

Совещания, семинары, симпозиумы

ВЭЛК: настоящее и будущее электротехники

С 21 по 25^е июня 1977 г. в Москве работал Всемирный электротехнический конгресс (ВЭЛК), организованный по инициативе Министерства электротехнической промышленности СССР и Академии наук СССР при содействии и поддержке таких международных организаций, как Международная электротехническая комиссия (МЭК), Международная конференция по большим электрическим системам высоких напряжений (СИГРЭ) и др.

Со времени последнего электротехнического конгресса, состоявшегося в 1932 г. в Париже, в мировой электротехнике произошли глубокие качественные изменения. Созданы генераторы предельных мощностей для всех видов электростанций, включая атомные, установки по исследованию управляемого термоядерного синтеза, криотурбогенераторы, МГД-генераторы, сверхпроводящие материалы и магнитные системы, автоматизированные электрохимические комплексы и устройства, плазменные электропечи и другие виды электротехнического оборудования, во многом определяющие научно-технический прогресс будущего.

Техническое состояние средств электротехники отражает масштабы производства самой универсальной энергии современности — электричества, а также эффективность ее применения в бесконечном множестве производственных процессов, в науке и в повседневной жизни человека.

ВЭЛК поставил перед собой задачу подвести итоги развития электротехники за последние годы и оценить ее место в решении одной из самых насущных научно-технических проблем современности — бережном и разумном расходовании энергетических ресурсов человечества.

В работе Конгресса участвовало более 2800 специалистов из 42 стран мира. На двух пленарных заседаниях и 12 секциях и подсекциях было заслушано и обсуждено более 800 научных докладов.

Конгресс открыл Председатель оргкомитета министр электротехнической промышленности СССР А. К. Антонов. На первом пленарном заседании в числе других были сделаны два советско-американских доклада «Проблемы и перспективы создания термоядерных электростанций» (докладчик Е. П. Велихов, СССР) и «МГД-генерирование электроэнергии» (докладчик У. Джексон, США), которые явились отражением международного сотрудничества в разработке новых сложных способов генерирования электроэнергии. В конце доклада Е. П. Велихов сказал: «Хотя мы в настоящее время не можем знать, какую окончательную форму примут термоядерные реакторы, мы совершенно уверены в том, что безопасная и экономичная термоядерная энергия станет реальностью и что будет достигнуто существенное практическое применение термоядерной энергии — более дешевой за счет неуклонного увеличения международного сотрудничества по мере перехода от исследования физики плазмы к технике реакторостроения».

Во втором докладе были описаны результаты, полученные в СССР и США по созданию МГД-генераторов. Сообщалось, что советская установка У-25, созданная в Институте высоких температур АН СССР, достигла в 1975 г. проектной мощности 20 МВт. Основные вопросы, связанные со строительством МГД-установок такой мощности, решены, и можно переходить к проек-

тированию МГД-блоков мощностью в сотни мегаватт для промышленных электростанций. В СССР первую такую станцию планируется соорудить в начале 80-х годов.

На Конгрессе работало восемь секций.

Первая секция всесторонне рассмотрела оптимальные пути повышения мощности turbo- и гидрогенераторов, а также создания принципиально новых источников электрической энергии на основе использования явления сверхпроводимости и генерирующей техники будущего — МГД-генераторов и термоядерных установок.

Вторая секция обсудила научные и технические проблемы, связанные с разработкой электрооборудования для мощных энергосистем, в частности для линий электропередач сверхвысоких напряжений переменного и постоянного тока.

Актуальному направлению — созданию новых электротехнических материалов с повышенными техническими и физико-химическими свойствами — была посвящена третья секция.

На четвертой секции рассматривался широкий круг вопросов, посвященных непосредственному использованию электроэнергии в технологии. Среди них — пути совершенствования конструкций дуговых, вакуумных, электрошлаковых, руднотермических электропечей, различного рода электросварочных и высокочастотных установок, перспективы промышленного применения плазменного, электронно-лучевого, ультразвукового и других новых видов нагрева, в том числе при термообработке, в строительстве, коммунальном хозяйстве, сельскохозяйственных процессах.

В докладах пятой секции отражены исследования и практическое применение различных способов прямого преобразования солнечной, тепловой, химической и других видов энергии в электрическую.

Шестая секция занималась проблемами создания сложных электротехнических комплексов на базе синтеза силовой электротехники, электроники и точной электромеханики.

Седьмая обсуждала специализированные электрохимические комплексы, использование вычислительной и микроэлектронной техники в системах управления.

