

28

ISSN 0013-5860

Электротехника

6 1999



ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ —
КОЛЛЕКТИВНЫЙ ЧЛЕН АКАДЕМИИ
ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ НАУК РФ
Издается с января 1930 года

№ 6 ИЮНЬ 1999

УЧРЕДИТЕЛИ

ДЕПАРТАМЕНТ МАШИНОСТРОЕНИЯ
МИНПРОМА РФ (г. МОСКВА)
АО «ЭЛЕКТРОВЫПРЯМИТЕЛЬ»
(г. САРАНСК)
АООТ «ХОЛДИНГОВАЯ КОМПАНИЯ
«ЭЛЕКТРОЗАВОД» (г. МОСКВА)
АО «ЭЛЕКТРОНИКА» (г. ВОРОНЕЖ)
АО «ВЭЛНИИ» (г. НОВОЧЕРКАССК)
АССОЦИАЦИЯ ИНЖЕНЕРОВ СИЛОВОЙ
ЭЛЕКТРОНИКИ (г. МОСКВА)
АССОЦИАЦИЯ «АВТОМАТИЗИРОВАН-
НЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД» (г. МОСКВА)
НТА «ПРОГРЕССЭЛЕКТРО»
(г. МОСКВА)
АО «РОСЭЛПРОМ» (г. МОСКВА)
НИИ «ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ»
(г. ЗАПОРОЖЬЕ)

СОВЕТ УЧРЕДИТЕЛЕЙ

ИВАНОВ В.Н., ЧИБИРКИН В.В., МА-
КАРЕВИЧ Л.В., МЕЩЕРЯКОВ В.М.,
ЩЕРБАКОВ В.Г., КОВАЛЕВ Ф.И. (пред-
седатель совета), ЮНЬКОВ М.Г., ПО-
ДАРУЕВ А.И., ГЛОВАЦКИЙ А.В., АНД-
РИЕНКО П.Д.

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Главный редактор
КОЧЕТКОВ В.Д.

БЕЛКИН Г.С., ДАЦКОВСКИЙ Л.Х.,
ДОЛКАРТ В.М., КОПЫЛОВ И.П.,
ЛУРЬЕ А.И., МАВЛЯНБЕКОВ Ю.У.,
МОСКАЛЕНКО В.В., РОЗАНОВ Ю.К.,
СЛЕЖАНОВСКИЙ О.В. (зам. главного
редактора), ТРУБАЧЕВ С.Г.,
ТУБИС Я.Б., УСОВ Н.Н., ФИН-
КЕЛЬ Э.Э., ФЛОРЕНЦЕВ С.Н., ХО-
ТИН В.А.

Издатель: ЗАО "Знак"

103012, Москва, Б.Черкасский пер., 2/10

Адрес редакции:

123242, Москва,

Зоологическая ул., 11, комн. 213

Факс/телефон: 254-11-52

СОДЕРЖАНИЕ

Стома С.А. ВНИИЭМ — сегодня	1
КОСМИЧЕСКАЯ ТЕХНИКА	
Горбунов В.А. Космический аппарат "Ресурс-01" №4	3
Беленький А.Д., Васильев В.Н. Управление приводами систе- мы ориентации солнечных батарей научно-энергетической плат- формы международной космической станции	6
Стома С.А., Кудрявцев В.В., Кузьмин В.Н., Михайлов Е.М. Бесконтактные электродвигатели постоянного тока в элект- ронасосных агрегатах космических аппаратов	11
Медведев Ю.Е., Медушев С.В., Ремизов В.Е., Шичков В.В. Лазерная интерферометрическая система для измерений пе- ремещений	14
Ходненко В.П. Электрореактивные двигатели как исполнитель- ные органы систем управления движением космических аппа- ратов	18
ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ АТОМНЫХ СТАНЦИЙ	
Жемчугов Г.А., Десятников И.И., Ольшевский Ю.Н. Системы управления, защиты и автоматизированного контроля ядер- ных энергетических реакторов АЭС	21
Ольшевский Ю.Н., Жемчугов Г.А., Куцаков С.Я., Галки- на Т.Н. Концепция развития систем управления и защиты ядер- ных энергетических реакторов типа ВВЭР-1000	25
Десятников И.И., Галкина Т.Н., Джумаев С.Д. Программно- технические комплексы для информационно-диагностических систем АЭС	28
ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ГАЗОПРОВОДОВ	
Верещагин В.П., Матвейчук П.А., Сарычев А.П. Особенности электромагнитных подшипников компрессоров магистральных газопроводов	32
КОРАБЕЛЬНАЯ ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА	
Жемчугов Г.А., Калашников В.К., Круглин В.А. Корабельная электромеханка — тенденции развития	35
АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВА	
Горбунов А.В., Крутикова Л.П., Жаринов В.А. Создание ав- томатизированного проектирования в области технологичес- кой подготовки производства в НПП ВНИИЭМ	39
Крутикова Л.П., Жаринов В.А., Тюрин Ю.А., Каминский М.Н. Автоматизированная система управления технической подго- товкой производства	43
МАТЕРИАЛЫ И ИСПЫТАНИЯ	
Стома С.А., Сергеев В.В., Сафонов Г.А. Разработка новых электротехнических материалов — важное направление ра- бот ВНИИЭМ	47
Духопельников Д.В., Сальковский Ф.М., Сафонов Г.П., Суш- ков В.Я. Электролюминесцентные индикаторы — новые экономичные изделия будущего	50
Кузнециков С.Ю., Шамрай Н.М. Выбор магнитно-мягкого ма- териала для магнитопроводов маломощного реакторного обо- рудования	53
Баскин Э.М. Методология для определения закона надежности усталостных испытаний	55
МЕДИЦИНСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ	
Богатырева И.И., Прусс А.И., Смирнов В.И. Высокочастотный электрохирургический аппарат типа ЭКХ	61
Сведения об авторах опубликованных статей	64
ХРОНИКА	
7-я Международная специализированная выставка "Автоном- ные источники тока"	67
Георгий Николаевич Петров	68
Давид Вениаминович Свечарник	69



НПП ВНИИЭМ — народному хозяйству

ВНИИЭМ — сегодня

С.А.СТОМА, генеральный директор

В нынешних условиях экономической реформы важнейшими факторами успешной работы научно-производственного коллектива являются актуальность тематики, наличие высококвалифицированных кадров, хорошее состояние оборудования, а также — платежеспособность заказчиков. Особое значение имеют многоплановая тематика научного коллектива и умение производства выпускать высококачественную продукцию. Только при таких условиях предприятие оказывается застрахованным от случайностей, которые могут поставить коллектив на грань распада.

НПП ВНИИЭМ ведет исследования, разработки, изготовление и поставки электрооборудования в соответствии с федеральными программами России — космической, энергетической, военной. Учитывая трудности с бюджетным финансированием, руководство ВНИИЭМ постоянно ведет поиск заказчиков, способных оплатить выполненные работы по тематике предприятия.

Заказчиком космических аппаратов для гидрометеорологии и исследования природных ресурсов Земли является Российское Космическое Агентство, которое достаточно регулярно оплачивает большую часть работ ВНИИЭМ в этой области. Существенным материальным подспорьем является попутный вывод на орбиту вокруг Земли малых космических аппаратов, созданных зарубежными фирмами. Кроме того, имеется достаточно предложений инофирм по установке на

борт искусственного спутника Земли научной аппаратуры для изучения окружающего пространства.

Богатый опыт разработки и эксплуатации бесщеточных двигателей постоянного тока различного назначения позволил ВНИИЭМ с успехом реализовать эти двигатели в электрических приводах заслонок подземных газохранилищ. При этом обеспечиваются необходимая взрывобезопасность и требуемая пространственная точность установки ходовой части устройства.

ВНИИЭМ в течение нескольких десятилетий ведет исследования динамических процессов систем магнитного подвеса вращающихся масс. Венцом этих работ явилось создание быстроходных силовых гироскопов (гиродинов) для ориентации долговременной орбитальной космической станции. На станции "Мир" гиродины, созданные во ВНИИЭМ, более 13 лет обеспечивают безрасходную работу системы управления движением станции и благодаря высокой точности позволили провести ряд уникальных научных экспериментов, являющихся значительным вкладом в мировую науку.

На основе этих работ во ВНИИЭМ созданы магнитные подшипники для газоперекачивающих агрегатов (ГПА) большой мощности, которые позволяют исключить смазочные масла и существенно повысить надежность работы агрегатов. Магнитные подшипники отличаются удобством в эксплуатации и достаточно простыми ремонтно-восстановительны-

ми работами. Как правило, требуемый ремонт заключается в замене отказавших электронных компонентов, реже — в замене печатных плат или субблоков. В настоящее время заканчиваются предварительные испытания ГПА-16 "Волга" производства Казанского компрессорного завода и ГПА-12, изготовленных пермским заводом "Искра".

Значительное место в научной тематике ВНИИЭМ занимают разработки электрических машин и электроприводов морских судов. Отличительной особенностью этих машин является их быстроходность и высокие электромагнитные нагрузки. Накопленный опыт создания подобных изделий позволяет ВНИИЭМ приступить к созданию высокочастотных электродвигателей и электроприводов для работы в экстремальных условиях нефтяных скважин. Эти работы являются весьма перспективными благодаря резкому снижению габаритных размеров и массы нефтеперекачивающих устройств. Испытания технологических образцов позволяют определить стратегию проектирования этих машин.

Важные работы ведет ВНИИЭМ по созданию электрооборудования АЭС. Для АЭС с реакторами РБМК поставлены информационно-справочные системы "Скала", являющиеся советчиком оператора и успешно эксплуатирующиеся длительное время. Эти работы выполнены на основе управляющей вычислительной машины ВНИИЭМ, использованной для автоматизированных испытательных систем космических аппаратов, а также — для бортового комплекса управления геостационарного искусственного спутника Земли "Электро". Дальнейшее развитие эти технические средства получили при создании программно-диагностических комплексов АЭС и при разработке сис-

тем управления и защиты ядерных реакторов. Это дало возможность разработать и поставить программно-управляемые электроприводы систем группового и индивидуального контроля на АЭС "Моховце" (Словакия), энергетический пуск первого блока которой осуществлен в 1998 г. Работы ВНИИЭМ в области вычислительной техники открывают новые горизонты в области автоматизированных систем управления (в том числе производственными, технологическими процессами), подготовкой производства, а также проектированием и испытаниями.

Электротехнические материалы — магнитные, изоляционные, конструкционные — представляют собой фундамент новых разработок и модернизации существующих изделий. Высокоэнергетические постоянные магниты с хорошей механической обрабатываемостью и достаточно высокой точкой Кюри являются одной из главных составляющих всех вышеупомянутых электромеханических изделий. Это относится к пленочным электроизоляционным материалам с увеличенной толщиной, а также — к пропиточным компаундам и покровным лакам и эмалям. На основе работ материаловедов во ВНИИЭМ ведется разработка электролюминисцентных индикаторов с уникальными световыми и энергетическими характеристиками применительно к гамме светотехнических индикаторных изделий.

Во все времена своего 58-летнего существования ВНИИЭМ характеризовался как "Институт-завод", и это оказалось особенно ценным в нынешние годы, когда происходит повальное разрушение производственной кооперации. Можно с уверенностью сказать, что динамизм и политехничность ВНИИЭМ являются залогом успешной его работы.

Космический аппарат «Ресурс-01» № 4

А.В.ГОРБУНОВ

Изложены основные предпосылки, этапы и проблемы создания космического аппарата (КА) оперативного наблюдения Земли и атмосферы «Ресурс-01» № 4, предназначенного для решения задач экологического мониторинга, изучения природных ресурсов Земли, метеорологии и контроля чрезвычайных ситуаций. Приведены принципиальные технические решения и особенности международного сотрудничества при интеграции в структуру КА бортовой информационно-измерительной аппаратуры других стран и при установке микроспутников, а также отделении их от КА «Ресурс-01» № 4. Подведены итоги функционирования КА в 1998 и 1999 гг.

Основные предпосылки и этапы создания КА «Ресурс-01» № 4

Головной организацией по разработке и изготовлению КА оперативного наблюдения Земли и атмосферы является Федеральное государственное унитарное Научно-производственное предприятие Всероссийский НИИ электромеханики с заводом (НПП ВНИИЭМ).

Космические аппараты создавались с начала 60-х годов первоначально для решения задач метеорологии и контроля окружающего космического пространства на высоте орбиты КА [1].

В 70-е годы особую значимость приобрело получение информации по вопросам экологии, так как индустриализация мирового хозяйства привела к заметному загрязнению окружающей человека среды.

В период 1974-1981 гг. были созданы отечественные космические комплексы (КК) «Метеор-Природа» двух поколений для изучения природных ресурсов Земли (ИПРЗ). С 1980 г. началось поэтапное развертывание КК «Ресурс-01» для экологического, природоресурсного мониторинга окружающей среды и контроля чрезвычайных ситуаций [2].

Пуск первого экспериментального КА «Ресурс-01» был осуществлен 18 июня 1980 г. на базе многоцелевой космической платформы второго поколения. Космический аппарат «Ресурс-01» № 1 эксплуатировался более восьми лет. Бортовой информационный комплекс (БИК-Э) вместе с цифровой радиолинией и запоминающими устройствами высокой плотности составили основу информационного комплекса КА «Ресурс-01».

Очередной КА этой серии — «Ресурс-01» №2 был выведен на орбиту 20 апреля 1988 г. Это был последний пуск КА «Ресурс-01» ракетоносителем «Восток».

С 1994 г. продолжились пуски КА «Ресурс-01», но уже новым ракетоносителем «Зенит». Впервые в мировой практике на широтно-стабилизированную по высоте орбиту (диапазон 663—690 км) был выведен КА «Ресурс-01» № 3. Включение в состав КА экспериментальной радиолинии сантиметрового диапазона обеспечило условия создания и применения сети малых наземных пунктов приема информации, установленных непосредственно у региональных потребителей, и создания на их основе территориальных центров получения, обработки и использования данных дистанционного зондирования Земли.

Информация с КА «Ресурс-01» № 3 широко применяется в регионах России, а также принимается и обрабатывается в Швеции в интересах многих фирм и организаций Европы.

10 июля 1998 г. ракетоносителем «Зенит» также на широтно-стабилизированную солнечно-синхронную орбиту (диапазон 818—845 км) был выведен усовершенствованный КА третьего поколения «Ресурс-01» № 4. Началось функционирование КК «Ресурс-01» в составе двух КА.

Космический аппарат «Ресурс-01» № 4

История создания КА «Ресурс-01» № 4 была сложной. Первоначально состав его бортового информационного комплекса не отличался принципиально от предыдущего аппарата этого типа, служебная платформа практически повторяла предыдущую. Разработка шла по накатанным рельсам и включала в себя усовершенствование отдельных элементов. Период 1993—1995 гг. был наиболее тяжелым для космической отрасли в России. Резкое ограничение финансирования бюджетом Федеральной космической программы России, аритмичность финан-

сирования, секвестирование бюджета заставили разработчиков КА и Российское Космическое Агентство искать пути выхода из сложившейся ситуации.

В программе дистанционного зондирования Земли из космоса создавались 2 типа КА, решающих родственные задачи. Это КА типа «Ресурс-01» (задачи природно-ресурсного и экологического мониторинга) и КА типа «Метеор-3» (задачи метеорологического мониторинга). Служебные платформы обоих КА в силу исторических обстоятельств были созданы на единой базе. Различие заключалось в информационных комплексах. Учитывая сложившуюся ситуацию с финансированием, возможность насыщения информационного комплекса дополнительной научной аппаратурой, в конце 1995 г. по предложению Главных конструкторов Российским Космическим Агентством было принято решение о введении в состав практически изготовленного КА «Ресурс-01» № 4 комплекса приборов метеорологического и гелиогеофизического назначения, а также серьезной модернизации информационного экоприродного комплекса.

Известно, что нет ничего сложнее, чем переконструировать уже готовое изделие. Установка дополнительной аппаратуры требовала доработки конструкции аппарата, ряда его служебных систем и системы сброса на Землю полезной информации. Вся эта работа проходила в условиях жесткого лимита времени и потребовала мобилизации всех сил от разработчиков КА.

В 1996 г. последовало предложение от Франции об установке прибора радиационного баланса Земли «Scarab», также требующей интеграции в состав информационного комплекса КА. Прибор имел большое научное значение для изучения динамических процессов в климате нашей планеты. Существенным было и привлечение зарубежных инвестиций в российский космос. Поэтому было принято решение об установке прибора на КА «Ресурс-01» № 4. Пришлось повторно решать вопросы интеграции новой аппаратуры, вносить коррективы в документацию, дорабатывать аппаратуру и конструкцию. Работа осложнялась нестыковкой по электрическому интерфейсу прибора и КА. Было решено создать уникальный блок-адаптер, в котором впервые использовалось в условиях космоса ЭВМ на базе микро-РС зарубежного производства. Аналогичный адаптер разрабатывался и для российско-итальянского малогабаритного спектрометра заряженных частиц.

В течение всего 1996 г. поступали предложения по установке на КА в качестве дополнительной полезной нагрузки отделяемых микроспутников производства Великобритании, Израиля, Германии и Австралии. Их установка требовала корректного определения места расположения, решения задач баллистического анализа траектории их отделения и расчета последующей орбиты, решения задач электромагнитной совместимости радиоволн на первых этапах после отделения, создания систем отделения. Задачи принципиально решаемы, инвестиции необходимы — контракты на предоставление этих услуг были подписаны.

Наиболее сложная задача в работе с микроспутниками — разработка и отработка систем отделения микроспутников от основного КА. Эта работа для коллектива предприятия была новой, требовала точного расчета исполнительных механизмов и высокой надежности при срабатывании. Кроме того, микроспутники не были идентичны по конструкции, и потребовалось создавать две принципиально разных системы отделения.

Интеграция двух английских микроспутников вызывала особенно пристальное внимание. Дело в том, что эти спутники устанавливались на КА на своих системах отделения, которые прошли достаточно высокую отработку в условиях космоса. Но последний пуск английского КА, по стечению обстоятельств тринадцатый по счету, был неудачным. Система отделения не сработала. Разработанная комплексная программа отработки интерфейса система отделения/борт КА позволила убедиться в надежности принятых решений и уверенно пойти на эту интеграцию.

Таким образом, состав КА «Ресурс-01» № 4 к началу 1997 г. значительно изменился по отношению к первоначальному. Общий вес полезной нагрузки вырос с 422 до 1012 кг и составил 44% общего веса КА, что доказывает высокий уровень «интеллектуальности» спутника и соответствует лучшим зарубежным разработкам. Практически российская программа создания КА «Ресурс-01» № 4 перешла в ранг международной программы, в которой принимали участие, кроме России, Франция, Германия, Бельгия, Италия, Великобритания, Чили, Таиланд, Израиль, Австралия.

На борту спутника были установлены следующие виды аппаратуры.

Для экоприродоресурсного мониторинга: модернизированный информационно-измери-

тельный бортовой комплекс БИК (Россия). В его состав входят сканирующие устройства среднего и высокого разрешения МСУ-СК с полосой обзора 760 км и МСУ-Э с полосой обзора 60 км в надире и 84 км на краю зоны, бортовое запоминающее устройство и радиолиния передачи видеoinформации. В МСУ-СК введен шестой поддиапазон для обнаружения пожаров. Существенно улучшено соотношение сигнал/шум. Разрешение МСУ-Э улучшено с 45 до 27 м.

Для метеорологического обеспечения: телевизионный метеорологический радиометр МР-900 с шириной обзора 2500 км (Россия); сканирующий прибор для анализа радиационного баланса системы Земля—атмосфера (СРРБ, Франция); измеритель солнечной постоянной ИСП-2 (Россия).

Для гелиогеофизических наблюдений: прибор для контроля радиационной обстановки в околоземном космическом пространстве РМК-М (Россия—Белоруссия); малогабаритный спектрометр для регистрации параметров космических лучей (НИНА, Италия).

Для сбора-передачи экологической информации от наземных средств установлена радиотехническая система ИРИС (Германия—Бельгия).

Пять малых, отделяемых спутников различных стран, установленных на КА «Ресурс-01» № 4, стали уникальным примером международного сотрудничества.

Спутник WESTPAC австралийско-российской разработки представляет собой пассивный КА — сферу с лазерными уголковыми отражателями. Разработанный механизм поддержания положения центра масс КА с точностью 0,5 мм позволяет использовать его как объект с очень малым собственным смещением и определять по его наблюдениям изменения координат наземных станций.

Спутник SAFIR-2 немецкой разработки имеет двунаправленную систему связи для наземных корреспондентов. Подобный ретранслятор (SAFIR-1) был установлен в качестве неотделяемой полезной нагрузки и отработан на предыдущем КА «Ресурс-01» № 3.

TechSat-2 является вторым израильским микроспутником, разработанным Техническим университетом г.Хайфы (Израиль). Его задача — испытания нового оборудования и проведение экспериментов в области связи, дистанционного зондирования, астрономии и наук о Земле. Он призван продемонстрировать эффективность малых спутников для решения широкого круга задач.

FASat-Bravo — микроспутник английской

разработки, выполненной по заказу Чили. Главной научной задачей спутника является слежение за состоянием озонового слоя над территориями Чили. Кроме того, на FASat-Bravo установлена система отображения Земли.

TMSat — микроспутник английской разработки — первый спутник, в изготовлении которого принимали участие тайландские специалисты. На нем установлен ряд новых экспериментальных полезных нагрузок, включая цифровую систему обработки сигналов, предназначенную для исследования способов улучшения спутниковой связи. В комплект входят широкоугольная и узкоугольная видеокамеры, способные получать многозональные снимки земной поверхности с разрешением до 100 м.

КА «Ресурс-01» № 4 поставляет оперативную информацию о состоянии окружающей среды. Во всех режимах работы передача видеoinформации со сканирующих устройств сопровождается передачей вспомогательной телеметрической информации, которая используется как для оперативного контроля некоторых параметров аппаратуры бортового измерительного комплекса, так и для пространственной привязки, геометрической и фотометрической коррекции видеoinформации при ее вторичной обработке на средствах потребителя.

Прием и регистрация данных дистанционного зондирования, передаваемых всеми КА «Ресурс-01», осуществляются в Главном и региональном центрах приема, регистрации и первичной обработки данных Росгидромета, на малых станциях регионального наблюдения в России, а также на стационарных пунктах приема, расположенных в других государствах (Швеция, Германия).

Сочетание высокого и среднего разрешения соответственно в узкой и широкой полосе обзора у отечественных КА типа «Ресурс-01» обеспечивает возможность осуществления мониторингового режима с периодичностью регионального обзора 3—4 сут со свободным доступом массовых потребителей и возможностью детального досмотра с достаточно высоким разрешением экологогеофизических объектов. Эта возможность широкого охвата, мониторингового режима наблюдения с возможностью детального досмотра интересующих потребителей локальных образований является уникальной особенностью КА «Ресурс-01», определяющей как бы «нишу», которую занимают отечественные космические средства экоприродоресурсного назначения среди зарубежных аналогов.

Области применения информации КА «Ресурс-01» № 4

Архив многоцелевой информации с КА «Ресурс-01» формируется в составе Государственного фонда данных о состоянии природной среды с доступом сначала через терминалы природоресурсного (НИЦ ИПР) и метеорологического (НИЦ «Планета») центров России, а в дальнейшем — по телефонным линиям и сети Интернет.

Информация используется в следующих народнохозяйственных отраслях:

— в сельском хозяйстве — для определения состояния посевов, структуры и влажности почвы, прогнозирования урожая, регистрации сельскохозяйственных угодий;

— в геологии — для составления космогеологических карт;

— в лесном хозяйстве — для обеспечения круглосуточного дозора по охране лесов от пожаров, картирования лесов;

— в метеорологии — для составления краткосрочных и долгосрочных прогнозов погоды, изучения воздушного бассейна над промышленными центрами, температурно-

влажностного зондирования атмосферы;

— в мелиорации — для изучения состояния водохранилищ и рек.

Космический аппарат обеспечивает оперативное получение в течение суток 6—8 изображений подстилающей поверхности Земли и облачного покрова в режиме непосредственной передачи вдоль маршрута протяженностью 4—5 тыс. км, а также планируемого числа записанных в бортовом запоминающем устройстве изображений с территорий, находящихся вне зоны радиовидимости пунктов приема информации.

Список литературы

1. Иосифьян А.Г., Шереметьевский Н.Н., Трифонов Ю.В. Советские космические аппараты для дистанционного зондирования типа «Метеор» // Электротехника. 1982. № 6.

2. Адашко В.И., Иосифьян А.Г., Трифонов Ю.В., Шереметьевский Н.Н. Космические аппараты оперативного метеорологического и природно-ресурсного назначения. Проблемы. Технические решения. Международная интеграция // Электротехника. 1991. № 9.

3. Herbert J. Kramer. Observation of the Earth and its Environment. Survey of Missions and Sensors. Deutsche Forschungsanstalt für Luft — Raumfahrt e.V. 1995.

Управление приводами системы ориентации солнечных батарей научно-энергетической платформы международной космической станции

А.Д.БЕЛЕНЬКИЙ, В.Н.ВАСИЛЬЕВ, кандидаты техн. наук

Рассмотрена кинематика двухступенного привода солнечных батарей, построена функция Ляпунова для анализа устойчивости привода с магнитной муфтой, намечены пути оптимизации параметров системы ориентации.

Основным источником снабжения электрической энергией российского сегмента международной космической станции (МКС) являются солнечные батареи (СБ), размещенные на научно-энергетической платформе (НЭП). СБ НЭП выполнены в виде двух одинаковых крыльев. Каждое крыло представляет собой плоскую трансформируемую конструкцию, состоящую из фермы-балки, на которой возможны монтаж и демонтаж от одной до четырех разворачиваемых панелей СБ.

Система ориентации солнечных батарей (СОСБ) осуществляет наведение СБ на Солнце, слежение за ним на освещенных участках орбиты, наведение в точку восхода Солнца на теневых участках орбиты, а также установку СБ в стандартные положения во время проведения на МКС специальных динамических операций.

В состав СОСБ входят три привода: два боковых для вращения крыльев СБ вокруг их продольных осей и корневой для поворота рамы СОСБ с установленными на ней боковыми приводами вокруг продольной оси НЭП. СОСБ оснащена датчиками Солнца, блоком электроники, а также активными и пассивными элементами обеспечения теплового режима.

Проблема управления приводами СОСБ не является принципиально новой. Имеется богатый опыт создания и успешной эксплуатации СОСБ, реализующей способ одноосного слежения за Солнцем, для оснащения модулей космической станции (КС) "Мир" [1]. Этот опыт был использован при создании СОСБ функционально-грузового блока и служебного модуля МКС. Разработка СОСБ НЭП призвана решить новые проблемы:

- эффективное использование СБ за счет двухосного слежения за Солнцем;
- гарантированный срок службы до 15 лет;
- существенное увеличение (на порядок) моментов инерции СБ;
- увеличение нагрузочных моментов приводов во время динамических операций на МКС;
- ограничение возмущений, действующих на НЭП при движении СБ.

Вместе с тем, при проектировании СОСБ желательно сохранить преемственность технических решений, которые полностью себя оправдали в процессе длительной эксплуатации КС "Мир".

Кинематика приводов СОСБ НЭП

Ряд важных проектных параметров определяется кинематикой двухстепенной СОСБ.

Полагаем, что МКС ориентирована в орбитальной системе координат $Oxyz$ (ОСК). Ось вращения корневого привода совпадает с осью Oy , направленной вдоль радиуса-вектора орбиты. Пусть n — единичный вектор, нормальный к активной поверхности СБ, а n_c — единичный вектор, направленный на Солнце.

Положение вектора n в ОСК определяется углами поворота корневого и боковых приводов ψ и u (рис.1). За начало отсчета углов примем положение СБ, при котором вектор n совпадает с направлением полета Ox . В исходном положении оси вращения боковых приводов перпендикулярны плоскости орбиты и совпадают с осью Oz . Положительным направлениям отсчета углов соответствуют повороты вектора n в сторону осей Oy и Oz .

Угол между линией визирования Солнца и бинормалью орбиты обозначим i . Изменения угла i связаны с прецессией плоскости орбиты и годовым движением Солнца

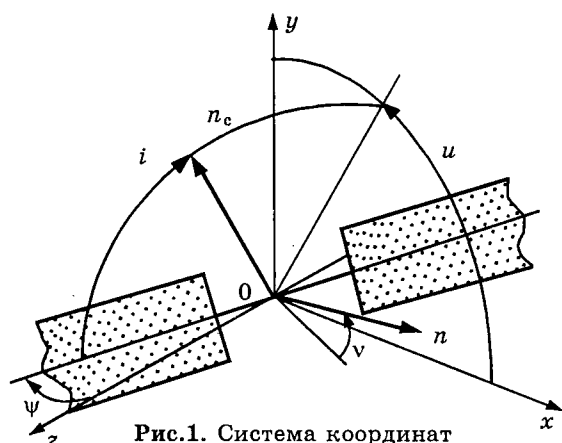


Рис.1. Система координат

по эклиптике. Для коротких интервалов времени, соизмеримых с периодом обращения МКС по орбите, будем считать угол i постоянным. При таком допущении вектор n_c описывает в ОСК поверхность кругового конуса с осью симметрии Oz и углом $2i$ при вершине. Положение вектора n_c на поверхности конуса в текущий момент времени t может быть задано углом $u = \omega_0 t$, где ω_0 — угловая скорость орбитального движения (рис.1). За начало отсчета времени выберем момент восхода Солнца над плоскостью местного горизонта Oxz .

Слежение за Солнцем осуществляется при выполнении условия $n = n_c$.

Из равенства проекций векторов n и n_c получим кинематические соотношения, связывающие угловые положения приводов с угловым положением Солнца в ОСК

$$v = \arcsin(\sin i \sin u);$$

$$\psi = \arcsin(\cos i (1 - \sin^2 i \sin^2 u)^{-1/2}). \quad (1)$$

Графики изменения углового положения корневого и боковых приводов за один период $T = 2\pi/\omega_0$ обращения МКС по орбите для различных значений угла i изображены на рис.2.

Диапазон изменения углов поворотов корневого и боковых приводов в процессе орбитального движения составляет $2i$. Важно отметить, что вращение приводов СБ является существенно неравномерным.

Максимальная скорость бокового привода ($|\dot{u}|_{\max} = \omega_0 \sin i$) не превышает угловую скорость орбитального движения ω_0 .

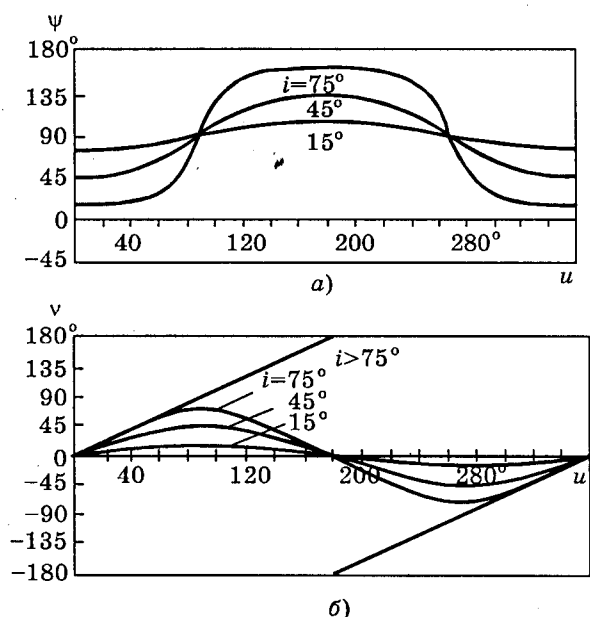


Рис.2. Углы поворота корневого (а) и боковых (б) приводов

Скорость корневого привода

$$\psi' = d\psi/dt = \omega_0 \operatorname{tg} i \sin u (1 + \operatorname{tg}^2 i \cos^2 u)^{-1} \quad (2)$$

достигает максимума

$$|\psi'|_{\max} = \omega_0 \operatorname{tg} i \quad (3)$$

при $u = \pi/2, 3\pi/2$ и равна нулю при $u = 0, \pi$.

Последняя формула показывает, что при углах i , близких к $\pi/2$, угловая скорость корневого привода резко возрастает.

Рассмотрим проблемы слежения за Солнцем, связанные с тем обстоятельством, что все реальные приводы имеют естественное ограничение скорости вращения. Требуемая скорость вращения корневого привода определяется формулой (3). В условиях ограничения скорости вращения корневого привода точное решение кинематической задачи при некоторых значениях угла i становится невозможным. Возникает необходимость оценки погрешности ориентации СБ, вызванной ограничением скорости поворота привода, и выработки мер, способствующих минимизации потерь электроэнергии.

Пусть ψ'_* — максимальная скорость вращения корневого привода.

Определим угловые положения Солнца u_* и моменты времени t_* , когда скорость вращения корневого привода становится максимальной.

Заменяя в формуле (2) $\psi'(u)$ на ψ'_* , получаем квадратное уравнение

$$\sin^2 u_* + (1/ab) \sin u_* - 1 - 1/a^2 = 0,$$

где $a = \operatorname{tg} i$; $b = \psi'_*/\omega_0$.

Отсюда

$$u_* = \arcsin(1/2ab)\{[1+4(a^2+1)b^2]^{1/2}-1\}. \quad (4)$$

Подставив (4) в (1), получим формулу для определения угла поворота корневого привода в те моменты времени t_* , когда его скорость становится максимальной

$$\psi_* = \psi(u_*) = \arcsin[\cos i (1 - \sin^2 i \sin^2 u_*)^{-1/2}]. \quad (5)$$

В процессе вращения корневого привода со скоростью ψ'_* ошибка ориентации по азимуту нарастает и становится максимальной

$$\Delta\psi = \pi - 2\psi_* \quad (6)$$

при угловом положении Солнца $u_{**} = \pi - u_*$.

Если скорость ψ'_* задана, то погрешность ориентации зависит только от угла i . Семейство зависимостей $\Delta\psi(i)$, построенных по формулам (6), (5) и (4), изображено на рис.3. Очевидно, $\Delta\psi = 0$ при $i \leq \arctg b$. С увеличением i ошибка ориентации по азимуту возрастает.

Фактические потери электроэнергии зависят не от погрешности ориентации по ази-

муту, которая может быть большой, а от косинуса угла между векторами n и n_c :

$$\cos \gamma = n n_c = \cos \psi \cos v \sin i \cos u + \sin v \sin i \sin u - \cos v \sin \psi \cos i. \quad (7)$$

Построим зависимость $\gamma(i)$ для фиксированного момента времени $t_{**} = (\pi - u_*)/\omega_0$, где ошибка ориентации по азимуту максимальна. В этот момент времени угол поворота корневого привода равен $\psi_{**} = \pi - \psi_*$.

Исключив из выражения (7) время, получим:

$$\cos \gamma(i) = (1 - \sin^2 i \sin^2 u_*)^{1/2} (\sin \psi_* \cos i - \cos \psi_* \cos u_* \sin i) + \sin^2 i \sin 2u_*.$$

Семейство зависимостей $\gamma(i)$ при различных значениях b изображено на рис.4.

Изучение зависимостей $\gamma(b, i)$ показывает, что с увеличением b погрешность ориентации СБ уменьшается, снижаются потери выработки электроэнергии. Например, при выборе $b=4$ мощность, вырабатываемая панелями СБ, снижается всего на 3%. Учитывая, что при больших углах i ($i > i_*$) снижение мощности СБ неизбежно, возможно использование двухступенного привода СБ в режиме одноступенного. С этой целью корневой привод устанавливается в исходное положение ($\psi = 0$), а боковые приводы вращаются с орбитальной угловой скоростью ω_0 (рис.2,б).

При $\psi = 0$ из соотношения (7) получим $\cos \psi = \sin i \cos(v-u)$. Если принять $v' = \omega_0$, то угол между векторами n и n_c будет постоянным и равным $\gamma = \pi/2 - i_*$. При $i_* = 75^\circ$ потери в выработке электроэнергии не превышают 3,5%.

Важно отметить, что в таком режиме работы СОСБ значительно снижаются возмущающие моменты, действующие на МКС. Это связано с тем, что корневой привод, на валу которого сосредоточена основная инерционная нагрузка, неподвижен, а боковые приводы вращаются вкруговую с постоянной скоростью ω_0 .

