя, В	~220, 1ф
Номинальная частота, Гц	50
Род тока	Переменный
Исполнение по степени защиты	IP54(IP65) по ГОСТ 14254 (МЭК 529)
Номинальная мощность двигателя, кВт	0,9
Наибольшая активная мощность, потребляемая двигателем, в течение ≤ 0.2 с, кВт	1,1
Количество положений привода	1-99
Число оборотов выходного вала на 1 переключение	10 (Любое)
Время переключения на 1 положение, сек.	$3 \pm 0,6$
Точность останковки на положении, оборотов выходного вала /градусов по лимбу привода	$\pm 0,00025/0,09$
Средний момент на выходном валу, Нм	$29 \pm 10\%$
Максимальный момент на выходном валу, Нм	45
Продолжительность действия максимального момента, сек.	От 0,001 до 10
Ресурс, определяющий механическую износостойкость, тысяч переключений	50 000
Проверка пошаговой работы привода при подаче длительного сигнала	Отказов в работе нет.
Проверка работы привода при местном управлении	Отказов в работе нет.
Проверка работы привода при исчезновении питания и его последующем восстановлении	Отказов в работе нет.
Проверка работы датчика положений	Отказов в работе нет.
Проверка величины момента на выходном валу привода	Смотреть осциллограммы

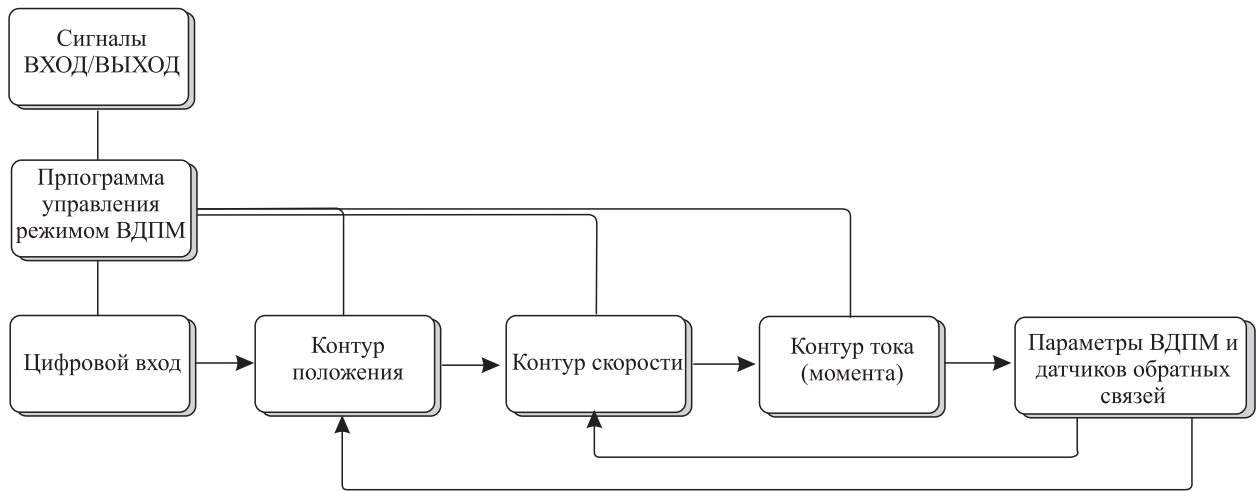


Рис. 4. Блок-схема контура управления ВДПМ привода РПН.

ных магнитов и ферромагнитных концентраторов, поэтому величина магнитной индукции в рабочем зазоре таких двигателей может быть высокой и даже превышать величину остаточной магнитной индукции используемых постоянных магнитов. ВДПМ для РПН изготовлен на основе статора асинхронного двигателя АИР90L8, в котором короткозамкнутый ротор заменен на ротор с постоянными магнитами.

В системе управления приводом РПН на основе ВДПМ реализованы цифровые контуры:

- цифровой контур тока;
- цифровой контур скорости;
- цифровой контур положения вала;

- цифровая система векторного управления фазными токами ВДПМ;

Наличие цифровых контуров регулирования обеспечивает высокую точность и быстродействие, максимально упрощает наладку и настройку в отличие от аналоговых приводов.