И, наконец, восьмая секция обсудила достижения в создании новых бытовых электроприборов.

В настоящем сообщении отражены некоторые имеющие интерес для читателей нашего журнала проблемы, которые обсуждались на третьей, пятой и седьмой секциях.

Секция № 3 «Новые материалы для электротехники»

Как показал анализ материалов, представленных на Конгрессе, практическое применение явления сверхпроводимости — одно из основных направлений развития современной электротехники. На пленарных заседаниях Конгресса в половине докладов крупных ученых и специалистов мира техническая сверхпроводимость рассматривалась как база для развития различных областей электротехники. В таких областях техники, как стационарные термоядерные электростанции, МГД-генераторы, ускорители элементарных частиц, крупные турбогенераторы, применение сверх-

проводников является единственным техническим решением. Особенно эффективны сверхпроводники в крупных электрических машинах (турбогенераторы для тепловых и атомных электростанций, крупные двигатели постоянного тока), мощность которых приближается к технически возможным пределам.

Сверхпроводники, охлажденные до гелиевых температур, позволяют пропускать электрический ток без сопротивления и создавать магнитное поле индукцией в десятки и сотни тесла, что дает возможность коренным образом улучшить характеристики различных электротехнических устройств и решить ряд фундаментальных научно-технических задач.

В совместных советско-американских докладах Е. П. Велихова и Е. Кинтнера, А. Е. Шейндлина и У. Джексона рассмотрены вопросы создания новых и эксплуатации существующих сверхпроводящих магнитных систем (СМС) для установок управляемого термоядерного синтеза и МГД-генераторов.

В настоящее время создана технология производства сверхпроводящих материалов в большинстве промышленно развитых стран: СССР, США, Англии, ФРГ, Японии, Франции и др. В США исследованием и разработкой сверхпроводников по программе ERDA занимаются Брукхейвенская, Ок-Риджская и Лос-Аламосская национальные лаборатории, Ливерморская лаборатория им. Лоуренса, некоторые университеты и др. Производят эти материалы фирмы «Айрко», «Суперкон», «Интермагнетик дженерал», «Вестингауз», «Юнион Карбайд» (США), «Вакуумшмельц», «Сименс» (ФРГ), «Империал метал индустри» (Великобритания), «Хитачи» (Япония) и др. Большие достижения в разработке и производстве сверхпроводников имеются в СССР, ЧССР, ГДР.

Практический интерес представляет сравнительно небольшая группа сверхпроводящих сплавов и соединений, часть из которых приведена в табл. 1.

Многожильные сверхпроводники на основе ниобий-титановых сплавов прочно утвердились в технологии сверхпроводящих магнитов [1—3], что объясняется их высокими технологическими свойствами, достаточной прочностью и пластичностью композиционных проводов, простотой стабилизации.

Сверхпроводники на основе интерметаллических соединений со структурой A-15 (Nb_3Sn , V_3Ga , Nb_3Ge и др.) имеют более высокие критические характеристики, однако они хрупки и требуют специальных технологических процессов.

При эксплуатации сверхпроводящие материалы подвергаются механическим и термическим нагрузкам, а в некоторых случаях воздействию радиоактивного излучения, которые оказывают влияние на критические параметры. Свойства сверхпроводников определяются химическим составом и режимами термической обработки и деформации. С учетом этого в настоящее время определены основные требования к ним и к технологии изготовления, намечены пути унификации.

Основные свойства сверхпроводников Таблица 1

Сверхпроводник	Индукция критического поля (4.2 К), Т	Критическая температура, К
NbTi	12	9,7
Nb ₃ Sn	20	17,8
V ₃ Ga	21	14,6
Nb ₃ Ge	30	23,2

Основная тенденция в конструировании сверхпроводников для крупных СМС — создание сильноточных транспонированных токонесущих элементов (ТНЭ) из единичных модулей. Последние представляют монолитные твистированные (скрученные) провода диаметром 0,3—2 мм с числом жил от десятков до нескольких тысяч диаметром от 5 до 30—50 мкм. В качестве стабилизирующего материала (матрицы) используется в основном чистая медь. Такая конструкция ТНЭ обеспечивает более высокую плотность тока на ниобий-титановых проводниках, так как единичные мелкие модули можно подвергать большей холодной деформации, чем массивные изделия. Кроме того, пользуясь одним и тем же исходным элементом, можно создавать сверхпроводники различных конструкций большой длины. Транспонированные ТНЭ обеспечивают работоспособность систем с переменным магнитным полем. Соединяют элементы обычно пайкой. В Советском Союзе широко применяется гальваническое сращивание медью. Для больших магнитных систем все чаще используются ТНЭ с каналами для охлаждения гелием.