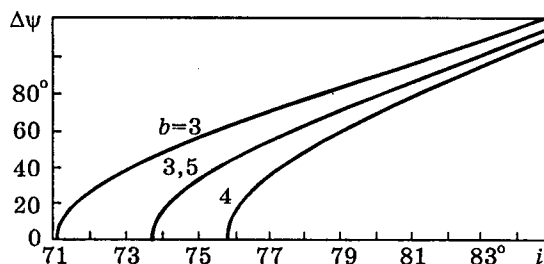
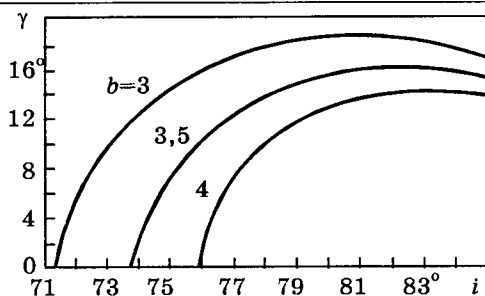


Рис.3. Ошибка по азимуту

Рис.4. Зависимость $\gamma(b, i)$

Таким образом, алгоритм управления приводами СБ при углах $i > i_*$ должен обеспечивать переключение боковых приводов из режима колебательного движения в режим кругового вращения с одновременной установкой корневого привода в исходное положение.

Исследования кинематики показали, что угол поворота корневого привода может быть ограничен диапазоном $\pm 2i_*$, а боковые приводы должны иметь неограниченные углы поворота.

Потери электроэнергии во время кругового вращения боковых приводов могут быть снижены за счет маневров корневого привода в пределах ограниченного угла. Однако этот вопрос является предметом специального изучения.

Обеспечение устойчивости управления приводом СОСБ

Одной из проблем, возникающих при создании редукторных приводов СОСБ, является разработка редукторов, обладающих высокими точностями и способных выдерживать большие нагрузки на выходном валу. Природа таких нагрузок связана с проведением стыковок транспортных кораблей с КС, с возникновением нештатных условий эксплуатации или с некорректными действиями монтажников и операторов при наземных испытаниях. Обычно названная проблема решается встраиванием в кинематическую цепь привода ограничительной муфты. В приводах СОСБ КС "Мир" использована магнитная ограничительная муфта, установленная на выходном валу редуктора. Эта муфта обладает двумя важными свойствами: неограниченным сроком службы и возможностью передачи вращения через герметизирующий объем редуктора немагнитную мембрану [1]. Зависимость передаваемого момента M_m от угла поворота ведомой полумуфты относительно ведущей $\Delta\beta$ называется моментной характеристикой магнитной муфты. В силу симметрии магнитной системы моментная характеристика является нечетной функцией.

Моментная характеристика магнитной муфты, оптимизированной по максимуму энергии, представляет собой синусоиду $M_m = M \sin(1/2)p\Delta\beta$. Ее амплитуда M определяет момент опрокидывания, а полупериод $2\pi/p$, где p — число полюсов, угол срыва магнитной муфты. С точки зрения динамики магнитная муфта представляет собой упругий элемент с переменной жесткостью и практически полным отсутствием диссипации энергии в области низких частот. Включение магнитной муфты в кинематическую цепь СОСБ приводит к возникновению консервативных движений и порождает проблему устойчивости "в большом". При этом на первый план выступает такая важная характеристика, как максимум потенциальной энергии, запасаемой в магнитной муфте. Численно энергия магнитной муфты равна интегралу от моментной характеристики на интервале от 0 до угла срыва магнитной муфты. Сопоставляя энергию магнитной муфты P_m с максимальной кинетической энергией E движущихся масс СОСБ и возможным импульсом внешнего Q_0 и внутреннего Q_1 возмущения, можно судить об актуальности проблемы устойчивости СОСБ. К примеру, для СОСБ КС "Мир" эти соотношения имеют вид:

$$P_m \gg E; P_m \gg Q_0; P_m \gg Q_1. \quad (8)$$

Отсюда следует, что проблема устойчивости существует только при нештатных ситуациях.

В случае СОСБ НЭП правые части неравенств (8) увеличились на порядок вследствие роста моментов инерции СБ и увеличения нагрузок при динамических операциях МКС. Решение проблемы устойчивости путем увеличения энергии магнитной муфты P_m , как показали оценки, приводит к неприемлемому росту массы магнитной муфты. Поэтому для обеспечения устойчивости системы предлагается использовать дополнительный контур управления электродвигателем по моменту магнитной муфты.

Уравнения движения ротора двигателя и СБ в этом случае имеют вид

$$\left. \begin{aligned} J_p \alpha'' &= k_1(\omega - \alpha') - k_2 M \sin 1/2 p(\alpha - \beta); \\ J_{сб} \beta'' &= M \sin 1/2 p(\alpha - \beta), \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

где J_p , α — момент инерции и угол поворота ротора двигателя, приведенные к выходному валу самотормозящегося редуктора; ω — требуемая скорость вращения СБ; k_1 — коэффициент обратной связи по скорости; k_2 — коэффициент обратной связи

по моменту магнитной муфты; $J_{сб}$, β — момент инерции и угол поворота СБ.

Преобразуем систему (9), введя новые параметры

$$v^2 = 0,5pM/J_{сб}; \mu = k_1/(J_p v); \lambda = 0,5pMk_2/(J_p v^2)$$

и безразмерные переменные

$$t_b = tv; \omega_b = 0,5p\omega/v; x = 0,5p\alpha - \omega_b t_b;$$

$$y = 0,5p\beta - \omega_b t_b; v = dx/dt_b; w = dy/dt_b.$$

В результате система уравнений (9) примет вид (индексы b опущены):

$$\left. \begin{aligned} v' &= -\mu v - \lambda \sin(x-y); \\ w' &= \sin(x-y); \\ x' &= v; \\ y' &= w. \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

Система (10) имеет k точек равновесия

$$v = 0; w = 0; x = y + k\pi. \quad (11)$$

Рассмотрим функцию

$$H = c_1 v^2 + c_2 w^2 + c_3 [1 - \cos(x-y)],$$

где c_1, c_2, c_3 — произвольные положительные параметры.

Очевидно, что эта функция положительно определенная и обращается в нуль в положении равновесия (11) при четном k . Производная по времени от этой функции

$$H' = 2c_1 vv' + 2c_2 ww' + c_3 (x' - y') \sin(x-y). \quad (12)$$

Подставив в это выражение v', w', x', y' из уравнений движения (10), получим:

$$H' = -2c_1 \mu v^2 + A \sin(x-y),$$

где $A = (c_3 - 2c_1 \lambda) v + (2c_2 - c_3) w$.

При $\lambda > 0$ существует нетривиальный набор положительных коэффициентов c_1, c_2, c_3 , обеспечивающих равенство $A = 0$ при любых значениях v, w . Для этого достаточно принять $c_1 = 0,5\lambda^{-1}c_3, c_2 = 0,5c_3$ при произвольном значении коэффициента c_3 . В этом случае $H' = -2c_1 \mu v^2 < 0$.

Таким образом, функция H является функцией Ляпунова, и, следовательно, управление с обратной связью по моменту обеспечивает асимптотическую устойчивость [2]. Доказательство устойчивости привода с оптимальной моментной характеристикой магнитной муфты можно распространить на общий случай. Для этого достаточно представить моментную характеристику в виде суммы m гармоник:

$$M(\alpha - \beta) = \sum_{j=1}^m M_j \sin(1/2)jp(\alpha - \beta),$$

а в качестве функции H выбрать выражение

$$H = c_1 v^2 + c_2 w^2 + \sum_{j=1}^m c_{j+2} [1 - \cos j(x-y)].$$

Если редуктор привода не является самотормозящимся, т.е. момент магнитной муфты частично (в зависимости от коэффициента полезного действия редуктора) действует на ротор двигателя, устойчивость системы может быть обеспечена и без дополнительного контура управления. Однако качество переходных процессов и размер области устойчивости в этом случае трудно предсказуемы, так как определяются уровнем технологии изготовления редукторов.

Способ оценки момента магнитной муфты может быть основан на зависимости момента от угла скручивания и сводится к измерению угла. Для повышения чувствительности датчика момента желательно увеличить угол срыва муфты. Достичь этого можно путем ее переноса вдоль кинематической цепи редуктора от выходного вала к входному с одновременным уменьшением числа полюсов. Это позволяет при сохранении механических характеристик передачи существенно снизить массу магнитной муфты. За счет этого удастся компенсировать увеличение массы деталей редуктора, которые стоят за муфтой и лишь частично защищены ею от высокочастотных динамических нагрузок на выходном валу.

Оптимизация параметров управления приводом СОСБ

В качестве критерия оптимизации примем минимум времени переходного процесса при разгоне привода до заданной скорости ω . Линеаризуя уравнения (10) вблизи точки устойчивого равновесия (k — четное), получаем выражение для скорости СБ в виде

$$\dot{\omega}' = \frac{A(s)}{B(s)} \omega,$$

где $A(s) = \mu; s = d/dt_b; B(s) = s^3 + \mu s^2 + (1+\lambda)s + \mu$.

При отсутствии обратной связи по моменту магнитной муфты $\lambda = 0$ характеристический многочлен передаточной функции $B(s) = (s+\mu)(s^2+1)$ имеет один действительный и пару чисто мнимых корней.

При $\lambda > 0$ представим характеристический многочлен $B(s)$ в виде

$$B_*(s) = (s+\mu)(s^2 + \lambda s/\mu + 1). \quad (13)$$

Сопоставив выражения для $B(s)$ и $B_*(s)$, получим, что $B(s) \approx B_*(s)$ при условии

$$\lambda \ll \mu^2. \quad (14)$$

Из выражения (13) следует, что оптимальный по времени переходный процесс имеет место при $\lambda = \sqrt{2} \mu$. Подставив это соотношение в неравенство (14), получим область оптимальных значений параметров λ , μ : $\lambda \gg 2$, $\mu = 0,707 \lambda$.

Вводя момент сопротивления вращению СБ M_c в правую часть второго уравнения системы (9), легко получить выражение для статической ошибки привода по скорости:

$$\frac{\Delta \beta'}{\omega} = \frac{\lambda}{\mu} \frac{M_c}{(0,5 p M J_{сб})^{1/2} \omega}.$$

Так как отношение μ к λ в оптимальной области фиксировано, то ошибка по скорости определяется конструктивными параметрами СОСБ и моментом сопротивления.

Выводы

1. Исследования кинематики двухстепенной системы ориентации показали, что угол поворота корневого привода может быть

ограничен, а боковые приводы должны иметь неограниченные углы поворота.

2. В зависимости от положения Солнца в орбитальной системе координат алгоритм управления приводами должен обеспечивать переключение боковых приводов из режима колебательного движения в режим кругового вращения и обратно.

3. Эффективному улучшению динамики привода с магнитной муфтой способствует введение в закон управления обратной связи по моменту. В качестве измерителя момента может использоваться датчик угла, измеряющий угол скручивания муфты.

4. Построена область оптимальных параметров управления.

Список литературы

1. Шереметьевский Н.Н., Стома С.А., Курилович В.П., Мирошник О.М. Высоконадежная система ориентации солнечных батарей для орбитальных станций "Салют" и "Мир" // Электротехника. 1996. № 5. С.11—19.
2. Ляпунов А.М. Общая задача об устойчивости движения. М.: Гостехиздат, 1950.

Бесконтактные электродвигатели постоянного тока в электронасосных агрегатах космических аппаратов

С.А.СТОМА, академик АЭН РФ, В.В.КУДРЯВЦЕВ, доктор техн.наук, В.Н.КУЗЬМИН, Е.М.МИХАЙЛОВ, инженеры

Рассматриваются проблемы создания и развития насосных электродвигателей и их влияние на эволюцию электронасосных агрегатов в целом.

С появлением в конце 50-х годов космических аппаратов (КА) возникла потребность в поддержании заданного температурного диапазона их отдельных приборов, а на обитаемых КА — всей их атмосферы.

Разработанные с этой целью системы терморегулирования (СТР) состоят, в основном, из теплообменников, трубопроводов, вентиляторов и электронасосных агрегатов (ЭНА).

Совокупность многочисленных задач, решаемых при разработке ЭНА для КА, состоит в оптимальном выборе гидравлической мощности ЭНА, типа насоса и электропривода для достижения:

- максимальных КПД и продолжительности непрерывной работы;
- минимизации массы и энергопотребления;
- возможности эксплуатации отдельных узлов ЭНА в вакууме и контакте с различными теплоносителями.

В качестве основного критерия при выборе типа насоса используется коэффициент его быстроходности

$$n_s = \frac{3,65n\sqrt{Q}}{H^{(0,75)}}, \quad (1)$$

где n — частота вращения рабочего органа насоса; Q и H — его расход и развиваемый им напор.

Насосы космических аппаратов имеют малые значения расхода ($Q \leq 300 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$) и напора ($H \leq 1,5 \text{ атм}$) при частоте вращения $n \leq 6000 \text{ об/мин}$, в связи с чем они относятся к так называемым малорасходным малооборотным насосам, имеющим $n_s \leq 60$. Это осложняет их разработку, так как накопленный опыт проектирования более крупных насосов с $n_s > 60$ и известными критериями подобия практически использован быть не может.

Стремление к минимизации массы СТР, а при создании первых КА — к радикальному снижению массы его трубопроводов, приводило к выбору минимально допустимого их диаметра. Это, при низких частотах вращения и неизменном расходе, ведет к увеличению напора ЭНА и определяет тенденцию

к выбору насоса объемного типа с $n_s < 40$.

Впервые подобные ЭНА были разработаны для охлаждения приборов спутника связи «Молния» в конце 50-х годов с использованием накопленного к тому времени опыта создания электрогидравлических рулевых машин управления вектором тяги маршевых двигателей ракет. Эти электронасосные агрегаты имели шестеренчатый насос, а в качестве электропривода использовался коллекторный электродвигатель (ЭД) постоянного тока мощностью 5 Вт и низкой частотой вращения 2500 об/мин с целью увеличения ресурса щеточно-коллекторного узла ЭД. Энергопотребление ЭНА оказалось неудовлетворительным и, как выяснилось позднее, не только из-за низкой скорости ЭД, но и в связи с тем, что для шестеренчатых насосов такой малой мощности оптимальная частота вращения составляет 600—800 об/мин.

В результате ЭНА состоял из шестеренчатого насоса, ЭД с магнитной муфтой, отделяющей щеточно-коллекторный узел от теплоносителя, и понижающего редуктора с 2500 до 800 об/мин (рис.1). При этом у насоса $n_s = 15$, а КПД $\leq 0,35$. Такая конструкция соответствовала уровню техники того времени, но недостатки ее очевидны:

- сложность изготовления шестеренчатого насоса с торцевыми зазорами до 0,04 мм;
- низкий ресурс из-за контактного износа шестерен и подшипниковых опор;
- ЭД с малыми КПД и ресурсом из-за наличия щеточно-коллекторного узла;
- наличие магнитной муфты и редуктора.

Таким образом, опыт создания первого ЭНА для СТР КА позволил определить тенденции их усовершенствования. В первую

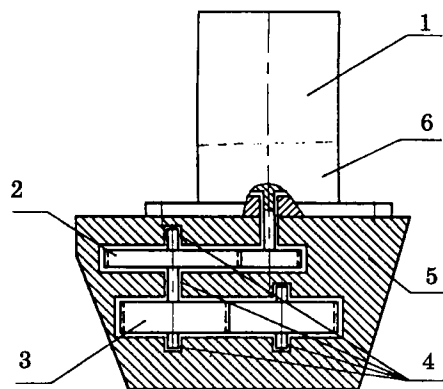


Рис. 1. Схема электронасосного агрегата шестеренчатого типа:

1 — электродвигатель (коллекторный); 2 — редуктор; 3 — насос; 4 — подшипники; 5 — корпус насоса; 6 — магнитная муфта

очередь — это использование в качестве электропривода насоса ЭД без щеточно-коллекторного узла, ограничивающего ресурс работы агрегата. Это, в свою очередь, позволяет повысить частоту вращения и коэффициент быстроходности n_s , перейти из области объемных насосов в область центробежных, повысить КПД, избавиться от редуктора.

Проблема заключалась в том, что ЭД переменного тока в качестве привода насоса практически непригодны из-за фиксированной частоты вращения и низкого пускового момента по сравнению с ЭД постоянного тока.

В 1960 г. в НПП ВНИИЭМ впервые в стране был разработан бесконтактный электродвигатель постоянного тока (БДПТ) с электронным блоком-коммутатором вместо щеточно-коллекторного узла. Датчик положения ротора с чувствительными элементами — датчиками Холла управлял работой коммутатора. Как теперь широко известно, это обращенная электрическая машина постоянного тока с постоянными магнитами на роторе и обмоткой на статоре, сохранившая практически все характеристики классического ЭД постоянного тока. Несмотря на недостатки, присущие первому поколению БДПТ, — низкие КПД и отношение мощности к массе (из-за сложности электронной схемы и низких свойств существовавших постоянных магнитов), все перечисленные проблемы были в принципе решены.

Введение в зазор между статором и ротором БДПТ тонкостенной разделительной гильзы позволило избавиться от магнитной муфты, так как отделение обмотки статора от теплоносителя и отсутствие на роторе щеточно-коллекторного узла и обмоток позволило эксплуатировать ротор с опорами в среде теплоносителя.

Увеличение частоты вращения колеса насоса представлялось наиболее перспективным с точки зрения повышения n_s и КПД ЭНА в целом. Однако дальнейшие исследования показали, что увеличение скорости более 6000 об/мин приводит к ухудшению энергетических показателей ЭНА из-за ощутимого возрастания гидравлических потерь как в насосе, так и в полости ротора ЭД. Одновременно снижался ресурс шарикоподшипников ЭД, работающих в теплоносителе.

В середине 60-х годов было создано второе поколение БДПТ мощностью до 15 Вт и частотой вращения от 3000 до 10000 об/мин для ЭНА и вентиляторов СТР. ЭД имели от-

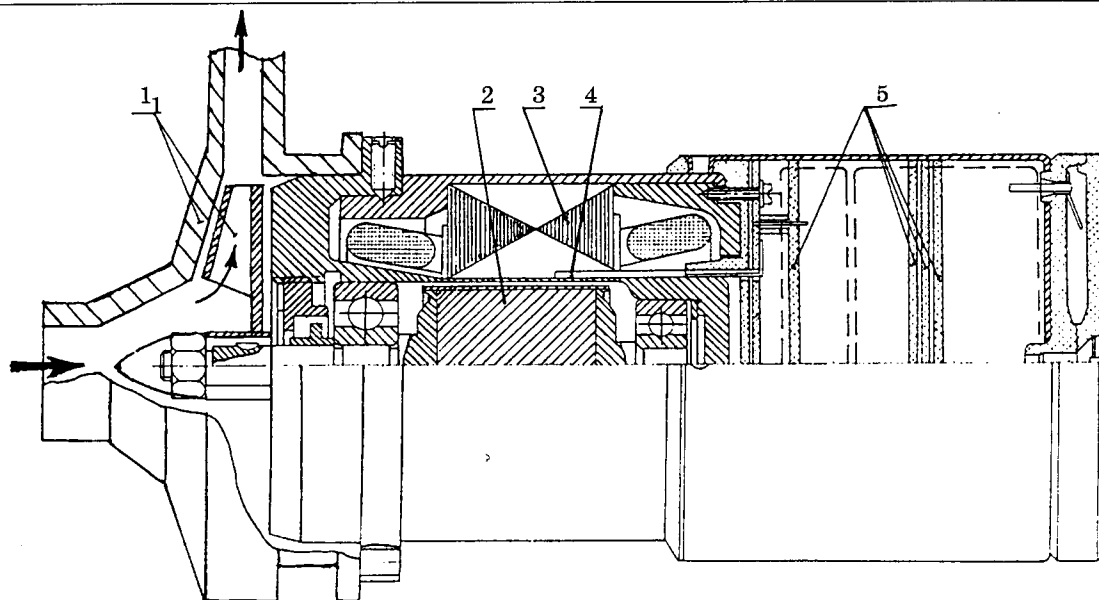


Рис.2. БДПТ мощностью до 100 Вт:

1 — насос; 2 — ротор; 3 — статор; 4 — разделительная гильза; 5 — коммутатор

дельный коммутатор и по сравнению с первыми БДПТ лучший КПД и выигрыш по габаритно-массовым показателям в 3 раза. Ресурс работы вентиляторов составлял до 30000 ч, а ресурс ЭНА — от 5000 до 12000 ч в зависимости от применяемого теплоносителя, n_s насосов составил 40—150, а КПД — 0,5.

Сочетание в ЭНА центробежного насоса с БДПТ позволило снизить массу агрегата в 2 раза по сравнению с объемными насосами, увеличить ресурс ЭНА на порядок, снизить трудоемкость изготовления, обеспечить лучшие энергетические показатели. Одновременно в РКК «Энергия» проводилось усовершенствование насосов с целью повышения их гидравлического КПД, разрабатывались двухступенчатые насосы для повышения напора при частоте вращения, как правило, не более 4000 об/мин. Отрабатывались вопросы устранения осевых сил, возникающих на колесе центробежного насоса и отрицательно влияющих на долговечность подшипников ЭД. Для различных КА был разработан ряд ЭНА центробежного типа, по которым создана база данных и методика расчета малорасходных малооборотных насосов.

В 70-х годах с появлением долговременных обитаемых космических станций возникла необходимость в дальнейшем повышении мощности ЭНА и их ресурса.

На базе появившихся новых магнитных и изоляционных материалов, датчиков Холла, специально разработанных шарикоподшипников к середине 70-годов было созда-

но третье поколение БДПТ мощностью до 100 Вт с конструктивно совмещенным коммутатором, при уменьшении его размеров в 1,5-2 раза по сравнению с предшествующими. Они обеспечили ресурс ЭНА до 30000 ч в зависимости от типа теплоносителя (рис.2).

Однако работа широкоподшипников ЭД в среде теплоносителей, обладающих низкими смазывающими свойствами, происходит по существу в режиме масляного голодания, в связи с чем добиваться дальнейшего увеличения их ресурса в таких условиях было бесперспективным. В течение многих лет вопрос решался применением холодного резерва, т.е. установкой на борту КА групп ЭНА, последовательно включавшихся по мере отказа предшествующих.

Проводились замены отработавших ЭНА новыми, доставленными с Земли грузовыми космическими аппаратами «Прогресс». В последние годы в связи с остротой проблемы, а также учетом возможности долговременных межпланетных полетов КА, НПП ВНИИЭМ разработало БДПТ на гидростатических опорах (ГСП) мощностью 90 Вт и частотой вращения 6000 об/мин.

При этом ЭНА формируется на ЭД двумя симметричными центробежными насосами, часть расхода (5-7%) каждого насоса используется для питания одной опоры ЭД с напором, развиваемым насосом. При остановке или запуске ЭНА опоры работают в гидродинамическом режиме. Ресурс такой опоры ограничивается, в принципе, числом

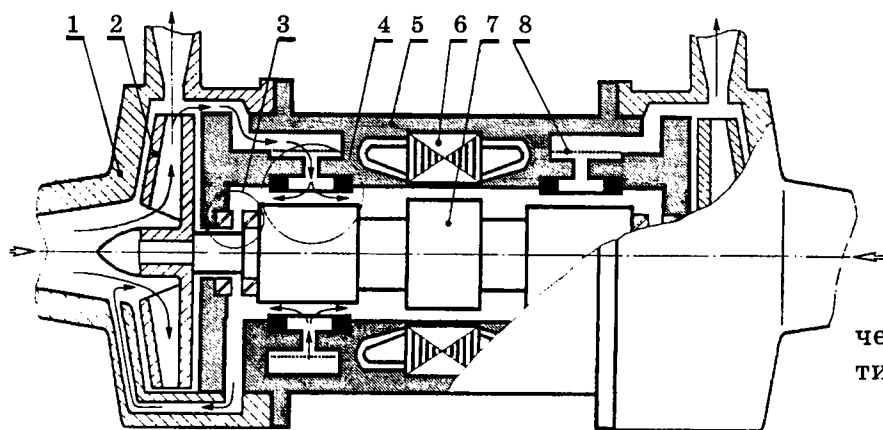


Рис.3. Электронасосный агрегат с бесконтактным электродвигателем на гидростатических опорах:

1 — корпус насоса; 2 — рабочее колесо насоса; 3 — осевая магнитная опора; 4 — радиальная гидростатическая опора; 5 — корпус электродвигателя; 6 — статор электродвигателя; 7 — ротор электродвигателя; 8 — фильтр

пусков ЭНА и чистой теплоносителя, для поддержания которой в СТР и самом ЭД имеются фильтры (рис.3). При соблюдении этих условий ресурс ЭНА составит по нашим оценкам более 100000 ч и его дальнейшее увеличение будет зависеть от работоспособности электрорадиоэлементов и изоляции. Электронасосные агрегаты с ЭД на гидростатических опорах в настоящее время прошли разносторонние испытания и устанавливаются в системы терморегулирования служебного модуля программы МКС.

Предусмотрено их использование в модулях научно-энергетической платформы и установочно-стыковочного модуля.

Подводя итоги многолетнего процесса создания и развития электронасосных агрегатов для систем терморегулирования косми-

ческих аппаратов, следует отметить:

- создание бесконтактных электродвигателей постоянного тока;
- развитие их мощности от 1—5 до 100 Вт при увеличении отношения мощности к массе с 2,0 до 40,0 Вт/кг и увеличении ресурса с 2000 до 100000 ч;
- увеличение коэффициента быстроходности насосов n_s (при равных соотношениях расхода и напора) с 15 до 100 и увеличение КПД насосов до 0,6.

Список литературы

1. Вевюрко И.А., Кузьмин В.Н., Михайлов Е.М., Стома С.А. Бесконтактные электродвигатели постоянного тока серии БК//Электротехника 1985. № 4.
2. Кузьмин В.Н., Михайлов Е.М., Стома С.А. РЗМ — магниты в специальных бесконтактных двигателях постоянного тока//Электротехника. 1989. № 11.
3. Кузьмин В.Н., Михайлова Е.М., Стома С.А. Электронасосные агрегаты космических аппаратов с гидроопорами ротора//Электротехника. 1996. № 5.

Лазерная интерферометрическая система для измерений перемещений

Ю.Е.МЕДВЕДЕВ, С.В.МЕДУШЕВ, В.Е.РЕМИЗОВ, инженеры, В.В.ШИЧКОВ, канд.техн.наук

Использование методов лазерной интерферометрии в технических средствах контроля перемещений создает новые широкие возможности для повышения точности выполнения технологических операций и производительности производственного процесса в машиностроении. В настоящее время лазерные измерительные системы (ЛИС) являются наиболее точными, производительными и находящимися на уровне образцовых средств измерений, они становятся доступными и с высокой степенью эффективности все чаще применяются в контрольных измерительных системах при изготовлении, испытаниях и аттестации машин, станков и измерительного оборудования.

Применение ЛИС способствует осуществлению «ключевых технологий» приборного и машиностроительного производств, обеспечивает высокоточные измерения перемещений объекта контроля с погрешностью до сотых и тысячных долей микрометра. Лазерный интерферометр, являющийся основой ЛИС, обеспечивает быструю и надежную аттестацию продукции по критериям размерного и параметрического контроля, поскольку сам является вторичным эталоном длины.

НПП ВНИИЭМ в процессе разработки прецизионного оптико-электромеханического двухкоординатного развертывающего устройства [1] бортовых телевизионных комплексов космических аппаратов для метеоро-

логии и исследования природных ресурсов Земли приобрел опыт проектирования и изготовления лазерных интерферометрических измерителей перемещений прецизионных исполнительных устройств. В настоящей статье приведены основные результаты выполняемых НПП ВНИИЭМ в содружестве с НПП «МультиФАКС» работ по созданию на базе интерферометрического измерителя перемещений специального назначения [2] многофункциональной ЛИС — универсального прибора для высокоточного контроля как угловых, так и линейных перемещений объектов контроля бесконтактным оптическим методом.

При проведении разработки был учтен современный уровень аналогичных систем, предлагаемых как отечественными, так и зарубежными разработчиками, например, модели измерителя ИПЛ-МП Новосибирского приборостроительного завода, приборов фирм «Хьюлетт-Паккард» (США) и «Ренишау» (Великобритания). Общие принципы построения и анализ работы ЛИП достаточно подробно изложены в [3,4]. Поэтому отметим лишь характерные особенности схемотехнических и конструктивных решений, отличающих рассматриваемый прибор, его архитектуру, основные характеристики и примеры его практического применения.

Разработка является многофункциональной измерительной системой, управляемой от внешнего IBM-совместимого персонального компьютера (ПК) с автоматизированной обработкой, коррекцией и регистрацией результатов измерений в реальном масштабе времени и содержащей один, два или три независимых лазерных измерителя перемещений (ЛИП), и позволяет производить прецизионный контроль следующих параметров перемещений объектов независимо и одновременно по одной, двум и трем координатам:

- линейные или угловые перемещения;
- неплоскостности (непрямолинейности) перемещений;
- относительные перемещения двух независимых объектов;
- деформации объектов при внешних воздействиях.

При одновременных измерениях нескольких (двух или трех) перечисленных параметров перемещений объектов используются соответственно два или три автономных ЛИП и один общий ПК. Для каждого ЛИП предусмотрена коррекция, учитывающая изменение длины волны излучения лазера и связанных с ней значений дискретов изме-

рения линейного и углового перемещений при изменении внешних условий (температуры, давления и влажности воздуха).

С учетом достоинств и недостатков известных схем нами была выбрана схема дифференциального ЛИП с использованием одночастотного высокостабильного He-Ne лазера и низкочастотной фазовой модуляции [5] светового потока в референтном плече интерферометра. Эта схема позволяет существенно уменьшить дополнительные погрешности, обусловленные так называемым дрейфом нуля, зависящим от тепловых деформаций элементов опорного плеча. Фазовая модуляция позволяет исключить низкочастотные шумы и влияние интерференционного фона, а также повысить работоспособность ЛИП при значительных колебаниях уровней оптических сигналов [5]. Для обеспечения временной (температурной) стабильности измерений в оптической схеме применены светоделительные устройства, создающие равенство оптических путей в рефракционных элементах в измерительном и референтном плечах интерферометров, а низкочастотная модуляция осуществляется колебаниями малогабаритного оптического клина, закрепленного на упругом подвесе с молекулярным трением.

В состав ЛИП входят:

- оптический блок с комплектом бипризм и призмённых отражателей;
- электронный блок;
- комплект соединительных жгутов.

Для обеспечения работы прибора необходим IBM-совместимый персональный компьютер с процессором не ниже 80286, имеющий в своем составе интерфейсную плату ввода-вывода стандарта IEEE-488. При одновременном использовании двух и трех ЛИП один из них является базовым, подключаемым к компьютеру, и должен быть укомплектован полным набором плат электронного блока. В остальных ЛИП интерфейсные платы не устанавливаются, а их электронные блоки подключаются соединительными жгутами к электронному блоку базового ЛИП.

Оптическая схема ЛИП изображена на рис.1, где 1 — He-Ne одночастотный лазер; 2 — коллиматор; 3 — светоделительная пластина; 4 — светоделитель призмённый; 5 — светоделитель призмённый (ромбический); 6 — ретроотражатель (трипельпризма) опорный; 7 — ретроотражатель (трипельпризма) линейный; 8 и 8' — ретроотражатели угловые (с двумя трипельпризмами); 9 и 10 — клиновые пластинки, образующие вместе

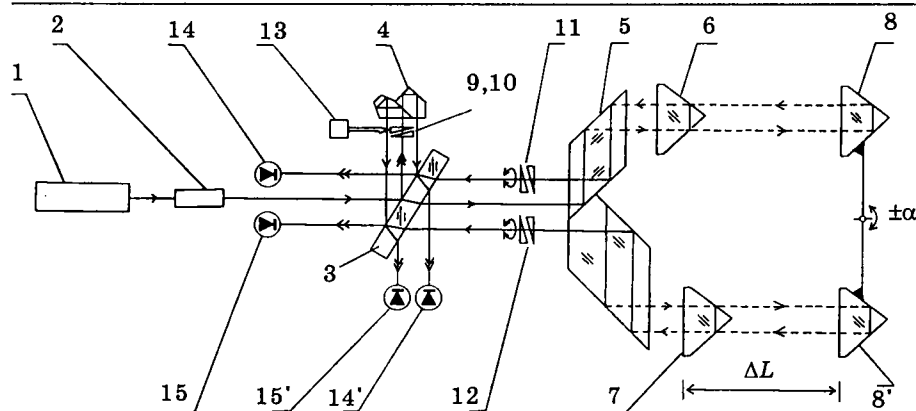


Рис.1. Оптическая схема лазерного измерителя перемещений (ЛИП)

плоскопараллельную пластину; 11 и 12 — пары юстировочных клиновых пластинок; 13 — электромеханический вибратор; 14 и 14', 15 и 15' — фотоприемники (кремниевые фотодиоды).

При измерениях линейных перемещений элементы 3—6, 9—11 совместно с фотоприемниками 14 и 14' образуют референсный интерферометр, а, соответственно, элементы 3—5, 7, 9, 10, 12 совместно с фотоприемниками 15 и 15' — измерительный интерферометр.

В опорных плечах обоих интерферометров используется общий модулирующий элемент — клиновидная пластинка 10, приводимая в колебательное движение вибратором 13.

При измерениях угловых перемещений вместо отражательных призм 6 и 7 используется двойной ретроотражатель с призмами 8 и 8'.

Светоделительная пластина 3 имеет специальное светоделительное покрытие, которое обеспечивает сдвиг фаз между сигналами фотоприемников 14 и 14', соответственно, 15 и 15' на угол $90 \pm 10^\circ$, что позволяет получить информацию о направлении движения объекта и организовать дискретизацию периода интерференционной картины.

В электронном блоке осуществляются преобразование сигналов фотоприемников и выделение содержащейся в них первичной информации о текущем перемещении объекта контроля. Для повышения чувствительности прибора в электронном блоке производится линейная интерполяция периода интерференционной картины. В электронном блоке осуществляются также формирование и передача массива данных через канал общего пользования интерфейса в ПК для дальнейшей обработки, преобразований и визуализации.

Типовые схемы измерений с использованием одного ЛИП показаны на рис.2, где

1 — оптический блок, включающий одночастотный He-Ne лазер, референсный и измерительный интерферометры, фотопреобразователи интерференционных сигналов; 2 — ретроотражатель (трипельпризма) одинарный; 2' — ретроотражатель опорный (неподвижный); 3 — ретроотражатель двойной с двумя трипельпризмами; 4 — клиновидная бипризма (неподвижная); 5 — клиновидная бипризма; 6 — призматический отражатель; 7 — отражатель зеркальный; 8, 8' — контролируемые объекты; 9 — направляющие, по которым переме-

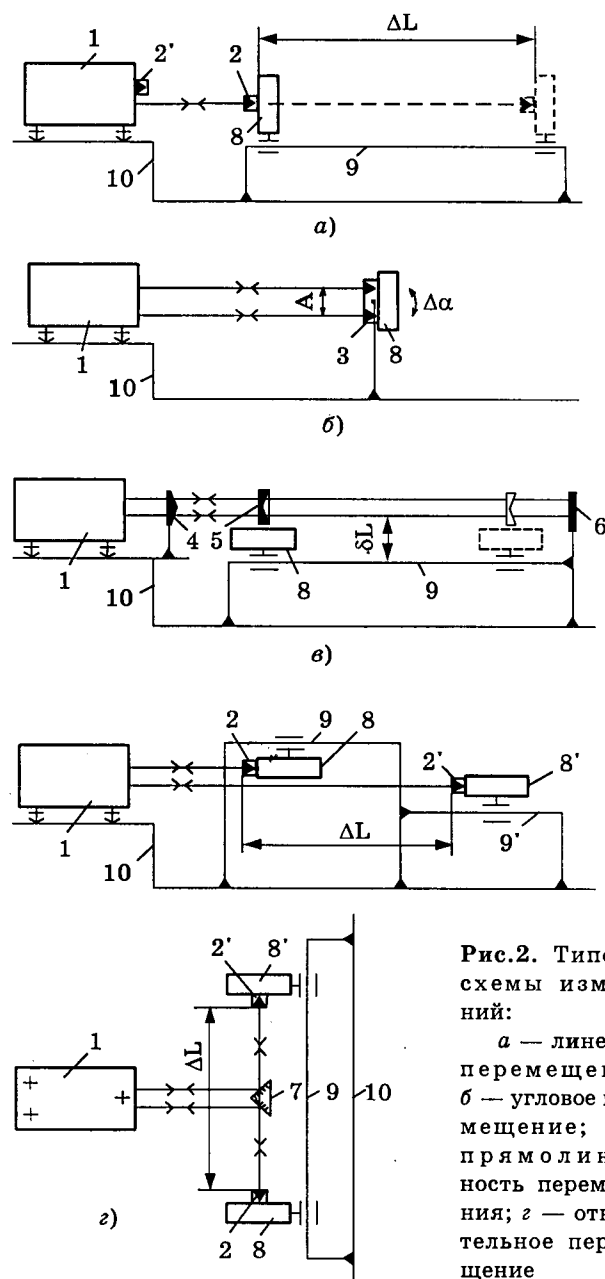


Рис.2. Типовые схемы измерений:

а — линейное перемещение; б — угловое перемещение; в — прямолинейность перемещения; г — относительное перемещение

щаются контролируемые объекты; 10 — основание. При этом элементы 2, 3, 5 жестко закрепляются на контролируемом объекте, а блок 1 устанавливается на основании 10 на регулируемых опорах.

