

УДК 621.313.3

## **Разработки гистерезисных электромеханических преобразователей энергии и систем для технологических установок атомной и химической промышленности и энергетики**

**А. А. Ефимов, С. Ю. Останин\*, М. В. Огладин,  
П. С. Рудник, М. С. Зубарев**

Объектом исследования являются гистерезисные электромеханические преобразователи энергии и системы для технологических установок атомной и химической промышленности и энергетики. В составе только одного комбината технологические линии содержат до миллиона и более центрифуг, для приведения которых во вращение традиционно используются гистерезисные электродвигатели в синхронном режиме, индивидуальные для каждой из центрифуг. Проанализированы научно-технические решения и разработки в области гистерезисных электромеханических преобразователей энергии и систем для технологических установок атомной и химической промышленности и энергетики. Основное внимание уделено центрифужным и роторным технологиям на базе высокооборотного гистерезисного электропривода, в частности, центрифугам по атомарному разделению веществ: очистительным; центрифугам для получения сверхчистых веществ, разделения изотопов; утилизации радиоактивных отходов. Исследованы научные проблемы электромеханического преобразования энергии и электропривода центрифуг по обогащению. Сформирован банк научно-технических решений для рассматриваемых областей техники и отраслей промышленности. Разработаны и изучены электромеханические преобразователи энергии и электроприводы для газовых центрифуг, электромеханические преобразователи энергии и системы для реализации технологий сепарирования, а также технологий на базе миниатюрных турбокомпрессоров и турбогенераторов. Выполненные работы характеризуются общностью проблем по ряду направлений, преемственностью научно-технических решений с работами по гироскопической тематике. Также установлены и подтверждены общность проблем по ряду направлений и преемственность научно-технических решений при переходе от работ по гироскопической тематике к работам по центрифугам и другим высокооборотным электро-механотронным устройствам и системам в энергетике, химической и смежных отраслях промышленности. Показано, что при реализации электромеханической части механизмов вариант гистерезисного электродвигателя с управляемым возбуждением имеет преимущества благодаря энергетической экономичности вентильного электродвигателя, большей механической и температурной стабильности и прочности ротора.

Ключевые слова: гистерезисные электромеханические преобразователи энергии, системы, технологические установки, высокооборотные электро-механотронные устройства, энергоэффективность, механическая и температурная стабильности.

---

\* OstaninSY@mpei.ru

Развитие атомной промышленности и энергетики требует совершенствования методов и средств, используемых при обогащении урана. В мировой практике для этих целей широко применяется центрифужный метод (ФРГ, Великобритания, Нидерланды, США, Япония) [1 — 4]. Мощности обогатительных комбинатов возрастают более чем на 3% в год. Пионером в создании центрифужного метода обогащения был СССР, благодаря чему в настоящее время Россия обладает передовыми технологиями, участвует в мировом обогатительном сервисе и экспортирует продукцию за рубеж [5 — 8]. В составе только одного комбината технологические линии содержат до миллиона и более центрифуг, для приведения во вращение которых традиционно используются индивидуальные гистерезисные электродвигатели (ГД) в синхронном режиме (СГД).

Научно-исследовательские (НИР) и опытно-конструкторские (ОКР) работы по гистерезисным электродвигателям и электроприводам впервые в нашей стране начались на кафедре Электротехнических комплексов автономных объектов и электрического транспорта (ЭКАОиЭТ) (ранее — кафедра Авиационного и автотракторного электрооборудования) Московского энергетического института (в настоящее время — Национальный исследовательский университет (НИУ) «МЭИ») в 1949 г. под руководством члена-корреспондента Академии наук СССР А. Н. Ларионова [9]. Для роторов использовались материалы класса викаллой, на базе которого впервые были созданы ГД [9], конкурентоспособные по энергетическим характеристикам с другими электродвигателями и имеющие ряд важных преимуществ перед ними.