В обширном докладе ФРГ [1] представлены результаты разработок различных сверхпроводников на основе ниобий-титановых сплавов и Nb₃Sn. Обычно используется сплав ниобия с 50% титана, на котором получена плотность тока до $3 \cdot 10^6$ А/см² при индукции магнитного поля 5 Т. Технология изготовления многожильных сверхпроводников из этого сплава достигла высокой степени совершенства.

Разработаны сильноточные транспонированные многожильные проводники для накопителя энергии, установок термоядерного синтеза, сверхпроводящих ключей, способные проводить токи от 5 до 15 кА при 5 Т (см. табл. 1, п. 1—3). Для уменьшения потерь на переменном токе применяют перегородки из сплавов с высоким электросопротивлением.

Подобные конструкции производятся и в США. Для магнитной системы токамака в Ок-Риджской лаборатории разработан транспонированный сверхпроводник из модулей сечением 4 × 4 мм с упрочняющей стальной пластиной (табл. 2, п. 5). В настоящее время он изготавливается.

Транспонированные проводники из тонких многожильных проводов с нитями диаметром 10 мкм используются в США для изготовления СМС ускорителей.

Большое внимание в докладах Конгресса уделено многожильным сверхпроводникам на основе интерметаллидов, получаемых методом твердофазной диффузии. Суть метода состоит в изготовлении композита из бронзы с ниобиевыми или ванадиевыми жилами и последующей термообработке при 650—800°С, в результате которой образуется сверхпроводящее соединение.

В докладе ФРГ [1] описаны сверхпроводники на основе Nb₃Sn с числом жил до 70 000 критической плотностью тока $2,6 \cdot 10^5$ и $0,51 \cdot 10^5$ А/см² при 5 и 12 Т соответственно. Для стабилизации ТНЭ предлагается запаивать проводники между медными пластинами или наматывать вокруг медной полосы, покрытой танталом (см. табл. 2, п. 7). Последний предохраняет медь от загнивания оловом при термообработке.

Термические сжимающие напряжения, возникающие в сверхпроводящем слое при охлаждении в жидком гелии многожильного сверхпроводника на основе Nb₃Sn, приводят к уменьшению критических температуры и тока. Из таких сверхпроводников (без медной стабилизации) намотаны соленоиды внутреннего диаметра от 15 до 55 мм. Внутри катушек достигнута индукция магнитного поля 12—14,5 Т, критический

Характеристики сверхпроводящих ТЭЭ и проводов

Таблица 2

№ п.п.	Сверхпроводник	Матрица	Сечение или диаметр ТЭЭ, мм	Число модулей	Диаметр модулей, мм	Число жил в модуле	Диаметр жилы, мкм	Отношение матрица/сверхпроводник	Критический ток (4,2 К), А
1	NbTi	Cu + CuNi	7,5×1,5	17	0,85	2600	10	1,8	6000
2	NbTi	Cu	18×4	24	1,45	1710	20	2	15000
3	NbTi	Cu	17×12	209	0,86	300	—	5,2	5000
4	NbTi	Cu + CuNi	17,3×5,1	315	0,4	—	—	3,5	15000; 2,3 Т
5	NbTi	Cu + CuNi	27,2×13	12	4×4	—	—	13	10000; 8 Т
6	Nb ₃ Sn	CuSn + Cu	0,55	7	0,18	230	6	2	80
7	Nb ₃ Sn	CuSn	2,3×1,0	12	0,4	1615	—	—	1000
8	Nb ₃ Sn	Cu + CuSn	0,74	7	0,24	331	7,5	2,3	180
9	Nb ₃ Sn	CuSn	3,36	1	3,36	5551	12	3,36	1500
10	V ₃ Ga	CuGa	0,18	1	0,18	110—350	5—10	—	2,5·10 ⁴ А/см ² ; 15 Т

ток равен или больше тока коротких образцов. Ниобий-оловянные многожильные проводники могут изготавливаться в промышленных условиях. Из предварительно термообработанных проводников можно наматывать соленоиды без разрушения хрупких слоев.

Такие сверхпроводники испытаны в соленоидах и в Японии [2]. В катушке из скрученных многожильных проводов (см. табл. 2, п. 8) достигнута индукция 9,2 Т, критический ток не превышает 65% тока короткого образца, что объясняется плохой стабилизацией и разрушением сверхпроводящего слоя. Развитием этих работ явилось создание сильноточных сверхпроводников с диффузионным барьером из ниобия вокруг каждой жилы (см. табл. 2, п. 9).