При измерениях линейных перемещений ΔL измерительная характеристика определяется линейным уравнением:

$$\Delta L = \frac{\lambda}{64n_b} N_c, \quad (1)$$

где N_c — количество дискретов, соответствующих перемещению объекта на расстояние ΔL ; $\lambda = (0,632991857 \pm 2 \cdot 10^{-8})$ мкм — длина волны излучения лазера в вакууме; n_b — показатель преломления воздуха,

$$n_b = 1 + 10^{-8} \left(\frac{38,39p}{1 + 0,003671T} - 5,61e \right);$$

p — давление, мм рт.ст; T — температура, °C; e — влажность (парциальное давление водяных паров), мм рт.ст.

Значение n_b автоматически определяется при вводе в ПК текущих значений p , T , e .

При измерениях угловых $\Delta \alpha$ перемещений измерительная характеристика определяется следующим уравнением:

$$\Delta \alpha = \arcsin \frac{\alpha}{64n_b A} N_c, \quad (2)$$

где $A = 80$ мм — расстояние (база) между вершинами трипелъпризм отражателя, закрепляемого на контролируемом объекте в первоначальном положении, при котором направление выходных лазерных пучков перпендикулярно базе отражателя (линии, соединяющей вершины трипелъпризм).

Для нормальных внешних условий ($T = 20^\circ\text{C}$, $p = 760$ мм рт.ст., $e = 10$ мм рт.ст.) расчетные значения разрешения (чувствительности) ЛИП при минимальных измерительных дискретах ($N_c = 1$) равны: $\Delta L_d = 9,88781 \cdot 10^{-3}$ мкм $\approx 0,01$ мкм — при ли-

Основные технические характеристики ЛИП-1М

Параметр	Вид контролируемых перемещений	
	Линейные	Угловые
Диапазон контролируемых перемещений	0—30 м	$\pm 12^\circ$
Дискретность отсчета	0,01 мкм	0,025"
Погрешность измерения	$(\pm 1,0 \times L)$ мкм (L — перемещение, м)	$(\pm 0,3 \times \varphi)''$ (φ — угол поворота объекта, град)
Максимальная скорость перемещения объекта	50 мм/с	20 °/с
Диапазон рабочих температур, °C	10—40	
Габариты: оптико-механического блока, мм	105×205×430	
электронного блока, мм	200×280×380	
блока ретроотражателей, мм	50×50×35	50×130×35

нейных измерениях; $\Delta \alpha_d = (2,54931 \cdot 10^{-2})'' \approx 0,025''$ — при угловых измерениях.

При измерениях неплоскостности (прямолинейности) перемещения (рис.1,в) измеряется смещение контролируемого объекта в направлении, перпендикулярном направлению его перемещения, с помощью бипризмы 5, закрепленной на объекте 8. В этом случае измерительная характеристика задается линейным уравнением:

$$\delta_L = \frac{\lambda}{128 n_b n_k \operatorname{tg} \delta_k} N_c, \quad (3)$$

где n_k — показатель преломления клиньев бипризмы на длине волны излучения лазера; δ_k — угол при вершинах клиньев бипризмы.

Параметры клиньев бипризмы выбраны такими, чтобы значение дискрета $\Delta \delta_L$ было равно 0,01 мкм для $\Delta L = 200$ мм, 0,1 мкм — для $\Delta L = 2000$ мм и 1 мкм — для $\Delta L = 20000$ мм.

Программное обеспечение измерителя, разработанное сотрудниками НПП «МультиФАКС» А.Тынком и В.Щербаковым, обеспечивает автоматизацию процесса измерений в соответствии с уравнениями (1)—(3), индикацию на экране монитора процессов измерений в реальном масштабе времени, их запись и хранение. Сервисные возможности позволяют проводить детальные исследования записанных процессов (изменение мас-

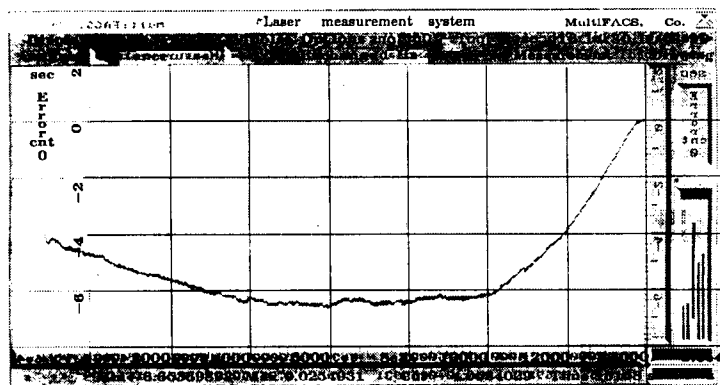


Рис.3. Измерение угловых перемещений объекта контроля

штабов координатных осей, выделение фрагмента зафиксированного процесса). Программное обеспечение дает возможность также измерять скорости и ускорения (путем дифференцирования соответствующих функций) и проводить спектральный анализ колебаний (вибраций) контролируемого объекта. Оно позволяет в любой момент времени провести тестирование (калибровку) и диагностику работы измерителей и обеспечить совместную работу двух и трех измерителей, а также коррекцию значений дискретности отсчета для соответствующих внешних условий.

На рис.3 приведен пример измерения угловых колебаний исследуемого изделия, выполненного с помощью лазерного измерителя перемещений модели ЛИП-1М по схеме рис.2,б.

В таблице даны основные технические характеристики ЛИП-1М.

Список литературы

1. Вевюрко И.А., Медушев С.В., Ремизов В.Е., Стома С.А. Прецизионный электропривод с интерферометрическим измерителем перемещений и цифровым программным управлением//Тр. ВНИИЭМ. Т.78 Прецизионные электромеханические устройства. 1985. С.5—33.
2. Вевюрко И.А., Ракитянский И.В., Ремизов В.Е., Шичков В.В. Интерферометрический измеритель угловых перемещений//Тр. ВНИИЭМ Т.78. Прецизионные электромеханические устройства. 1985. С.41—50.
3. Коронкевич В.П. и др. Лазерная интерферометрия. Новосибирск: Наука, 1982.
4. Коронкевич В.П., Ханов В.А. Современные лазерные интерферометры. Новосибирск: Наука, 1985.
5. Ханов В.А. Дифференциальный лазерный интерферометр//Автометрия. 1989. № 5. С.92—96.

Электрореактивные двигатели как исполнительные органы систем управления движением космических аппаратов

В.П.ХОДНЕНКО

К электромеханическим исполнительным органам систем управления космических аппаратов (КА) могут быть отнесены электрореактивные двигатели (ЭРД), в которых механическая сила или тяга создается за счет использования электрических сил.

Идея применения электрических сил для ускорения рабочего вещества в двигателе и создания тяги была высказана впервые К.Э.Циолковским в 1911 г.

Первые модели ЭРД были созданы и испытаны в 1929-1933 гг. в Советском Союзе в Газодинамической лаборатории (г.Ленинград) пионером отечественного реактивного двигателестроения академиком В.П.Глушко.

В ЭРД могут использоваться три механизма ускорения: тепловой, электростатический и электромагнитный.

В *тепловых* ЭРД электроэнергия служит лишь для подогрева рабочего вещества, а его ускорение осуществляется за счет перепада газодинамического давления, как в обычных ракетных двигателях.

Работа *электростатических* двигателей сводится к ускорению положительно заряженных ионов электрическим полем.

В *электромагнитных* (плазменных) двигателях для ускорения рабочего вещества в состоянии плазмы используются электромагнитные поля.

В настоящее время достаточно четко оп-

ределились и области решаемых с помощью ЭРД задач, которые в общем виде сводятся к следующим:

1. Коррекция орбиты КА, в частности, компенсация аэродинамического сопротивления верхних слоев атмосферы.
2. Стабилизация положения КА на орбите, включая управление ориентацией и коррекцию по удержанию его в заданной орбитальной точке.
3. Перевод КА с одной орбиты на другую, например, для вывода КА с промежуточной на геостационарную орбиту.
4. Межпланетные перелеты.

Тенденция увеличения срока активного существования (САС) КА, повышения их энерговооруженности, существенного усложнения полетных программ, включающих в себя все большее число различных орбитальных маневров, требует использования для управления КА электрореактивных двигателей, позволяющих обеспечивать большие суммарные (полные) импульсы тяги при минимальной массе рабочего тела.

При этом во внимание принимаются также перспективы улучшения функциональных возможностей и высокий уровень отработанности ЭРД.

Последние, имея сравнительно невысокую ($0,02—0,2$) H и достаточно стабильную тягу (не больше 10%), позволяют проводить пре-

цизионную коррекцию параметров орбиты и создавать управляющие моменты в системах ориентации (СО) КА.

В частности, для геостационарных КА целесообразность создания управляющих моментов с помощью ЭРД объясняется тем, что эффективность применения магнитных полей в исполнительных органах СО сильно снижается с увеличением высоты полета КА.

ЭРД более эффективно, чем магнитные системы, можно использовать для сброса кинетического момента (разгрузка двигателей-маховиков и гиросtabilизаторов) при $\bar{r} = 2,5 \div 5,5$ ($\bar{r}$ — радиус орбиты, отнесенный к радиусу Земли) при уровне управляющих моментов $0,05\text{—}10\text{ мН}\cdot\text{м}$.

На рис.1 представлены области рационального применения систем управления КА в зависимости от тяги F и суммарного импульса I_Σ при использовании различных типов ЭРД.

Выбор типа ЭРД для систем управления КА требует учета многих факторов, определяемых задачами, сроком активного существования и реальными массоэнергетическими возможностями КА и его конструктивно-компоновочными характеристиками.

Остановимся более подробно на применении ЭРД в системах управления КА геофизического наблюдения (КА ГФН). В системах управления КА ГФН электрореактивные двигатели выполняют следующие задачи:

- начальная коррекция орбиты;
- поддержание (стабилизация) параметров орбиты;
- наведение трассы полета на исследуемый район и ее удержание;
- перевод КА по орбите, например, геостационарного КА на другую долготу или изменение фазовой расстановки аппаратов, входящих в систему;

$I_\Sigma \cdot 10^5, \text{Н}\cdot\text{с}$

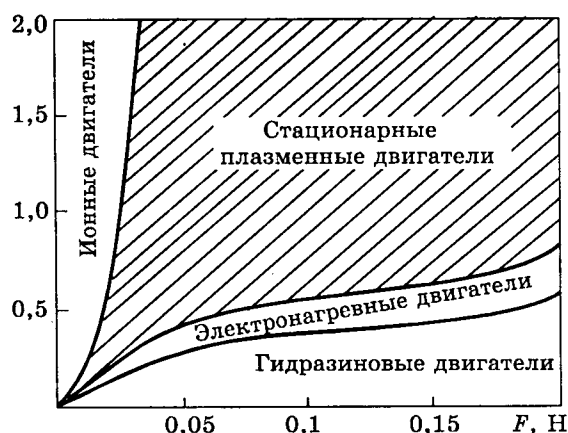


Рис.1. Области рационального применения различных типов ЭРД

— создание управляющих моментов.

Для обеспечения повышенных требований по точности выполнения орбитальных маневров КА «Ресурс-0» (космической подсистемы исследования природных ресурсов Земли) ЭРД должны обеспечивать получение:

- высокой стабильности тяги;
- минимального значения единичного импульса тяги;
- минимального импульса последствий.

Для КА «Ресурс-0» снижение неустойчивости тяги с 25 до 10% позволяет уменьшить суммарное время проведения начальной коррекции в 1,2—1,35 раз.

При этом количество сеансов радиоконтроля орбиты (РКО) и их продолжительность уменьшаются в 1,4—1,5 раз.

Для того, чтобы периодичность проведения коррекций поддержания была приемлемой (от 22 до 25 суток), неустойчивость тяги должна быть не более 5% (при среднем уровне солнечной активности $150 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{Гц})$).

Кроме того, анализ возможности обеспечения точностных характеристик ориентации и стабилизации высокоорбитальных КА ГФН показал, что максимальная угловая скорость вращения КА вокруг центра масс в момент разгрузки двигателей-маховиков $\text{тах}(t)$ пропорциональна значению тяги двигателя и сумме $K_F + K_y$, где $K_F = \delta F/F$ — коэффициент неустойчивости тяги двигателя разгрузки, а K_y — точность знания момента инерции маховика. Например, для геостационарного гидрометеорологического КА ГФН «Электро-1» сохранение точности уг-

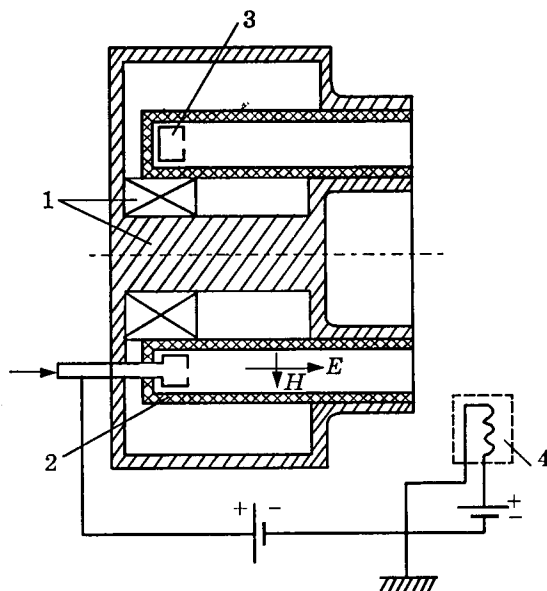


Рис.2. Принципиальная схема СПД

ловой стабилизации (0,001%) обеспечивает при ограничении тяги значением 0,05—0,07Н и $K_F \leq 10\%$.

Динамические характеристики ЭРД, в первую очередь время запуска и импульс последствия, определяются требованиями повышения оперативности и применительно к КА ГФН должны составлять не более 1с и 0,3 — 1 Н·с соответственно.

Реальное применение в системах коррекции и ориентации КА ГФН («Метеор-Природа», «Ресурс-0», «Электро-1») нашли наиболее отработанные в космических условиях электронагревные двигатели (ЭНД), относящиеся к тепловым ЭРД, и стационарные плазменные двигатели (СПД), входящие в класс электромагнитных [1].

В ЭНД рабочее тело — аммиак нагревается за счет «омических» потерь при пропускании тока через специальный нагреватель. Удельный импульс данного типа ЭРД составляет 2300-2700 Н·с/кг.

СПД на ксеноне впервые были испытаны на ИСЗ «Метеор» в 1972 г. [2].

Принципиальная схема СПД приведена на рис.2. Основными элементами двигателя являются: коаксиальная магнитная система 1 с катушками намагничивания; кольцевая диэлектрическая камера 2, расположенная между полюсами магнитной системы; анод 3, являющийся одновременно газораспределителем; катод — нейтрализатор 4, расположенный вблизи среза канала. Направление магнитного поля H и электрического E показаны стрелками. В скрещенных $E \times H$ полях горит разряд, в котором происходит ионизация рабочего тела — ксенона. В дальнейшем ионы ксенона ускоряются электростатическим полем, как в ионных двигателях, приобретая направленную энергию порядка eU_p (U_p — разность потенциалов между катодом и анодом). Однако на протяжении всего канала положительный объемный заряд ионов скомпенсирован электронами, дрейфующими по азимуту в магнитном поле, что позволяет ускорять ионы в нейтральной плазме.

В связи с этим СПД может работать при существенно более высоких плотностях тока, чем ионные двигатели. Кроме того, геометрические размеры СПД могут быть уменьшены, что ведет к увеличению отношения мощности в струе к массе двигателя. На выходе из двигателя с помощью катода-компенсатора происходит нейтрализация ионного пучка.

СПД обладает удельным импульсом (1,2—2,0)·10⁴ Н·с/кг и выше. Кроме высокого удельного импульса СПД имеют высокий тяговый КПД $\eta_t \geq 50\%$ при относительно низком уровне разрядного напряжения $U_p = 150 \div 300$ В и малых магнитных полях $H_p = (1,2 \div 1,6) \cdot 10^3$ А/м. СПД допускает управление значением и направлением тяги, а применение ксенона делает его экологически чистым и дает возможность использования простой и надежной системы подачи.

Кроме того, благодаря работе СПД на низкотемпературной плазме при сравнительно невысоких ускоряющих напряжениях (сотни вольт) могут быть обеспечены высокая надежность его работы и большой ресурс (более 7000 ч). СПД, как показывает анализ, целесообразно использовать в прецизионных системах ориентации высокоорбитальных КА ($R_{orb} \geq 15 \cdot 10^3$ км) для создания стабильных по значению (не хуже 5—10%) управляющих моментов на уровне (1,5—3)·10⁻² Н·м [3].

СПД хорошо дополняют двигатели-маховики и гироскопические системы при использовании их для сброса кинетического момента благодаря сравнительно низкому значению (не более 0,05 Н) и высокой стабильности (3—5%) тяги.

СПД является широкодиапазонным и легкоуправляемым двигателем, позволяющим даже в одном типоразмере обеспечить значения тяги и удельного импульса в довольно широких пределах простым изменением электрических параметров и расхода рабочего тела.

Недостатком СПД по отношению к ЭНД является более высокая энергетическая цена тяги (отношение мощности, потребляемой двигателем, к тяге).

Цена тяги для современных СПД составляет 12—15 Вт/(м·Н), для ЭНД соответственно 2,5—4 Вт/(м·Н).

Кроме сравнительно низкого значения энергопотребления преимуществом ЭНД является также возможность работы от источника тока без преобразователя напряжения, простота и малый вес конструкции, изученность рабочего процесса. Однако относительно низкий удельный импульс ЭНД, вызванный принципиальными и технологическими ограничениями по температуре рабочего тела и длительной стойкости конструкционных материалов, не позволяют надеяться на сколько-нибудь значительный прогресс ЭНД в будущем. Основные харак-

теристика рассматриваемых типов ЭРД сведена в таблицу.

Основные параметры	ЭНД на аммиаке	СПД на ксеноне
Тяга, Н	0,05—0,3	0,03—1
Нестабильность тяги	До 10%	До 5%
Удельный импульс, Н·с/кг	$(2,3—2,8) \cdot 10^3$	$(1,2—2) \cdot 10^4$
Цена тяги, Вт/(м·Н)	2,5—4	12—15
Число включений	10^3	10^4
Время выхода на режим, с	1	0,01—0,1
Импульс последствий, Н·с	0,03—0,05*	$(1—3) \cdot 10^{-3**}$

* — для двигателя тягой 0,15—0,2 Н

** — для двигателя тягой 0,02—0,04 Н

На основании достигнутых характеристик двигателя и реальной возможности их улучшения СПД может рассматриваться как один из наиболее перспективных типов ЭРД для применения в системах управления движением КА.

Кроме того, степень отработанности СПД в составе КА также является фактором, определяющим перспективность их применения (СПД работают в космосе с 1972 г.).

Дальнейшее совершенствование СПД как исполнительных органов систем коррекции и ориентации КА, в частности КА ГФН, требует решения следующих задач: увеличения ресурса до $8 \cdot 10^3$ ч и выше, снижения цены тяги до 10—12 кВт/Н, повышения удельного импульса до $2,5 \cdot 10^4$ Н·с/кг и выше, увеличения числа включений до 10^5 .

Список литературы

1. Trifonov Yu.V., Rylov Yu.P., Khodnenko V.P. et al. VNIIEМ activity in the of EPE.24th International Electric Propulsion Conference. Moscow (Russian), 1995.
2. Андронов И.М., Морозов А.И., Трифонов Ю.В. и др. Разработка стационарного плазменного двигателя (СПД) и его испытание на ИСЗ «Метеор» // Космические исследования. 1974. 12, № 3.
3. Khodnenko V.P. Electric propulsion systems for spacecraft application and the methods of improving their effectiveness // Proc. Second Spacecraft Propulsion Conference. 1997. P.321—325.

ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ АТОМНЫХ СТАНЦИЙ

Системы управления, защиты и автоматизированного контроля ядерных энергетических реакторов АЭС

Г.А.ЖЕМЧУГОВ, И.И.ДЕСЯТНИКОВ, Ю.Н.ОЛЬШЕВСКИЙ

Электромеханика, как прикладная наука, в силу своей универсальности объективно стала неразрывной частью многих современных отраслей науки.

НПП ВНИИЭМ, создавая электромеханические изделия и комплексные системы для различных направлений техники (космическое, судостроение, атомная энергетика и др.), одновременно проводил политику эффективного распространения научно-технических достижений, возникающих в одном направлении электромеханики, на другие.

Такая научно-техническая политика превратила НПП ВНИИЭМ в многопрофильный научно-технический центр электромеханики.

В конце 50-х годов в институте начало формироваться направление электромеханики для зарождающейся и начавшей бурно развиваться отечественной атомной энергетике.

Начиная с 60-х годов и до настоящего времени НПП ВНИИЭМ является лидером в создании комплексов электрооборудования и информационно-вычислительных систем для реакторов АЭС нескольких поколений.

Первые три отечественных промышленных реактора были введены в эксплуатацию на Ново-Воронежской АЭС в 1964—1971 гг. На последнем из этих энергоблоков был установлен энергетический реактор ВВЭР-440. Всего в СССР было построено десять энергоблоков мощностью 440 МВт с этими реакторами.

С 70-х годов началось строительство АЭС с реакторами ВВЭР-440 в ГДР, Чехословакии, Болгарии, Венгрии, Финляндии.

Все энергоблоки были укомплектованы комплексами электрооборудования систем управления и защиты (КЭ СУЗ) атомных

энергетических реакторов, которые разработали и изготовили во ВНИИЭМ, а в дальнейшем они изготавливались по документации института, переданной на один из заводов Ленинградского объединения "Электросила", а также на чешское предприятие "Шкода".

КЭ СУЗ состоит из нескольких систем, осуществляющих:

- функции управления движением регулирующих органов (РО) реактора;
- надежного бесперебойного питания силовых устройств и другой аппаратуры;
- исполнительную часть аварийных защит реактора;
- автоматическое регулирование мощности турбины;
- разгрузку и ограничение мощности реактора.

В реакторах ВВЭР-440 система группового и индивидуального управления РО (СГИУ) была выполнена на основе электро-механических приводов в составе реактивного тихоходного двигателя (с частотой вращения ~ 1 об/мин) и инвертора напряжения, питающегося от автономной системы силового питания. Система управления позволяет осуществлять индивидуальное и групповое управление РО как в режиме ручного, так и автоматического управления. Система построена по мажоритарному принципу, исключающему несанкционированное движение РО.

Исполнительная часть аварийной защиты также построена по принципу "два из трех" с размещением в разных помещениях двух дублирующих друг друга источников надежного питания.

Алгоритм автоматического регулирования мощности построен на принципе поддержания постоянным давления пара во втором контуре с обратной отрицательной связью по нейтронному потоку в реакторе. Это практически реализуется регулированием положения стержней реактора посредством их группового перемещения.

Автоматический регулятор мощности, воздействует на органы регулирования реактора, реализует любую из трех программ регулирования:

- стабилизация нейтронного потока реактора;
- поддержание давления пара во втором контуре;
- "стерегущий режим", обеспечивающий только разгрузку реактора при повышении давления сверх допустимого значения.

Конструктивно КЭ СУЗ выполнен в виде отдельных шкафов, функционально сгруппированных по отдельным подсистемам с требуемым уровнем дублирования или троирования.

Главным требованием, предъявляемым к КЭ СУЗ, является четкое исполнение функций управления и защиты с очень высоким уровнем надежности для обеспечения всевозрастающих требований по ядерной безопасности функционирующих энергетических реакторов.

Одним из важнейших условий повышения надежности и ресурса КЭ СУЗ является применение комплектующей электротехнической и электронной элементной базы повышенной надежности.

Первое поколение электрооборудования СУЗ строилось на транзисторной логике "Т", которая обеспечила ресурс работы до 10 лет.

Следующее поколение ЭО СУЗ (конец 70-х — начало 80-х годов) модернизировалось на базе микроэлектроники в схемах с "жесткой" логикой.

При создании третьего поколения ЭО СУЗ (начало 90-х годов) разработчики и конструкторы НПП ВНИИЭМ используют принципы блочно-модульного построения конструктивов с применением в схемах управления (наряду с "жесткой" логикой) программно-технических средств.

Модернизированный КЭ СУЗ для реактора ВВЭР-440 введен в эксплуатацию на первом энергоблоке АЭС "Моховце" в Словацкой республике в 1998 г. На этом блоке внедрены преобразователи низкой частоты на IGBT транзисторных сборках с микропроцессорным управлением, существенно повышающим качество управления (рис.1).

Развитие атомной энергетики в направлении повышения единичной мощности энергетического реактора потребовало раз-

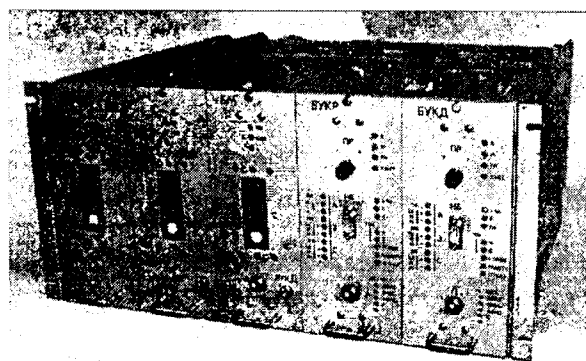


Рис.1. Преобразователь низкой частоты индивидуальный ННЧИ-3

работки в конце 70-х годов КЭ СУЗ для реакторов ВВЭР-1000 (мощностью 1000 МВт).

Первый энергоблок с атомным реактором ВВЭР-1000 был пущен в 1980 г. на Нововоронежской АЭС, а затем до 1993 г. были введены в строй еще 17 энергоблоков на АЭС бывшего СССР (в том числе 22 на Украине), а также 2 энергоблока в Болгарии.

Для этих энергоблоков в НПП ВНИИЭМ был разработан КЭ СУЗ. Изготовление этого оборудования, начатое во ВНИИЭМ, также в 80-х годах было передано вместе с технической документацией на предприятия России, Чехословакии, Украины.

В СУЗ для реакторов ВВЭР-1000 были, в основном, сохранены функциональные и структурные особенности построения СУЗ реакторов ВВЭР-440. Одно из существенных отличий СУЗ ВВЭР-1000 заключалось в применении в СГИУ для привода РО реактора шагового электромагнитного двигателя и соответствующего электронного регулятора.

В настоящее время на энергоблоках ВВЭР-1000 АЭС России поэтапно вводятся в эксплуатацию отдельные подсистемы модернизированного КЭ СУЗ в блочно-модульном исполнении с управлением на основе сочетания схем, построенных на дискретных электронных компонентах и программно-технических средствах.

При модернизации систем управления и защиты энергетических реакторов основная задача, стоящая перед конструкторами, заключается в полном удовлетворении требований обеспечения ядерной безопасности (ЯБ). Поэтому ввод в эксплуатацию на АЭС вновь созданного оборудования сопряжен с необходимостью подтверждения выполнения требований ЯБ.

В НПП ВНИИЭМ модернизация оборудования СУЗ базируется на двух основополагающих принципах:

- функциональной и структурной референтности с оборудованием, находящимся в эксплуатации;

- опытной эксплуатации модернизируемого оборудования на действующих энергоблоках АЭС.

Выполнение этих принципов оказывается экономически дорогостоящим, когда речь идет о модернизации СУЗ ядерного реактора на основе программно-технических средств и сетевой структуры управления. Это связано с масштабным фактором, когда, например, замена одного — трех каналов управления РО не дает полной референтности, поэтому требуется отработка всей

системы СГИУ на специально выделенном для этой цели реакторе.

В НПП ВНИИЭМ имеется большой опыт по созданию систем контроля для ядерных энергетических реакторов типа РБМК на базе средств вычислительной техники.

Первый энергоблок с атомным реактором РБМК-1000 был пущен в 1973 г. на Ленинградской АЭС, а затем до 1985 г. были введены в строй еще 14 энергоблоков бывшего СССР (в том числе 4 на Украине).

Специфика канального реактора РБМК-1000 требовала существенно большего объема контроля и оперативных расчетов по сравнению с реакторами типа ВВЭР, поэтому система контроля этих АЭС должна была строиться на базе управляющих ЭВМ.

ВНИИЭМ в 1970 г. получил заказ на создание системы контроля на базе УВМ В-3М собственной разработки, апробированной в автоматизированных исполнительных системах космических аппаратов также разработки ВНИИЭМ. В 1972 г. была создана информационно-вычислительная система "Скала" для АЭС с РБМК-1000 и внедрена на всех АЭС этого типа.

Система "Скала" построена на схемотехнике второго поколения ЭВМ с расчетным ресурсом 8 лет, однако качество поставленного оборудования, а также постоянное сопровождение систем в процессе эксплуатации, поддержание технического ресурса и развитие программного обеспечения позволило втроекратно увеличить фактический ресурс системы. Система "Скала" обеспечивает оперативный контроль энергоблока АЭС от традиционных функций сигнализации до оперативных нейтронно-физических расчетов внутри реакторного энергораспределения.

Объем контролируемых параметров более 8 тыс. аналоговых и 5 тыс. дискретных, а также более 20 тыс. расчетных. В системе внедрена функция диагностической регистрации особо важной информации на магнитной ленте и, именно данные, зафиксированные системой "Скала" четвертого энергоблока Чернобыльской АЭС, дали необходимую информацию для анализа причин аварии.

Следующим поколением системы "Скала" является система "Скала-микро", разработанная в НПП ВНИИЭМ для замены систем "Скала", вырабатывающих назначенный ресурс, и для внедрения на вновь строящихся энергоблоках АЭС.

Система "Скала-микро" основана на микросредствах управляющей вычислительной техники МС УВТ В7/В9/В10 и персональ-

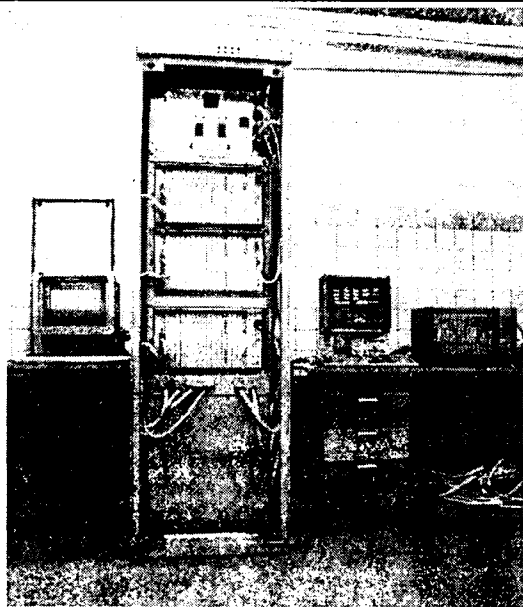


Рис.2. Шкаф контроля расхода воды (КРВ) в процессе проверки

ных ЭВМ в промышленном исполнении производства ВНИИЭМ (рис.2).

Главная цель создания системы "Скала-микро" — повышение безопасности АЭС с реакторами РБМК-1000 путем:

- повышения эксплуатационной надежности информационно-вычислительной системы с заменой физически и морально устаревших технических средств современной аппаратурой с приемкой "Для АЭС";

- повышения оперативности основных информационных и расчетных функций, в том числе снижение периода контроля непосредственно измеряемых параметров до 5 с (ранее 60 с), двумерных нейтронно-физических расчетов до 20 с (ранее 10 мин), трехмерных расчетов до 1,5 мин (ранее 1 раз в сутки);

- реализации развитой информационной поддержки операторов на дисплейных средствах во всех режимах, включая аварийный (рис.3);

- обеспечение стыковки с модернизированными системами безопасности;

- реализации автономной подсистемы диагностической регистрации ("черный ящик") основных аналоговых (до 480 точек с периодами 0,5 с) дискретных параметров (до 2000 точек с периодами 0,2 с) на время ± 15 мин от момента срабатывания аварийной защиты;

- обеспечения непрерывной бесперебойной работы системы в течение 8000 ч за счет дублирования функциональных узлов и магистралей и развитого диагностического программного обеспечения.

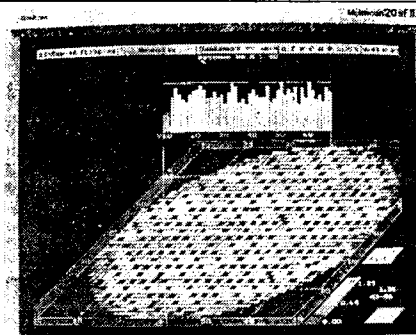


Рис.3. Видеокадр мнемотабло реактора РБМК-1000

Система "Скала-микро" является открытой системой, обеспечивающей привязку к конкретному объекту, и может быть применена в качестве информационной системы для других АЭС и сложных промышленных объектов. Например, локально-вычислительная сеть ППЭВМ системы "Скала-микро" применяется в системах диагностики аппаратуры СУЗ вновь строящихся АЭС с реакторами ВВЭР.

Система "Скала-микро" обеспечивает возможность поэтапной модернизации действующих систем "Скала" без специальной остановки энергоблоков на реконструкцию системы. На двух энергоблоках Ленинградской АЭС реализован верхний уровень системы "Скала-микро" и автономные системы "черный ящик" с выводом из работы УВМ В-3М. На первом энергоблоке Курской АЭС реализована локальная вычислительная сеть. В полном объеме система "Скала-микро" внедряется на пятом энергоблоке Курской АЭС в 2000 г.

Используя основные решения системы "Скала-микро", НПП ВНИИЭМ разработал комплекс аппаратуры аварийной защиты реактора РБМК-1000 от снижения расхода воды в раздающих групповых коллекторах (АЗ РГК). Эта система использует существующие датчики контроля расхода воды в каналах реактора и, несмотря на относительно высокую надежность существующих трактов измерения, применения специальных алгоритмов структурирования и обработки информации, позволила получить требуемую надежность системы защиты.

Для обеспечения всего комплекса работ по разработке, испытанию и сопровождению систем "Скала" и "Скала-микро" в НПП ВНИИЭМ создан специальный стенд, на котором предусмотрена возможность отработки и сопровождения как действующего, так и вновь разрабатываемого программного обеспечения.

Концепция развития систем управления и защиты ядерных энергетических реакторов типа ВВЭР-1000

Ю.Н.ОЛЬШЕВСКИЙ, Г.А.ЖЕМЧУГОВ, С.Я.КУЦАКОВ, Т.Н.ГАЛКИНА

Мировой опыт эксплуатации атомных электростанций (АЭС) показал необходимость повышения их безопасности. Поэтому в последнее десятилетие наряду с разработкой новых проектов АЭС производится поэтапная реконструкция действующих АЭС в соответствии с современными требованиями ядерной безопасности.

Реконструкция действующих АЭС касается в основном введения дополнительных каналов (или комплектов) аварийной защиты реакторов и замены аналоговой техники управления современными цифровыми системами, позволяющими существенно повысить информационные и диагностические возможности системы.

Наибольшую долю в атомной энергетике составляют АЭС с водо-водяными энергетическими реакторами (ВВЭР).

В настоящее время в России, странах СНГ и ряде других стран находятся в эксплуатации более 50 атомных энергоблоков с реакторами ВВЭР российского производства, оснащенных системами управления и защиты (СУЗ) разработки НПП ВНИИЭМ.

НПП ВНИИЭМ ведет работы по реконструкции действующих АЭС, а также осуществляет разработку и внедрение СУЗ реакторов ВВЭР-1000 нового поколения.

Перспективные реакторы ВВЭР-1000 имеют ряд конструктивных и технологических особенностей по сравнению с действующими:

- большее число регулирующих органов (РО) — 121 РО;
- датчики положения РО, фиксирующие положение РО с шагом 2 см;
- реактор требует нетрадиционного алгоритма управления регулирующими органами в связи с необходимостью управления выравниванием нейтронного потока в активной зоне и поля энерговыделения.

СУЗ является автоматизированной распределенной восстанавливаемой системой и должна удовлетворять требованиям ядерной безопасности, которые сформулированы на двух основных принципах — "единичного отказа" и "отказа по общей причине".

Первый принцип требует выполнения системой ее функций назначения при любом, требующем ее работы, исходном событии и при отказе одного из ее элементов или одной независимой от исходного события ошибки оператора.

Второй принцип декларирует сохранение нормального функционирования системы при отказах по общей причине, обусловленных определенным фактором общности для элементов системы (пожары, падение самолета, отказы общих для всей СУЗ элементов и т.д.)

Удовлетворение указанным принципам может быть достигнуто путем создания многоканальных взаимно независимых структур с мажоритарным выходом, позволяющим осуществлять проверку отдельных каналов с иницированием их срабатывания без результирующего воздействия на реактор.

С учетом указанных принципов строится структура СУЗ, состоящая в своей управляющей части из системы аварийной предупредительной защиты и системы группового и индивидуального управления (СГИУ) органами регулирования реактора.