Преимущества привода РПН на основе ВДПМ с цифровым управлением:

- простой монтаж;
- независимое чередование фаз питающей сети;
- отсутствие механических узлов;
- расширенный набор защит;
- отсутствие дополнительных устройств торможения вала ВДПМ т. к. остановка, осуществ-

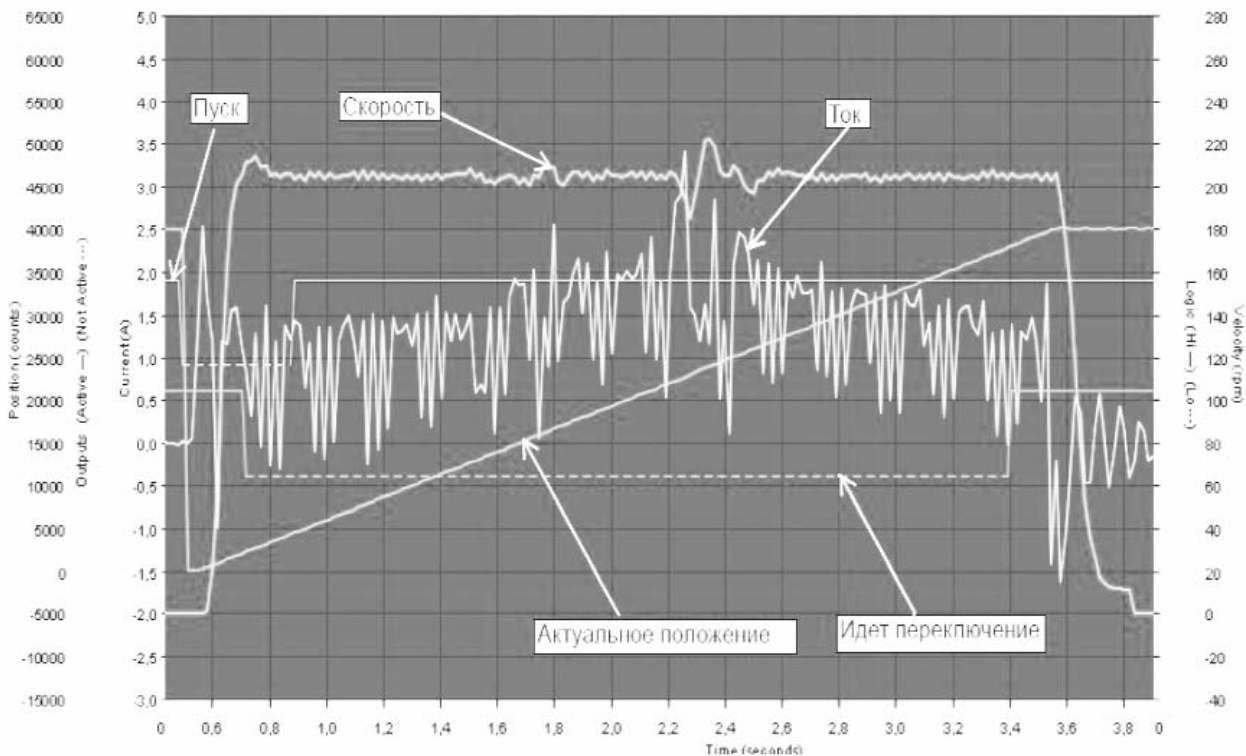


Рис. 5. Осциллограммы контролируемых параметров при переключении привода РПН.



ляется контурами тока (силы), скорости и положения;

- удержание вала ВДПМ в точке останова контуром положения и тока;

- низкая скорость вращения вала ВДПМ (200–250 об/мин) по сравнению с приводами РПН на базе асинхронных электродвигателях (1500 об/мин);

- мониторинг основных параметров в момент переключения (ток, скорость, положение, температура двигателя, время переключения и др.);

- диагностика (микродвижение в пределах допуска для РПН);

- плавный на низкой скорости режим перемещения для наладочных работ с пульта управления (можно не использовать механическую рукоятку);

- архив последних событий;

- удобный пульт управления с ЖК-дисплеем с 2 строками по 16 знаков;

- возможность настройки параметров и управления через ПК;

- возможность управления по интерфейсу RS-232, RS485, CAN, Ethernet;

- модульная конструкция позволяет быстро произвести ремонт устройства;

- гибкая и быстрая доработка программного обеспечения по техническому заданию заказчика.

- структура привода РПН такова, что такой отказ как "переезд за положение или за конечное положение" практически и алгоритмически исключен.

В приводе РПН на основе ВДПМ организованы следующие защиты:

- от обрыва цепи обратной связи по скорости;

- от перегрева двигателя;

- от длительной перегрузки;

- от превышения заданной скорости;

- от превышения максимально допустимого тока;

- от перенапряжения;

- от перегрева блока управления ВДПМ;

- от недопустимого понижения напряжения;

- от исчезновения напряжения в силовой цепи.

Испытание привода РПН.

Место проведения испытаний – ПАО "Запорожтрансформатор".

Нагрузка привода – РПН РНТА 35/200.

Количество переключений – 50000, пауза между переключениями 1 секунда.

Управление переключением осуществлялось от специально разработанной программы, которая встроена в панель управления приводом РПН и освобождает заказчика от затрат на организацию дистанционного управления для создания режимов переключения при испытаниях. Сводная таблица основных результатов испытаний приведена в Табл. 1.