В лабораториях США ведутся работы по созданию ниобий-оловянных сверхпроводников на ток до 10 кА при 12 Т.

Следует отметить, что серьезных достижений, аналогичных уровню разработок в Советском Союзе, в создании сильноточных стабилизированных сверхпроводников на основе Nb₃Sn на Конгрессе не было представлено.

Технология изготовления и свойства многожильных сверхпроводников на основе V₃Ga представлены в докладе ГДР [4]. Такие материалы имеют более высокую плотность тока при индукции магнитного поля более 12 Т по сравнению со сверхпроводником на основе Nb₃Sn. Изготовлены проводники длиной до 4—5 км и плотностью тока (по всему сечению) до 3·10⁴ А/см² при 15 Т (табл. 2, п. 10).

В докладе США [5] сообщалось о разработке фирмой «Вестингауз» многоволоконных сверхпроводников на основе Nb₃Ge. По аналогии с ленточными многожильными сверхпроводниками получены с использованием разложения хлоридов и осаждением Nb₃Ge на нити из Al₂O₃. Получены сверхпроводники с 200 нитями диаметром 20 мкм, покрытые медью и алюминием, критическая температура составила 21—21,5 К.

Отдельное заседание секции Конгресса было посвящено сверхпроводящим ЛЭП. Их разработкой занимаются в США, СССР, Японии и ФРГ. В качестве сверхпроводника используются ниобий и многожильные сверхпроводники на основе Nb₃Sn [6].

Секция № 5 «Способы преобразования энергии»

Термоэмиссионные преобразователи были представлены на Конгрессе семью докладами: по одному от СССР и ФРГ, пять от США. Несмотря на небольшое число,

они охватывали широкий круг вопросов — от изложения национальной программы США по термоэмиссионным преобразователям до фундаментальных исследований по физике поверхности электродов.

В докладе США [7] излагалась программа научно-технических исследований и разработок по термоэмиссионным преобразователям в США до 90-х годов. Американские специалисты исходят из того, что термоэмиссионный метод является одним из наиболее перспективных при преобразовании тепловой энергии в электрическую для космических ядерно-энергетических установок и высокотемпературных надстроек к ТЭС. Поэтому реализация программы ведется под эгидой двух государственных организаций и имеет цели: 1) обеспечение высокоэффективными термоэмиссионными ядерно-энергетическими установками космических задач NASA с использованием электроактивных двигателей и 2) разработка научно-технической основы применения термоэмиссионных преобразователей в качестве высокотемпературной надстройки к пароводяному циклу ТЭС, включая станции, работающие на угле. При этом предполагается повысить КПД с 40 до 52% без значительного увеличения капитальных затрат и стоимости электроэнергии. Более конкретно американская программа выглядит так.

ERDA предусматривает к 1981 г. разработать электрогенерирующие элементы для термоэмиссионной надстройки, к 1984 г. отработать термоэмиссионный модуль к надстройкам с КПД, равным 16%, и ресурсом работы 25 тыс. ч, к 1989 г. построить демонстрационную ТЭС с термоэмиссионной надстройкой.

NASA разрабатывает быстрый реактор с термоэмиссионными преобразователями выносного типа на молибденовых тепловых трубах с высокотемпературным литиевым теплоносителем. К 1985 г. планируется отработать тепловые трубы и электрогенерирующие каналы (ЭГК), к 1990 г. соорудить термоэмиссионный реактор-генератор мощностью 400—500 кВт(эл.) для питания электроактивных двигателей тягой до 21 кг. В США уже есть двигатели тягой 17 кг. К 1980 г. предусматривается также отработать радиоизотопный термоэмиссионный генератор с ресурсом работы в космосе 10 лет.

В настоящее время в США созданы термоэмиссионные преобразователи с эмиттером, полученным из газофазного хлоридного вольфрама, и коллектором, покрытым WO₃, с КПД 18 и 14% при температуре эмиттера 1800 и 1600 К соответственно. Барьерный индекс (суммарные электрические потери в межэлектродном промежутке) у этих преобразователей равен 1,9 эВ. Одна-

ко отмечается, что после нескольких сот часов работы он увеличивается до 2 эВ и, как следствие, падает КПД преобразователя. Ведутся работы по снижению КПД, а также по уменьшению энергетических потерь в плазме и поиску коллекторных материалов с низкой работой выхода электронов при низком давлении паров цезия. Уже имеются материалы с работой выхода электронов ~1 эВ в парах цезия и кислорода и 1,3 эВ в парах цезия без кислорода.