Защита реактора подразделяется на:

- аварийную защиту (АЗ), реализуемую снятием силового электропитания всех РО реактора и вызывающую гашение цепной реакции в активной зоне;
- предупредительную защиту первого рода (ПЗ-1), реализующую снижение мощности реактора движением групп РО вниз с рабочей скоростью;
- предупредительную защиту второго рода (ПЗ-2), по которой запрещается движение всех РО вверх;
- ускоренную предупредительную защиту (УПЗ), вызывающую падение вниз одной наперед заданной группы РО.

Концепция построения каналов аварийной защиты проиллюстрирована на рис.1.

Элементарный детерминистский анализ показывает безопасность структуры аварийной защиты при наличии возможности периодической проверки и восстановления ее узлов.

Следует отметить, что деградация аварийной защиты не допускается. Допускается только переход низших уровней защиты в более высокий уровень (например, переход предупредительной защиты ПЗ в аварийную защиту АЗ).

СГИУ предназначена для управления группами РО, индивидуально выбранными РО, а также контроля положения всех РО. Все РО в реакторе разбиты на группы РО с приблизительно равной эффективностью (не более 0,1 доли запаздывающих нейтронов),

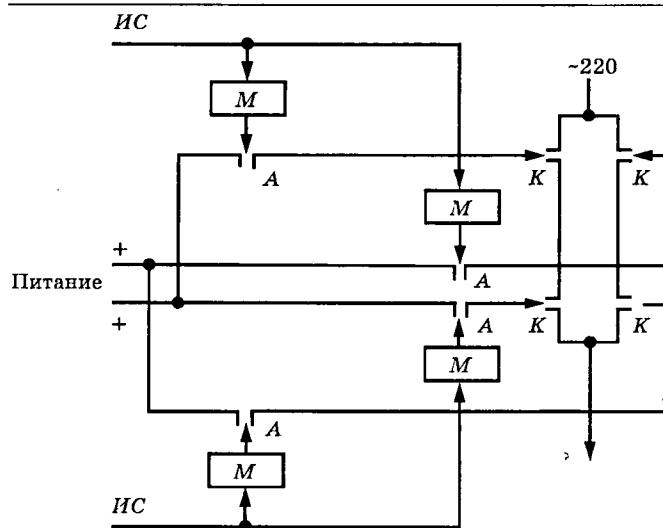


Рис.1. Схема построения каналов аварийной защиты: ИС — иницирующие сигналы (3 или 4 сигнала), воздействующие на свои контактные элементы А; М — мажоритарные элементы 2 из 3-х или 2 из 4-х; К — (контакты) — основные контакты разрыва силового питания приводов РО

симметрично расположены относительно центра активной зоны реактора. В силу сотовой шестигранной решетки и шестигранных кассет с ядерным топливом по количеству РО группы формируются из ряда по 6, 9, 12 и 18 РО, если не считать центрального стержня.

В нормальном режиме объединенные в группы РО должны перемещаться последовательно группа за группой с определенным перекрытием по высоте смежных по номеру групп. Эта последовательность групп жестко программируется в СГИУ по позиционному принципу.

В первых двух сериях реакторов ВВЭР-1000 последовательность групп программировалась в специальных устройствах группового управления, куда передавалась информация по промежуточным выключателям всех РО. Такая структура не удовлетворяла в полной мере требованиям ядерной безопасности.

В новых проектах СГИУ передача движения с группы на группу осуществляется дублированными сигналами непосредственно по положению смежных групп передачей команды разрешения на движение не по первому и не по последнему РО в группе. Такой принцип применен в наших разработках СУЗ реакторов ВВЭР-440.

В новых проектах СУЗ ВВЭР-1000 появились дополнительные задачи:

- выравнивание положений РО в группе;
- контроль положения РО с дискретностью ± 2 см по всей высоте активной зоне 3,5 м;

— индикация положения РО на БЩУ и РЩУ;

— реализация оперативной диагностики привода и датчика РО и сообщение об отказах оператору;

— осуществление неоперативной диагностики привода и накопление информации по отклонениям от его нормальной работы для последующего анализа в период перегрузки реактора.

Все изложенные задачи реализуются программно-аппаратным унифицированным групповым комплексом силового управления и контроля положения (ГК СУКП) на 6 органов регулирования (рис.2).

Комплекс ГК СУКП является базовой структурной единицей системы СГИУ. Управление группой РО, состоящей из 12 или 18 РО, осуществляется двумя или тремя комплексами.

Комплекс включает в себя два шкафа силового управления ПСУ, каждый из которых содержит 3 канала управления тремя приводами М и шкаф контроля и управления 6 приводами РО (каналы УКУП) со своими датчиками положения ДП.

В шкафу ПКУ устанавливаются два идентичных микроконтроллера, один из которых ИМК предназначен для сбора информации от 6 каналов УКУП и передачи ее через дублированную сеть в серверы ШСР и далее в систему верхнего блочного уровня СВБУ энергоблока и в систему внутрореакторного контроля. Второй микроконтроллер (ГМК) предназначен для сбора оперативной информации и индивидуального управления РО и связан дублированной сетью с пультом индивидуального выбора ПИВ.

Каждый ГК СУКП получает управляющие команды от:

- магистрали команд управления;
- системы аварийной и предупредительной защиты (АЗ, ПЗ);
- органов ручного управления (команды поступают прямо в ПСУ);
- промежуточных верхних и нижних положений (ПВ и ПН) смежных $(n-1)$ и $(n+1)$ групп для организации последовательности движения групп РО.

Внутренняя структуру УКУП обеспечивает прием первичной информации от датчиков положения РО одноплатными микроконтроллерами, производящими первичную обработку информации.

Далее информация из одноплатных микроконтроллеров параллельно поступают в ГМК и в ИМК. Такая двухканальная структура УКУП облегчает задачу идентифика-

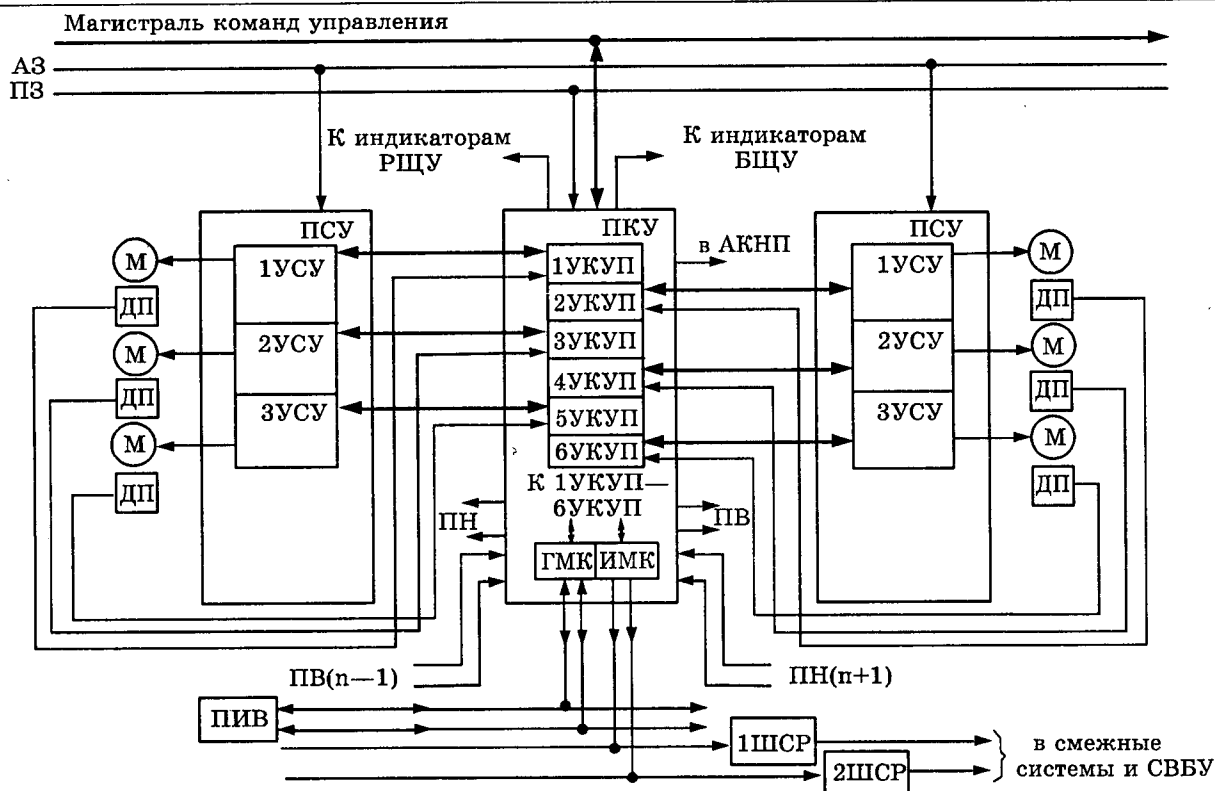


Рис.2. Структурная схема группового комплекса силового управления и контроля положения ГК СУКП

ции отказа одного из каналов.

Устройствами контроля положения, входящими в ГСК ЦКП, для каждого РО формируются сигналы "грубого" (по 10 зонам) положения РО, поступающие на индивидуальные индикаторы положения, размещаемые на БЩУ и РЩУ.

В УКУП входит блок управления приводом РО, который по сигналам из магистрали команд управления и по сигналам от ГМК формирует управляющие сигналы для УСУ согласно заданному приоритету команд управления.

Команды в ГМК поступают от пульта ПИБ, а также от органов ручного управления, как разрешение на проведение соответствующей операции.

В состав ПИБ входит монитор для представления информации по положению любого РО или группы РО в цифровом и/или графическом виде (картограмма, гистограмма, таблица). С помощью клавиатуры оператор имеет возможность выбрать любой РО или группу РО и затем с помощью ключа управлять их перемещением или подключить любую группу к регулятору мощности, а также включать режим выравнивания РО в группе. В случае, когда группа состоит из более чем шести РО, выравнивание производится через ПИБ.

При управлении реактором в автоматическом режиме оператор имеет возможность включить автоматическое управление реактором от системы контроля, управления и диагностики реактора (СКУД). Это новый режим для СУЗ, в котором СКУД непосредственно подключается к нескольким группам РО. Причем каждая из групп делится пополам и может управляться по сигналам, формируемым непосредственно СКУД. Этот режим обеспечивает регулирование мощности и выравнивание офсета в активной зоне маневренных режимов энергоблока.

Автоматический регулятор мощности (АРМ) реализует два из основных пяти контуров регулирования мощности энергоблока. Регулятор может работать в режиме стабилизации нейтронной мощности (базовый режим работы энергоблока) и в режиме поддержания давления пара во втором контуре (регулирующий режим). Причем АРМ может автоматически переключаться из режима в режим, обеспечивая максимальную выработку энергии в зависимости от состояния основного оборудования энергоблока. Регулятор также может работать еще в "стерегущем" режиме, обеспечивая защиту энергоблока по допустимому давлению во втором контуре при управлении реактором от СКУД.

При работе АРМ в указанных режимах необходимо защищать реактор в случае аварийного отключения главных циркуляционных насосов первого контура. Для этой ситуации в состав СУЗ вводится устройство разгрузки и ограничений мощности РОМ, который получает следующие входные сигналы:

- нейтронный поток от АКНП;
- подогрев воды в реакторе от термопар, установленных на петлях первого контура;

— дискретные сигналы от циркуляционных насосов первого контура, а также от питательных насосов второго контура;

— частоты питания циркуляционных насосов.

Наличие этих сигналов позволяет реализовать динамическое опережение сигналов защиты ПЗИ при появлении инициирующих дискретных сигналов отключения соответствующего оборудования.

Программно-технические комплексы для информационно-диагностических систем АЭС

И.И.ДЕСЯТНИКОВ, главный конструктор, Т.Н.ГАЛКИНА, С.Д.ДЖУМАЕВ, инженеры

Всероссийский научно-исследовательский институт электромеханики им. А.Г.Иосифьяна (НПП ВНИИЭМ) обладает многолетним опытом разработки, изготовления и внедрения оборудования для автоматизации АЭС широкого спектра назначения: это информационно-вычислительные системы для АЭС с реакторами РБМК, системы управления и защиты и системы перегрузки топлива для АЭС с реакторами ВВЭР.

На всех энергоблоках АЭС с реакторами РБМК-1000 (Ленинградская, Курская, Смоленская АЭС в России и Чернобыльская АЭС на Украине) успешно эксплуатируется информационно-вычислительная система «СКАЛА» на базе УВМ В-3М разработки ВНИИЭМ, головной образец которой был внедрен в 1973 г. на первом энергоблоке Ленинградской АЭС. Несмотря на ограниченные ресурсы УВМ В-3М, система «СКАЛА» обеспечивает оперативные расчеты энергораспределения по реактору и регистрацию особо важной информации, необходимой для диагностики оборудования и технологического процесса.

Современный подход к обеспечению безопасности АЭС существенно повышает требования к ПТК автоматизации АЭС:

— оперативность основных информационных и расчетных функций должна быть повышена до уровня, обеспечивающего операторам возможность получения информации в темпе управления;

— необходимо обеспечить информационную поддержку операторов как в режиме нормальной эксплуатации, так и в переходных и аварийных режимах;

— необходимо обеспечить регистрацию особо важной информации с высокой разрешающей способностью для анализа аварийных ситуаций;

— ресурсы программно-технических

средств должны позволить оперативную реализацию сложных алгоритмов контроля и диагностики технологического процесса с использованием архивируемой информации;

— базовые программные средства должны включать средства автоматизации технологического проектирования, обеспечивающие возможность минимизации временных затрат на отработку и внедрение новых прикладных задач, и соответствовать современным требованиям к информационным системам (поддержку сетевых структур, защиту информации и управления безопасностью сетевой структуры, живучесть сетевой архитектуры, многопользовательский режим работы, режим реального времени);

— архитектура программно-технических комплексов должна обеспечить функционирование при «единичном» отказе и исключить возможность нарушения функционирования при отказах по общей причине;

— технические средства должны соответствовать мировому уровню, международным и российским стандартам и требованиям, обеспечивать гибкость конфигурирования системы, а также (при одинаковом функциональном назначении) иметь нескольких производителей как отечественных, так и зарубежных.

Руководствуясь современной концепцией реализации программно-технических средств автоматизации АЭС, НПП ВНИИЭМ разработал программу поэтапной модернизации действующих систем «Скала», основанную на создании функционально законченных программно-технических комплексов, дополняющих и/или заменяющих действующее оборудование.

В настоящее время в НПП ВНИИЭМ разработаны и в основном внедрены на АЭС с реакторами РБМК следующие комплексы:

- комплекс контроля и диагностики температурных параметров КТП;
- комплекс контроля быстрых параметров МСИ;
- комплекс контроля внутриреакторных параметров МСФ;
- комплекс связи с устройствами жесткой логики МСК;
- комплекс автономной диагностической регистрации («черный ящик») ДРЕГ-А;
- комплекс ЦВК В9 для замены УВК-ВЗМ системы «Скала»;
- локальная вычислительная сеть ЛСВУ;
- комплекс аварийной защиты реактора РБМК-1000 по снижению расхода воды в раздающих групповых коллекторах АЗ РГК;
- комплекс автономной сигнализации МИС;
- комплекс отображения информации на программируемой мнемосхеме КПМ.

В период 30-суточного планово-предупредительного ремонта локальная сеть ЛС ВУ совместно с комплексами ЦВК В9, МСИ, МСФ, МСК и ДРЕГ-А внедрена в 1996 г. на первом и втором энергоблоках Ленинградской АЭС и внедряется на первом энергоблоке Курской АЭС.

Измерительная часть АЗРГК прошла отработку на первом энергоблоке Курской АЭС, комплекс КТП находится в эксплуатации на Конаковской ГРЭС.

Кроме того, для управления приводами органов регулирования реактора ВВЭР-440 разработан в 1997 г. и успешно эксплуатируется на 1 блоке АЭС «Моховце» (Словакия) преобразователь низкой частоты ПНЧИ-3 на базе программируемого контроллера.

Для всех разработок НПП ВНИИЭМ общим является:

- наличие специального стенда, обеспечивающего отработку программно-технических средств на стадии их создания и сопровождения в течение всего срока эксплуатации;
- наличие программируемых средств автономной наладки, обеспечивающих возможность внедрения ПТК на объекте без специального останова на пусконаладку.

Если до сих пор на базе ПТК решались в основном информационные задачи автоматизации АЭС с реакторами РБМК, то в настоящее время необходимость повышения уровня управления мощностью реактора и информационно-диагностических возможностей системы требует внедрения программно-технических средств в системы управления и защиты реакторов ВВЭР.

К первой группе задач, связанных с повышением качества и уровня процесса уп-

равления мощностью реактора, относятся задачи автоматического выравнивания приводов в группе при увеличении и снижении мощности реактора, дотягивания органов регулирования до крайнего нижнего и верхнего положений, выравнивания поля энерговыделения и др.

Реализация этой группы задач связана в основном с расширением возможностей оборудования индивидуального управления приводами органов регулирования.

Вторая группа задач направлена на расширение информационных и диагностических возможностей системы и связана со сбором, обработкой и архивированием большого объема информации (до 4000 аналоговых и дискретных сигналов), необходимой для диагностики привода и датчика положения, состояния оборудования СУЗ, передачей информации по положению всех органов управления и состоянию оборудования в смежные подсистемы и систему верхнего блочного уровня.

Реализация новых алгоритмов в рамках оборудования индивидуального управления и обеспечение необходимой информации для диагностики привода и датчика положения невозможны на средствах «жесткой» логики, и поэтому потребовалось введение в состав комплекса электрооборудования СУЗ двух сетевых подсистем.

Одной из этих сетевых подсистем является ПТК информационно-диагностической сети, основные аспекты создания которого рассматриваются в настоящей статье. Базой для создания ПТК ИДС является ПТК ЛС ВУ, разработанный ранее для энергоблоков с реакторами РБМК.

ПТК ИДС состоит из двух комплектов аппаратуры и программного обеспечения, которые резервируют друг друга. При этом независимость двух комплектов аппаратуры ПТК ИДС обеспечена таким образом, чтобы:

- исключать возможность отказов и повреждений двух комплектов по общей причине (кроме случаев отказа источников информации);

- отказы одного комплекта аппаратуры не приводили к отказам и сбоям другого комплекта аппаратуры.

Фрагмент ПТК ИДС приведен на рис.1, где показаны основные функциональные узлы программно-технического комплекса ИДС:

- аппаратура сервера ИДС;
- аппаратура рабочей станции расчетов и диагностики;
- аппаратура каналобразующей части ПТК;

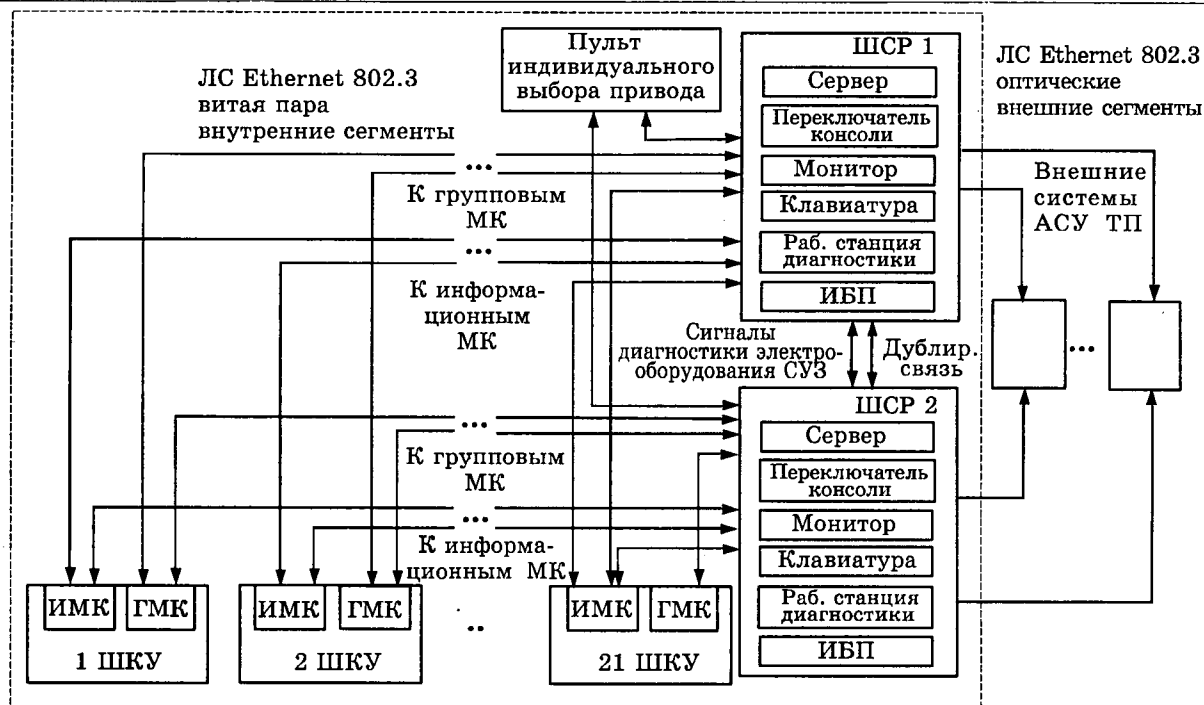


Рис.1. Структурная схема ПТК ИДС КЭ СУЗ для реактора ВВЭР:

ШСР — шкаф серверный; ШКУ — шкаф контроля и управления; ИМК/ГМК — информационные и групповые микроконтроллеры; ИБП — источник бесперебойного питания

- источники информации;
- периферийное оборудование;
- кабели и коммутационное оборудование.

Аппаратура сервера и рабочей станции диагностики построена на основе комплекса компьютерного специального назначения (ККСН) ЭКСПРО (рис.2).

ККСН ЭКСПРО — это компьютер с архитектурой PC AT (Personal Computer Advanced Technology — персональный компьютер класса AT), изготавливаемый в усиленном промышленном исполнении и предназначенный для обработки и представления информации по задаваемым алгоритмам в тяже-

лых условиях эксплуатации автономно или в составе измерительных, вычислительных, информационных, управляющих и иных автоматических и автоматизированных систем.

ККСН ЭКСПРО сохраняют работоспособность в закрытых помещениях со следующими условиями эксплуатации:

- температура окружающего воздуха от +5 до +55°C;
- относительная влажность окружающего воздуха не более 98% при +25°C;
- атмосферное давление от 53,3 до 107 КПа;
- отсутствие в окружающем воздухе взрывоопасных и химически активных воздействий;

— сейсмостойкость изделий ККСН ЭКСПРО соответствует требованиям ГОСТ 17516.1-90 для уровня установки +27 м и интенсивности землетрясения 8 баллов МРЗ по шкале MSK-64;

— по электромагнитной совместимости ККСН соответствует критерию качества А и третьей группе исполнения по ГОСТ 50746-95.

Электропитание ККСН ЭКСПРО осуществляется от сети переменного тока 380/220 (+10, -15)% В, 50 (±1) Гц.

Потребляемая мощность по цепям питания 220 В, 50 Гц каждого ККСН не превышает 250 В·А.

Каналообразующая часть (КЧ) ПТК ИДС имеет модульную структуру и представляет из себя классический маршрутизатор или

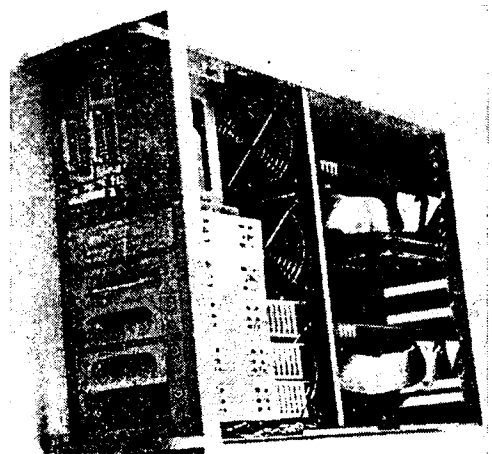


Рис.2. Комплекс компьютерный специального назначения ЭКСПРО

коммутатор 3-го уровня (в соответствии с эталонной структурой уровней сетевого взаимодействия — OSI международной организации по стандартам ISO), работающий в соответствии с группой стандартов Ethernet 802.3.

КЧ обеспечивает связь компонентов ПТК ИДС, контроллеров источников информации и внешних систем. Топология связи — звезда. В состав КЧ входят модули коммутаторов и маршрутизатора.

Коммутаторы (модули коммутаторов) осуществляют связь конечных устройств любой системной принадлежности с одним из сегментов ИДС, образуемых маршрутизатором. При этом информационные пакеты, направляемые по конкретному сетевому адресу, т.е. конкретному устройству, пересылаются коммутатором только этому устройству, что при наличии буферов пересылки увеличивает реальную пропускную способность сети за счет уменьшения коллизий из-за одновременной передачи информации двумя и более устройствами. Основой коммутаторов служат быстродействующие проблемно-ориентированные микросхемы (ASIC), что устанавливает предел пропускной способности по одному каналу, равный теоретическому пределу пропускной способности сети 100 Мбит/с.

Маршрутизатор (модуль маршрутизатора) осуществляет связь между сегментами ИДС, разбивая собой всю ИДС на отдельные широковещательные домены (broadcast domain). Возможности настройки маршрутизатора позволяют локализовать график каждого сегмента ИДС и не допустить распространения посторонних пакетов (например, из внешних систем), не предназначенных для использования в КЭ СУЗ.

Периферийное оборудование

Монитор и клавиатура предназначены для управления ПТК ИДС, отображения диагностической и другой необходимой информации.

Переключатель консоли позволяет использовать один набор периферийных устройств (монитор, клавиатура, трекбол) для сервера и рабочей станции диагностики.

Источник бесперебойного питания обеспечивает непрерывное электропитание шкафа за счет использования энергии собственных аккумуляторных батарей. За некоторое (настраиваемое) время после пропадания первичного электропитания ИБП обеспечивает безопасное сворачивание работы программного обеспечения компьютеров.

Все периферийные устройства устанавливаются в серверный шкаф в защитных металлических кожухах.

Кабели и коммутационное оборудование

В ПТК ИДС применяются кабели двух типов:

- неэкранированная витая пара категории 5 (UTP 5) для связи с источниками информации, длина связи — не более 100 м;

- многомодовое оптоволокно для связи с внешними системами.

Тип применяемых коммутационных панелей соответствует типу применяемых кабелей.

Программное обеспечение

ПО сервера — операционная система Novell Netware (текущая версия 5.0) — обеспечивает хранение информации, предоставление ее по запросам от внешних потребителей, а также создание и работу долговременного архива.

На рабочей станции выполняется прикладное ПО диагностики электрооборудования СУЗ и системное ПО диагностики оборудования ПТК ИДС. Системное ПО диагностики позволяет отображать состояние компонентов ИДС и количественные характеристики каналов связи на экране монитора, а также сигнализировать дежурному персоналу о достижении этими характеристиками граничных значений.

Сетевое ПО контроллеров источников информации обеспечивает дублированную связь с коммутаторами КЧ на системном и прикладном уровнях, защиту от несанкционированного доступа, живучесть сетевой архитектуры.

Система технологического проектирования

Для построения информационной системы ПТК ИДС была создана специально система технологического проектирования (СТП), привязанная к конкретной базе данных.

Разработка системы проводилась в среде программирования Visual Basic 5.0 (VB 5) под управлением операционной системы Windows NT Work station 4.0.

Использование стандартных средств среды Visual Basic и средств СТП позволяет производить разработку проекта в интерактивном режиме практически без использования традиционных средств программирования, что дает возможность при проектировании оперировать терминами технологического процесса и не требует от разработчика квалификации программиста.

Создание новых видеок кадров, корректировка старых, выбор стандартных элементов VB 5 и специализированных элементов СТП осуществляется с помощью указателя мыши.

Задание вызывной характеристики сигнала

ла во входных параметрах элементов СТП обеспечивает привязку элемента к текущей базе данных с последующей автоматической выборкой всех необходимых атрибутов из базы данных для реализации функции представления информации, что принципиально исключает ошибки, связанные с идентификацией параметров, и определения их свойств в процессе проектирования. Введение системы условных цветов позволяет производить быструю настройку и корректировку цветов сразу по всем элементам с одинаковым условным цветом одновременно на всех кадрах проекта.

Концепция комплексного стенда ПТК

Для обеспечения своевременной и качественной разработки, поставки и авторского сопровождения электрооборудования КЭ СУЗ уже на этапе технического проекта создается комплексный стенд по отработке основных программно-технических решений:

- отработка алгоритмического и программного обеспечения подсистемы контроля положения и индивидуального управления органов регулирования;
- отработка информационных и диагностических задач;
- отработка взаимодействия со смежными системами РУ;

— моделирование поведения сети в условиях пиковых информационных потоков и отказов оборудования;

— отработка мер повышения живучести сетевой архитектуры;

— отработка принципов защиты информации и управления безопасностью сетевой структуры;

— проверка конструктивных решений;

— авторское сопровождение ПТК ИДС КЭ СУЗ.

В заключение следует отметить:

— в электрооборудовании СУЗ нового поколения сохранены функциональные и технологические принципы, заложенные в оборудовании, эксплуатируемом на действующих энергоблоках, что обеспечивает преемственность по отношению к действующему электрооборудованию;

— использование при проектировании ПТК сетевой архитектуры и широко распространенных программно-аппаратных средств делает систему гибкой, открытой для модернизации в соответствии с темпом развития компьютерных технологий;

— референтной системой для сетевых структур в составе КЭ СУЗ с реактором типа ВВЭР является ЛС ВУ для ИВС энергоблоков с реактором РБМК.

ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ГАЗОПРОВОДОВ

Особенности электромагнитных подшипников компрессоров магистральных газопроводов

В.П.ВЕРЕЩАГИН, доктор техн.наук, П.А.МАТВЕЙЧУК, А.П.САРЫЧЕВ, кандидаты техн.наук

Отмечено, что электромагнитные подшипники активно демпфируют упругие колебания ротора и позволяют длительно работать компрессору на критических скоростях. Для снижения влияния упругих колебаний ротора датчики положения электромагнитных подшипников рекомендуется размещать ближе к узлам соответствующих форм колебаний.

За последние 20 лет электромагнитные подшипники находят все более широкое применение в различных роторных машинах, включая шаровой электродвигатель-маховик и силовые гироскопы для управления ориентацией орбитальных станций «Алмаз» и «Мир» [1,2], высокоскоростные электрошпиндели для шлифования, турбодетандеры для сепарации природного газа, компрессоры газоперекачивающих агрегатов магистральных газопроводов [3] и др.

В процессе создания этих устройств в НПП ВНИИЭМ сформировано самостоятель-

ное научное направление по проектированию и исследованию роторных механизмов с электромагнитными подшипниками. Некоторые из основных положений и аспектов этого направления неоднократно рассматривались в научных трудах [4]. Большинство научно-технических решений, включающих результаты теоретических и экспериментальных исследований, имеют общий характер и могут быть использованы при разработке электромагнитных подшипников агрегатов различного назначения.

Кроме того, существует ряд специфических теоретических и экспериментальных задач, которые связаны с конструктивными особенностями или условиями эксплуатации конкретных агрегатов. К числу таких задач относятся научно-технические проблемы, возникшие при создании электромагнитных подшипников для новых компрессоров газоперекачивающих агрегатов магистральных газопроводов ГПА-16 и ГПА-12, изготавливаемых Казанским компрессорным заводом. По сравнению с аналогичными компрессорами газоперекачивающих агрегатов ГПА-Ц-16, изготовленными на Сумском машиностроительном НПО и успешно работающими на компрессорных станциях ПО «Самаратрансгаз», эти новые компрессоры отличаются тем, что работают в режимах, при которых частота вращения может совпадать с частотой первой формы упругих колебаний ротора. Это обстоятельство необходимо учитывать при проектировании электромагнитных подшипников и принимать ряд дополнительных мер по повышению демпфирующих свойств и снижению на этих критических частотах влияния упругих колебаний ротора на систему управления подшипниками компрессора.

Сравнительные характеристики роторов газоперекачивающих агрегатов приведены в таблице.

Тип агрегата	ГПА-Ц-16	ГПА-16	ГПА-12
Диапазон рабочих скоростей, об/мин (Гц)	4100-4900 (68-82)	3700-5600 (62-93)	4500-6900 (75-114)
Частота упругих колебаний ротора, Гц			
1 форма	120	70	82
2 форма	180	171	208
3 форма	230	310	344

Обычно параметры системы управления подшипниками выбираются так, чтобы собственные частоты колебаний ротора, соответствующие его движению как твердого тела, демпфировались достаточно хорошо. В процессе разгона ротора до рабочей скорости вращения при прохождении резонансных точек, соответствующих собственным частотам, допускается не более чем 2-кратное увеличение уровня колебаний ротора. Поскольку это временное увеличение колебаний ротора, то нет необходимости в еще большем уменьшении их уровня, так как это сопряжено со снижением помехозащищенности

системы управления или соответственно жесткости электромагнитного подшипника. В случае необходимости, если уровень колебаний ротора окажется близким к срабатыванию контрольных устройств, на время прохождения этих точек можно ввести блокировку аварийной сигнализации и защиты.

Сложнее осуществить демпфирование упругих колебаний ротора. Особенно когда конструкция ротора такая, что частота первой упругой формы попадает в диапазон рабочих скоростей вращения. Для обеспечения надежного функционирования электромагнитных подшипников в этих режимах необходимо выбрать параметры системы управления так, чтобы и на этой критической частоте обеспечивалось, по крайней мере, 30-градусное опережение по фазе усилия, создаваемого электромагнитным подшипником, по отношению к сигналу отклонения ротора. Уровень колебаний ротора в рабочем диапазоне скоростей не должен превышать по амплитуде, установленной для этого типа агрегатов, нормы — 70 мкм.

При обеспечении этих требований следует учитывать, что необходимое в данном случае снижение жесткости электромагнитного подшипника лимитировано динамическими нагрузками, действующими на ротор в эксплуатационных режимах. С другой стороны, связанное с улучшением демпфирования увеличение коэффициента усиления системы управления подшипниками на этих частотах может привести к возбуждению ближайших упругих форм колебаний ротора, т.е. 2-й и 3-й формы. Кроме того, могут существенно возрасти требования к точности механической обработки и балансировки ротора.

На основе анализа комплекса перечисленных научно-технических проблем и для поиска компромиссных решений при создании электромагнитных подшипников новых компрессоров ГПА-16 и ГПА-12 в их конструкции, схематически показанной на рис.1, предусмотрена возможность установки датчиков положения в различных точках по длине ротора. При такой компоновке для работы в системе управления подшипниками можно использовать датчики с наиболее благоприятным соотношением уровней колебаний ротора для различных форм колебаний.

Для пояснения на рис.2 представлено изменение уровня упругих колебаний по длине ротора для первых трех форм и указаны места расположения датчиков положения Д1-Д5 и электромагнитов М1, М2. Из рис.2 видно, что в данном случае предпочтитель-

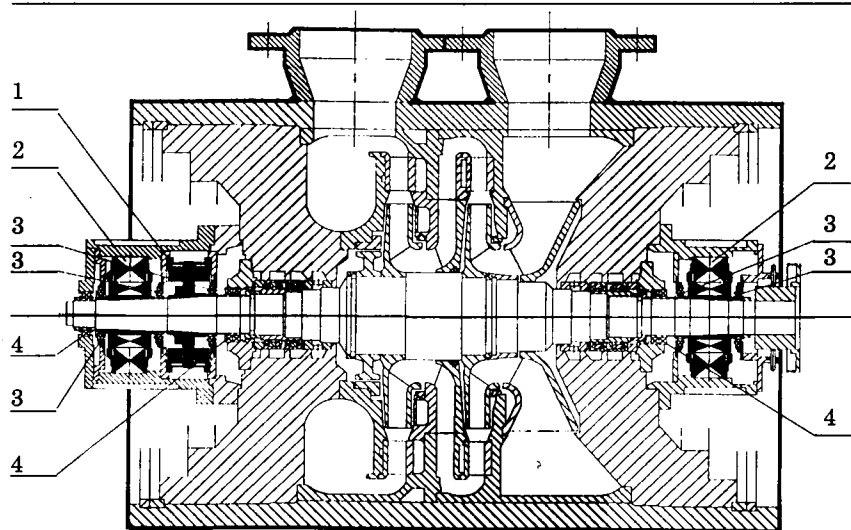


Рис.1. Конструкция компрессора с электромагнитными подшипниками: 1 — осевой подшипник; 2 — радиальный подшипник; 3 — датчик положения ротора; 4 — страховочный шарикоподшипник

ным для снижения влияния 1-й формы упругих колебаний является выбор датчиков ДЗ и Д4, расположенных ближе других к узлам колебаний этой формы.

При внесении конструктивных изменений, например, при соединении компрессора с приводом через промвал картина распределения упругих колебаний может меняться и потребуются подключение к системе других датчиков. Как показала практика экспериментальной отработки компрессоров с электромагнитными подшипниками ГПА-16 и ГПА-12, применение такого способа снижения влияния упругих колебаний ротора для обеспечения надежного функционирования электромагнитных подшипников, несмотря на некоторую избыточность датчиков в системе управления, является перспективным, особенно при создании первых образцов компрессоров.