Цель настоящей работы заключается в обобщении и развитии научно-технических решений и разработок в области гистерезисных электромеханических преобразователей энергии и систем для технологических установок атомной и химической промышленности и энергетики. Основное внимание уделено центрифужным и роторным технологиям на базе гистерезисного электропривода и, в частности, на основе следующих центрифуг по атомарному разделению веществ:

- очистительные центрифуги;
- центрифуги для получения сверхчистых веществ;
- центрифуги для разделения изотопов [3];
- центрифуги для утилизации радиоактивных отходов [4].

Для достижения цели решались следующие основные задачи:

- исследование научных проблем электромеханического преобразователя энергии и электропривода центрифуг по обогащению;
- формирование банка научно-технических решений;
- разработка электромеханических преобразователей энергии и электроприводов для указанных центрифуг;

— изучение электромеханических преобразователей энергии и систем для реализации технологий сепарирования, а также технологий на базе миниатюрных турбокомпрессоров и турбогенераторов.

Партнерами и заказчиками НИУ «МЭИ» были и остаются ведущие организации атомной отрасли и Российской академии наук (РАН):

— Акционерное общество «Уральский электрохимический комбинат» (АО «УЭХК») (г. Новоуральск Свердловской обл.);

— Закрытое акционерное общество «Центротех-СПб» (ЗАО «Центротех-СПб») (г. Санкт-Петербург);

— Акционерное общество «Опытное конструкторское бюро — Нижний Новгород» (АО «ОКБ — Нижний Новгород»);

— Всероссийский электротехнический институт (ВЭИ);

— Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт металлургии и материаловедения им. А. А. Байкова РАН;

— ГНЦ РФ ФГУП «ЦНИИчермет им. И. П. Бардина».

В ЗАО «Центротех-СПб» было создано несколько поколений синхронных гистерезисных электродвигателей торцевой конструкции (СГДТ) для привода центрифуг, а 8-е и 9-е поколения разрабатывались ЗАО «Центротех-СПб», АО «УЭХК» и АО «ОКБ — Нижний Новгород» совместно с НИУ «МЭИ» по проектам НИУ «МЭИ». Наибольший технический резерв состоит в использовании новых алгоритмов импульсного управления возбуждением СГД, созданных в НИУ «МЭИ».

Совокупность научных проблем электромеханического преобразователя энергии и электропривода центрифуг по обогащению урана обычно ограничивалась созданием требуемого, как правило, возможно более высокого уровня частоты вращения при минимально возможном энергопотреблении. Из [2, 5, 10 — 14] следует, что последнее связано с типом приводного электродвигателя и электропривода, режимами их работы, реализацией системы электропитания. Исследования [12 — 18] показали наличие внутренних потерь от взаимодействия вторичных магнитных полей рассеяния электродвигателя с элементами конструкции центрифуги. Авторы использовали методы анализа электромеханических преобразователей и систем, отработанные в гироскопии, что позволило:

— выявить наличие дополнительных потерь, составляющих от 10 — 15 до 45 — 50% от значения номинальной мощности;

— установить основные причины их возникновения;

— выработать рекомендации и мероприятия по их уменьшению.

Для обеспечения разработок и исследований электромеханических преобразователей энергии и элект-

троприводов на их основе для газовых центрифуг по обогащению урана под руководством профессора В. Н. Тарасова был сформирован банк научно-технических решений. Традиционно в отрасли по обогащению урана электропривод строился на базе СГД [5 — 8]. На основе совокупности новых научно-технических решений по управлению СГД [11 — 16, 18] НИУ «МЭИ» в содружестве с ВЭИ и рядом других организаций в 1980 — 2000-х гг. был создан научно-технический задел. Он защищен авторскими свидетельствами СССР и патентами РФ, основные из которых: № 577632\* и зависящие от него № 904172\* и 949090\*, 1155192, 1162013, 1164850, 1170574, 1241339, 1241390, 1259415, 1361698, 1498359, 1508336, 1628176, 1777228, 1785405, 1833096, 12820. Знак «\*» означает внедрение в производство.