Доклад СССР [8] был посвящен транспортабельным ядерно-энергетическим установкам (ЯЭУ) с термоэмиссионным преобразованием энергии массой до 100 т. Такие источники электроэнергетики мощностью несколько сот киловатт могут быть сделаны компактными, сравнительно легкими и надежными, не требующими обслуживания в течение двух-трех лет. Они способны обеспечивать различных потребителей (например, буровые установки в отдаленных северных и пустынных районах) электрической и тепловой энергией. ЯЭУ могут располагаться как под землей, так и на перемещаемых платформах. В докладе рассмотрена возможность применения в таких установках реакторов-преобразователей с различными замедлителями на медленных и промежуточных нейтронах, а также быстрых реакторов. Общим для всех реакторов является применение жидкометаллического теплоносителя и ЭГК такого же типа, как у опытного термоэмиссионного реактора-преобразователя «Топаз». Обсуждаются также особенности транспортабельных термоэмиссионных ЯЭУ, в которых тепло из быстрого реактора передается тепловыми трубами к вынесенным термоэмиссионным преобразователям.

Технико-экономическое обоснование перспективности использования термоэмиссионных надстроек к пароводяному циклу приводилось в докладе [9]. Отмечались положительные особенности термоэмиссионных преобразователей: отсутствие движущихся частей; температура холодильника, хорошо сочетающаяся с температурой стандартных парогенераторов; высокий КПД преобразования тепловой энергии; модульный тип конструкции надстройки. Рассматривались два варианта термоэмиссионных надстроек: котельный агрегат с термоэмиссионной надстройкой и парогенератором и МГД-генератор, на выходе которого устанавливается термоэмиссионная надстройка, а затем парогенератор. Сообщались различные режимы работы. Расчеты показывают, что в первом варианте КПД станции можно увеличить до 52%; во втором — до 62% при КПД пароводяного цикла 40%, термоэмиссионного и МГД-цикла — по 20%.

В дискуссиях сообщалось о результатах разработки в США термоэмиссионных модулей большой единичной мощности, совмещенных с парогенераторами, и об огневых испытаниях полномасштабного демонстрационного термоэмиссионного модуля.

Низкотемпературный термоэмиссионный преобразователь с эмиттером из кермета (30% $UO_2 + 70\%$ Mo) с хорошей тепло- и электропроводностью и коллектором из поликристаллического молибдена при температуре 1200 и 1300°С обеспечивает 2—4 Вт/см² при межэлектродном зазоре 1 мм и КПД 15% [10]. Преобразователь испытан с нагревом эмиттера бензиновой горелкой. В докладе рассматривалась возможность создания на базе этого преобразователя коммерческого генератора на 1 кВт с удельной выходной мощностью 3 Вт/см² при температуре эмиттера и коллектора 1500 и 700 К соответственно.

Программа исследовательских работ США по созданию низкотемпературных термоэмиссионных преоб-

разователей, методы исследования характеристик электродных материалов и результаты их исследований приводились в докладе [11]. Сообщались характеристики преобразователей при низкой температуре эмиттера. Наиболее низкая работа выхода электронов 1,1 эВ в парах цезия с кислородом получена для диборидов титала и титана, такие же показатели имеет в этих условиях и кремний. Примерно на 0,1 эВ больше работа выхода электронов TiO_2 , ZnSe, CeB_6 . Работа выхода электронов окиси цинка в парах цезия без кислорода составляет 1,28 эВ. В докладе приводятся вольт-амперные характеристики преобразователей с эмиттерами из вольфрама и коллекторами из окиси титана и гексаборида лантана при температуре эмиттера 1400 К. Характеристики этих преобразователей близки, барьерный индекс 2 эВ, работа выхода электронов коллектора была низкой, всего 1,2—1,3 эВ.

Авторы доклада [12] сообщили об исследованиях монокристаллов гексаборидов лантана, цезия, самария и бария. Структура и состав изучались методами дифракции медленных электронов и с помощью Оже-спектроскопии. Работа выхода электронов отдельных граней изучалась методом задержки монохроматического пучка и методом Ричардсона. В докладе приводились данные о кристаллической решетке и испаряемости этих соединений, о работе выхода электронов отдельных граней, коэффициенте отражения электронов, влиянии паров цезия на работу выхода. Несмотря на тщательное изготовление кристаллов, наблюдается разброс в значениях работы выхода электронов ~0,2 эВ. Из исследованных материалов наиболее перспективными для термоэмиссионных преобразователей являются грани гексаборида лантана (100), работа выхода 2,7—2,52 эВ и гексаборида цезия (100), работа выхода 2,62 эВ. В парах цезия работа выхода грани (100) гексаборида лантана понижается на 1,2 эВ.