Испытания новых компрессоров с электромагнитными подшипниками ГПА-16 и ГПА-12 на стенде Казанского компрессорного завода подтвердили возможность обес-

печения надежной работы агрегатов при скоростях вращения, совпадающих с частотой упругих колебаний ротора. Электромагнитные подшипники, благодаря их возможности активно демпфировать колебания ротора в определенном частотном диапазоне, позволяют компрессору длительно работать на критических частотах вращения практически без увеличения уровня вибраций. Как следует из амплитудно-частотной характеристики системы электромагнитных подшипников, представленной на рис.3, существующие в НПП ВНИИЭМ методы выбора параметров системы управления и рассмотренный подход к исполь-

зованию датчиков положения ротора позволяют добиться в рабочем диапазоне частот плавного изменения уровня колебаний ротора без существенного подъема на критической частоте, соответствующей первому тону упругих колебаний.

Кроме того, в процессе испытаний существует необходимость в проведении проверок компрессоров автономно и при соединении с приводом. В этом случае из-за изменения упругих свойств возникает проблема, связанная с обеспечением устойчивости системы электромагнитных подшипников. Для решения этой проблемы и избежания вынужденной корректировки параметров системы управления оказывается удобнее воспользоваться датчиками положения, расположенными в различных местах по длине ротора. В целом это упрощает процедуру испытаний компрессора и сокращает их продолжительность.

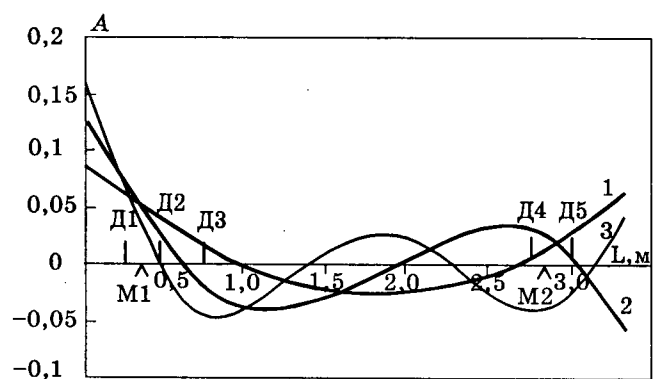


Рис.2. Формы упругих колебаний ротора

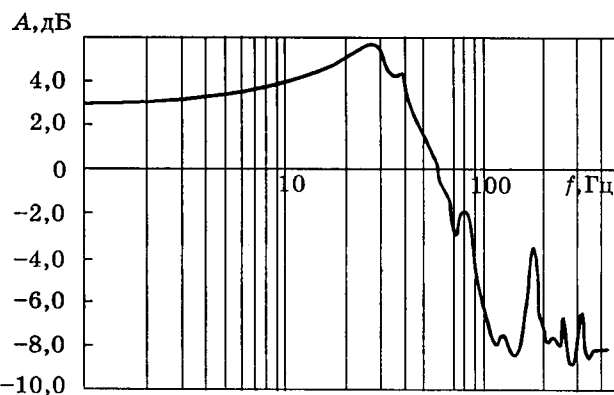


Рис.3. Амплитудно-частотная характеристика системы управления электромагнитными подшипниками компрессора

Выводы

1. Электромагнитные подшипники компрессоров магистральных газопроводов активно демпфируют упругие колебания ротора и позволяют надежно работать на критических скоростях при совпадении частоты вращения с собственной частотой упругих колебаний ротора.

2. Для снижения влияния упругих колебаний ротора на работу электромагнитных подшипников предусматривается возможность изменения расположения датчиков положения по длине ротора с установкой их в местах, близких к узлам соответствующих форм упругих колебаний ротора.

Список литературы

1. **Шереметьевский Н.Н. и др.** Силовой гироскоп с электромагнитными подшипниками для управления ориентацией орбитальных станций//Изв. АН СССР. Сер. Космические исследования. 1983. Т.ХХI. Вып. 1. С.139—141.
2. **Стома С.А. и др.** Электромеханические исполнительные органы с магнитными опорами для управления ориентацией космических станций//Космический бюллетень. 1995. Т.2. № 1. С.5—10.
3. **Кочетов Д.А. и др.** Опыт наладки и эксплуатации газоперекачивающих агрегатов с магнитными подшипниками//Конверсия в машиностроении. 1994. № 4. С.23—29.
4. **Магнитный** подвес роторов электрических машин и механизмов//Тр. ВНИИЭМ. 1989. Т.89.

КОРАБЕЛЬНАЯ ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА

Корабельная электромеханика — тенденция развития

Г.А.ЖЕМЧУГОВ, В.К.КАЛАШНИКОВ, В.А.КРУГЛИН

Более чем пятидесятилетняя деятельность значительной части коллектива ученых, инженеров, рабочих НПП ВНИИЭМ неразрывно связана с проблемами флота, созданием корабельных электромеханических систем и комплексов. Вряд ли можно найти аналог современному кораблю по степени его насыщенности электромеханическими устройствами и по широте их функционального использования. Это системы электрического движения корабля, системы управления оружием, навигационные комплексы, системы связи, системы жизнеобеспечения корабля. Создание электромеханических комплексов, отвечающих корабельным требованиям, обязывает в процессе проектирования непрерывно опираться на достижения фундаментальной науки и требует постоянно вести экспериментальные и теоретические исследования. Решению задачи создания надежного корабельного электромеханического оборудования подчинены научно-тематические планы работ ряда расчетно-конструкторских, технологических и производственных подразделений предприятия. В НПП ВНИИЭМ были созданы электромашинные и статические преобразователи для питания различных судовых механизмов, серии электрических двигателей постоянного и переменного тока (в том числе асинхронные электродвигатели с частотой тока статора 400 ГЦ), высоконадежное коммутационное оборудова-

ние, магнитные пускатели, серия тепловых и электромагнитных реле и др.

Одним из направлений научной и производственной деятельности предприятия в области морской тематики является создание систем электродвижения (СЭД) для ледокольного флота. Первый отечественный атомный ледокол «Ленин» был оборудован совершенной по тому времени системой электродвижения постоянного тока, разработанной в НПП ВНИИЭМ. Дальнейшее развитие системы электродвижения атомных ледоколов и других надводных и подводных кораблей шло по пути замены постоянного тока в системах электродвижения переменным током, что привело к существенному улучшению ходовых и эксплуатационных характеристик СЭД. Для отработки всех элементов СЭД в условиях, близких к эксплуатационным, был создан физический стенд, обеспечивающий испытания всего комплекса электрооборудования СЭД.

Судовая техника имеет свою специфику. Одним из важнейших требований, предъявляемых к судовому электрооборудованию, являются его высокая ударостойкость и маложумность. На предприятии были организованы подразделения, занимающиеся исследованием и решением проблем виброакустики судового электротехнического оборудования. На базе накопленного опыта были разработаны первые общегосударственные

стандарты по вибрации, балансировке, воздушному и магнитному шумам судового электрооборудования, а также методики расчета и испытаний вибраций и шума. Была предложена и внедрена в производство методика комплексного проектирования, основным научно-техническим принципом которой являлось объединение в моноблочной конструкции электрического привода и исполнительного механизма.

Наряду с виброакустикой в самостоятельное научно-техническое направление вылилась проблема обеспечения длительного ресурса корабельного электрооборудования.

Многолетний успешный опыт эксплуатации систем электродвижения ледоколов «Ленин», «Арктика», «Сибирь» подтверждает правильность организации проектирования, исследования и производства судового электромеханического оборудования, сформировавшихся в рамках НПП ВНИИЭМ.

Со стороны судостроительных предприятий постоянно выдвигаются все более жесткие требования к корабельному электрооборудованию в части массогабаритных показателей и виброакустических характеристик. И, естественно, разработчики судовых электромеханических систем стремятся использовать новейшие достижения в области научных и технологических разработок, позволяющие решить поставленные флотом задачи. Так, в разработках судовых систем электродвижения стали применяться сверхпроводниковые электрические гребные двигатели и сверхпроводниковые турбогенераторы.

ЦНИИ им. А.Н. Крылова и ЛВИМУ им. С.О. Макарова были сформулированы технико-экономические требования к СЭД, явившиеся результатом анализа и сравнения различных типов энергетических установок судов. В этих материалах показана целесообразность создания систем электродвижения со сверхпроводниковыми электрическими машинами для транспортных и пассажирских судов морских перевозок [1].

Для грузовых транспортных судов предприятиями Минсудпрома была определена оптимальная мощность энергетической установки — 10–12 МВт. При этом для увеличения пропульсивного коэффициента судна было бы желательно снизить частоту вращения гребного винта (а значит частоту вращения гребного электродвигателя) до 80 мин⁻¹. Таким образом предполагается снизить расход топлива в среднем на 10% [2].

Для пассажирских перевозок специалистами ЦНИИ им. А.Н. Крылова было разработано техническое предложение сверхвысо-

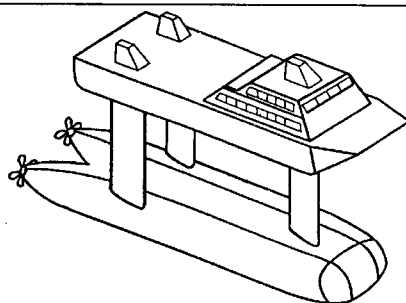


Рис.1. Схема компоновки супербыстроходного грузопассажирского судна

коскоростного грузопассажирского судна (рис.1). Судно состоит из двух отдельных корпусов, один из которых подводный и в нем размещается весь комплекс сверхпроводниковой системы электродвижения, одновременно через подвижные лонжероны он несет над поверхностью воды вторую часть судна, где размещены пассажирские каюты и грузовые отсеки. В такой компоновке в энергетической установке необходимость использования сверхпроводниковой СЭД оказалась однозначной.

Отметим факторы, определяющие целесообразность создания сверхбыстроходного судна со сверхпроводниковой системой электродвижения:

- экономические предпосылки увеличения скорости грузопассажирских перевозок;

- требования к применению электродвижения вместо прямой механической передачи на пассажирских судах (снижение структурного шума и вибрации корпуса, экономическое обеспечение общесудовых нужд);

- возможность отделения первичного двигателя от линии вала и сокращение длины вала;

- снижение массы и габаритов системы передачи мощности на гребной винт;

- повышение КПД электропередачи.

Для опытного образца сверхбыстроходного судна в ЦНИИ им. А.Н. Крылова были определены основные характеристики:

Количество пассажиров, чел.	500
Масса коммерческого груза, т	1000
Длина судна, м	
— верхнего корпуса	80
— нижнего корпуса	100
Ширина судна, м	
— верхнего корпуса	25
— нижнего корпуса	23
Глубина погружения оси гребных валов, м	22
Водоизмещение, т	12000
Скорость хода, узлов	35—40
Мощность энергетической установки, МВт	40

В соответствии с техническим заданием судостроительных предприятий в НПП ВНИИЭМ было принято решение разработать единый для всех энергетических установок перспективных судов базовый сверхпроводниковый (СП) гребной криодвигатель мощностью 10 МВт, который мог бы быть использован как универсальный модуль для осуществления различных судовых систем привода гребного винта. Одновременно были выполнены работы по проектированию судового сверхпроводникового турбогенератора для энергетической установки СЭД.

Оптимизационные расчеты выполнены с помощью математической модели криогенной электрической машины, состоящей из элементов электромагнитного, теплового и механического расчетов [3]. Структурная схема математической модели предусматривает последовательность полного расчета параметров и характеристик электрической машины. Задача выбора оптимальных размеров и параметров решалась методом градиентного поиска с учетом функций ограничения.

Криодвигатель и криогенератор разрабатывались в виде двух модификаций: с обмоткой возбуждения из сверхпроводникового провода на основе ниобий-титана и из провода на основе ниобий-олова.

В расчетах многокритериальная задача сводится к однокритериальной введением вторичных факторов с ограничениями. Особенность разработанной программы заключается в том, что для определения приращений в направлении антиградиента аппроксимация целевой функции проводится с помощью параболы. Исходные данные для расчета машины берутся в соответствии с техническим заданием. Параметры сверхпроводящего провода задаются в виде аналитической функции.

В качестве целевой функции была принята удельная масса криодвигателя.

Варьируемые размеры, параметры:

- диаметр якоря;
- высота СП обмотки возбуждения;
- высота обмотки якоря;
- плотность тока в обмотке якоря;
- активная длина якоря.

Ограничения, введенные в штрафную функцию: предельные температуры в обмотке якоря и ферромагнитопровода, КПД машины, наружный диаметр криостата, расход гелия на криостатирование.

Для гребного сверхпроводникового двигателя мощностью 10 МВт в результате поиска получены следующие оптимальные значения основных размеров и параметров:

- диаметр обмотки якоря, см 138
- длина пазовой части обмотки якоря, см 120
- высота обмотки якоря, см 12
- плотность тока в обмотке якоря, А/мм² 6,0

Было принято решение унифицировать исполнение якоря криодвигателя для вариантов системы возбуждения на основе ниобий-титана и ниобий-олова.

Геометрические размеры активных частей криодвигателя и его конструктивный облик определялись в процессе проектирования. В результате электромагнитных расчетов определены:

- магнитное поле в зоне обмотки якоря;
- магнитное поле в зоне сверхпроводящей обмотки возбуждения;
- максимальное магнитное поле на полюсе индуктора;
- уровень устойчивости обмотки возбуждения к воздействию переменных магнитных полей;
- значения электромагнитных параметров криодвигателя;
- потери мощности во всех тепловыделяющих элементах криостата;
- магнитное поле в наружном ферромагнитном экране.

Сверхпроводящая магнитная система гребного криодвигателя на основе интерметаллида ниобий-олово позволяет ориентироваться на газовую гелиевую схему охлаждения с рабочей температурой 8—9 К. Магнитная система индуктора на основе сплава ниобий-титан однозначно требует жидкостного гелиевого охлаждения на уровне рабочих температур 4,2—4,5 К. Была спроектирована восьмиполюсная магнитная система возбуждения статического индуктора со средним диаметром обмотки возбуждения 1600 мм при высоте полюса 47 мм с магнитодвижущей силой $500 \cdot 10^3$ А. Максимальная индукция магнитного поля в сверхпроводниковом полюсе 4 Тл, максимально допустимый ток СП магнитной системы 1000 А, номинальный ток возбуждения 750 А, число витков полюса 640.

Конструкция и технологический процесс производства СП обмотки возбуждения из ниобий-оловянного провода предусматривают изготовление обмотки по методу «намотка-отжиг», при котором проводится намотка катушек-секций полюсов сверхпроводящей магнитной системы из ниобий-оловянного провода — полуфабриката. Затем готовые секции полюса подвергаются вакуумному отжигу, лишь после которого в жилах

провода образуется сверхпроводящее соединение ниобий-олово. После отжига секции компаундируются и производится сборка полюса.

Нормальное функционирование СП системы возбуждения требует надежной криостабилизации магнитной системы сверхпроводникового индуктора при заданной производительности системы криообеспечения в течение всего срока службы гребного криодвигателя. Сверхпроводниковая магнитная система должна иметь высокоэффективную тепловую изоляцию от всех видов теплопритоков, обеспечивающую минимальный расход криоагента и сохраняющую стабильность на весь межремонтный период.

Разработанная конструктивная схема криостатов как для жидкостной, так и для газовой системы криостатирования СП магнитной системы представляет совокупность газоохлаждаемых тепловых мостов — радиационных экранов, газоохлаждаемых и теплопроводящих радиационных экранов, охлаждаемых тоководов, замкнутых герметичных оболочек с размещенными в них сверхпроводниковыми обмотками и других узлов, не оказывающих значительного влияния на процессы теплообмена (теплопритока) в системе. Все перечисленные элементы конструкции расположены в вакуумированной внутренней полости герметизированного корпуса криостата. Элементы конструкции криостата за исключением оболочек холодных зон, в основном, идентичны для криостатов с жидкостным и газовым охлаждением сверхпроводниковой системы возбуждения.

Реализация положительных свойств сверхпроводниковых магнитных систем из ниобий-оловянного СП провода связана с переходом к системе криостабилизации параметрами криоагента (гелия) при рабочих температурах в диапазоне 4,5—12 К. Газовая схема охлаждения СП магнитной системы позволяет упростить систему криообеспечения СП гребного двигателя и криотурбогенератора, освобождает схему охлаждения от части оборудования, необходимого при использовании жидкостной схемы, позволяет уменьшить массогабаритные показатели и повышает надежность системы электродвижения в целом.

В результате проведенных работ по созданию универсального базового гребного сверхпроводникового двигателя для грузовых и пассажирских судов была достигнута поставленная цель — снижение массы и объема гребного двигателя и повышение его КПД. Масса сверхпроводникового двигателя по

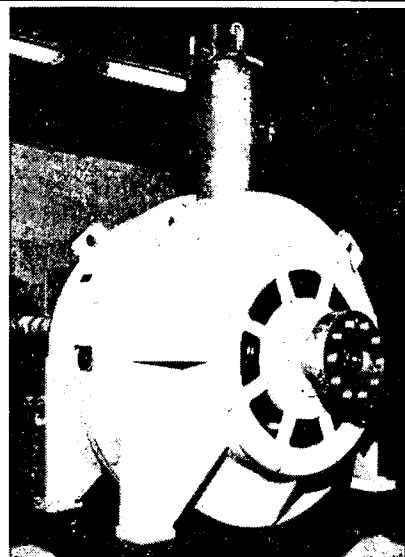


Рис.2. Вентильный сверхпроводниковый прототип гребного криодвигателя $P = 200$ кВт в условиях испытательного стенда

сравнению с традиционным гребным электродвигателем уменьшена примерно в два раза, объем — в 4,5 раза, а КПД криодвигателя повышен на 3%.

Все работы по проектированию сверхпроводникового гребного двигателя мощностью 10 МВт с СП индуктором для судовой системы электродвижения базируются на результатах исследования разработанных, изготовленных и испытанных прототипов таких СП машин.

Прототип судового криодвигателя переменного тока ($P = 200$ кВт) со сверхпроводниковым индуктором (рис.2) был испытан в системе со статическим преобразователем в условиях, обеспечивающих имитацию реверсивной работы гребного двигателя. Проведенные исследования легли в основу про-

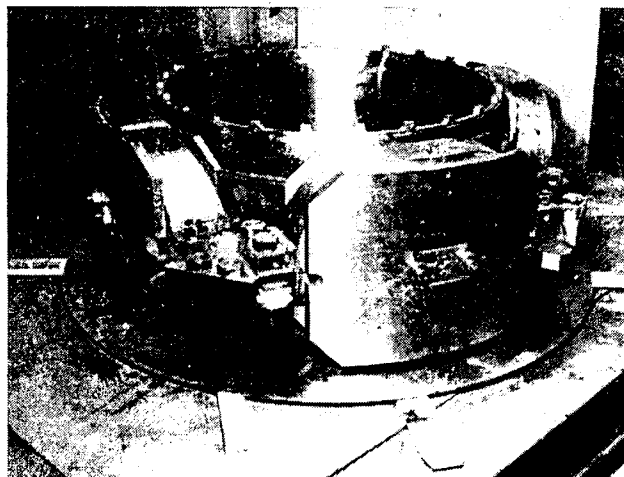


Рис.3. Сверхпроводниковая магнитная система гребного криодвигателя 200 кВт в процессе сборки

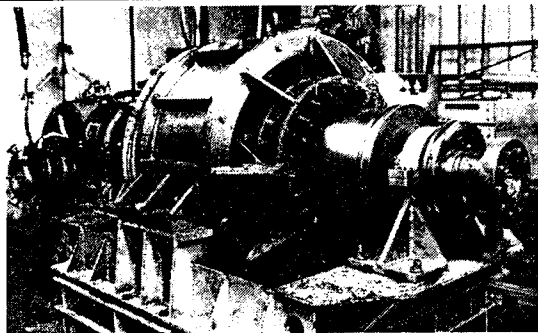


Рис.4. Сверхпроводниковый турбогенератор мощностью 1000 кВ·А для стендовой системы электродвижения

ектных работ создания базового образца криодвигателя СЭД. Сверхпроводниковая магнитная система прототипа гребного криодвигателя показана на рис.3. Магнитная система изготовлена из сверхпроводникового провода на основе ниобий-титана. Для обеспечения высокого уровня стабилизации магнитная система полностью бандажирована и полюса магнитной системы компаундированы специально созданным компаундом с нитридом бора, обеспечивающим высокую теплопроводность, сочетающуюся с необходимым уровнем электроизоляционных характеристик в условиях температур жидкого гелия (4,5 К).

Работы по созданию криотурбогенератора для судовой СЭД ограничились разработкой и изготовлением двух вариантов прототипа генератора мощностью 1 МВ·А. Один генератор имеет вращающуюся магнитную систему индуктора из ниобий-титанового

сверхпроводника с жидкостной системой охлаждения. Второй вариант криотурбогенератора имеет сверхпроводниковый индуктор со сверхпроводниковой магнитной системой из ниобий-олова, позволяющей работать при газовой схеме охлаждения с расходом крионосителя до 8 л/ч.

Генератор ГКС

Статор	Ферромагнитный
Обмотка возбуждения	Ниобий-олово
Мощность, МВ·А	1
Коэффициент мощности	0,25
Частота вращения, 1/мин	3000
Напряжение, В	230
Частота напряжения, Гц	50
Ток статора, А	2000
Ток возбуждения, А	200
Расход гелия, л/ч	8—15

Криотурбогенератор $P = 1$ МВ·А прошел полный цикл испытаний при различных режимах работы. Общий вид прототипа криотурбогенератора СЭД можно видеть на рис.4.

Список литературы

1. Барбашев Э.В., Горчинский Ю.Н. и др. Системы электродвижения с криодвигателем на транспортных судах//Энергетика и транспорт. М.: АН СССР, 1990. Т. 36. С.76—83.
2. Михайлов М.В., Семидел Л.И. Проектирование и постройка высокоэкономических судов с ограниченным экипажем//Судостроение за рубежом. 1986. № 7. С.51—56.
3. Рубинраут А.М., Матвейчук П.А., Розенкоп В.Д. Оптимальное проектирование криогенных электрических машин переменного тока//Электротехника. 1989. № 5. С.18—24.

АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВА

Создание систем автоматизированного проектирования в области технологической подготовки производства в НПП ВНИИЭМ

А.В.ГОРБУНОВ, А.П.КРУТИКОВА, В.А.ЖАРИНОВ, инженеры

Необходимость быстрого создания образцов новой техники, в том числе сложных изделий для работ в условиях космоса, сокращения сроков от начала разработки до выхода их с предприятия потребовали принципиально нового подхода к организации технической и технологической подготовки производства. В современных условиях данная задача решается созданием автоматизированных систем на базе персональной вычислительной техники и неременной унифи-

кацией и стандартизацией конструкторско-технологических элементов.

Уровень технической и технологической подготовки производства (ТПП) в НИИ, конструкторско-технологических бюро, на предприятиях, в производственных объединениях оценивается, как правило, следующими технико-экономическими показателями:

- сроками подготовки производства;
- качеством технологической подготовки производства;

- затратами на подготовку производства;
- повышением производительности труда в сфере основного производства и уровнем качества выпускаемой продукции.

Наиболее важной составляющей в ТПП является технологическая часть, которая также может быть оценена по показателям, представленным в таблице.

С целью сокращения времени и затрат на технологическую подготовку производства и, особенно, повышения ее качества проводились работы по созданию автоматизированных систем в области ТПП.

Для этого в 1986 г. был приобретен первый комплект персональной вычислительной техники РС/ХТ, которая на тот период была шагом вперед по сравнению с использованием для этих целей больших ЭВМ в части удобства ввода исходной информации и оперативности получения выходных документов. Однако ПЭВМ имели свои недостатки — недостаточные объем памяти (оперативной и внешней) и быстродействие.

Поэтому при проектировании автоматизированных систем технологической подготовки производства (АСУ—ТПП) целесообразно было разбить весь состав задач на группы (очереди) с целью поэтапной разработки интегрированной системы с последовательным внедрением работ, входящих в каждую группу, независимо от степени завершенности разработки целой системы.

Были определены три направления разработки САПР — ТПП:

- I — управление ТПП;
- II — САПР технологических процессов;
- III — САПР технологической оснастки.

Основные технико-экономические показатели технологической подготовки производства

Основной показатель	Объект оценки	
	ТПП изделия	ТПП предприятия
Трудоемкость изготовления изделия	+	+
Технологическая себестоимость изделия	+	+
Затраты на технологическую подготовку производства	+	+
Цикл технологической подготовки производства изделий	+	—
Коэффициент использования материалов	+	+
Показатель применения типовых технологических процессов	+	+
Показатель применения стандартной технологической оснастки	+	+

Работы были развернуты сразу по трем направлениям, и в каждом из них были определены первоочередные задачи.

Первые системы САПР по ТПП

На первом этапе в период с 1986 по 1992 гг. были разработаны и введены в эксплуатацию следующие автоматизированные системы:

1. Экспертное планирование ТПП [1].

Это была первая система САПР в области ТПП, позволяющая плановым службам определять работу на перспективу в области ТПП новых изделий. Был получен инструмент, с помощью которого можно прогнозировать — по каким техническим направлениям должна развиваться технологическая служба, с целью обеспечения качественного изготовления изделий точной электромеханики и космической техники.

2. САПР технологических процессов (САПР — ТП).

Системой были охвачены технологические процессы гальванических, лакокрасочных покрытий, сборки и монтажа радиоэлектронной аппаратуры, конструкционной пайки и сварки, выполнения намоточных и обмоточных работ и другие технологические переделы.

Созданию САПР предшествовал большой этап подготовительной работы, связанный с унификацией технологических процессов, созданием справочников операций, технологических переходов, унификации технологической оснастки.

Данные системы (некоторые с расчетом норм трудозатрат) были разработаны по алгоритму, блок-схема которого представлена на рис.1.

Автоматизация разработки технологических процессов позволила сократить время на разработку комплекта технологической документации в 4—5 раз и получить четкие, унифицированные ТП, а также одновременно тиражировать их в необходимом количестве для цехов опытного производства.

3. САПР измерительного инструмента (пробки, скобы, штихмассы и т.д.).

САПР "Инструмент" дала возможность и позволяет в настоящее время проектировать измерительный инструмент (пробки, скобы, размером от 2 до 500 мм, штихмассы плоские, размерами от 13 до 400 мм, а также шаблоны высоты и длины) в автоматическом режиме. Система работает по алгоритму, блок-схема которого приведена на рис.2, и позволяет при вводе только контролируемых размеров на конкретный инструмент производить:

- расчет исполнительных и габаритных размеров инструмента;

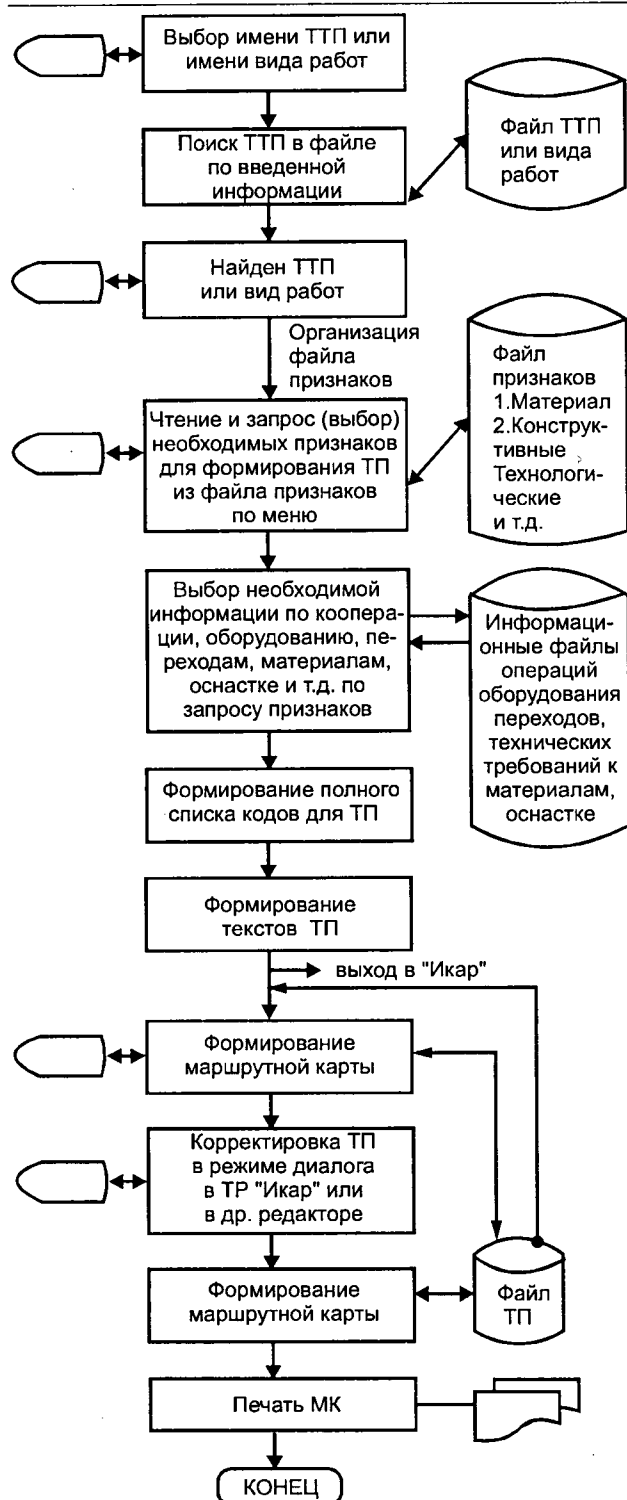


Рис.1. Блок-схема решения задачи формирования ТП.

- подбор деталей инструмента;
- получение чертежей измерительного инструмента и их модификаций для частных требований;
- формирование и вывод на печать технологии изготовления измерительного инструмента с нормированием трудозатрат;
- определение трудоемкости изготовления инструмента и вывод на печать сводных ведомостей трудозатрат.

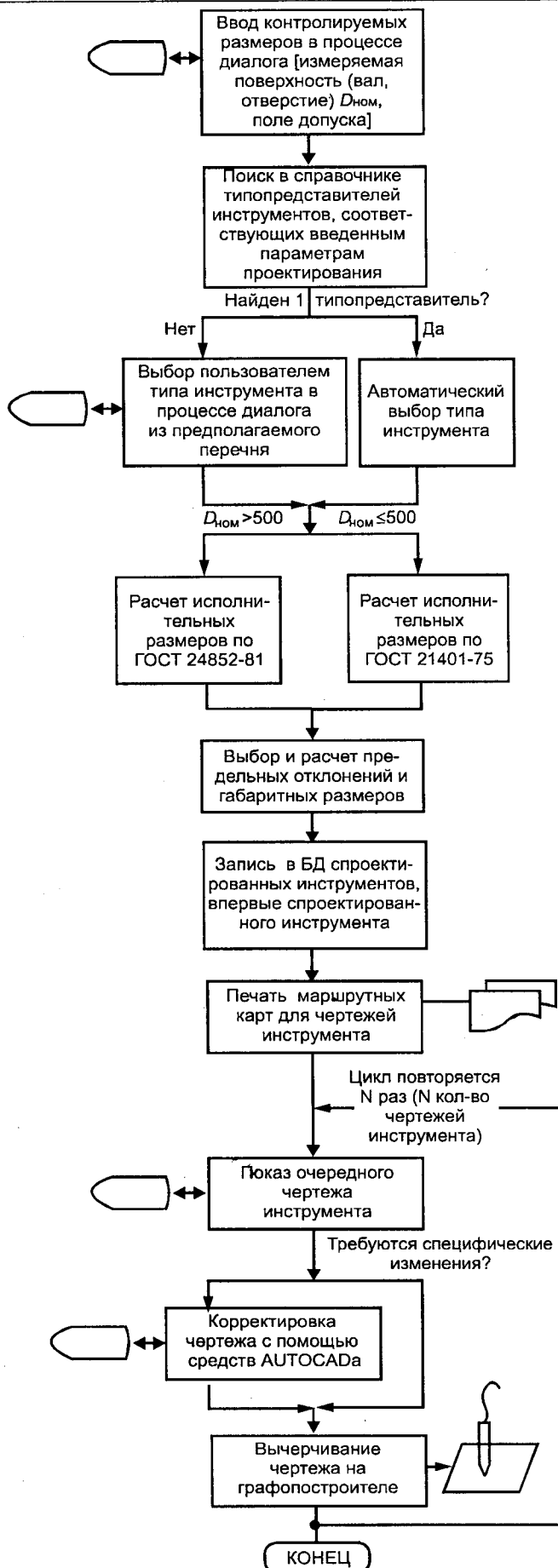


Рис.2. Функциональная схема САПР "ИНСТРУМЕНТ"

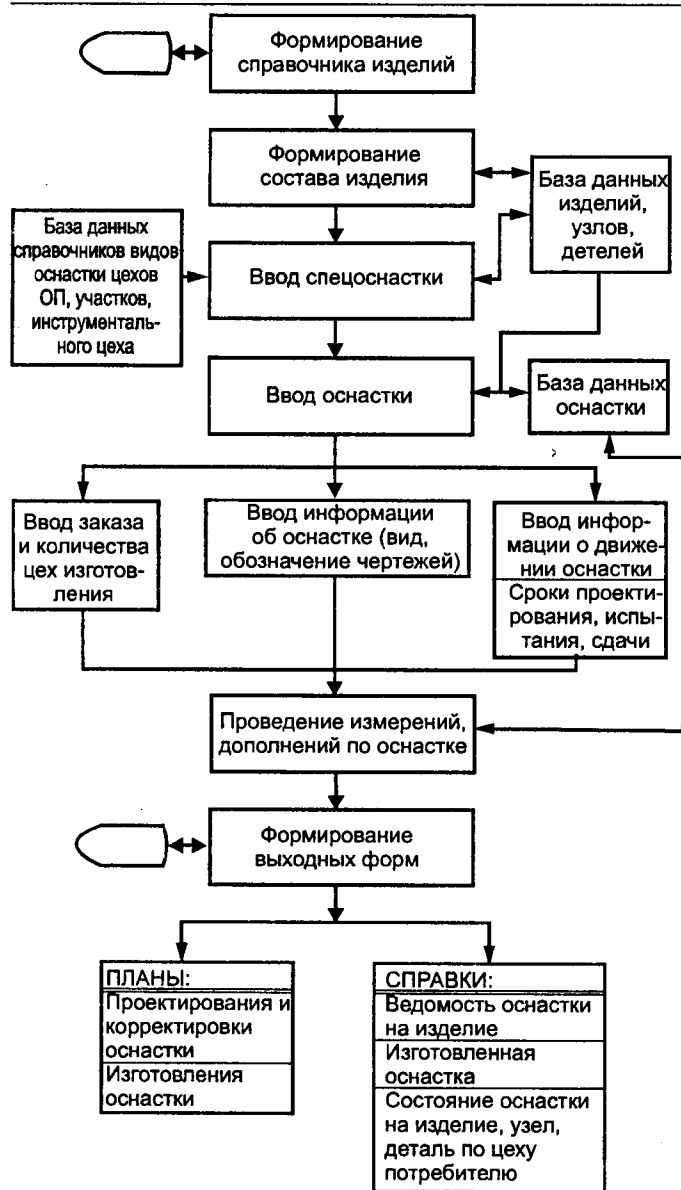


Рис.3. Блок-схема АСУ "Оснастка"

Система обеспечивает пользователям (не программистам) возможность:

- увеличивать и модифицировать номенклатуру инструментов при наличии в системе исполнительных размеров;
- определять условия выбора типопредставителей, чертежей и их параметров;
- определять условия и формулы расчета параметров;
- изменять по своему усмотрению формы выходных документов;

САПР "Инструмент" освободила конструкторов от рутинной работы, связанной с расчетом инструмента, позволила избежать субъективных ошибок, а самое главное, сократить в 4—5 раз время на разработку инструмента и обеспечить инструментальный цех полным комплектом технологической документации.