В 2001 — 2008 гг. НИУ «МЭИ» на ряде отраслевых совещаний в Росатоме и головных организациях отрасли, выдвинул и обосновал идею комплексной оптимизации ключевых систем технологических линий:

- электронных: источники питания, преобразователи частоты;
- электромеханических: основные элементы, электродвигатели;
- управляющих подсистем;
- электромеханотронных, включающих центрифуги.

Работы проводились по новым типам СГД для центрифуг 7-го, 8-го и 9-го поколений совместно с ведущими предприятиями отрасли: УЭХК, НТЦ «Центротех-ЭХЗ». Прошли этапы проектирования, включая этапы моделирования, конструирования, экспериментальной проверки на макетных образцах, выпуска опытных партий в 2002 — 2008 гг. [11 — 14, 16]. Особо важные новые задачи решались при реализации электропривода 9-го поколения надкритических газовых центрифуг [14 — 16].

Оптимизация подсистем проводилась следующим образом: модернизировались структуры преобразователей частоты и система «преобразователь-электродвигатель» с обеспечением полноценного использования режима управления; оптимизировались электродвигатели за счет использования новых аморфно-магнитных материалов для магнитопроводов статоров и применения магнитно-твердых материалов для дисков роторов.

Все это в совокупности позволило повысить КПД системы с 53 — 55 (предыдущий уровень) до 70 — 75%, что в условиях одновременной работы огромного числа (миллионы) приводных электродвигателей центрифуг дало существенный экономический эффект. Экономически значимым в масштабах отрасли является повышение КПД на 0,1%.

В НИУ «МЭИ» на базе фундаментальных НИР были выполнены разработки и исследования специализированных источников электропитания, оптимизированных комплексов электронных и, главное, элект-

ромеханических преобразователей — синхронных гистерезисных электродвигателей торцевого исполнения (СГДТ) [13 — 18], совершенствование которых велось по следующим направлениям:

- 1) анализ и минимизация потерь мощности в СГДТ;
- 2) параметрическая оптимизация существующей конструкции;
- 3) конструктивные изменения в СГДТ;
- 4) изменения конструкции технологического механизма.

Принятая на предприятиях методика определения потерь мощности состояла в нахождении механических и электрических потерь и в условном отнесении оставшихся потерь к магнитным потерям. В результате исследований в НИУ «МЭИ» было установлено, что потери, условно относимые к магнитным, включают в себя не только собственно магнитные потери, но и добавочные потери в роторе от высших гармоник магнитного поля обмотки статора  $\Delta P_{\text{доб}}$ , а также дополнительные потери в роторе, вызванные модуляцией размера воздушного зазора и радиальными перемещениями ротора относительно статора при вращении ротора в составе механизма, и дополнительные потери, связанные с конструкцией механизма  $\Delta P_{\text{доп}}$ .

В табл. 1, 2 представлены результаты расчетных исследований, проведенных в НИУ «МЭИ», и опытные данные, полученные в реальных производственных условиях, в частности, при испытании базового варианта СГДТ с серийным магнитопроводом статора, новой обмоткой, ротором из стали 70С2ХА с номинальным внутренним диаметром  $D_{\text{рвн}}$ . Числовые значения во всех таблицах и в тексте статьи для удобства анализа и обобщения даны в относительных единицах как отношения реальных значений к номинальным значениям параметров и показателей: воздушного зазора  $\delta_{\text{н}}$ , толщины  $\Delta_{\text{рн}}$ , наружного  $D_{\text{рнн}}$  и внутреннего  $D_{\text{рвн}}$  диаметров ротора, напряжения электропитания  $U_{\text{н}}$ , тока в обмотке статора  $I_{\text{фн}}$ , электромагнитного гистерезисного момента  $M_{\text{зг}}$ , момента сопротивления на валу  $M_{\text{с}}$ . Потери мощности: электрические  $\Delta P_{\text{элек}}$ , магнитные  $\Delta P_{\text{магн}} = \Delta P_{\text{з,я}} + \Delta P_{\text{д}}$ , в ярме и зубцах  $\Delta P_{\text{з,я}} = \Delta P_{\text{з}} + \Delta P_{\text{я}}$ , добавочные  $\Delta P_{\text{доб}}$ , дополнительные  $\Delta P_{\text{доп}}$ :  $\Delta P_{\text{д}} = \Delta P_{\text{д}} + \Delta P_{\text{доп}}$ , механические  $\Delta P_{\text{мех}}$  в % от потребляемой мощности.