На Конгресс был представлен доклад [13], в котором рассматривалась возможность уменьшения энергетических потерь в плазме термоэмиссионного преобразователя. Высокая концентрация цезиевой плазмы в межэлектродном зазоре достигается двумя способами. В первом она генерировалась в преобразователе с помощью СВЧ-излучения. Экспериментальные результаты по энергетическим потерям удовлетворительно согласуются с теорией Лема. Во втором предполагается передача энергии от возбужденных атомов азота атомам цезия. Экспериментально показано, что такой процесс имеет место.

Секция № 7 «Специализированные электромеханические комплексы, вычислительная и микроэлектронная техника в системах управления»

Большой интерес специалистов в области ядерной энергетики вызвали доклады, посвященные управляющим вычислительным машинам и электромеханическим комплексам для АЭС. Наиболее интересными были три доклада [14—16]. В дискуссиях по докладам отмечалась все возрастающая роль ЭВМ в системе контроля управления и защиты реакторов АЭС. Например, в Канаде за последние годы накоплен большой положительный опыт применения для управления реактором и всей АЭС двух больших ЭВМ [14]. Система наряду с прямым регулированием реактора и другого оборудования, включая регулирование мощности и энергораспределения, регистрирует данные, выдает информацию на дисплеи, обеспечивает аварийную сигнализацию, регистрирует срабатывание оборудования в аварийных ситуа-

Полные отказы системы регулирования Таблица 3
АЭС «Пикеринг»

Год	Число отказов	Потеря в выработке электроэнергии, 10 ³ МВт·ч	Выработка электроэнергии, 10 ⁶ МВт·ч
1973	2	1	14
1974	2	21	14
1975	5	65	11
1976	0	0	17
Всего:	9	87	56

циях, управляет устройством для перегрузки топлива, пуском турбины и т. д. Функции защиты возложены пока на систему, не использующую ЭВМ.

Обе ЭВМ системы могут автономно выполнять функции регулирования, обеспечивая непрерывную самопроверку. При появлении сигнала о неисправности автоматически предпринимаются попытки исправить положение путем перезаписи программы с барабана и другие меры. Однако число таких попыток ограничено. При невозможности исправить положение управление переключается на вторую ЭВМ. При одновременном отказе обеих ЭВМ реактор останавливается. В докладе приводятся данные о надежности таких систем. Отказы систем подразделяются на вызванные одновременным выходом из строя двух ЭВМ (табл. 3) и обусловленные сбоем и не обнаруженные самопроверкой (табл. 4). Отказы первой группы редко вызываются причиной, общей для обеих ЭВМ (отказом общего вида), и происходят в основном тогда, когда одна из ЭВМ находится в ремонте, а в другой обнаружен сбой. В связи с этим автор указывает на необходимость повышения надежности ЭВМ и сокращение времени остановки на ремонт.

Во второй группе четыре отказа вызваны программным обеспечением, пять — оборудованием ЭВМ и три — ошибками эксплуатационного персонала. Эта группа отказов обусловила за рассмотренный период три остановки, осуществленные системой защиты. Автор указывает, что отказы второй группы произошли либо по причинам, не предусмотренным проектировщиками, либо их вероятность считалась чрезвычайно незначительной и идентификация не предполагалась. Харак-

Отказы системы регулирования АЭС «Пикеринг», не обнаруженные самопроверкой Таблица 4

Год	Число отказов	Потеря в выработке электроэнергии, МВт·ч
1973	5	7000
1974	5	1300
1975	1	0
1976	1	200
Всего:	12	8500

терно, что отказы не приводили к заметным потерям энерговыработки, так как их появление удавалось вовремя обнаружить и переключить управление на другую ЭВМ, или остановки происходили в процессе выхода, на малой мощности после модернизации программы.