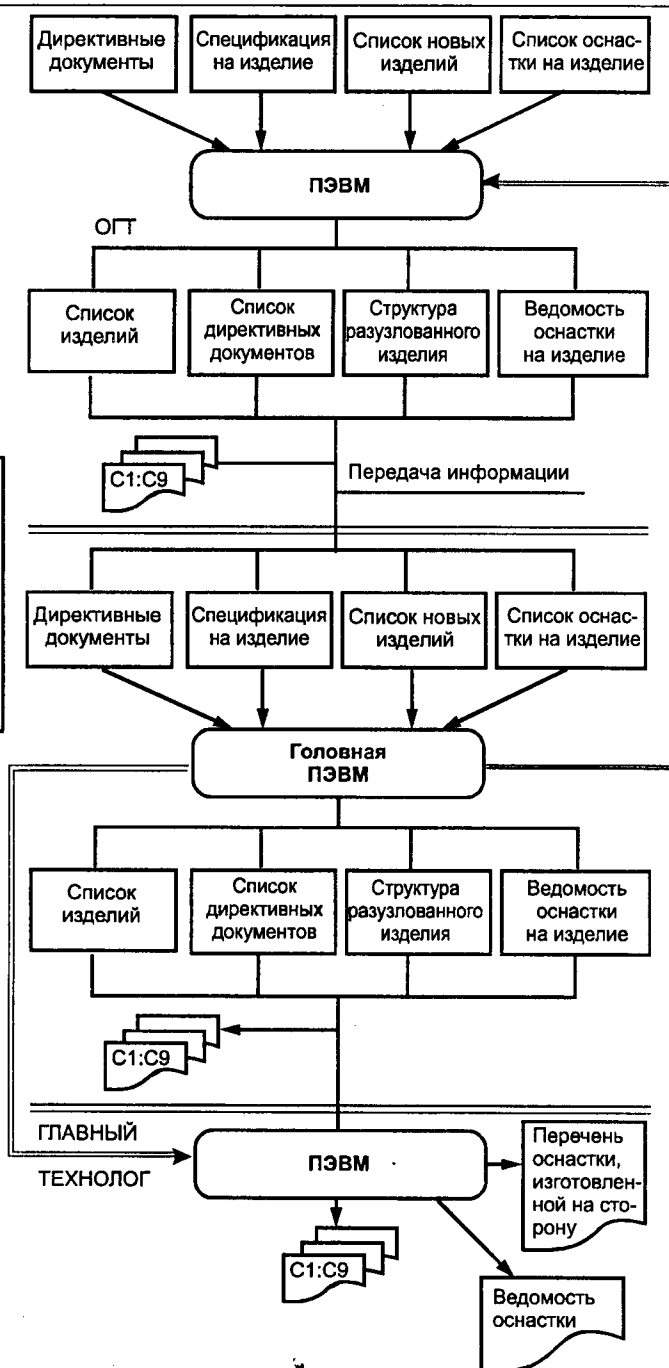


Рис.4. Работа системы САПР "ОСНАСТКА" в сети

На данном этапе были определены и выбраны более формализованные технологические задачи, чтобы в дальнейшем перейти к более сложным.

После внедрения систем в опытном производстве в НПП ВНИИЭМ была разработана и распространена за его пределы информация (статьи, доклады, информационные листки), которая заинтересовала смежные предприятия и предприятия других министерств в использовании САПР на своих предприятиях.

Некоторые из перечисленных систем внедрены на заводах "Знамя революции" и

"Держинец", "Прожектор" ДЗНВА (г. Дивногоorsk) и др.

С 1990 г. начался этап совместных разработок систем САПР.

Совместно с кафедрой режущего инструмента МТУ "Станкин" были разработаны системы автоматизированного проектирования зенкеров, концевых фрез и разверток.

По совместному техническому заданию с ДЗНВА была разработана и внедрена на ДЗНВА и Опытном заводе ВНИИЭМ сетевая автоматизированная система планирования и учета технологической оснастки — САПР "Оснастка", которая обеспечила необходимые службы оперативной и достоверной информацией о наличии специальной оснастки на готовящееся к производству изделие, сроках проектирования, корректировки, изготовления и передачи ее цеху потребителю.

Блок-схема внешней постановки задачи системы "Оснастка" приведена на рис.3, а распределенная сеть — на рис.4.

С внедрением САПР "Оснастка" была решена задача очень быстрого формирования плана изготовления оснастки для инструментального цеха по двум участкам: для участка приспособлений и участка формообразующей оснастки (штампы, прессформы), а также оперативного получения информации о состоянии оснастки на конкретное изделие, сборочную единицу конкретного изделия, по конкретному цеху—потребителю оснастки и т.д.

Наряду с указанными системами успешно эксплуатируется в основном производстве система планирования опытного производства. Система была разработана в 1993 г.

для планово-экономического и производственного отделов. Она позволяет оперативно разрабатывать планы для производственных подразделений, исходя из задач научных отделов и серийных заказов на месяц, квартал и год. Система учитывает объемы незавершенного производства и циклы изготовления продукции по каждому изделию.

Создание на предприятии различных целевых САПР по технологической подготовке производства позволяет:

- получать унифицированные технические и технологические документы, исключив появление ошибок исполнителей при ручной подготовке;

- в сжатые сроки готовить производство;

- оперативно готовить комплексные документы по планированию, материалам, в том числе по материалам на группу изделий на план года;

- значительно снизить потери, возникающие в процессе подготовки технической документации и, самое главное, стабильно сохранять это качество при последующих запусках изделий в производство.

Список литературы

1. Крутикова Л.П., Сальковский Ф.М., Поворовский Л.Е. и др. САПР "Экспертное планирование ТПП"// Тр.ВНИИЭМ. 1989. Т.90

2. Амиров Ю.Д., Проскуряков В.А. Организационно-методические основы оценки технико-экономического уровня технологической подготовки производства// Тр.ВНИИМАН. Вып. XXIII.

3. Карберри П.Р. Персональные компьютеры в автоматизированном проектировании. М.: Машиностроение, 1989.

4. Петров А.В., Чернявский В.М. Проблемы и принципы создания САПР. Кн.1. М.: Высшая школа, 1990.

Автоматизированная система управления технической подготовкой производства

Л.П.КРУТИКОВА, В.А.ЖАРИНОВ, Ю.Н.ТЮРИН, М.Н.КАМИНСКИЙ, инженеры

Одним из путей повышения эффективности, качества и сокращения сроков по технической и технологической подготовке производства (ТПП) является внедрение автоматизированных систем (АС).

Известно значительное количество разработок в области АС ТПП. Это разработки Минского завода по производству металло-режущего оборудования (Оргстанкипром), ГАЗ (г.Нижний Новгород), интегрированная система автоматизации конструкторско-технологической подготовки и планирования производства «Спектр» НПП «Синта» (г. С.-Петербург) и др.

С недавнего времени на мировом рынке стали появляться системы управления производством, разработанные представительными фирмами, например, система YES — УПП (фирма «Форс»), системы ВААН, Трайтон и др. Это полностью интегрированные системы, поддерживающие все направления деятельности, включая финансы, проектно-конструкторские работы, материально-техническое снабжение, производство, сбыт, сервисное обслуживание и т.д. Однако большая разница в организации производства заводов с различными типами производств и особенно опытных, находящихся в составе науч-

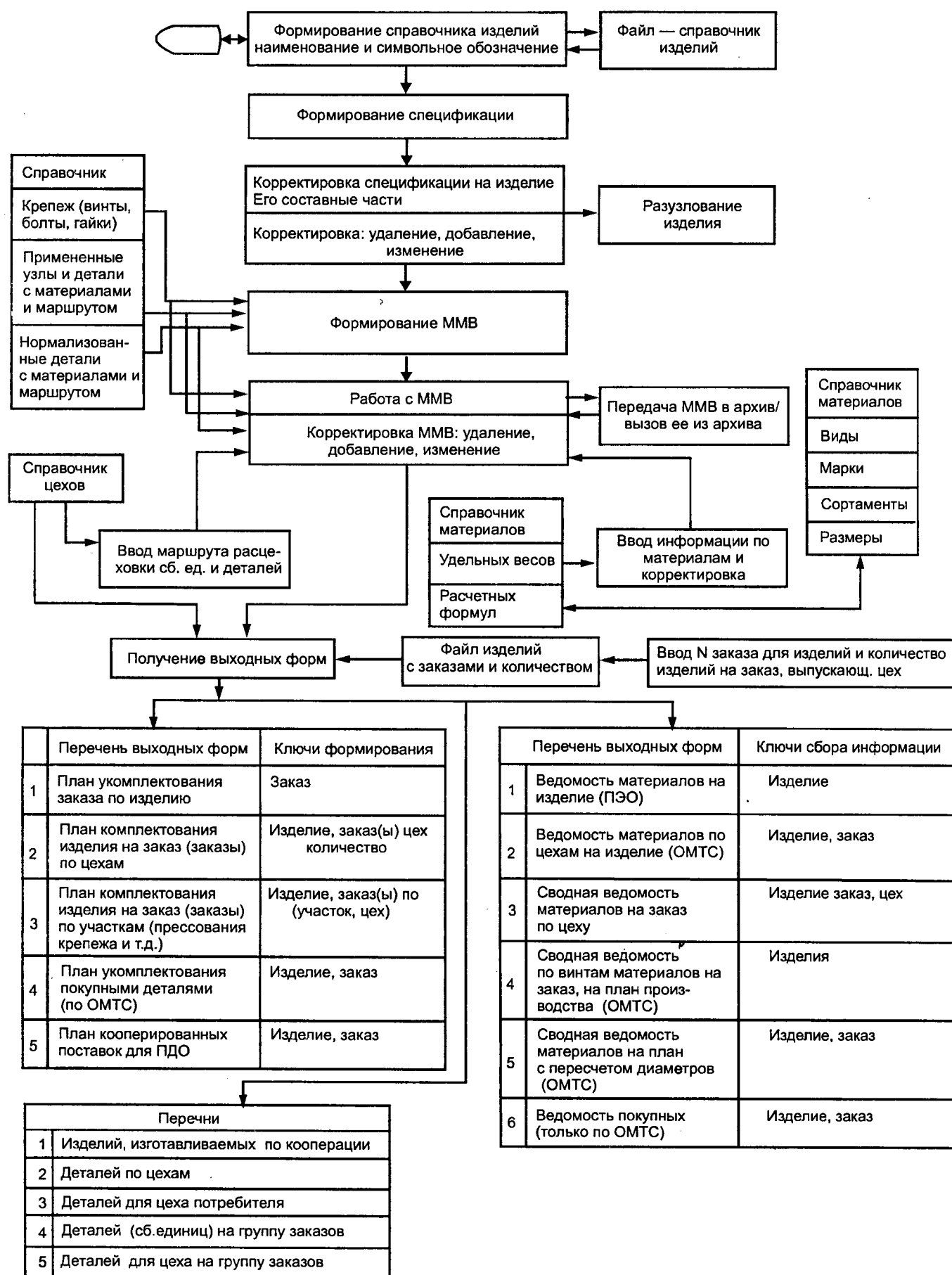


Рис.1. Укрупненный алгоритм автоматизированной системы управления технической подготовкой производства.

но-исследовательских институтов, не позволяет использовать перечисленные отечественные и зарубежные корпоративные системы без серьезной их адаптации.

Как правило, во всех зарубежных системах используются собственные инструментальные средства проектирования приложений и настройки параметров, учитывающих особенности предприятий.

Жесткость этих систем требует перестройки производственных и экономических бизнес-процессов предприятия под требования системы.

Высокая стоимость этих пакетов, программ, еще большая стоимость адаптации к производственным условиям делают их труднодоступными для малых предприятий.

К этому времени в отделе Главного технолога НПП ВНИИЭМ лабораторией САПР были разработаны и внедрены системы автоматизированного проектирования технологических процессов и технологической оснастки. Накоплен достаточный опыт разработки сетевых автоматизированных систем.

Основные факторы, потребовавшие скорейшей разработки системы:

1. Необходимость постоянно перерабатывать большое количество разобренных сопутствующих документов (СТП, ГОСТ, инструкции, нормали) и т.д.

2. Постоянное сокращение сроков на подготовку производства.

3. Необходимость разработки большого количества сопроводительной документации.

4. Отсутствие достаточного количества высококвалифицированного и опытного персонала, вследствие чего неизбежность появления ошибок при разработке документации.

5. Отсутствие сводных документов для ОМТС, которые могли бы заранее определять необходимую потребность в приобретении материалов.

Для разработки АСУ ТПП была определена идеология системы, взаимосвязь подразделений и подготовлена блок-схема внешней архитектуры системы (рис.1).

Подготовка информации для формирования базы данных

АСУ ТПП предназначена для автоматизированного управления технической подготовкой производства.

Объектом автоматизации является документооборот между подразделениями, входящими в систему технической подготовки производства.

Созданию системы предшествовал большой объем работ по подготовке базы данных, в которую вошли следующие справочники:

1. База данных материалов:
 - справочники типов материалов;
 - справочники групп материалов;
 - справочники марок материалов;
 - справочники сортamentов материалов;
 - справочники размеров всех необходимых видов сортamentов;
 - справочники таблиц на допуски, припуски и т.д., а также формулы расчета весов заготовок.

В базу данных введены все, разрешенные к применению на предприятии, материалы от черных, цветных металлов, проводов, химии и т.п. до материалов упаковки.

Вся гамма материалов делится (условно) на основные и вспомогательные.

2. Справочники нормализованных сборочных единиц и деталей, входящие в стандарты предприятия.

3. Справочные таблицы по крепежным деталям, широко применяемым на предприятии.

4. Справочники производственных подразделений (цеха, участки) и другая информация.

Каждое изделие, входящее в базу данных и вводимое АСУ ТПП, — это самостоятельная плановая единица, для которой разрабатывается конкретная материально-маршрутная ведомость (ММВ) по спецификации изделия. Основным документом для формирования ММВ является комплект конструкторской документации.

Все детали, сборочные единицы изделий в системе классифицируются следующим образом:

примененные — детали, применявшиеся в сборочной единице какого-либо изделия;

унифицированные — нормализованные детали (СТП предприятия);

индивидуальные — детали, применяемые только в данном изделии;

крепежные детали.

Для каждой детали (сборки) указывается маршрут изготовления, представляющий собой перечень цехов, в которых изготавливается данная сборочная единица или деталь, а также информация о материале, из которого изготавливается деталь, материалах покрытий и др.

Работа с системой

В системе предусмотрены два режима ввода исходной информации по спецификации: интерактивный и с гибкого носителя из системы автоматизированного проектирования конструкторской документации (если таковая имеется).

Система обеспечивает определенный сервис для пользователя при составлении спе-

цификации. При вводе в спецификацию примененных или нормализованных деталей и сборочных единиц достаточно ввести только обозначение детали или сборочной единицы с указанием принадлежности (прим., стп.), чтобы при формировании ММВ получить полную развернутую информацию для материалов и маршрута.

Кроме того, система предусматривает при создании ММВ после ввода обозначения примененной или нормализованной сборочной единицы и выбора ее принадлежности полную раскрываемость всего узла, т.е. автоматически будут записаны в ММВ все входящие в сборочную единицу детали, сборки и вспомогательные материалы и по каждой детали будет полная информация по материалам и маршруту изготовления.

Для материалов вводится следующая информация: наименование, марка материала, сортament, размер заготовки (с учетом припусков за заготовку в соответствии с таблицами), масса заготовки на одну деталь, на группу деталей.

В АСУ ТПП ввод данной информации осуществляется в интерактивном режиме путем выбора материалов из базы данных, которая сформирована по схеме жесткой взаимосвязи в цепочке: группа материалов-подгруппа материалов — марка материала — сортament материала — размер заготовки. Размер заготовки вводится вручную. Данный алгоритм универсален и в нем учтены все особенности всех разновидностей материалов, которые используются в опытном производстве. Такой же принцип используется при составлении ведомости материалов на других предприятиях.

Для ввода крепежных деталей был проведен анализ группирования записей обозначений крепежных деталей (винтов, болтов, гаек, шурупов и т.д.) в соответствии с их ГОСТ. На основании этого анализа были разработаны схемы записи обозначений для групп крепежных деталей, которые позволили обеспечить жесткую связь введенной информации с базой данных по крепежу, применяемому на предприятии и изготавливаемому в цехах опытного производства.

Такие схемы разработаны для ввода всех необходимых крепежных деталей с учетом ГОСТ. Поэтому при вводе крепежных деталей выбираются соответствующий вид и ГОСТ, а затем необходимо только в каждое поле ввести соответствующую информацию. Например, ВИНТ В.М5-6g 8-4A016 ГОСТ 17474-80 необходимо записать по схеме, приведенной на рис.2. Затем в ММВ этот кре-

Исполнение	В
Обозначение	М
Диаметр	5
Шаг	—
Длина	8
Класс точности	6g
Класс прочности	4,8H
Покрытие	016

Рис.2. Схема записи обозначения винтов и болтов

пеж автоматически будет раскрыт по материалу, размерам заготовки и маршруту изготовления.

Все описанное позволяет достаточно быстро вводить любую спецификацию и оперативно получать ММВ и проводить соответствующие корректировки.

После того, как ММВ сформирована, можно получить спецификацию всего изделия в развернутом виде.

Разработка документов по технической подготовке производства

На основании плана выпуска изделий и сформированной ММВ система АСУ ТПП позволяет формировать в автоматическом режиме большой объем документов:

- ведомости материалов;
- ведомости покупных изделий (частично);
- ведомости изделий, изготавливаемых по кооперации, необходимые плановому отделу для расчета цены изделия;
- различные ведомости материалов для ОМТС, которые учитывают потребность материалов на заказ, на план выпуска изделий по году, в том числе, на различную группу изделий.

Кроме того, с помощью системы формируются планы для цехов Опытного завода по выпуску изделий, а также для планово-диспетчерского отдела.

Плановая информация для цехов может быть сформирована как на заказ, так и на группу заказов для однотипных изделий.

Внедрение АСУ ТПП позволило:

- сократить время на подготовку документов по технической подготовке производства в 3—4 раза;
- оперативно готовить комплексные документы по материалам для планово-экономического отдела, ОМТС и цехов Опытного завода, составлять развернутые планы выпуска продукции для цехов Опытного производства и планово-диспетчерского отдела;
- исключить ошибки по несогласованности документов и, что самое главное, все

службы, участвующие в технической подготовке производства, стали получать полную информацию по изделиям, что повысило качество контроля выполнения плана;

— повысить качество технической документации и стабильно сохранять это качество при последующих запусках изделий в производство.

Развитие системы

На основе разработанной системы АСУ ТПП планируется разработать подсистему автоматизированного подетального нормирования трудозатрат. В развитие системы АСУ ТПП были разработаны и введены в опытную эксплуатацию автоматизированные системы расчета калькуляции (САПР «Калькуляция») и автоматизированная система управления сбытом продукции (АСУ «Сбыт»).

Все эти системы успешно работают и имеют возможность обмена DBF файлами с системой АСУ ТПП на уровне гибких носителей (по материалам, перечню изделий, кооперированным поставкам и др.).

Надежность работы этих локальных систем и возможность их программной взаимосвязи дают толчок к созданию на их основе интегрированной автоматизированной сетевой системы по технической подготовке производства, которая могла бы впоследствии стать составной частью большой интегрированной системы на предприятии, начиная от разработки и заканчивая сбытом.

Фундаментальной основой в этой сети может стать АСУ ТПП, которая позволяет оперативно готовить все необходимые технические документы во все службы, связанные с запуском изделий в производство, начиная от планово-экономического отдела, ОМТС, цехов опытного производства, ПДО и кончая сбытом.

В этой сети коммуникация может осуществляться через центральный сервер-координатор, который ассоциирует и управляет информацией, приходящей из различных подразделений (ОГТ, ПЭО, ПДО, СБЫТ).

Благодаря интегрированной системе, мощная база данных ее будет позволять осуществлять гарантированный контроль всего цикла технической подготовки производства, изготовления и выпуска продукции.

Список литературы

1. Митрофанов С.П. и др. Применение ЭВМ в технологической подготовке серийного производства. М.: Машиностроение, 1981.
2. Андреев А.Р. и др. Управление производством новых изделий. Новосибирск: Наука, 1980.
3. Петров А.В., Черненко В.М. Проблемы и принципы создания САПР. Кн.1. М.: Высшая школа, 1990.
4. Ивлев В.М., Попова Т.В. Реорганизация и автоматизация систем управления предприятием // Экономика и производство. 1998. №11.
5. Кренкель Э.Т., Коган А.Г., Тараторин А.М. Персональные ЭВМ в инженерной практике. М.: Радио и связь. 1989.

МАТЕРИАЛЫ И ИСПЫТАНИЯ

Разработка новых электротехнических материалов — важное направление работ во ВНИИЭМ

С.А.СТОМА, В.В.СЕРГЕЕВ, Г.П.САФОНОВ

Отличительный признак деятельности НПП ВНИИЭМ — ее политехничность. Наиболее фундаментальной ветвью в этом отношении является электромеханика широкого профиля, включающая разработку и производство микромашин, электромашин для судостроения, машин с магнитным подвесом — гироудинов, а также машин для других областей специальной техники (например, космической техники), а также электрооборудования для атомной энергетики, в частности СУЗ.

Одним из важных секретов успеха в этих областях являются, с одной стороны, соб-

ственные достижения с момента создания института в области разработки электротехнических материалов на базе достижения в современном материаловедении, с другой, — повышенное внимание к этому направлению при разработке новых наукоемких направлений работ. При этом ставилась задача получения материалов, обеспечивающих экстремальные энергетические характеристики в сочетании с технологичностью их применения и изготовления. Это позволило использовать в разработках лабораторные образцы и опытно-промышленные партии материалов и реализовать серийное производство материалов,

конкурентоспособных на мировом рынке как по свойствам, так и по цене.

Весь комплекс работ в области создания новых электротехнических материалов, проводимых во ВНИИЭМ, можно разделить на два основных направления: электроизоляционные материалы и создание композиционных антифрикционных, магнитомягких, конструкционных и магнитных материалов, в том числе на базе металло-порошковой металлургии.

Успехи в области электроизоляционной техники связаны с умением максимально удовлетворить требования конструкторов путем поиска новых, в основном полимерных, материалов и использованием собственных оригинальных путей разработки.

Благодаря такому подходу были созданы новые пленочные электроизоляционные материалы и пропиточные составы.

Наиболее эффективным оказалось использование современных ориентированных полиэтилентерефталатных, полиарилатных и полиимидных пленок, широко используемых в качестве электроизоляционных. Удачное сочетание их друг с другом в композициях благодаря склейке и сварке позволило получить механически прочные материалы — изофлекс, имидофлекс, лавитерм с высоким уровнем электроизоляционных и эксплуатационных характеристик, с разрушающим напряжением при растяжении до 180 МПа, относительным удлинением до 120%, удельным объемным сопротивлением до 10^{14} Ом·м, электрической прочностью до 150 кВ/мм.

Некоторые из этих материалов внедрены в производство и выпускаются в количестве более 100 т.

Благодаря высоким показателям эти материалы позволили создать системы изоляции, имеющие повышенный ресурс 50 тыс.ч и работающие в космосе, например в гиродинах, на АЭС, в тропических условиях, морских машинах, в компрессорах, холодильниках, нефтепогружных насосах и ряде других.

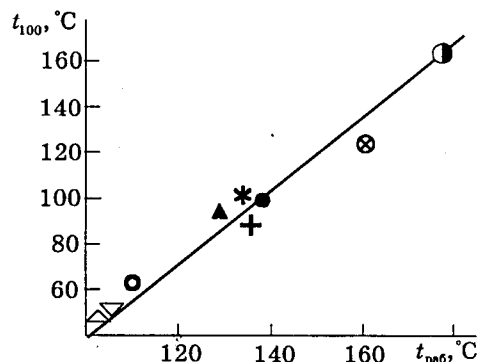
Электроизоляционный материал лавитерм позволяет автоматизировать процесс пазоизоляции.

Широко известны также пропиточные электроизоляционные компаунды без растворителя марки КП, выпускаемые российской промышленностью в значительном количестве. Наиболее широко используются в настоящее время компаунды КП-34, КП-50, КП-55. Успех этой разработки основан на использовании комплекса низко-вязких (30—80 с при 20°C по воронке ВЗ-246) олигомерных

реакционно-способных соединений, дающих после отверждения термостойкие сетчатые продукты с необходимыми технологическими и эксплуатационными характеристиками. Благодаря подбору составов с хорошей совместимостью между собственными компонентами и компонентами электроизоляционных систем (эмалированными проводами, пленочной изоляцией и т.д.) пропиточные компаунды указанных марок быстро полимеризуются (40—60 с при 125°C) и длительно эксплуатируются при температурах до 180°C. Быстрота полимеризации позволяет использовать компаунды на автоматических пропиточных установках, позволяющих через 20—30 мин пропитанное изделие допускать на сборку. Существенным достоинством этих компаундов является их хорошая экологическая чистота, так как в них отсутствуют растворители и токсичные компоненты.

Разработан также комплекс пропиточно-заливочных составов без растворителя на базе эпоксидных олигомеров, таких как эпоксидно-каучуковые композиции марок ЭК-5, эпоксидно-полиарилатные составы и ряд других, которые также освоены промышленностью.

Удельное объемное сопротивление заполимеризованных составов достигает $1 \cdot 10^{13}$ Ом·м



Корреляция между температурой, при которой гидролиз пленок проходит за 10^3 ч, и рабочей температурой (срок службы $40 \cdot 10^3$ ч) этих же пленок и композиционных материалов на их основе:

● — полиарилатные (на основе дифенилолпропана) пленки и полиэтилентерефталатные пленки; ⊗ — пленки из ароматического полиамида (фенилона); ○ — полиимидные пленки; ▽△ — полиарилатные пленки на основе фенолфталеина; ▲ — модифицированные диизоцианатом полиэтилентерефталатные и полиарилатные (на основе дефенилолпропана) пленки; ● — эпоксидно-полиарилатные композиции; * — электроизоляционные композиции на основе полиимидных и полиэтилентерефталатных пленок; + — композиция на основе фенолоновых и полиэтилентерефталатных пленок.

(незначительно снижается после выдержки в воде), электрическая прочность до 70 кВ/мм.

Разработка комплекса материалов в области электроизоляционной техники потребовала разработки ряда оригинальных (запатентованных) методик испытания материалов, например, по стойкости к сдвиговым нагрузкам, прочностных испытаний тонких пленок и их композиций, стойкости к масло-фреоновым средам, стойкости и гидролизу. При этом получена универсальная корреляция между стойкостью к гидролизу и рабочими температурами для ряда электроизоляционных материалов (рисунок), позволяющая сравнительно просто оценить рабочие температуры новых материалов, значения которых требуют больших временных и энергетических затрат.

Одним из важных результатов работы, сделанной во ВНИИЭМ, является создание оригинального перечня материалов, рекомендованных для использования в космической технике, в том числе для объектов "Ресурс", "Электро", МКС "Альфа" с ресурсом не менее 10 лет.

В этот перечень вошли также композиционные, в том числе антифрикционные материалы, а также постоянные магниты, разработке которых во ВНИИЭМ всегда уделялось значительное внимание.

Длительное время институт был головным в отрасли по проблеме электрометаллокерамики, внося существенный вклад в эту область науки. Были разработаны электрические контакты на основе систем $\text{Ag}-\text{CdO}$, AgNi с обычной и токодисперсной структурой для низковольтной аппаратуры вместо серебряных с комплексом более высоких свойств по износостойкости. Разработаны оксидно-барьерные магниты вместо $\text{Fe}-\text{Ni}-\text{Al}$, позволяющие экономить цветные металлы, магнитомягкие магнитопроводы систем переменного тока.

Пары трения бронзографитового состава деталей специального назначения, а также детали сухого трения на основе дисульфидов металлов были использованы для эксплуатации в экстремальных условиях, например космических. Предполагается использование таких решений и для МКС "Альфа".

Во ВНИИЭМ были разработаны постоян-

ные магниты на основе редкоземельных сплавов, в том числе неодима, самария, этому способствовали серьезные фундаментальные исследования физики и технологии этих систем. На их основе удалось получить магниты с $H_{\text{см}} = 4000$ кА/м и остаточной индукцией до 1,25 Тл. Магниты на основе неодима при этом могут эксплуатироваться при температуре 100—150°C, а на основе самария — до 200°C и быть изготовлены в виде призм, цилиндров, колец, секторов.

Учитывая повышенную твердость постоянных магнитов, параллельно с их созданием, разрабатывались методы их обработки, а также способы создания магнитных систем.

Разработаны технологические процессы сборки многополюсных магнитных систем, исследованы различные способы соединения магнитов с магнитами и магнитов с магнитопроводами, в том числе с помощью клеевых составов, пайки, диффузионной сварки.

Разработанные электротехнические материалы практически все внедрены в серийное или опытное производство или использованы для уникальных изделий, например, при создании сверхпроводящих систем. Технология изготовления материалов, еще не внедренных в серийное производство, довольно проста и позволяет надеяться на их перспективность в будущем.

Список литературы

1. Сафонов Г.П., Каплунов И.Я., Соколовская Р.П. и др. Электроизоляционные системы с высокой надежностью для электрооборудования СУЗ АЭС. Выбор компонентов, расчет параметров надежности//Труды ВНИИЭМ. 1990. Т.94. С.48—66.
2. Альтман В.А., Гутцайт Б.Г., Кривицкий Б.М. и др. О возможности реализации эффекта аномально-низкого трения//Труды ВНИИЭМ. 1991. Т.96. С.97—100.
3. Сафонов Г.П., Каплунов И.Я., Казымов У.Г. Создание композиционных электроизоляционных материалов, пропиточных и заливочных составов на основе полимерных диэлектриков и полимеризационноспособных олигомеров//Труды ВНИИЭМ. 1991. Т.96. С.5—20.
4. Каплунов И.Я., Сальковский Ф.М., Сафонов Г.П./Современные материалы и технологии//Электротехника. 1991. № 10. С.55—59.
5. Сафонов Г.П. Состояние разработки электроизоляционных материалов, покрытий, подшипников из ВАМК для увеличения срока активного существования космических аппаратов//Труды ВНИИЭМ. 1997. Т.97. С.132—139.

Электролюминесцентные индикаторы — новые экономичные изделия будущего

Д.В.ДУХОПЕЛЬНИКОВ, Ф.М.САЛЬКОВСКИЙ, Г.П.САФОНОВ, В.Я.СУШКОВ

Освещены конструктивные особенности и методы герметизации электролюминесцентных приборов.

Электролюминесцентный индикатор (ЭЛИ) представляет собой плоский конденсатор, одной из обкладок которого является плоский электрод, а другой — электрически разделенные металлические площадки (мозаичный электрод). Между электродами размещается тонкопленочная люминесцентная структура, как правило, на основе сульфида цинка, легированного специальными активаторами. При приложении к электродам индикатора переменного напряжения в люминесцентном слое возникает световое излучение. Электролюминесцентный индикатор (ЭЛИ) представляет собой плоский конденсатор, одной из обкладок которого является плоский электрод, а другой — электрически разделенные металлические площадки (мозаичный электрод). Между электродами размещается тонкопленочная люминесцентная структура, как правило, на основе сульфида цинка, легированного специальными активаторами. При приложении к электродам индикатора переменного напряжения в люминесцентном слое возникает световое излучение. В зависимости от примененного активатора получают различные цвета свечения: зеленый, желтый, голубой, красный.

В настоящее время существуют две различных технологии изготовления ЭЛИ: лаковая и тонкопленочная.

В лаковой технологии структура ЭЛИ получается последовательным нанесением лаковых слоев с соответствующими наполнителями. Иногда применяется отжиг с целью удаления лакового связующего. ЭЛИ изготавливаются как на жесткой основе (силикатное стекло), так и на гибкой (полиэтилентерефталатной или полиимидной пленке). Практически все выпускаемые на гибкой основе индикаторы изготовлены лаковой технологией. Характерные толщины слоев порядка 10—50 мкм. Типовые параметры ЭЛИ, изготовленных лаковой технологией: яркость 50—150 кд/м², срок службы 1000—5000 ч.

Ускоренный рост электролюминесцентной техники в последнее время связан с общей проблемой построения систем управления, которая стоит сейчас перед всей современной техникой. Дело в том, что даже самая совершенная система управления не может

обойтись без помощи человека. Но именно из-за сложности ситуации человек не может тратить много времени на перевод показаний приборов в привычные для него понятия, так как ему некогда будет обдумать решение. Необходимо подавать оператору информацию в наиболее удобном для него виде. Эту задачу и помогает решить электролюминесценция. ЭЛИ, главным образом, предназначены для создания систем отображения и преобразователей изображения. С помощью электролюминесценции можно создать неподвижные или движущиеся светящиеся изображения любой формы, сохранять их сколь угодно долго или, напротив, быстро заменять другими. Можно изменять цвет этих изображений и их яркость.

Кроме систем отображения ЭЛИ могут найти применение в следующих отраслях:

- логические схемы;
- линии передачи данных;
- персональные компьютеры военного назначения;
- медицинское оборудование;
- плоские дисплеи;
- экраны в телевизорах бытового назначения;
- нестандартные системы освещения;
- аварийное освещение на воздушном и наземном транспорте;
- рекламные панели нового поколения;
- дорожные знаки и указатели;
- системы освещения и указатели для применения в чрезвычайных ситуациях.

В настоящее время уже создан целый ряд электролюминесцентных устройств, нашедших широкое применение. Многие устройства являются пока лабораторными образцами, часть находится на стадии поисковых работ.

В конце 50-х годов предполагалось, что порошковые электролюминесцентные панели на переменном токе, называемые также холодными источниками света, будут широко использоваться для общего освещения в авиации и в автомобилях, однако этого не случилось. Автомобильная промышленность обходилась без ЭЛ ламп до появления в 70-х годах гибких пластиковых толстопленочных ЭЛ ламп, работающих на переменном токе,

которые являлись относительно новым типом электрорлюминесцентного материала.

Типичная конструкция такой лампы представляет из себя плоский элемент. В этой лампе люминофорный слой заключен между алюминиевой фольгой и прозрачным электродом, причем слоистый полимер осуществляет изоляцию и защиту от влаги. Шина обеспечивает равномерное распределение тока в больших лампах. Для хорошей влагонепроницаемости заштамповки вокруг краев панели необходимо, чтобы края вокруг каждого отверстия и отсеченные пары в лампе были неосвещенными (технологическая зона). Для изготовления удобно, если это расстояние до края будет 3 мм. Концевые устройства могут быть размещены в любой удобной точке по периферии панели.

Толщина готовой панели не более 0,8 мм, но лампа обладает достаточной прочностью, чтобы изгибаться в относительно больших радиусах. Формы ламп ограничиваются лишь собственным воображением и производственным оборудованием.

Благодаря набору параметров пластиковые лампы приобрели особую популярность в военной авиации. Они очень тонкие (типичные гибкие пластиковые структуры имеют толщину от 0,5 до 1,0 мм), потребляют мало энергии (типичное значение потребляемой мощности от источника 115 В переменного тока с частотой 60 Гц составляет 0,02 Вт/дм² и 0,14 Вт/дм² при частоте 400 Гц).

Для стабилизации яркости ЭЛ источников света применяют инверторы (преобразователи постоянного тока в переменный), например фирмы "Endicott Research Group" и другие автоматические регуляторы напряжения и частоты.

Учитывая перечисленные особенности ЭЛ ламп, можно определять область применения их довольно широко: военная техника, промышленность, торговля, бытовая техника. Лампы нашли свое применение для различного рода декоративных целей, устройств отображения массовой информации, в контрольно-измерительных приборах, телефонах, часах, приборных циферблатах, шкалах, переключателях и клавиатурах. Основная же область применения — тыльная подсветка жидкокристаллических индикаторов (ЖКИ) для усиления их контраста.

В настоящее время для производства гибких ЭЛИ применяются два варианта технологии изготовления панелей.

В качестве основы в первом варианте используется прозрачная органическая пленка полимера, покрытая прозрачным токоп-

роводящим слоем. Во втором варианте в качестве основы берется тонкая металлическая (алюминиевая) фольга.

Для разработки оптимального технологического процесса прорабатывались оба варианта технологических направлений. При этом основными критериями оценки пригодности технологий гибких ЭЛИ являлись следующие показатели:

— для изготовления ЭЛИ требуется использовать вакуумно-плазменные методы формирования функциональных слоев;

— технологический процесс должен быть построен таким образом, чтобы максимальное количество операций изготовления ЭЛИ проводилось в едином технологическом цикле.

Для изготовления опытных образцов гибких ЭЛИ на полимерной пленке для проверки работоспособности функциональных слоев использовался технологический процесс с поэтапным расширением применения вакуумно-плазменных методов.

Методика получения работоспособных ЭЛИ заключалась в постепенной замене функциональных слоев, изготовленных с помощью лаковой технологии, слоями, полученными вакуумно-плазменными методами.

Конструктивно гибкая ЭЛИ представляет собой тонкую монолитную многослойную структуру, образованную основой, функциональными слоями, включая активный, защитными и герметизирующими покрытиями.

Технологический процесс изготовления гибкой ЭЛИ на прозрачной полимерной основе состоит из следующих основных операций:

- подготовка технологической оснастки;
- нанесение прозрачного проводящего покрытия;
- проверка электрических и оптических характеристик пленки;
- нанесение покрытия прозрачного изолятора;
- проверка изолятора на электрическую прочность;
- нанесение покрытия активного слоя;
- нанесение покрытия контактных площадок;
- нанесение покрытия отражающего проводящего слоя;
- присоединение выводов;
- герметизация ЭЛИ методом горячего прессования;
- контроль параметров готового элемента.