Далее выполнялось проектирование нового типа СГДТ, по результатам проектного расчета в ведущей проектно-конструкторской организации был изготовлен и испытан макет СГДТ с магнитопроводом статора из стали 3431, новой обмоткой, ротором из стали 70С2ХА с  $D_{\text{рвн}}$ ,  $\Delta_{\text{р}} = 1,25\Delta_{\text{рн}}$ . Результаты его расчетов и испытаний приведены в табл. 3, показатели при различных размерах зазора — в табл. 4.

Анализ результатов показал, что в спроектированном новом типе СГДТ электрические и магнитные потери мощности составляют от потребляемой мощно-

Таблица 1

Результаты расчета и испытаний базового варианта СГДТ при  $U = 0,947U_n$  и частоте электропитания  $f = f_n$

Параметры, показатели	Единицы измерения	Ротор номинальной толщины $\Delta_{рн}$				
		профилированный, $D_{рн} = D_{рнн}$		плоский, $D_{рн} = 0,956D_{рнн}$		
вид данных	—	расчет		опыт	расчет	
режим	—	пуск	синх.	синх.	пуск	синх.
фазный ток в обмотке статора	отн.ед.	0,913	0,835	0,757	0,991	0,891
КПД		0,785	0,765	0,720	0,755	0,709
cosφ		0,252	0,221	0,258	0,232	0,185
гистерезисный момент		0,747	0,716	0,739	0,717	0,687
момент сопротивления		—	0,582	0,582	—	0,485
потребляемая мощность	%	100	100	100	100	100
потери:						
механические		78,5	76,5	72,3	75,5	70,9
электрические		17,0	17,8	20,9	20,1	22,6
магнитные		4,5	5,7	6,8	4,4	6,5
добавочные	<0,05	<0,05	—	<0,05	<0,05	

Таблица 2

Результаты расчета и испытаний базового варианта СГДТ при  $U = 0,947U_n$  и частоте электропитания  $f = f_n$

Параметры, показатели	Единицы измерения	Ротор толщиной $\Delta P = 0,875\Delta P_n$ плоский, $D_{рн} = D_{рнн}$						
		расчет						опыт*
вид данных	—	расчет						
зазор	отн.ед.	$\delta = 0,968\delta_n$		$\delta = 1,080\delta_n$		$\delta = 1,108\delta_n$		
режим	—	пуск	синх.	пуск	синх.	пуск	синх.	синх.
фазный ток в обмотке	отн.ед.	0,917	0,826	0,865	0,770	0,970	0,887	0,774
КПД		0,803	0,774	0,824	0,792	0,781	0,756	0,60**
cosφ		0,275	0,229	0,300	0,241	0,255	0,219	0,235
гистерезисный момент		0,840	0,807	0,885	0,845	0,801	0,774	0,794
момент на валу		—	0,606	—	0,606	—	0,606	0,552
потребляемая мощность	%	100	100	100	100	100	100	100
потери:								
механические		80,2	77,3	82,4	79,3	78,1	75,5	60,8**
электрические		15,7	17,0	13,5	14,9	17,9	19,0	12,5**
магнитные	4,1	5,7	4,1	5,8	4,0	5,5	26,7**	