В ряде случаев регулирование реакторов без ЭВМ может стать практически невозможным. Так, на канадском тяжеловодном кипящем реакторе «Джентли-1», имеющем период развития неустойчивости энергораспределения около 1 с, только применение ЭВМ для пространственной стабилизации делает возможной нормальную эксплуатацию. Принятую структуру систем регулирования на базе ЭВМ предполагается использовать на канадских реакторах по крайней мере в течение ближайших 10 лет. Наряду с этим в Канаде проводятся исследования распределенных структур систем регулирования, основанных на мини-ЭВМ и вызванных к жизни прогрессом в технологии интегральных схем, микропроцессоров и периферийного оборудования.

Значительный экономический эффект ожидается получить в ближайшие годы от перехода на связь между отдельными узлами оборудования ЭВМ по одному коаксиальному кабелю, широко применяющемуся в телевидении. Признается возможным полный перевод функций аварийной защиты на специализированные ЭВМ. Высокая эффективность и надежность систем регулирования, построенных на ЭВМ и проиллюстрированная данными табл. 3 и 4, делает их привлекательными для вновь проектируемых реакторов и в других странах. Так, в ФРГ для вновь проектируемых систем контроля и регулирования реакторов LWR предусматривается использование ЭВМ в качестве основного элемента систем регулирования энергораспределения и мощности реактора, а также систем аварийной защиты от локальных превышений энерговыделения [15].

Одной из особенностей многих систем управления современных АЭС, использующих ЭВМ, является обеспечение автопуска реактора, автоматического вывода его на номинальную мощность и работы в быстрых переходных режимах при слежении за нагрузкой в сети. Так, минимальное время автоматического вывода разогретого реактора на АЭС в Библесе (ФРГ) из подкритического состояния до номинальной мощности составляет 35 мин, максимальная скорость нарастания мощности реактора на низких ее уровнях ~1% в секунду.

Для систем регулирования реакторов LWR в ФРГ в последнее время характерно введение ограничений на отдельные параметры, реализуемые с применением ЭВМ. Например, ограничение на плотность энерговыделения в верхней и нижней половинах активной зоны, на температуру и давление теплоносителя, уровень воды в регуляторе давления. Для реакторов АЭС «Библис» и последующих реакторов корпусного типа в ФРГ характерно также регулирование мощности и стабилизация общего высотного изменения энергораспределения путем последовательного перемещения фиксированных групп стержней регулирования, вводимых сверху и снизу активной зоны. Для перспективных реакторов большей мощности предусматривается локальное автоматическое регулирование энергораспределения с использованием ЭВМ.

Большую роль играют АСУТП с ЭВМ на советских АЭС, особенно на АЭС с РБМК-1000 [16]. Показательно, что в начальный период эксплуатация головного блока РБМК-1000 ЛАЭС осуществлялась без программы контроля расчетных параметров реактора, в связи с чем мощность была ограничена 65%. С вводом в строй программы реактор был выведен на номинальную мощность.

Дальнейшее развитие АСУТП ожидается по пути все более полной автоматизации управления реактором и энергоблоком в целом, и ввиду сложности алгоритмов оно должно базироваться на ЭВМ. Считается, что именно развитие автоматизации наряду с совершенствованием методов представления данных должно значительно уменьшить информационную нагрузку оператора реактора. В последующем развитии АСУТП реакторов различных типов признается необходимой унификация специального алгоритмического и программного обеспечения, что в первую очередь касается функций, связанных с расчетом энергораспределений, расчетом и выдачей управляющих воздействий, диагностикой состояния технологического оборудования.

АРТЕМОВ А. И., НИКУЛИН А. Д., ГУСЬКОВ Ю. К., ПУПКО В. Я., ПОСТНИКОВ В. В.

ПЕРЕЧЕНЬ ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ДОКЛАДОВ

1. Pfister H., Hillmann H. (ФРГ). Новое в разработке сверхпроводящих материалов. Докл. ЗБ.15.
2. Tada H. e.a. (Япония). Разработка мультифилламентных Nb_3Sn -сверхпроводников и катушек соленоидов. Докл. ЗБ.23.
3. Rosner C., Swartz P., Zeitlin B. (США). Выбор материалов при проектировании сверхпроводящих устройств. Докл. 1.60.
4. Фишер К. и др. (ГДР). Сверхпроводящие материалы на основе V_3Ga для технического использования. Докл. ЗБ.34.
5. Jones C., Murphy J. (США). Создание проводников обложки возбуждения в сверхпроводящих электрических устройствах. Докл. 1.41.
6. Пешков И. Б. и др. (СССР). Производство и испытание