В процессе проведения испытаний записывались соответствующие осциллограммы для всех 50 000 переключений. Поскольку в ВДПМ данной конструкции момент на валу двигателя прямо пропорционален потребляемому току, то по осциллограмме тока можно определить момент на валу ВДПМ. Форма тока в обмотках имеет переменный характер, поскольку ток в обмотках изменяется в соответствии с алгоритмом управления, сформированным контуром скорости, контуром положения и контуром тока (Рис. 4), решая задачу заданного перемещения, с заданной скоростью за заданное время переключения при переменной моментной нагрузке приводного вала РПН, обусловленной конструктивными особенностями РПН. Каждый контур – положения, скорости и тока для формирования управляющих сигналов имеет ПИ-регулятор.

В качестве иллюстрации на Рис. 5, показаны контролируемые параметры при переключении привода РПН, на этом рисунке положение 40000 соответствует 10 оборотам вала ВДПМ или одному переключению РПН.

Из-за инерционности системы форма мгновенного значения момента не будет в точности соответствовать форме тока в обмотках. Поэтому, мгновенное значение момента, полученное путем пересчета по мгновенному значению тока с коэффициентом пересчета равном $k = 3$ (этот коэффициент получен из зависимости крутящего момента от тока по Рис. 4), лишь качественно отражает форму момента на валу двигателя. Однако если к графику мгновенного значения момента применить функцию сглаживания, то полученный график мгновенного значения момента будет качественно и количественно правильно отображать момент на валу двигателя в процессе переключения РПН. Таким образом, по форме мгновенного значения момента можно осуществлять анализ нагрузки на валу ВДПМ в процессе переключения РПН.

Выводы и рекомендации.

- вместо асинхронного электродвигателя применен вентильный двигатель с постоянными магнитами специальной разработки;

- новый привод является полностью цифро-



вым и имеет следующие основные узлы: вентильный двигатель на постоянных магнитах, датчик угла коммутации обмоток вентильного двигателя, датчик положения и скорости вала вентильного двигателя, блок силовой коммутации фазных обмоток, программируемый логический контроллер, пульт местного управления, панель индикации положения РПН, блок бесперебойного питания, интерфейс связи с дистанционным пультом управления приводом РПН и автоматизированными системами регулирования напряжения;

- вал вентильного двигателя с постоянными магнитами непосредственно (без редуктора) соединен с валом РПН;

- из конструкции моторного привода исключены все механические и электромеханические узлы управления работой электродвигателя, такие как конические колеса, шестерни, расцепители, возвратные пружины, защелки, рычаги, стопоры и т. д.;

- на пульт местного управления, дополнительно к общепринятым органам управления, выведены кнопки для осуществления вращения вала вентильного двигателя в обе стороны на очень низких скоростях (например, 1 об/мин). Данный режим может быть использован для наладочных работ вместо механической рукоятки;

- в системе управления вентильным двигателем реализованы контуры управления по положению, скорости и току (моменту на валу), обеспечивающие заданное время выполнения каждо-

го переключения РПН с постоянной скоростью вращения вала вентильного двигателя, с заданным моментом и высокой точностью;

- реализована возможность дистанционного контроля состояния выполнения переключения РПН по положению, скорости, времени, току, напряжению. По величине тока, потребляемого ВДПМ можно осуществлять мониторинг состояния переключателя;

- на базе макетного образца привода РПН с ВДПМ возможно создание нового образца привода РПН;

ЛИТЕРАТУРА

1. Гребеников В. В., Приймак М. В. Исследование влияния конфигурации магнитной системы на моментные характеристики электродвигателей с постоянными магнитами. // Электротехника и электроэнергетика. – 2009. – № 2. – С. 57–60.

2. Патент на винахід UA 94521 Україна. МПК H01 21/00, H02P 13/00, H02P 3/00. Привід пристрою регулювання напруги силового трансформатора під навантаженням / Гребеніков В. В., Кацалап С. М., Рассальський О. М.; заявл. 08.02.2010; опубл. 10.05.2011, Бюл. № 9. 6 с.: ил. 1.

3. Патент 2444046 Российская Федерация. МПК H01H21/36, H02P6/12, H02P6/16. Привод устройства регулирования напряжения силового трансформатора под нагрузкой / Гребеников В.В., Кацалап С.М., Рассальская С.М.; заявл. 07.09.2010; опубл. 27.02.2012, Бюл. № 6. 2 с.: ил. 1.

4
<http://silovoytransformator.ru/stati/modernizaciya-silovyh-transformatorov-ot-mr.htm>

© Гребеников В. В., Конторович Л. Н., 2014