\* — средние значения по данным испытаний опытной партии СГДТ в составе 20 единиц, изготовленной по результатам проектных расчетов;

\*\* — различие по КПД и процентному содержанию составляющих потерь в потребляемой мощности объясняется более точным расчетом реальных магнитных потерь в статоре: если использовать методики, принятые на предприятиях, в соответствии с которыми остаточные потери  $\Delta P = P_1 - \Delta P_{\text{мех}} - \Delta P_{\text{элек}}$  относятся к магнитным потерям, то расчетное значение КПД и, соответственно, процентное содержание составляющих потерь в потребляемой мощности совпадают с экспериментальными с точностью 3 — 5%, однако это скрывает истинную картину распределения потерь мощности в СГДТ.

Таблица 3

## Результаты расчета и испытаний спроектированного нового типа СГДТ

Параметры, показатели	Единицы измерения	Значения			
		синхронный режим без управления		синхронный режим с управлением	
режим	—				
вид данных	—	расчет	опыт	расчет	опыт
напряжение	отн. ед.	1,000	1,003	0,741	0,741
ток в обмотке статора		0,939	0,926	0,580	0,543
КПД		0,595	0,602	0,762	0,784
cosφ		0,271	0,274	0,452	0,486
максимальный синхронный момент		0,877	0,867	0,837	0,852
момент сопротивления на валу		0,661	0,677	0,661	0,677
потребляемая мощность	%	100	100	100	100
потери:					
электрические		14,4	14,0	6,9	6,3
магнитные		26,1	25,8	16,9	15,3
механические	59,5	60,2	76,2	78,4	

Таблица 4

Показатели нового типа СГДТ при различных размерах воздушного зазора при  $f = f_n$ 

Параметры, показатели	Единицы измерения	Значения в относительных единицах					
		$\delta = 0,968\delta_n$		$\delta = 1,080\delta_n$		$\delta = 1,108\delta_n$	
режим	—	без упр.	с упр.	без упр.	с упр.	без упр.	с упр.
напряжение линейное	отн. ед.	0,947	1,079//0,737	0,947	1,079//0,737	0,947	1,079//0,737
фазный ток		1,130	0,674	1,039	0,578	1,209	0,761
максимальный синхронный момент		0,828	1,023	0,861	1,065	0,799	0,982
момент сопротивления		0,664	0,664	0,664	0,664	0,664	0,664
КПД		0,591	0,762	0,602	0,774	0,580	0,751
cosφ		0,241	0,401	0,256	0,460	0,229	0,362
потребляемая мощность	%	100	100	100	100	100	100
механические потери		59,0	76,2	60,2	77,4	57,9	75,1
электрические потери		13,8	6,4	11,9	4,8	15,5	7,9
магнитные потери:		27,2	17,4	27,9	17,8	26,6	17,0
в зубцах и ярме:		7,2	6,5	7,4	6,7	6,9	6,2
в зубцах		1,1	1,0	1,1	1,0	1,0	0,9
в ярме	6,1	5,5	6,3	5,7	5,9	5,3	
дополнительные	20,0	10,9	20,5	11,1	19,7	10,8	

сти в режиме без управления — 41,0%, с управлением — 23,8 %. Основная доля магнитных потерь это дополнительные потери: в режиме без управления — 20,0%, с управлением — 10,9 %. Магнитные потери в зубцах и ярме статора  $\Delta P_{z,y}$  в режиме без управления — 7,2 %, с управлением — 6,5 %, причем их основная доля — в ярме. Электрические потери в режиме без управления — 13,8 %, с управлением — 6,4 %.