- гибкой сверхпроводящей жилы с гибкой криостатирующей оболочкой. Докл. 2.113.
7. Merrill O., Morris J. (США). Термоэмиссионные преобразователи энергии, применяемые в программах исследований в США. Докл. 5А.31.
8. Кузнецов В. А. и др. (СССР). Транспортальные ядерно-энергетические установки с термоэмиссионным преобразованием энергии. Докл. 5А.32.
9. Miskolczy G., Huffman F. (США). Исследование тепловой электростанции с термоэмиссионной надстройкой. Докл. 5А.36.
10. Henne R., Henne T., Weber W. (ФРГ). Состояние разработок термоионных газопламенных преобразователей для небольших энергетических установок. Докл. 5А.40.
11. Huffman F., Rufen F. (США). Разработка более совершенных термоэмиссионных преобразователей. Докл. 5А.33.
12. Swanson L., McNeely D. (США). Характеристики поверхности и электронная эмиссия BaB_6 , LaB_6 , GeB_6 , SmB_6 . Докл. 5А.38.
13. Shaw D., Manikopoulos C., Lee C. (США). Азотно-цеозиевый термоэмиссионный преобразователь. Докл. 5А.37.
14. Pearson A. (Канада). Управление с помощью вычислительной техники ядерными установками в Канаде — опыт, имеющийся в настоящее время, и перспективы. Докл. 7.18.
15. Aleite W. (ФРГ). Достижения и разработка фирмы KWU в области создания систем управления атомных электростанций с реакторами типа LWR. Докл. 7.20.
16. Адасько В. И. и др. (СССР). Системы контроля и управления технологическими процессами атомных электростанций с применением УВМ. Докл. 7.19.

Советско-французский семинар по водо-водяным реакторам

На семинаре, состоявшемся 1—3 июня 1977 г. в ИАЭ им. И. В. Курчатова, было заслушано 15 докладов, семь из них французских. Круг обсуждавшихся вопросов был широким: исследование переходных режимов, методы внутриреакторного контроля и контроля активности первого контура, результаты эксплуатации.

Итоги длительной эксплуатации водо-водяных реакторов в обеих странах освещались в нескольких докладах. Отмечалось, что, за исключением отдельных лет, когда имели место серьезные нарушения в работе на АЭС в Шузе и первом блоке НВАЭС, коэффициенты нагрузки АЭС были весьма высокими и соответствовали ~7000 ч работы на полной мощности в году. Стоимость электроэнергии на НВАЭС составляет около 0,6 коп./кВт·ч и на АЭС в Шузе 6 сант./кВт·ч, что существенно ниже, чем на ТЭС (0,8 коп. и 11—12 сант. соответственно).

Успешная работа водо-водяных реакторов и результаты проведенных на них исследований позволили в отдельных случаях повысить их проектную мощность. Так, на АЭС в Шузе мощность повышалась трижды и доведена в 1975 г. до 305 МВт(эл.), или на 15% выше проектной.

Как в СССР, так и во Франции была подтверждена работоспособность твэлов в массовом масштабе до выгораний 30 000—33 000 МВт·сут/т U.

При работе АЭС ведется строжайший контроль за попадающими в окружающую среду радиоактивными

отходами. Фактические выбросы значительно ниже предельных, устанавливаемых органами здравоохранения, и составляют: газы ~5000 Ки/год (АЭС в Шузе и суммарно третий и четвертый блоки НВАЭС), аэрозоли ~0,2 Ки/год (третий и четвертый блоки НВАЭС), жидкости <3 Ки/год (АЭС в Шузе). Французскими специалистами отмечалось, что из-за использования стальных покрытий твэлов количество накапливающегося в первом контуре трития составляет на АЭС в Шузе около 3000 Ки/год, а это значительно выше, чем для водо-водяных реакторов мощностью 1000 МВт(эл.) с твэлами из циркония (1000 Ки/год). Многолетние наблюдения в районе НВАЭС за концентрацией радиоактивных веществ в воздухе, воде, донных отложениях не выявили какого-либо влияния АЭС на объекты внешней среды и население.

Загрязнение первого контура продуктами коррозии конструкционных материалов обсуждалось в докладе П. Беслу и Г. Фрежавили. Растворенные в воде первого контура или находящиеся в виде суспензий окислы конструкционных материалов и отложение их на поверхности оборудования вызывают ряд трудностей при эксплуатации энергетических реакторов: повышенное облучение персонала, особенно при ремонте, нарушение работы механизмов, снижение коэффициентов теплопередачи и т. п. Поэтому КАЭ Франции совместно с персоналом АЭС проводит широкую программу исследований по выявлению влияния различных факторов