Основной причиной деградации ЭЛИ является проникновение в слой, содержащий люминофор, влаги. Уже небольшое количество влаги, попадающей через капилляры

или межмолекулярные пространства, приводит к появлению черных точек, пятен на люминесцирующем экране у торца панели, которые далее распространяются по всему полю, вызывает местные пробои и катастрофическое разрушение панелей.

Поэтому вопросам герметизации панелей всегда уделялось большое внимание. В случае ЭЛИ с использованием стекол основное внимание обращалось на герметизацию торцов, так как герметизация тыльной части не составляла труда и обычно решалась за счет применения таких трудно проникаемых для влаги материалов, как стекло, металлическая фольга, стеклотекстолит или, наконец, толстый слой эпоксидной смолы. Торцы оставались в любых вариантах герметизации слабым местом, так как через поверхность стеклогерметизирующий материал в результате деградации адгезионных связей адгезива или слабой адгезии проникает влага.

Таким образом, можно сформулировать следующие требования для герметизирующих материалов гибких ЭЛИ: низкая влагопроницаемость, высокая адгезия к люминофорному слою, эластичность, оптическая прозрачность. Обычно для этих целей применяют полимерные пленки и адгезивы, с помощью которых эти пленки приклеиваются к люминофорному слою.

Перспективные оптически прозрачные пленочные материалы для герметизации гибких ЭЛИ

Для герметизации гибких ЭЛИ применяются в настоящее время в основном полимерные пленки: поливинилхлоридные [1], полиэтиленовые [2,3], полиэтилентерефталатные [4—6], фторопластовые [7]. Поскольку основным параметром, определяющим пригодность материала для герметизации ЭЛИ, является его низкая влагопроницаемость, в таблице приведены сравнительные характеристики этого параметра для некоторых пленочных материалов, здесь же приведены прочностные характеристики и их цена.

Из таблицы видно, что наиболее низкая влагопроницаемость у фторопластовой пленки, затем по степени возрастания влагопроницаемости идут пленки: полиэтиленовая, полиэтилентерефталатная. По прочностным характеристикам пленки можно выстроить в ряд (по мере убывания прочности): полиэтилентерефталатная, поликарбонатная, полиимидная, поливинилхлоридная, полиэтиленовая, фторопластовая, т.е. наиболее прочной, а следовательно, менее подверженной механическим воздействиям является полиэтилентерефталатная пленка.

По стоимости пленки можно расположить в ряд (по мере убывания): полиимидную, фторопластовую, поликарбонатную, полиэтилентерефталатную, полиэтиленовую, поливинилхлоридную.

Наибольшее распространение для герметизации ЭЛИ нашли полиэтилентерефталатные пленки, что связано с их высокими механическими свойствами, широким промышленным производством и сравнительно низкой стоимостью. Другие пленки применяются значительно реже либо из-за низких механических свойств (например, полиэтиленовая пленка), либо из-за высокой цены (полиимидная пленка), либо из-за плохих адгезионных свойств (фторопластовая пленка).

В таблице приведена также для сравнения влагопроницаемость пленки кварцевого стекла, которая на 3 порядка меньше самой лучшей фторопластовой пленки. Тонкие кварцевые пленки (толщиной 20—50 мкм) можно изготавливать методом вытяжки из расплава. Применяются они в основном в электронной промышленности. Пленки довольно гибкие и могли бы быть применены для герметизации гибких ЭЛИ. Препятствием для этого является их чрезвычайная хрупкость. Однако этот недостаток может быть существенно снижен, если на поверхность таких пленок наносить тонкие полимерные слои [8].

Параметры пленочных материалов для герметизации гибких ЭЛП

Материал	Влагопроницаемость, K_{H20} , м ⁴ /с	Прочность на растяжение, МПа	Сравнительная цена за 1 кг
Полиамидная пленка	$2 \cdot 10^{-15}$	160	400
Полиэтиленовая пленка	$3 \cdot 10^{-16}$	100	8
Фторопластовая пленка	$5 \cdot 10^{-17}$	80	300
Поливинилхлоридная пленка	$3 \cdot 10^{-15}$	120	5
Полиэтилентерефталатная пленка	$6 \cdot 10^{-14}$	180	10
Поликарбонатная пленка	$6 \cdot 10^{-16}$	170	100
Кварцевая пленка	$2 \cdot 10^{-20}$	110 (изгиб)	200

Из других способов герметизации ЭЛИ применяют иногда лакирование эластичным полимером. Это менее технологично, чем применение пленки.

Таким образом, наиболее перспективными материалами для герметизации гибких ЭЛИ по комплексу свойств для изделий общей техники являются: фторопластовые, поликарбонатные и кварцевые пленки.

Список литературы

1. Пат. 2774004 США. Гибкая электролюминесцентная панель. 11.12.1956.

2. Пат. 63-76461. Япония. Тонкопленочная электролюминесцентная панель. 06.10.1989.

3. Заявка 2222484 Англия. Электролюминесцентная панель и способ ее изготовления. 07.03.1990.

4. Пат. 994680 Англия. Усовершенствованное электролюминесцентное устройство. 10.06.1965.

5. Пат. 4857416 США. Конструкция инфракрасной электролюминесцентной панели. 15.08.1989.

6. Пат. 4853594 США. Тонкопленочная электролюминесцентная панель. 01.08.1989.

7. Пат. 3315111 США. Материалы для изготовления гибких и прозрачных электродов 13.04.1967.

8. Воронин И.В. Исследование способов получения и применения пленочных материалов для подложек ИС и окон выводов СВЧ энергии. Отчет N272-7415. Исток. 1985.

Выбор магнитно-мягкого материала для магнитопроводов малошумного реакторного оборудования

С.Ю.КУЗНЕЧИКОВ, канд.техн.наук, Н.М.ШАМРАЙ, инж.

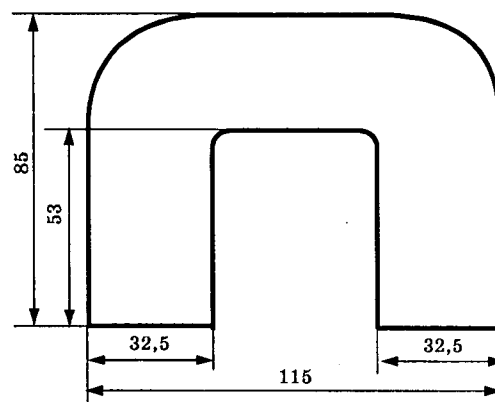
В последнее время для изготовления магнитопроводов успешно были использованы композиционные магнитно-мягкие материалы (КМММ) [1] на основе промышленных ферромагнетиков с полимерными связующими. В зависимости от технологии изготовления удельное электрическое сопротивление таких материалов может достигать 1000 Ом·см. Повышенное значение удельного электрического сопротивления КМММ оказывает благоприятное влияние на их магнитные свойства, снижает уровень магнитострикции, полные удельные магнитные потери и увеличивает глубину проникновения в них переменного магнитного поля. Это приводит к тому, что глубина промагничивания таких материалов практически не зависит от геометрических размеров магнитопроводов и частоты магнитного поля [2].

По уровню магнитных свойств КМММ занимают промежуточное положение между электротехническими сталями и магнитодиэлектриками. Еще более высокие свойства имеют композиционные анизотропные материалы, изготовленные из частиц в форме чешуек. "Чешуйчатые" КМММ благодаря магнитной ориентации частиц отличаются более высокой магнитной проницаемостью в направлении продольной оси частиц. Магнитопроводы из "чешуйчатого" ферромагнетика с толщиной чешуек порядка 25 мкм, электрически изолированных друг от друга и расположенных преимущественно в направлении продольной оси, при частоте 50 Гц лишь немного уступают по свой-

ствам шихтованным сердечникам из Fe—Si сплавов. Вместе с тем, при высоких частотах, порядка 10 кГц, "чешуйчатые" КМММ по сравнению с листовыми имеют существенные преимущества, так как обладают:

- незначительными потерями на вихревые токи;
- малошумностью;
- высокой индукцией насыщения и незначительной остаточной индукцией.

В данной работе было проведено сравнительное изучение магнитных свойств цельнопрессованных КМММ. Для испытаний изготавливались опытные образцы: кольцевые $\varnothing 35 \times \varnothing 25 \times 5$ мм и П-образные (рисунок) из КМММ. Опытные образцы получали путем смешивания с порошкообразным связующим порошка ферромагнетика: распыленного и "чешуйчатого", полученного из



П-образный сердечник

распыленного по оригинальной методике, последующего холодного прессования опытных образцов — сердечников, нагрева сердечников до температуры полимеризации связующего. После измерения магнитных характеристик сердечники термообработывали при температуре 500°C в течение 1 ч. Количество связующего обеспечило достаточный уровень магнитной проницаемости, удельного электрического сопротивления и физико-механических характеристик.

Магнитные характеристики опытных кольцевых образцов при $f = 50$ Гц магнитного поля: зависимость амплитудных значений индукции $B_{\max}$ от амплитудного значения напряженности магнитного поля $H_{\max}$ $B_m = f(H_m)$ и зависимость полных удельных потерь от амплитудного значения индукции $P = f(B_m)$ определялась по методике измерения магнитных свойств магнитопроводов на стандартной установке типа У-5057. Измерение магнитных характеристик на П-образных магнитопроводах из КМММ проводились на стенде в схеме реактора типа СРОВОК-63.

Результаты сравнительных магнитных испытаний кольцевых образцов из КМММ представлены в табл.1, из которой видно, что наиболее высокий уровень магнитных свойств имеют КМММ на основе "чешуйчатого" ферромагнетика, материалы № 3, 4. Магнитная индукция материала № 4 в полях 0,8—1,6 кА/м превышает индукцию любого другого КМММ более чем в 1,5 раза, а в полях 3,2—4,0 кА/м — на 40—60%. Значения полных удельных потерь для КМММ № 4 при $B = 1$ Тл на 25% меньше (табл.1), чем у любого другого КМММ, что обусловлено анизотропией свойств, полученной за счет чешуйчатой формы частиц, и минимальными внутренними структурными напряжениями.

Таблица 1

Магнитные характеристики кольцевых образцов из различных КМММ

№	В, Тл, при H, кА/м						P1, 0/50 Вт/кг	0,5/200**
	0,8	1,6	2,4	3,2	4,0	4,8		
1	0,18	0,38	0,55	0,65	0,75	0,82	11,8	—
2*	0,23	0,48	0,62	0,75	0,83	0,9	9,5	—
3	0,33	0,63	0,89	0,99	1,08	1,16	9,2	4×10
4*	0,64	0,95	1,13	1,22	1,31	1,36	8,3	—

* — термообработаны при 500°C 1 ч.
 ** — 0,5/200 — магнитострикция при индукции 0,5 Тл и частоте магнитного поля 200 Гц.

Проведение термической обработки позволяет увеличить максимальную магнитную проницаемость для КМММ № 2 на 20%, а для КМММ № 4 более чем в 1,5 раза и снизить полные удельные потери $P_{1,0/50}$ для КМММ № 2 на 20%, а для КМММ № 4 — на 10% за счет снятия внутренних механических напряжений.

Результаты сравнительных испытаний П-образных магнитопроводов из рассматриваемых КМММ представлены в табл.2. Для магнитных полей с $f = 500$ Гц наибольшей магнитной проницаемостью обладает КМММ № 3. Кроме того, только материал № 3 из рассматриваемых КМММ имеет допустимую температуру разогрева магнитопровода в установившемся режиме, полученную за счет анизотропии свойств "чешуйчатого" Fe.

Таблица 2

Результаты испытаний П-образных образцов из различных КМММ

№	B, Тл	Масса, г	T — температура t — время разогрева
1	— —	1500	T>100°C; t=15 мин
2*	— —	1500	T>100°C; t=10 мин
3	0,57 315	750	T=93°C; установившийся режим
4*	— —	750	T>100°C; t=7 мин

* — термообработаны при T = 500°C, 1 ч

Сопоставив данные магнитных измерений, приведенные в табл.1, можно заключить, что наиболее оптимальными свойствами для магнитопроводов маломощного реакторного оборудования обладает КМММ № 4 на основе "чешуйчатого" ферромагнетика.

Установлено, что термообработка магнитопроводов позволяет повысить магнитную проницаемость и снизить полные удельные потери (табл.1), однако испытания П-образных сердечников (табл.2) показали, что термообработанные образцы № 4 быстро разогреваются. Эффект быстрого разогрева объясняется значительным выгоранием связующего, поэтому для проведения термообработки магнитопроводов для маломощного реакторного оборудования необходимо отработать режимы отжига: температуру и время нагрева или подобрать более термостойкое связующее.

Тем не менее, сравнительно большая магнитная проницаемость анизотропных магнитно-мягких материалов дает возможность использовать магнитопроводы меньшего сечения, т.е. уменьшить их габаритные раз-

меры, а следовательно, и габариты реакторного оборудования.

Проведенные исследования и полученные результаты дают основание рекомендовать КМММ на основе "чешуйчатого" ферромагнетика как перспективный материал для создания магнитных систем малошумного реакторного оборудования.

Список литературы

1. Кузнециков С.Ю. Магнитопроводы из композиционных магнитомягких материалов // Электротехника. 1994. № 8. С. 54.
2. Kordecki A., Weglinski B. Development prospects for dielectromagnetics in magnetic cores with alternating magnetic flux // Powder metallurgy. 1996. Vol. 34, № 2. P. 87—88.

Методология для определения закона надежности усталостных испытаний

Э.М.БАСКИН, канд. техн. наук

Сколько угодно высокое качество элементов и системы в целом не может предохранить их от постепенного старения (износа). В процессе эксплуатации и хранения в металлах, пластмассах и других материалах накапливаются необратимые изменения, которые нарушают прочность, координацию и взаимодействие частей и в конечном итоге вызывают отказы. Эти изменения порождаются коррозией, износом, накоплением деформаций и усталости, диффузией одного материала в другой и т.д. Таким образом, вариации времени безотказной работы вызывают вариации качества изготовления, условий эксплуатации и процессами старения.

Известно много типов функций распределений, которые были предложены в качестве законов надежности для описания усталостной долговечности [1—7]. Среди этих распределений имеются такие, как распределение Вейбулла, гамма-распределение, логнормальное, нормальное и экспоненциальное распределения, распределение Биринбаума-Сандерса, распределение Бернштейна, логарифмическое распределение Вейбулла, логарифмическое гамма-распределение. Между тем, ошибка в выборе распределения может привести к большим ошибкам как при оценке вероятности безотказной работы, так и при оценке долговечности, как хорошо показано в [1].

Существуют два подхода для определения закона надежности усталостных испытаний. Один подход основывается на принятой физической модели отказов, второй — на математических моделях, полученных в результате статистической обработки результатов усталостных испытаний. К первому подходу относятся [1, 5, 7], к второму — [4, 6]. Для проверки правильности выбора физической или математической модели отказов используются различные критерии согласия или вероятностные бумаги.

Наибольшее распространение для описания усталостных испытаний получили распределение Вейбулла и логнормальное распределение. В [4] дан обзор многих работ, относящихся к этим распределениям. Вместе с тем, в [4] показано, что эти распределения неудовлетворительно описывают усталостные испытания и сделана неудачная попытка уточнить данные распределения помощью параметра сдвига.

В [8, 9] был предложен класс распределений, являющийся фактически общим законом надежности (ОЗН). Под ОЗН будем понимать класс распределений, позволяющий описать с определенной точностью большинство известных в теории надежности функций распределений. Плотность распределения ОЗН имеет следующий вид:

$$f(x) \cong f_{\alpha, \lambda}(x) = \lambda(\lambda x)^{\alpha} e^{-\lambda x} \sum_{k=0}^{\infty} c_k L_k^{(\alpha)}(x); \quad (1)$$

$$L_k^{(\alpha)}(x) = \sum_{i=0}^k C_{k+\alpha}^{k-i} (-\lambda x)^i / i!; \quad m_k = \int_0^{\infty} f(x) x^k dx;$$

$$c_k = 1/\Gamma(1+\alpha) C_{k+\alpha}^{\alpha} \sum_{i=0}^k C_{k+\alpha}^{k-i} (-\lambda)^i m_i / i!,$$

где λ — параметр масштаба ($\lambda > 0$); α — параметр формы ($\alpha > -1$); m_1, m_2 — первый и второй моменты распределения.

Для оценки параметров используется метод наименьших квадратов

$$W^2 = \min_{\alpha, \lambda, m_1, m_2} 1/n \sum_{i=1}^n [F_{\alpha, \lambda}(t_i) - F_e(t_i)]^2, \quad (2)$$

где $F_{\alpha, \lambda}(t_e) = \int_0^{t_e} f_{\alpha, \lambda}(\tau) d\tau$; $F_e(t_e)$ — эмпирическая функция распределения (ФР); $n = 100$

$$t_i = t_{\max} i/n; \quad t_{\max} = t_N.$$

Фактически W^2 — это почти критерий согласия Крамера — фон Мизеса. Вероятность безотказной работы равна

$$P_{\alpha,\lambda}(x) = 1 - F_{\alpha,\lambda}(x) = 1 - \sum_{k=0}^2 b_k \int_0^{\lambda x} x^{k+\alpha} e^{-x} dx;$$

$$b_0 = 1/\Gamma(1+\alpha)[3 + 5/2\alpha + \alpha^2/2 - \lambda m_1(3+\alpha) + \lambda^2 m_2/2];$$

$$b_1 = -1/\Gamma(1+\alpha)[3 + \alpha - \lambda m_1(5+2\alpha)/(1+\alpha) + \lambda^2 m_2/(1+\alpha)];$$

$$b_2 = 1/2\Gamma(1+\alpha)[1 - 2\lambda m_1/(1+\alpha) + \lambda^2 m_2/(1+\alpha)/(2+\alpha)].$$

Откуда интенсивность отказов

$$\lambda_{\alpha,\lambda}(x) = f_{\alpha,\lambda}(x)/P_{\alpha,\lambda}(x).$$

Существует пакет программ "Ravik3", позволяющий работать с данным ОЗН. Все перечисленные типы распределений и их смеси входят в данный ОЗН, причем каждому распределению $F_{\alpha,\lambda}(x)$, входящему в ОЗН ($F_{\alpha,\lambda}(x) \in S$), взаимно однозначно соответствует точка (вектор) в пространстве безразмерных параметров Π :

$$F_{\alpha,\lambda}(x) \in S \leftrightarrow (\alpha, \lambda m_1, v) \in \Pi,$$

где v — коэффициент вариации распределения $F_{\alpha,\lambda}(x)$.

Итак, если мы выравниваем результаты испытаний с помощью ОЗН, то получаем конкретное распределение $F_{\alpha,\lambda}(x) \in S$, которому соответствует вектор $(\alpha, \lambda, m_1, v) \in \Pi$.

Преимуществом ОЗН является то, что при обработке различного рода статистических данных нам нет необходимости задаваться каким-либо конкретным распределением и мы получаем довольно точные оценки различных характеристик надежности, и особенно, поведения интенсивности отказов. Фактически данный ОЗН является точным измерительным прибором, позволяющим без многих ограничений, присущих отдельным типам распределений, определять характеристики надежности изделий. Более того, на основе данного ОЗН можно построить новый общий критерий согласия ALMV, являющийся намного мощнее существующих критериев согласия.

Примеры некоторых усталостных испытаний

Рассмотрим несколько примеров усталостных испытаний, чтобы понять присущие им закономерности поведения функций распределений и интенсивностей отказов.

Пример 1. В [1, табл.3], используя физическую модель, обосновывается, что распределение стойкости резцов описывается гам-

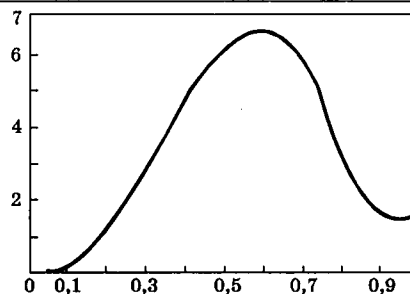


Рис.1. Интенсивность отказов резцов (ось абсцисс — $t/130$ мин, ось ординат — $\lambda(t)/130$ мин)

ма-распределением, причем срок службы резца определяется предельно допустимым износом. На рис.1 показано поведение интенсивности отказов резцов, при этом точка (вектор), характеризующая данное распределение, имеет следующие оценки параметров: ($\alpha = 5$, $\lambda m_1 = 4,618$, $v = 0,5164$).

Как следует из поведения $\lambda(t)$, это распределение логнормального типа. Используя критерий согласия ALMV [10], проверяем две альтернативные гипотезы:

1. Распределение Вейбулла ($\alpha_T = 2,4787$, $\lambda m_{1T} = 5,0463$, $v_T = 0,5164$)

$$b^2 = 14,82 \geq K_{0,05} = 7,814.$$

Статистика b^2 характеризует отклонение полученной в результате выравнивания результатов испытаний точки $(\alpha, \lambda m_1, v)$ от точки $(\alpha_T, \lambda m_{1T}, v_T)$, характеризующей гипотетическое распределение. $K_{0,05}$ является критическим квантилем трехмерного нормального распределения с уровнем значимости $\gamma = 0,05$.

Так как $b^2 \geq K_{0,05}$, то гипотеза распределения Вейбулла отвергается с уровнем значимости $\gamma = 0,05$.

2. Логнормальное распределение ($\alpha_T = 4,4708$, $\lambda m_{1T} = 5,0908$, $v_T = 0,5164$)

$$b^2 = 2,34 \leq 7,814.$$

Итак, логнормальное распределение не отвергается.

Согласно [1] логнормальное распределение присуще изделиям, обладающим свойством "упрочнения", ибо имеется участок $\lambda(t)$, при котором интенсивность отказов убывает после того, как достигла максимума.

Итак, стойкость резцов обладает свойством упрочнения, которое отсутствует при гамма-распределении.

Пример 2. В [5] приведены усталостные испытания образцов из алюминия 6061-Т6, подверженных максимальному напряжению на цикл $\sigma_m = 213$ МПа. На рис.2 показано поведение интенсивности отказов образцов, при этом точка, характеризующая данные испытания, имеет следующие оценки пара-

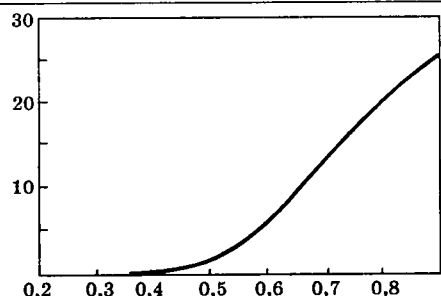


Рис.2. Интенсивность отказов образцов из алюминия 6061-T6 (ось абсцисс — $t/212 \cdot 10^3$ цикл., ось ординат — $\lambda(t)/212 \cdot 10^3$ цикл.)

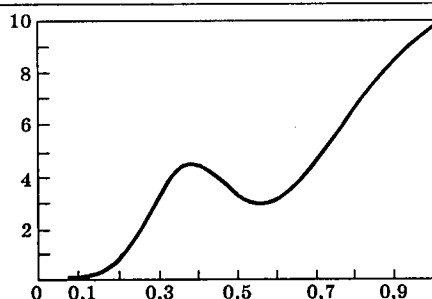


Рис.3. Интенсивность отказов образцов из сплава В-95 (ось абсцисс — $t/2, 79 \cdot 10^5$ цикл., ось ординат — $\lambda(t)/2, 79 \cdot 10^5$ цикл.)

метров: ($\alpha = 42,5$, $\lambda m_1 = 47,88$, $\nu = 0,1574$).

Как следует из поведения $\lambda(t)$, данное распределение стареющего типа, ибо у него интенсивность отказов монотонно растет.

С помощью критерия ALMV проверим три гипотезы:

1. Распределение Вейбулла ($\alpha_T = 49,5$, $\lambda m_{1T} = 55,58$, $\nu_T = 0,1586$)

$$b^2 = 3,422 \leq 7,814.$$

Распределение Вейбулла не отвергается.

2. Логнормальное распределение (ЛН) ($\alpha_T = 44,25$, $\lambda m_{1T} = 43,08$, $\nu_T = 0,1576$)

$$b^2 = 14,82 \leq 7,814.$$

Следовательно, ЛН отвергается.

3. Нормальное распределение (НР) ($\alpha_T = 46,25$, $\lambda m_{1T} = 50,77$, $\nu_T = 0,1563$)

$$b^2 = 10,21 \geq 7,814.$$

Итак, НР отвергается.

Пример 3. В [1, табл.4] приведены результаты испытаний на усталость образцов из сплава марки В-95 при $\sigma_m = 300$ МПа. На рис.3 показано поведение интенсивности отказов данных образцов, при этом было получено, что $\alpha = 10$, $\lambda m_1 = 10,73$, $\nu = 0,4465$.

Как видно из рис.3, $\lambda(t)$ является смесью двух распределений: логнормального типа и стареющего.

Последний пример является наиболее общим случаем усталостных испытаний.

Рассмотренные примеры испытаний на усталость характеризуются различным поведением интенсивности отказов. Связано это прежде всего с различной нагрузкой, приложенной к данным изделиям. Так, в первом примере нагрузка была сравнительно небольшой, во втором — очень большой и в третьем — средней. Еще одним косвенным показателем нагрузки является коэффициент вариации наработки до отказа изделия. Чем он меньше, тем больше нагрузка и наоборот.

Анализ большого числа усталостных испытаний с помощью пакета "Ravik3" позволяет сделать следующие выводы:

— изделия, подверженные усталостным испытаниям, обладают с определенной вероятностью свойством упрочнения; значение данной вероятности зависит от нагрузки, которая приложена к изделию: чем больше нагрузка, тем меньше вероятность того, что изделие будет упрочняться и, наоборот; так как свойство упрочнения описывается ЛН, то доля ЛН в смеси распределений будем обозначать $E_{\text{лн}}$;

— значение $E_{\text{лн}}$ зависит как от качества производства, так и, особенно, от нагрузки; $E_{\text{лн}}$ при росте нагрузки стремится к нулю, а при уменьшении нагрузки — к единице.

Таким образом, при росте нагрузки распределение отказов становится стареющим, а при уменьшении нагрузки — логнормальным.

Именно этим объясняется громадное число работ, посвященных исследованию усталостных испытаний, в которых доказывалось, что имеет место или распределение Вейбулла или ЛН. Ибо часть этих испытаний была проведена при сравнительно больших нагрузках, а другая часть — при малых.

Поэтому в общем случае функция распределения отказов для усталостных испытаний имеет вид смеси распределений:

$$F_{\text{см}}(t) = E_{\text{лн}} F_{\text{лн}}(t) + (1 - E_{\text{лн}}) F_{\text{ст}}(t). \quad (3)$$

Для доказательства данной гипотезы рассмотрим ускоренные испытания на усталость различных изделий при разных нагрузках и исследуем поведение $E_{\text{лн}}$ как функцию нагрузки.

При этом, для того, чтобы определить оценку $E_{\text{лн}}$, будем в дальнейшем использовать следующий подход.

При обработке результатов испытаний пакетом "Ravik3" мы получаем вектор $(\alpha, \lambda m_1, \nu)$. Данный вектор однозначно определяет $F_{\alpha, \lambda}(t)$. Для того, чтобы доказать, что

имеет место распределение $F_{см}(t)$ в форме (3), необходимо попытаться найти такие оценки $E_{лн}$, $F_{лн}(t)$, $F_{ст}(t)$, которые бы давали в результате приближения другой вектор $(\alpha_{см}, \lambda m_{1см}, v_{см})$, близкий к исходному, т.е. надо найти такие оценки $E_{лн}$, $F_{лн}(t)$, $F_{ст}(t)$, чтобы $F_{\alpha, \lambda}(t) \cong F_{см}(t)$. Так как $F_{лн}(t)$ и $F_{ст}(t) = F_{Вл}(t)$ (где приняли в качестве стареющего распределения распределение Вейбулла) определяются каждый двумя параметрами, то необходимо найти оценки пяти параметров. Для этого минимизируется следующее выражение:

$$\eta = \min_{E, A, B, C, D} \{1\alpha - \alpha_{см}1, 1\lambda m_1 - \lambda m_{1см}1, 1v - v_{см}1\}, (4)$$

где A, B — параметры ЛН ($A = m_1$, $B = v_{лн}$); C, D — параметры распределения Вейбулла (C — параметр масштаба, D — параметр формы).

Фактически мы привели новый метод оценки пяти параметров для функции распределения смеси $F_{см}(t)$, используя свойства общего закона надежности. Естественно, данная процедура также основывается на пакете "Ravik3".

Исследование испытаний на контактную усталость подшипников качения

Во многих справочниках по подшипникам качения (ПК) [10—12] и ряде работ [6, 14] принято, что распределением отказов ПК является распределение Вейбулла с показателем формы, равным 10/9, т.е. коэффициент вариации наработки до отказа больше единицы. Между тем, в [6, 14] показывается, что v может принимать значения в диапазоне от 0,2 до 1,5. Чтобы объяснить данное противоречие исследуем ряд испытаний на контактную усталость с помощью данного пакета "Ravik3".

В [13, 14] приведены результаты ускоренных испытаний ПК на жидкой смазке на контактную усталость при различных значениях нагрузок: σ_m (максимальное контактное напряжение) и $f_{ц}$ (частота повторных

напряжений, испытываемых в любой точке дорожки качения кольца).

В табл.1. приведены результаты выравнивания результатов испытаний силовых ПК.

Как видно из табл.1, коэффициент вариации долговечности ПК изменяется в диапазоне от 0,54 до 0,909.

На рис.4,5 показано поведение $\lambda(t)$ для ПК экспериментов 4 и 5 из табл.1. Видно, что характер поведения $\lambda(t)$ для этих случаев резко отличается.

Если в эксперименте 4 логнормальная составляющая является большой, то в 5 ее почти нет. И, соответственно, применение критерия согласия ALMV с уровнем значимости $\gamma = 0,05$ показывает, что для экспериментов 1—4 проходит как распределение Вейбулла, так и ЛН, а для эксперимента 5 — только распределение Вейбулла, что и следовало ожидать. Ибо в этом случае нагрузки на ПК достаточно велики, на что также

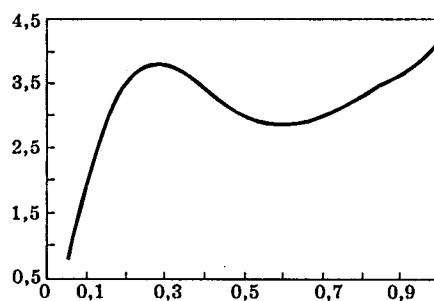


Рис.4. Интенсивность отказов ПК307 (ось абсцисс — $t/2026$ ч, ось ординат — $\lambda(t)/2026$ ч)

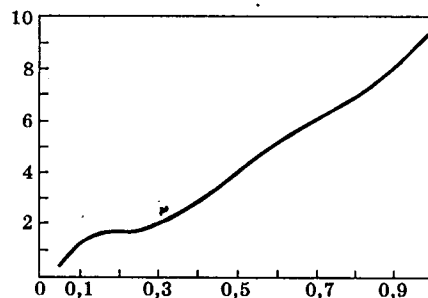


Рис.5. Интенсивность отказов ПК220 (ось абсцисс — $t/1331$ ч, ось ординат — $\lambda(t)/1331$ ч)

Таблица 1

n	Тип ПК	α	λm_1	v	$R, Н$	$n, \text{об/мин}$	$\sigma_m, \text{МПа}$	$f_{ц} \cdot 10^4, \text{цикл/ч}$	N
1	307	1	2,099	0,909	10500	1000	3600	0,262	30
2	307	-0,1	2,061	0,885	14000	1000	3960	0,262	30
3	307	1	1,42	0,775	17500	1000	4270	0,262	30
4	307	2	3,009	0,769	8100	2700	3300	0,707	21
5	220	3	5,656	0,54	42200	2000	3510	0,709	40

Примечание. R — радиальная нагрузка на ПК; N — объем выборки.

Таблица 2

n	$E_{\text{лн}}$	A	B	C	D
1	0,7	1	1	1	1
2	0,76	11	1	1	0,5
3	0,9	3,3	0,7	0,5	0,9
4	0,96	13	0,9	1	1
5	0,195	2,95	0,44	10	2,7

указывает сравнительно малое значение коэффициента вариации.

Определим численные значения логнормальной составляющей и составляющей распределения Вейбулла для данных случаев, используя выражение (4), с помощью пакета "Ravik3".

Найдем теперь уравнение регрессии $E_{\text{лн}}$ в зависимости от факторов нагрузки σ_m и $f_{\text{ц}}$, используя данные табл.1,2:

$$E_{\text{лн}} = 10^{9,087} \cdot \sigma_m^{-1,387} \cdot f_{\text{ц}}^{-1,037}. \quad (5)$$

Итак, доля логнормальной составляющей в уравнении (3) обратно пропорциональна значениям нагрузки на силовом ПК. Следовательно, с увеличением нагрузки на силовой ПК свойство упрочнения будет уменьшаться и наоборот.

В НИП ВНИИЭМ в 1970—1990 гг. были проведены многочисленные ресурсные испытания различного типа электродвигателей малой мощности на приборных подшипниках на различных пластичных смазках. Было установлено, что 91,5% отказов электродвигателей были за счет отказа ПК, поэтому нетрудно определить наработки на отказ данных приборных ПК.

Обработка некоторых результатов усталостных испытаний ПК с помощью пакета "Ravik3" приведена в табл.3.

Как видно из табл.3, коэффициент вариации долговечностей приборных ПК лежит в диапазоне 0,52—1,179, что примерно соответствует результатам испытаний силовых ПК (см.табл.1).

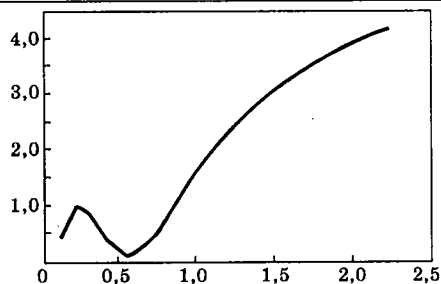


Рис.6. Интенсивность отказов ПК25-80074Ю (ось абсцисс — $t/26180$ ч, ось ординат — $\lambda(t)/26180$ ч)

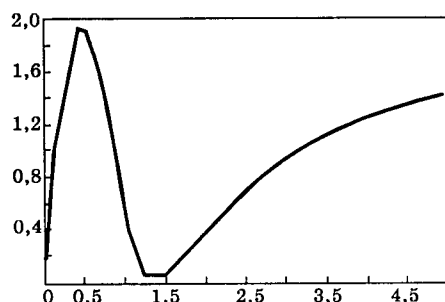


Рис.7. Интенсивность отказов ПК205-1000092 (ось абсцисс — $t/50450$ ч, ось ординат — $\lambda(t)/50450$ ч)

На рис.6,7 показано поведение $\lambda(t)$ для приборных ПК экспериментов 2. Видно, что так же, как и у силовых ПК, характер поведения $\lambda(t)$ для этих экспериментов резко отличается. Он также определяется различной нагрузкой, приложенной к ПК.

Найдем численные значения логнормальной составляющей и составляющей распределения Вейбулла для данных случаев (табл.4).

Уравнение регрессии

$$E_{\text{лн}} = 10^{14,26} \cdot \sigma_m^{-1,296} \cdot f_{\text{ц}}^{-2,021}. \quad (6)$$

Таким образом, и для приборных ПК доля логнормальной составляющей обратно пропорциональна значению нагрузки на ПК.

Исследование испытаний на длительную прочность стали 15Х5М₃

Особенно ярко прослеживается зависимость логнормальной составляющей от на-

Таблица 3

n	Тип двигателя	Тип ПК	F_r , Н	F_a , Н	n, об/мин	σ_m , МПа	$f_{\text{ц}} \cdot 10^{-6}$, цикл/ч	α	λm_1	ν	N
1	БГ-53П35	25-1000 94Ю	0,8	1,2	3500	70,5	0,845	1,5	3,072	0,895	89
2	Б-426	25-80074Ю	2	4	6000	74,6	1,31	3	6,514	0,528	33
3	БК-2524	25-80074Ю	3,5	1,2	4000	89,9	0,873	2,5	5,168	0,677	31
4	Т16/6М	205-1000092	0,5	2,5	2500	129,3	0,551	1	2,193	1,179	42

Таблица 4

n	$E_{\text{лн}}$	A	B	C	D
1	0,8	0,7	0,79	2,2	1,9
2	0,34	0,7	0,8	1,5	3
3	0,39	0,419	1	1,36	2,9
4	0,92	0,9	0,8	6	4

грузки при анализе результатов усталостных испытаний данных образцов стали. Это естественно, ибо в этом случае исследуются простые элементы в отличие от таких сложных систем, какими являются ПК.

В [15] приведены результаты усталостных испытаний образцов стали 15Х5М, при постоянной температуре 570°C и различных начальных напряжения σ_0 . Результаты обработки данных испытаний с помощью пакета "Ravik3" приведены в табл.5.