При исследовании электромеханических преобразователей энергии и систем центрифуг для реализации технологий сепарирования с целью нахождения новых областей применения отработанных научно-технических решений авторы ограничились рассмотрением класса высокооборотных, относительно маломощных центрифуг, научно-технические решения по которым близки к реше-

ниям по гироскопическим приборам и центрифугам по обогащению урана.

К новым областям применения относятся центрифуги для разделения суспензий и многокомпонентных жидкостей [17 — 21] в медицинских и биологических исследованиях. В таких центрифугах суспензии сверху поступают в ротор, вращающийся вокруг своей оси. Под действием центробежных сил масса отбрасывается к его стенке, а жидкая фракция проходит в корпус через специальные насадки. Твердая фракция удаляется со стенок ротора с помощью специальных скребков.

Для качественного разделения частота вращения ротора должна быть высокой и стабильной. Повышение прочности ротора достигается использованием армированных углеродистых нитей [21]. Эти требования и научно-технические решения близки к тем, которые характерны для центрифуг по обогащению урана и которые, следовательно, могут быть применены для систем электропитания и электропривода центрифуг в указанных новых областях использования.

Широко применяются центрифуги также в пищевой промышленности и сельском хозяйстве для переработки и сепарации сахара, молочных продуктов, семян и т. п. [19, 20]. Эти технологии были подробно изучены и установлены требования к их электроприводам, которые по структуре и элементной базе аналогичны рассмотренным, и отличаются частотами вращения, моментами сопротивления и инерции.

В последние годы для оснащения систем кондиционирования крупных объектов, авиационной и космической техники, железнодорожного транспорта и для других областей техники и отраслей промышленности интенсивно развиваются разработки высокоскоростных турбокомпрессоров, эффективные и для холодильной техники. Будучи экологически безопасными механизмами, они вместе с тем имеют по сравнению с аналогами в 20 — 40 раз меньшую установленную массу, более надежны и экономичны. Работы в этом направлении ведутся в США, Южной Корее, Японии. Аналогичные возможности совершенствования имеются и для систем генерирования электроэнергии. Впервые в 1999 г. стало известно о развертывании в США широкой программы «Advanced Energy» «System Program» по разработке высокоскоростных миниатюрных турбогенераторов.

Таким образом, это новая продукция с весьма широкой ожидаемой областью применения. Чем выше частота вращения при сохранении одних и тех же габаритов, тем больше выходная мощность и, соответственно, эффективность турбокомпрессора или турбогенератора. Для достижения высоких частот вращения используются предельные возможности материалов и конструкций. В итоге можно получить мощности до 100 и более кВт при частотах вращения 60000 — 70000 об/мин в таких малых габаритах, что даже при высоком, более 95%, КПД весьма трудно отвести от

электромеханического преобразователя энергии тепло, выделяемое вследствие потерь мощности в нем.

В России такие работы ведутся более 10 лет, в том числе в НИУ «МЭИ», ОАО «Аэроэлектромаш», МГТУ им. Н. Э. Баумана. В НИУ «МЭИ» выполнен уникальный проект на мощность 130 кВт и частоту вращения 84000 об/мин. Электромеханическая часть подобных механизмов может быть реализована на основе следующих вариантов:

- частотно-регулируемого асинхронного электродвигателя;
- вентильного электродвигателя;
- гистерезисного электродвигателя с управлением (табл. 5).

Научно-техническая проблематика этого направления в основном связана с созданием высокопрочного ротора либо на базе конструкции с бандажированием магнитов ротора и реализации вентильного электродвигателя, либо на основе монолитного ротора и реализации гистерезисного электродвигателя с управляемым возбуждением. Второй вариант был детально проработан, спроектированы, изготовлены и исследованы макетные и опытные образцы, получены требуемые электромеханические показатели и характеристики (табл. 5).

Таким образом, можно сделать следующие выводы.

Потери в СГДТ, условно относимые к магнитным потерям, включают в себя не только собственно магнитные потери, но и еще три составляющие: добавочные потери в роторе от высших гармоник магнитного поля; дополнительные потери в роторе из-за модуляции размера зазора и радиальных перемещений ротора относительно статора при вращении ротора; потери, обусловленные конструкцией механизма.

В спроектированном новом типе СГДТ электрические потери могут быть снижены за счет уменьшения активного сопротивления фазы обмотки статора  $R_{\phi}$ . Увеличение диаметра обмоточного провода по меди на 12,5% (по изоляции на 10,3 — 11,7%) снижает  $R_{\phi}$  на 21,0%. При этом увеличивается объем провода в пазу и лобовых частях на 21,7%. Для размещения утолщенного провода в пазу статора СГДТ целесообразны, следующие конструкторско-технологические решения: уменьшение высоты клиновой зоны на 28,6%, увеличение ширины паза на 6,9%. Для размещения провода в лобовых частях следует: увеличить толщину внутренней лобовой части и вылет ее наружной части; повысить степень обжатия лобовых частей.

Электрические потери также могут быть снижены за счет уменьшения тока в обмотке статора. Согласно результатам расчетов СГДТ основная составляющая МДС — МДС воздушного зазора  $F_{\delta}$ , поэтому задача снижения тока сводится, прежде всего, к уменьшению  $F_{\delta}$ . Ток также можно снизить за счет уменьшения пульсаций индукции магнитного поля в зазоре путем установки в пазах магнитных клиньев.

### Параметры и показатели ГД

Параметры, показатели	Единицы измерения	Гистерезисный пуск со скольжением				Последующий разгон	
		50	100	150	200	200	1167
частота	Гц	50	100	150	200	200	1167
напряжение	В	12,5	26,0	39,0	55,0	58,6	350,0
ток	А	500	500	500	500	227	227
моменты: максимальный номинальный	Н·м	13,6 —	14,4 —	14,4 —	15,0 —	20,7 18	20,6 18
мощность на валу		—	4523	9046	14135	22620	131900
потери: электрические магнитные на перемагничивание	Вт	905 17,5 4260	905 21,4 4523	905 21,0 4523	905 25,7 4711	180 241,0 10	180 3400,0 40
потребляемая мощность		5183	9972	14495	19775	23051	135520
индукция: в зазоре в роторе	Тл	0,54 0,46	0,57 0,50	0,58 0,51	0,62 0,55	0,70 0,88	0,70 0,88
cosφ	отн. ед.	0,48	0,44	0,43	0,42	1,00	1,00
КПД	%	0	45,3	62,4	71,4	98,1	97,3

Работы по центрифугам и другим высокооборотным электромеханотронным устройствам и системам, реализующим технологии в энергетике, химической и смежных с ней отраслях, характеризуются общностью проблем по ряду направлений, преобладающей научно-технической тематикой с работами по гироскопической тематике.

При реализации электромеханической части механизмов вариант гистерезисного электродвигателя с управляемым возбуждением имеет преимущества благодаря энергетической экономичности, практически равной экономичности вентильного электродвигателя, большей механической и температурной стабильности и прочности ротора.

Системы электропитания и электропривода центрифуг и сепараторов, нашедших широкое применение в пищевой промышленности и сельском хозяйстве для переработки и сепарации сахара, молочных продуктов, семян и тому подобного, по структуре и элементной базе аналогичны системам обогатительных центрифуг и отличаются частотами вращения, моментами сопротивления и инерции.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты № 15-08-99600-а и 16-08-01101-а).

### Литература

1. Nestler J. Verhalten von dreiphasigen Hysterese-motoren beim Antrieb von Gas-Ultrazentrifugen // Wiss. Ber. AEG-Telefunken. 1976. V. 49. N 45. P. 139 — 149.

2. Bouchard J.R., Ray R.E. The reality of whul spud modulation. Northrop Corporation, 1981. P. 217 — 222.

3. Прогресс в разработке кольцевой центрифуги для проведения процесса разделения радиоактивных отходов // Nucl. Sci. And Techn. 1998. Vol. 9. N 3. P. 157 — 162.