Как видно из табл.5, коэффициент вариации почти монотонно возрастает с уменьшением нагрузки. На рис.8, 9 показано поведение $\lambda(t)$ для экспериментов 1 и 5, откуда хорошо видно, что как и в случае ПК, с ростом нагрузки логнормальная составляющая

Таблица 5

n	σ_0 , МПа	α	λm_1	ν	N
1	140	14	16,45	0,3409	12
2	115	5	6,575	0,6609	10
3	100	2	2,513	0,9758	28
4	82,5	3	3,445	0,6906	20
5	75	3	3,443	0,8367	19

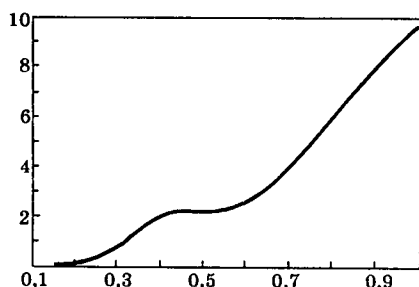


Рис.8. Интенсивность отказов образцов из стали 15Х5М (ось абсцисс — $t/176$ ч, ось ординат — $\lambda(t)/176$ ч)

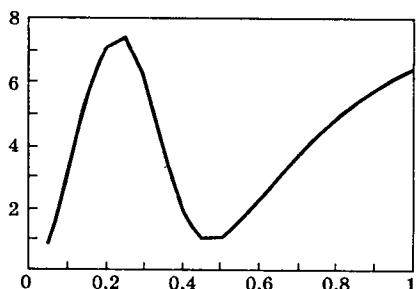


Рис.9. Интенсивность отказов образцов из стали 15Х5М (ось абсцисс — $t/15520$ ч, ось ординат — $\lambda(t)/15520$ ч)

распределения (4) исчезает и, наоборот, с уменьшением нагрузки логнормальная составляющая становится большей.

Найдем численные значения логнормальной составляющей для данных случаев. Из табл.6 хорошо видно, что $E_{\text{лн}}$ монотонно растет с уменьшением нагрузки, как впрочем и первый момент логнормальной составляющей A .

Уравнение регрессии для $E_{\text{лн}}$:

$$E_{\text{лн}} = 10^{8,777} \cdot \sigma_0^{-4,742}$$

Таблица 6

n	$E_{\text{лн}}$	A	B	C	D
1	0,04	0,1	0,6	49	3,9
2	0,055	4,5	0,6	32	1,1
3	0,27	5,5	0,6	23	0,9
4	0,50	20	0,9	16	1,3
5	0,65	30	1,4	6	1,3

Итак, для стальных образцов, подверженных усталостным испытаниям, имеем аналогичное уравнение для логнормальной составляющей.

Выводы.

1. Закон надежности усталостной долговечности в общем случае является смесью двух функций распределений: логнормального распределения и распределения Вейбулла.

2. При росте нагрузки имеет место в пределе распределение Вейбулла, а при уменьшении нагрузки — логнормальное распределение.

3. При эксплуатации изделий, подверженных накапливающимся повреждениям, имеет место "упрочнение", которое увеличивается с уменьшением нагрузки на изделие и, наоборот, исчезает при увеличении нагрузки.

Список литературы

1. Герцбах И.Б., Кордонский Х.Б. Модели отказов М.: Советское радио, 1966.
2. Gumbel E.J. Statistics of Extremes//Columbia University Press, 1958. № 4.
3. Parzen E. On models for the probability of fatigue failure of a structure//In Time Series Analysis Papers. San Francisco: Holden-Day, 1967.
4. Степанов М.И., Гиацинтов Е.В. Усталость легких конструкционных сплавов. М.: Машиностроение, 1973.
5. Birnbaum Z.W., Saunders S.C. Estimation for a Family of Life Distributions with Applications to Fatigue//J. Appl. Prob. 1969. № 6. P.328—347.
6. Ящерицын П.И., Лившиц З.Б., Кошель В.М. Исследование функций рассеивания усталостных испытаний подшипников качения//Вестник АН БССР. 1970. № 4. С.49—56.

7. Вейбулл В. Усталостные испытания и анализ их результатов. М.: Машиностроение, 1964.

8. Баскин Э.М. О сглаживании характеристик надежности полиномами Лагерра//Изв. АН СССР. Серия техническая кибернетика. 1971. № 5. С.79—82.

9. Баскин Э.М. Приближение законов надежности обобщенными полиномами Лагерра//Изв. АН СССР. Серия техническая кибернетика. 1973. № 5. С.90—93.

10. Перель Л.Я. Подшипники качения: Справочник. М.: Машиностроение, 1983.

11. Коросташевский Р.В., Нарышкин В.И. и др. Подшипники качения: Справочник. М.: Машиностроение, 1984.

12. Явленский К.Н., Нарышкин В.И., Чаадаева Е.Е. Приборные шариковые подшипники. М.: Машиностроение, 1981.

13. Жевтунов В.П. Выбор и обоснование функции распределения долговечности подшипников качения//Тр. ВНИПП. 1966. № 1.

14. Контер Л.Я. Статистическая обработка результатов испытаний на контактную выносливость закаленных подшипниковых сталей//Тр. ВНИПП. 1960. № 1(21).

15. Мухин В.Н., Ватник Л.Е. и др. Длительная прочность стали 15Х5М после длительной эксплуатации в трубчатых печах нефтеперерабатывающих установок//Проблемы прочности. 1983. № 5. С.78—80.

МЕДИЦИНСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

Высокочастотный электрохирургический аппарат типа ЭКХ

И.И.БОГАТЫРЕВА, канд. мед. наук, **А.И.ПРУСС**, заместитель генерального директора НПП ВНИИЭМ, **В.И.СМИРНОВ**, инж.

Доброкачественные новообразования кожи и слизистых оболочек (себорейный, сенильный кератозы; фибромы; опухоли придатков кожи; различные проявления папиллома-вирусной инфекции) являются одной из наиболее часто встречающихся причин обращения в косметологические учреждения.

Количество новообразований значительно увеличивается практически у всех групп населения, чему способствует общее снижение иммунологических показателей, повышенная инсоляция, экологическая загрязненность. Некоторые новообразования, особенно вирусного происхождения, чрезвычайно контагиозны также при длительном существовании и травматизации, возможна их малигнизация.

В связи с этим чрезвычайно актуальной является разработка современных быстрых и недорогих способов деструкции новообразований кожи, не оставляющих косметических рубцов и способствующих стойкому терапевтическому эффекту при радикальной деструкции новообразования.

В последние годы в медицине, особенно в косметологии, все шире используются новые виды энергии — современные лазеры, радионож, электромагнитные и ультразвуковые излучения, которые используются в том числе как деструктивные методы. Использование низких температур — криодеструкция

(в качестве хладагента употребляется жидкий азот) давно и оправданно применяется в косметологической практике. Этот метод практически никогда не оставляет рубцов, не требует обезболивания, но в ряде случаев радикальная деструкция не достигается за один сеанс, кроме того наблюдаются побочные явления в виде пузырьной реакции и отеков.

Электро- и лазерная коагуляция требуют обязательного обезболивания, рубцовые изменения очень часто являются последствием этих методов лечения. Кроме того, при удалении этими способами очагов папилломавирусной инфекции в результате недостаточного сжигания вирусной ДНК происходит заражение помещения.

В настоящее время в лечебных учреждениях России используются электрохирургические аппараты малой мощности (до 50 Вт), средней (до 150 Вт) и большой (более 150 Вт).

Исследование этого вопроса в начале разработки аппарата ЭКХ привело нас к убеждению, что в данной ситуации основным ограничением является не столько малая мощность, сколько относительно низкий перепад температуры (несколько сотен градусов), создаваемый в процессе контактного воздействия электрода на ткань пациента.

Действительно, выходная мощность электрохирургических аппаратов в настоящее



Рис.1.

время нормируется на значениях имитирующего ткани человека сопротивления, лежащих в диапазоне от 50 до 2000 Ом (обычно 500 Ом), что для малой выходной мощности (12 Вт) дает на выход высокочастотное напряжение, не превышающее 70—80 В. При таком выходном напряжении процедура лечения (удаления) новообразований на коже сводится к достаточно длительному контактному воздействию на ткань, что ведет, естественно, к термическому воздействию и на соседние (здоровые) участки кожи и, следовательно, увеличению зоны некроза и времени заживления, появлению рубцов.

Известно, что разброс сопротивлений, имитирующих различные ткани человеческого организма, занимает диапазон от 50 до 100000 Ом [1], в частности, для кожи это сопротивление составляет в среднем от 6 до 40 кОм.

Таким образом, при разработке аппарата ЭКХ было решено принять имитирующее сопротивление порядка 35 кОм, тогда как при требуемой мощности в дерматологии 10–15 Вт значения выходного напряжения составляют уже 600–700 В. При этом оказалось, что из-за наличия паразитной емкости пациент — аппарат (около 50—80 пФ) в момент приближения конца электрода к пациенту в месте воздействия на расстоянии 1–5 мм возникает высокочастотная электрическая дуга (рис.1).

Проведенные измерения температуры в плазме показали, что она может достигать 2000—2500°C. Такие высокие значения температуры, в свою очередь, обеспечивают возможность работать в бесконтактном режиме, существенно снижается время операции и, тем самым, уменьшается зона некроза. Кроме того, при таком воздействии в боль-



Рис.2.

шинстве случаев не превышает болевой порог.

Большой перепад температуры обеспечивает практически полное сжигание новообразований, в результате возникает возможность эффективного лечения такого распространенного заболевания, как папилломавирусная инфекция человека.

Разработанный аппарат выпускается в двух исполнениях: ЭКЗ-12-01 с максимальной выходной мощностью 12 Вт для применения в дерматологии, косметологии, стоматологии и ЭКХ-25-01 с максимальной выходной мощностью 25 Вт для применения в гинекологии, урологии, проктологии и др.

Аппараты успешно прошли клинические испытания в Государственном центре проктологии, в НИИ урологии, в Центральном научно-исследовательском кожно-венерологическом институте, в Центральном научно-исследовательском институте стоматологии, в Институте скорой помощи им. Склифасовского и др.

Аппарат также прошел испытания на соответствие требованиям нормативных документов (ГОСТ Р 50444-92, ГОСТ Р 50267.0-92, ГОСТ Р 50267.2-92, ГОСТ Р 50267.0.2-95, ГОСТ 23450-79). Сертификат соответствия № РОСС RU-ИМ04. В00432. Аппарат по электробезопасности соответствует ГОСТ Р 50267.0-92, классу 2 (двойная изоляция) типу BF.

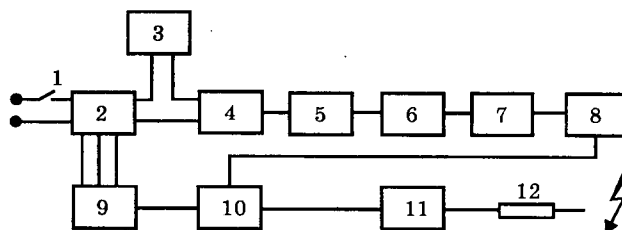


Рис.3.

Аппарат не требует возвратного (нейтрального) электрода, дополнительного заземления и может подключаться к обычной сетевой двухполюсной розетке. Корпус аппарата выполнен из пластмассы, в нем нет доступных для прикосновения металлических частей. Внешний вид аппарата показан на рис.2. Структурная схема аппарата показана на рис.3.

Напряжение сети 220 В, 50 Гц подается на аппарат с помощью тумблера 1 и поступает на трансформатор 2, выполненный с разделением первичной и вторичной обмоток и рассчитанный на испытательное напряжение 4000 В. Активизация выходного электрода 12 аппарата осуществляется нажатием педали 3 и подачей напряжения на стабилизатор 4, который вырабатывает напряжения +5 и +15 В для питания низковольтного высокочастотного генератора 5, формирователя импульсных последовательностей, формирователя пачек высокочастотных импульсов 6 и предварительного усилителя 8. Кроме того, с выхода сетевого трансформатора 2 снимаются три напряжения, которые с помощью переключателя поступают на выпрямитель 9 и используются далее для питания выходного усилителя мощности 10, выход которого через повышающий трансформатор 11 подключен к держателю электрода 12.

В аппарате предусмотрены следующие режимы работы:

— режим грубой регулировки выходной высокочастотной (60 кГц) мощности с помощью переключателя «Грубо», имеющего три положения;

— режим плавного регулирования — плавное изменение средней выходной мощности внутри каждого положения переключателя «Грубо», при изменении положения переключателя «Плавно» 7 формируются высокочастотные пачки в 60 кГц с периодом следования 500 Гц и соотношением

длительности пачки к периоду следования 0,2; 0,4; 0,6; 0,8: 1.

В состав аппарата входят комплект жестких электродов (игла, нож, электрод с плоским торцом и электрод со сферической головкой), а также проволочные электроды со своим зажимом, используемые для эпиляции. Указанные электроды крепятся в держателе с помощью цангового зажима.

Технические параметры аппаратов

Номинальное напряжение и частота питающей сети, В/Гц	220/50
Максимальная потребляемая мощности, В.А, не более	60/90
Максимальная выходная мощность, Вт	12/25
Частота входного напряжения, кГц	60
Регулировка выходной мощности	Плавная
Время готовности, с	1
Режим работы повторно-кратковременный (вкл/пауза), с	30/30
Габаритные размеры, мм	280r250r130
Масса, кг, не более	4,5

Комплект поставки:

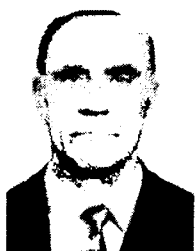
- генератор высокой частоты;
- ножная педаль для включения и отключения многоактивного электрода;
- нейтральный электрод (по заказу потребителя);
- комплект инструментов;
- встроенное в генератор устройство звуковой сигнализации различной тональности в зависимости от уровня выходной мощности (по заказу потребителя).

В аппарате предусмотрена световая сигнализация «Работа» и режима максимальной мощности.

Список литературы

1. С.Я.Долецкий и др. Высокочастотная электрохирургия. М., 1980.
2. Белик Д.В. Разработка и создания специализированных аппаратов для проведения вмешательства на различных органах человека//Медицинская техника. 1995. № 3.

Сведения об авторах опубликованных статей



Стома Степан Андреевич — генеральный директор НПП ВНИИЭМ. В 1958 г. окончил электромеханический факультет МЭИ. В 1968 г. защитил кандидатскую диссертацию на тему «Тихоходные синхронные двигатели».



Михайлов Евгений Михайлович — начальник лаборатории НПП ВНИИЭМ. В 1957 г. окончил факультет электрификации сельского хозяйства Московского института механизации и электрификации сельского хозяйства.

Горбунов Александр Викторович — начальник отделения космической техники НПП ВНИИЭМ. В 1982 г. окончил факультет приборов точной механики Московского станкоинструментального института.



Медведев Юрий Ефимович — ведущий инженер-конструктор НПП ВНИИЭМ. В 1969 г. окончил радиотехнический факультет МЭИ.



Беленький Арон Давыдович — начальник лаборатории НПП ВНИИЭМ. В 1969 г. окончил математический факультет МФТИ. В 1986 г. защитил кандидатскую диссертацию.



Медушев Сергей Валентинович — начальник лаборатории НПП ВНИИЭМ. В 1973 г. окончил факультет электрооборудования судов Николаевского кораблестроительного института.

Васильев Владимир Николаевич — старший научный сотрудник НПП ВНИИЭМ. В 1962 г. окончил факультет систем управления летательных аппаратов МАИ. В 1982 г. защитил кандидатскую диссертацию.



Ремизов Валерий Евгеньевич — начальник отдела НПП ВНИИЭМ. В 1973 г. окончил электромеханический факультет МЭИ.

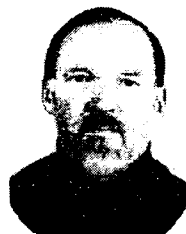


Кудрявцев Вадим Васильевич — начальник отделения РКК «Энергия». В 1960 г. окончил факультет машиностроения по специальности инженер-механик МВТУ им. Н.Э.Баумана. В 1969 г. защитил кандидатскую диссертацию, в 1990 г. — докторскую диссертацию. С 1992 г. — профессор.



Шичков Виктор Васильевич — начальник лаборатории НПП ВНИИЭМ. В 1962 г. окончил оптико-механический факультет Ленинградского института точной механики и оптики. В 1972 г. защитил кандидатскую диссертацию по теме «Разработка и исследование автоматической установки для регистрации спектров действия».

Кузьмин Вячеслав Николаевич — начальник лаборатории НПП ВНИИЭМ. В 1959 г. окончил факультет электрификации сельского хозяйства Московского института механизации и электрификации сельского хозяйства.



Ходненко Владимир Павлович — начальник лаборатории НПП ВНИИЭМ. В 1966 г. окончил факультет энергомашиностроения МВТУ им. Н.Э.Баумана. В 1977 г. защитил кандидатскую диссертацию по теме «Исследование взаимодействия ЭРДУ с бортовыми системами ИСЗ типа «Метеор». В 1996 г. защитил докторскую диссертацию по теме «Электрореактивные двигательные установки в системах управления космическими аппаратами геофизического наблюдения».



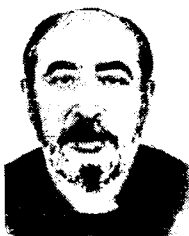


Жемчугов Георгий Александрович — первый заместитель генерального директора НПП ВНИИЭМ. В 1962 г. окончил электромеханический факультет Новочеркасского политехнического института. В 1981 г. защитил кандидатскую диссертацию по теме «Исследование регулируемого вентильного электродвигателя».



Матвейчук Петр Алексеевич — заместитель начальника отдела НПП ВНИИЭМ. В 1984 г. окончил электромеханический факультет МЭИ. В 1993 г. защитил кандидатскую диссертацию по теме «Исследование параметров и характеристик криорезистивного турбогенератора».

Десятников Иосиф Ильич — заместитель генерального директора НПП ВНИИЭМ. В 1963 г. окончил факультет автоматизации и приборостроения Харьковского политехнического института. Главный конструктор информационно-справочной системы «Скала».



Сарычев Алексей Петрович — заместитель генерального директора НПП ВНИИЭМ. В 1985 г. окончил электромеханический факультет МЭИ. В 1990 г. защитил кандидатскую диссертацию.



Ольшевский Юрий Николаевич — начальник лаборатории НПП ВНИИЭМ. В 1957 г. окончил теплоэнергетический факультет МЭИ. В 1967 г. защитил кандидатскую диссертацию по теме «Вопросы математического моделирования реакторов с переменными параметрами».



Калашников Владлен Константинович — ведущий инженер НПП ВНИИЭМ. В 1946 г. закончил электромеханический факультет МЭИ.

Куцаков Сергей Яковлевич — начальник отделения автоматизации НПП ВНИИЭМ. В 1966 г. окончил факультет вычислительной техники МЭИ.



Круглин Вадим Алексеевич — начальник сектора НПП ВНИИЭМ. В 1957 г. окончил энергетический факультет Уральского политехнического института. В 1983 г. защитил кандидатскую диссертацию по теме «Исследование сверхпроводникового криогенного двигателя для реверсивных режимов работ».

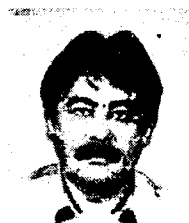


Галкина Татьяна Николаевна — заместитель начальника отдела НПП ВНИИЭМ. В 1970 г. окончила факультет автоматики и телемеханики МЭИ.

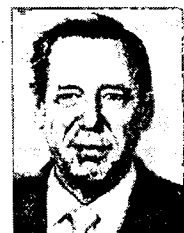


Крутикова Лариса Петровна — начальник лаборатории НПП ВНИИЭМ. В 1965 г. окончила механико-технологический факультет Тульского политехнического института.

Джумаев Сергей Джалилович — начальник отдела НПП ВНИИЭМ. В 1981 г. окончил факультет автоматизированных систем управления Куйбышевского авиационного института.



Жаринов Валерий Александрович — начальник отдела НПП ВНИИЭМ. В 1975 г. окончил механико-технологический факультет Всесоюзного заочного политехнического института.



Верещагин Владимир Петрович — начальник отдела НПП ВНИИЭМ. В 1959 г. окончил электромеханический факультет МЭИ. В 1972 г. защитил кандидатскую диссертацию, в 1992 г. — докторскую диссертацию.

Тюрин Юрий Николаевич — инженер-программист I категории НПП ВНИИЭМ. В 1999 г. окончил факультет автоматики и вычислительной техники Московского института радиотехники, электроники и автоматики.

Каминский Михаил Николаевич — ведущий инженер НПП ВНИИЭМ. В 1983 г. окончил механический факультет Московского автомеханического института.



Сергеев Валерий Владимирович — заместитель генерального директора НПП ВНИИЭМ. В 1958 г. закончил технологический факультет Московского института цветных металлов и золота. В 1965 г. защитил кандидатскую диссертацию на тему «Разработка магнитов с высокой магнитной энергией». В 1986 г. защитил докторскую диссертацию на тему «Основы технологии изготовления постоянных магнитов с высокой магнитной энергией».



Шамрай Наталья Михайловна — ведущий инженер-технолог НПП ВНИИЭМ. В 1960 г. окончила технологический факультет Московского института цветных металлов и золота.

Сафонов Георгий Петрович — начальник отдела НПП ВНИИЭМ. В 1963 г. закончил факультет химической кинетики МФТИ. В 1967 г. защитил кандидатскую диссертацию по теме «Поверхностные явления в полимерах», кандидат физико-математических наук.



Баскин Эдуард Моисеевич — старший научный сотрудник НПП ВНИИЭМ. В 1960 г. окончил электромеханический факультет Ленинградского института инженеров водного транспорта. В 1966 г. окончил математический факультет МГУ им. М.В.Ломоносова. В 1971 г. защитил кандидатскую диссертацию по теме «Разработка метода для выравнивания результатов испытаний с помощью ЭВМ».

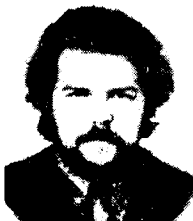


Богатырева Ирина Ивановна — заведующая отделением врачебной косметики Центрального научно-исследовательского кожно-венерологического института. В 1973 г. окончила 2-й Медицинский институт по специальности дерматовенерологии, патологоанатомии и косметологии. В 1984 г. защитила кандидатскую диссертацию по теме «Патологическая анатомия».



Сальковский Феликс Маркусович — заместитель генерального директора НПП ВНИИЭМ, директор опытного завода. В 1962 г. закончил инструментальный факультет Московского станкоинструментального института.

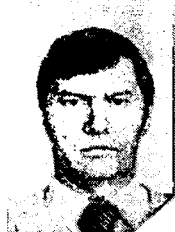
Духопельников Дмитрий Владимирович — ведущий инженер МВТУ им. Н.Э.Баумана. В 1986 г. окончил факультет машиностроения МВТУ им. Н.Э.Баумана.



Прусс Анатолий Исаакович — заместитель генерального директора НПП ВНИИЭМ. В 1969 г. окончил факультет технической кибернетики Московского института радиотехники, электроники и автоматики.



Сушков Валерий Яковлевич — заведующий лабораторией МВТУ им. Н.Э.Баумана. В 1986 г. окончил факультет машиностроения МВТУ им. Н.Э.Баумана.



Смирнов Владимир Иванович — начальник лаборатории НПП ВНИИЭМ. В 1970 г. окончил радиотехнический факультет МЭИ.

Кузнечиков Сергей Юрьевич — начальник лаборатории НПП ВНИИЭМ. В 1980 г. окончил факультет материалов и технологии МВТУ им. Н.Э.Баумана. В 1989 г. защитил кандидатскую диссертацию по теме «Разработка методики проектирования неполного горячего комбинированного выдавливания поковок асимметричных деталей ступенчатой формы из высокопрочных сталей».



7-я Международная специализированная выставка "Автономные источники тока"

Традиционно в конце февраля 1999 г. в Москве в выставочном зале Секретариата Интерэлектро прошла 7-я Международная специализированная выставка "Автономные источники тока", организованная Международной ассоциацией производителей химических источников и оборудования для их производства — МА "Интербат" совместно с Интерэлектро.

Международная ассоциация "Интербат", являющаяся инициатором проведения этих выставок, создана в 1991 г. В настоящее время в нее входит 38 фирм, предприятий и организаций из Болгарии, Германии, Казахстана, Польши, России, Румынии, Украины, Узбекистана и Югославии.

За семь лет выставки стали традиционными и пользуются успехом среди специалистов и потребителей источников тока. К ним проявляют постоянный интерес производители технологического оборудования, комплектующих изделий и материалов из разных стран. Практически постоянно на выставку приезжают, для установления контактов, специалисты из Германии, Великобритании, Китая, Италии, США, Голландии и других стран.

На последней выставке большой интерес проявлялся к продукции российских предприятий и стран СНГ в связи с экономическим кризисом, происходящим в этих странах, и резким ростом курса доллара. Однако, несмотря на экономический кризис, иностранные производители и инвесторы не теряют интереса к обширному российскому рынку. Во время выставки проводились переговоры по созданию совместных производств по свинцово-кислотным и щелочным аккумуляторам, гальваническим элементам и батареям.

Несмотря на то, что многие государства на постсоветском пространстве сейчас переживают экономический кризис, выставка отразила ряд позитивных тенденций, которые происходят в их экономике. Продолжается невиданный бум продаж в этих странах легковых автомобилей, так в России он ежегодно увеличивается на 10—12% и как следствие, увеличивается потребность в стартерных аккумуляторных батареях для них. Поэтому большую часть выставки занимали заводы, выпускающие стартерные свинцово-кислотные аккумуляторы для легковых, грузовых автомобилей и автотранспортной техники. Автомобильные батареи на выставке представили 10 компаний. Наиболее впечатляющими экспозициями на этой выставке были экспозиции Тюменского аккумуляторного завода (Россия), "Varta Autobatterie CMBX" (Германия), "Start" (Болгария), Подольского аккумуляторного завода (Россия), "ZAP Piastow" (Польша), Комсомольского-на-Амуре электротехнического завода (Россия), "Воссибэлемент" (г.Свирск, Россия) и др.

Особенно следует отметить экспозицию НПК "Иста"

(г. Днепропетровск, Украина). Созданная в 1995 г. НПК "Иста" уже в 1998 г. выпустила 1 млн. свинцово-кислотных аккумуляторов для любых автомобилей.

Наиболее насыщенная и хорошо оформленная экспозиция была представлена консультационно-техническим центром автономных источников тока "Альфа-Плюс", представляющая продукцию 5 российских предприятий и нескольких зарубежных фирм.

Следует отметить, что несмотря на экономические трудности, предприятия России и Украины представили на выставке много новых изделий, ранее не выпускавшихся на этих предприятиях. К таким предприятиям относятся Тюменский аккумуляторный завод, Днепропетровская "Иста", АО "НИИСТА" (г.Подольск), "НИАИ Источник" (С.-Петербург), АО "Электротяга" (С.-Петербург), Саратовский завод автономных источников тока.

Так, Тюменский аккумуляторный завод представил стационарные аккумуляторные батареи, ранее не выпускающиеся в России, емкостью от 300 до 600 А/ч: АО "Электротяга" (С.-Петербург) — ряд стационарных батарей емкостью от 350 до 3000 А/ч; ОАО "НИАИ Источник" (С.-Петербург) — новый ряд никель-водородных и никель-металлогидридных аккумуляторов; компания "Эсма" (Московская область) — ряд новых, экологически чистых источников энергии; АО "НИИСТ" (Подольск) — новую батарею 12СМ-18А и современный расширитель для свинцово-кислотных аккумуляторов, а также ряд других новых источников тока и материалов для их производства.

Следует отметить, что за последние годы в России и на Украине появилось много новых небольших производителей свинцово-кислотных аккумуляторов и гальванических элементов.

К выставке большой интерес проявили новые российские товаропроводящие структуры и особенно дилерские и дистрибьюторские структуры.

Во время выставки проводилась презентация новой серии стартерных аккумуляторов фирмы "Варта" (Германия). Успешно прошли заседания секций ассоциации "Интербат" по свинцово-кислотным источникам тока, щелочным источникам тока и литиевым источникам тока. На секциях обсуждались такие вопросы, как тенденции дальнейшего развития производства источников тока по направлениям, обеспечение материалами, экологические вопросы, влияние на рынок и цены и др. Также были заслушаны научные доклады по перспективным направлениям.

Следующая, 8-я выставка "Автономные источники тока" состоится традиционно в феврале 2000 г.

*А.М.Калошкин, советник Интерэлектро,
А.Г.Ледвин, директор МА "Интербат"*

Георгий Николаевич Петров

(к 100-летию со дня рождения)

Член-корреспондент Академии наук, Заслуженный деятель науки и техники РСФСР, дважды лауреат государственной премии СССР, доктор технических наук, профессор кафедры «Электрические машины» МЭИ Георгий Николаевич Петров родился 5 мая 1899 г. в Москве.

В 1924 г. он окончил электромеханический факультет МВТУ и начал преподавать. С 1930 г. Георгий Николаевич вел педагогическую работу в МЭИ до конца своих дней. В течение 38 лет (с 1938 по 1976 гг.) он заведовал кафедрой «Электрические машины», из них 12 лет был проректором по научной работе и деканом электромеханического факультета. Во время Великой Отечественной войны был ректором МЭИ.

Г.Н. Петров вел активную научную работу. В 1948 г. он был удостоен Государственной премии за разработку мощных трансформа-

торов для выпрямительных установок, а в 1962 г. — второй Государственной премии за создание и внедрение трансформаторов токов с новой системой компенсации погрешностей. Под его руководством были созданы высоковольтный гидрогенератор и серия новых магнитно-полупроводниковых стабилизаторов напряжения.

Георгий Николаевич является автором классических учебников по общему курсу и 120 статей. По его учебникам, вышедшим в свет с 1940 по 1974 гг., учились целые поколения инженеров электротехнического профиля. Он был прекрасным педагогом и выдающимся ученым.

Георгий Николаевич вел большую общественную работу. С 1931—1934 гг. — он депутат Райсовета, с 1951 по 1953 гг. — депутат Моссовета. В течение многих лет — председатель научно-методического Совета Минвуза СССР.

Благородный труд Георгия Николаевича Петрова был отмечен двумя орденами Ленина, орденами Трудового Красного Знамени, Красной Звезды, Знаком Почета и многими медалями.

Георгий Николаевич много лет был членом редколлегии журналов «Вестник электропромышленности», а затем «Электротехника», а с 1966 по 1976 гг. являлся главным редактором журнала. В эти годы советское электромашиностроение вышло на передовые рубежи, а журнал «Электротехника» стал одним из лучших электротехнических журналов.

Георгий Николаевич был настоящим патриархом отечественного электромашиностроения, имея непререкаемый авторитет в области трансформаторостроения.

Светлая память о Георгии Николаевиче Петрове сохранится среди электротехников и в грядущих веках.

Редактор отдела О.В. Кунавина
Научный редактор Л.А. Романова
Литературный редактор А.М. Мескина

Сдано в набор 17.05.99. Подписано в печать 09.06.99. Формат 60×88 1/8

Бумага офсетная № 1. Печать офсетная. Печ. л. 8. Заказ 45

Цена свободная. Тираж 1000 экз. Зарегистрирован Комитетом РФ по печати, регистрационный №01330.

Макет выполнен и отпечатан в АООТ «Электропривод»
107078, Москва, ул. Садовая Спасская, 1/2, к. 3

Давид Вениаминович Свечарник

Скончался известный ученый-электромеханик, профессор, доктор технических наук, почетный академик Международной академии информатизации и Академии электротехнических наук РФ, почетный профессор Московского государственного университета путей сообщения (прежде МИИТ).

Давид Вениаминович прожил большую, интересную, плодотворную жизнь, до последних дней оставаясь истинным Изобретателем.

Давид Вениаминович родился 5 апреля 1910 г. в семье рабочего типографии и рано начал трудовую деятельность, уже в 16 лет работая на конвейере обувной фабрики.

Свой первый патент на изобретение "Электродвигатель с возвратно-поступательным движением" Д.В.Свечарник получил более 70 лет назад в 1928 г., еще будучи рабфаковцем первого курса Одесского политехнического института. Последнюю заявку на изобретение, связанную с новым направлением творческой деятельности — машинно-трансформаторными агрегатами, Давид Вениаминович отправил незадолго до своей кончины в феврале этого года. По отзывам специалистов это направление может стать основой создания гаммы электрических машин различного назначения в двадцать первом веке.

В военные и послевоенные годы Д.В.Свечарник внес значительный вклад в разработку принципиально новых систем вооружения, работая в должности главного конструктора в ОКБ-642. Весомый вклад Д.В.Свечарника и в разработку теории систем управления: еще в 1936 г. им была предложена, запатентована и практически реализована на прокатном стане в Днепропетровске система управления с нелинейной обратной связью по квадрату скорости, широко применяемая впоследствии при



построении систем управления электроприводами. Другой пример — метод оптимума номинала, предложенный им в 1956 г. и давший импульс многим работам по теории статистической оптимизации.

С конца 50-х годов Д.В.Свечарник работал в приборостроительной промышленности, где им совместно с академиком В.А.Трапезниковым были разработаны основы построения единой государственной системы приборов и средств автоматизации ГСП и созданы новые робототехнические системы.

С 1966 г. и до последних дней своей жизни Д.В.Свечарник активно работал в должности профессора на кафедре электрических машин Московского государственного университета путей сообщения, воспитав за это время много учеников, ставших видными специалистами в области железнодорожного транспорта и общепромышленного электромашиностроения.

За заслуги в области разработки новых электрических машин Давид Вениаминович в 1995 г. от имени ООН первым удостоен почетного звания Старейшины электромехаников мира.

В 1922 г. за свои машины с раздельными фазами Д.В.Свечарник уже на 83 году жизни получил Золотую медаль за лучшее изобретение на 41-м Международном Салоне по изобретениям, открытиям и промышленным новациям в Брюсселе.

Бесконтактные сельсины, изоб-

ретенные Давидом Вениаминовичем с академиком А.Г.Иосифьяном более 60 лет назад, до сих пор выпускаются во всем мире многомиллионными тиражами. Достаточно сказать, что в нашей стране их выпущено свыше 6 миллионов экземпляров.

Широкое внедрение получили изобретенные Давидом Вениаминовичем совмещенные сельсины-двигатели, безредукторные низкооборотные электроприводы, разнообразные преобразователи движения и т.п.

Д.В.Свечарник — автор более 160 авторских свидетельств и патентов СССР и РФ, а также 32 патентов за рубежом. Глубокие теоретические исследования идей в области электромеханики отражены им в восьми монографиях и в более 80 опубликованных научных работах.

Творческая активность, трудолюбивость, ясный ум и неиссякаемый изобретательский потенциал были присущи Давиду Вениаминовичу до последних дней его жизни. В то же время Давид Вениаминович отличался широтой взглядов и интересов во многих сферах человеческой деятельности. Ему были присущи чувства уважения к чужому мнению, сопереживания по отношению к судьбам других людей и великодушия к недругам. Он увлекался путешествиями и экскурсиями по просторам нашей родины и за рубежом, был интересным и эрудированным собеседником и рассказчиком. Его меткие эпиграммы, остроумные афоризмы и шутивно-неформальные стихи вызывали у окружающих неподдельный интерес и восхищение.

Светлая память о Давиде Вениаминовиче, ученом-изобретателе с мировым именем, замечательном и добром человеке навсегда сохранится в памяти его коллег, учеников, близких и друзей и широкого круга специалистов.

Представительство РАО "ЕС России" по управлению акционерными обществами Уральской части России "Уралэнерго"

19—22 октября

ОАО "Башкирэнерго"

Центр "РИД"

Республиканский выставочный комплекс
Республики Башкортостан

МЕСТО ПРОВЕДЕНИЯ:
г. УФА — СТОЛИЦА
БАШКОРТОСТАНА

ПЯТАЯ МЕЖДУНАРОДНАЯ
СПЕЦИАЛИЗИРОВАННАЯ
ВЫСТАВКА



УРАЛЭНЕРГО-99

ОСНОВНЫЕ РАЗДЕЛЫ ВЫСТАВКИ

теплотехническое оборудование; • котлы, горелки, котельное и вспомогательное оборудование, теплообменные аппараты; • турбогенераторы, турбины, компрессоры, вспомогательное оборудование, • теплофикационные магистральные системы и техника их соединения; • оборудование для электростанций и подстанций, для организации сетей распределения, передачи и производства электроэнергии; • средства связи в энергетике; • энергосбережение; • экологические аспекты энергетики; • продукция кабельного производства; • электроинструменты, • осветительное оборудование

АДРЕС ОРГКОМИТЕТА

ООО Центр "РИД"

450000, Республика Башкортостан, г. Уфа, а/я 1360 А

Телефон: (3472) 22 48 57, 22 46 66

Телефон/факс: (3472) 22 37 05, 22 54 12

E-mail: rid@poikc.bashnet.ru