4. Компания JNEL начинает разработку новой центрифуги // Atoms Jap. 2000. Т. 44. № 11.

5. Синев Н.М. Экономия ядерной энергетики. М.: Энергоатомиздат, 1987.

6. Вестник Атомпрома: Единая топливная // Вестник Атомпрома. 2009. № 12.

7. Ядерный топливный цикл в фокусе Nuclear.Ru // Вестник Атомпрома. 2014. № 1. С. 46 — 48.

8. Компания ТВЭЛ. Основные факты 2015. Ч. 7. Газовые центрифуги и оборудование для разделения изотопов урана. М.: Росатом, 2015.

9. Ларионов А.Н., Мастяев Н.З., Орлов И.Н., Панов Д.Н. Общие вопросы теории гистерезисных двигателей // Электричество. 1958. № 7. С. 1 — 6.

10. Делекторский Б.А., Тарасов В.Н. Управляемый гистерезисный привод. М.: Энергоатомиздат, 1983.

11. Тарасов В.Н., Останин С.Ю., Соболев Л.Б. Моделирование физических процессов в гистерезисном двигателе при импульсном регулировании его возбуждения // Электричество. 1998. № 3. С. 44 — 51.

12. Тарасов В.Н., Останин С.Ю., Селезнев А.П. Development of electromechanical systems implementing rotor and centrifuge technologies (доклад на английском языке) // Proc. RNS-EEE-3. Kazan, 2001. P. 71 — 79.

13. **Делекторский Б.А. и др.** Высокооборотные синхронные электродвигатели для нового электротехнического оборудования // Электротехника — 2010. Перспективные виды электротехнического оборудования для передачи и распределения электроэнергии: Тезисы докл. VI симпозиума. М., 2001. С. 71 — 77.

14. **Тарасов В.Н. и др.** Результаты проектирования и оптимизации энергетических показателей синхронных гистерезисных двигателей для электропривода технологических линий // АПТ — 2002: Тезисы докл. III Межотрас. науч.-техн. конф. Новоуральск: НГТИ, 2002. С. 92 — 96.

15. **Ефимов А.А. и др.** Совершенствование методов и средств автоматизированного расчета и проектирования управляемого гистерезисного электропривода // Труды научной сессии МИФИ–2005. IV НТК «Научно-инновационное сотрудничество».

16. **Ефимов А.А., Останин С.Ю., Тарасов В.Н., Беспалов Н.И.** Проектирование и оптимизация энергетических показателей синхронных гистерезисных двигателей для электропривода технологических линий // Электроприводы переменного тока: Доклады

XIII Междунар. науч.-техн. конф. Екатеринбург, 2005. С. 108 — 111.

17. **Останин С.Ю., Рудник П.С.** Проектирование pilotных образцов электродвигателей для приводов центрифуг и сепараторов // Федоровские чтения — 2010: Материалы XL Всеросс. науч.-практ. конф. М., 2010. С. 60 — 62.

18. **Останин С.Ю., Огладин М.В.** Система управления многодвигательным синхронным энергосберегающим электроприводом // Федоровские чтения — 2011: Материалы XLI Всеросс. науч.-практ. конф. М., 2011. С. 47 — 55.

19. **Muller H.Ju.** 3-phase current drives for centrifugals in the sugar industry // Zuckerindustrie. 1998. Bd. 123. N 11. P. 877 — 893.

20. **Лубников С.И.** Механизм разделения семян диэлектрическим сепаратором // Техника в сельском хозяйстве. 2000. № 6. С. 12 — 13.

21. **Basso Dale** Electric motors power up the CPI. Pt. 1 // Chem.Eng. (USA). 1992. V. 99. N 7.

*Статья поступила в редакцию 19.04.2016*