

Э

ISSN 0013-5860



Санкт-Петербург – 300 лет



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

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 «АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД» (г. МОСКВА)
НТА «ПРОГРЕССЭЛЕКТРО» (г. МОСКВА)
АО «РОСЭЛПРОМ» (г. МОСКВА)

СОВЕТ УЧРЕДИТЕЛЕЙ

ЧИБИРКИН В.В., МАКАРЕВИЧ Л.В., МЕЩЕРЯКОВ В.М., СОРИН Л.Н.,
КОВАЛЕВ Ф.И. (председатель совета), ЮНЬКОВ М.Г., ПОДАРУЕВ А.И., ГЛОВАЦКИЙ А.В.

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Главный редактор **КОЧЕТКОВ В.Д.**

БЕЛКИН Г.С., БРЯНЦЕВ А.М., ДАЦКОВСКИЙ Л.Х., ДОЛКАРТ В.М., КОЗЯРУК А.Е., КОПЫЛОВ И.П.,
ЛУРЬЕ А.И., МАВЛЯНБЕКОВ Ю.У., МОСКАЛЕНКО В.В., НИКУЛИН А.А., РОЗАНОВ Ю.К.,
СЛЕЖАНОВСКИЙ О.В. (зам. главного редактора), ТРУБАЧЕВ С.Г., ТУБИС Я.Б., ФИНКЕЛЬ Э.Э., ФЛОРЕНЦЕВ С.Н.

Содержание журнала можно бесплатно получить
в INTERNET через службу ИНФОМАГ,
организованную в Московском физико-техни-
ческом институте.

Адрес сайта: <http://www.infomag.ru>

Журнал переводится на английский язык в полном
объеме и выходит в США в издательстве
"ALLERTON PRESS, INC" (18 West 27th Street New
York, N.Y. 10001).

Подписаться на журнал можно в почтовых
отделениях связи по объединенному каталогу
Департамента почтовой связи. Подписной индекс
— 71111.

В редакции можно подписаться на журнал с
любого месяца и приобрести отдельные номера
за прошлые и нынешний годы.

При перепечатке ссылка на журнал «Электротехника»
обязательна.

Мнение редакции не всегда совпадает с точкой зрения
авторов статей.

За содержание рекламных материалов редакция
ответственности не несет.

Рукописи статей не возвращаются.

Издатель: ЗАО "Знак" 101000, Москва, Главпочтamt, а/я 648.

Адрес редакции: 123242, Москва, Зоологическая ул., 11, комн. 213 Телефон/факс: 254-11-52

E-mail elektrotechnika@mtu-net.ru

СОДЕРЖАНИЕ

Ковчин С.А., Козярук А.Е., Сабинин Ю.А. Электротехника Санкт-Петербурга и ее научные школы за 300 лет (краткий исторический обзор)	3
Абрамович Б.Н., Козярук А.Е., Рудаков В.В., Шклярский Я.Э. Кафедре электротехники и электромеханики Санкт-Петербургского Государственного Горного института – первого технического вуза России – 110 лет	9
ЭЛЕКТРОПРИВОД	
Белов М.П., Новиков В.А., Рассудов Л.Н., Сушников А.Л. Автоматизированный электропривод – современная основа автоматизации технологических процессов	12
Гиммельман В.Г., Золотарев В.Ф., Постников Ю.В., Соколовский Г.Г. Основные аспекты построения следящих электроприводов крупного радиотелескопа	17
Демидов С.В. Электромеханические системы управления тяжелыми металлорежущими станками станкостроительного завода им. Свердлова ..	21
Шестаков В.М., Алексеев Д.В., Епишキン А.Е., Нагибина О.Л. Оптимизация динамических режимов работы взаимосвязанных электромеханических систем испытательных вибростендов ..	25
Дробкин Б.З., Карзунов Р.А., Крутиков Е.А., Павлов П.А., Пронин М.В. Высоковольтные тиристорные преобразователи частоты ОАО "Электросила"	30
ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ	
Пинский Г.Б. Гидрогенераторостроение в ОАО "Электросила"	34
Кади-Оглы И.А. Пожаро-взрывобезопасные турбогенераторы нового поколения средней мощности	40
Логинов А.Г. Системы возбуждения турбо- и гидрогенераторов ОАО "Электросила"	43
ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЯ	
Пинчук Н.Д., Рыбаков В.Л., Антонюк О.В. Высокоэффективные технологии в ОАО "Электросила"	48
Безменов Ф.В., Иванов В.Н. Высокочастотные электротехнологии	53
Васильев А.С., Демидович В.Б. Перспективы применения индукционного нагрева в металлургической промышленности	58
Загривный Э.А., Козярук А.Е., Батаев С.Н. Электротермический комплекс на основе скважинного электродного нагревателя мощностью более 500 кВт для теплового воздействия на продуктивный пласт высоковязкой нефти	61
Абрамович Б.Н., Кабанов С.О., Красавина М.А., Полищук В.В. Ограничители перенапряжений – важнейший элемент обеспечения электромагнитной совместимости	66
Сведения об авторах опубликованных статей	70

CONTENTS

Kovchin S.A., Kozyaruk A.E., Sabinin Y.A. Electrical engineering in St.-Petersburg and its scientific schools for 300 years (brief historical review)	3
Abramovich B.N., Kozyaruk A.E., Rudakov V.V., Shklyarskiy Y.A. The electrical engineering and electromechanics department of saint-petersburg mining institute – the oldest technical institute in Russia – is 110 years old	9
ELECTRIC DRIVE	
Belov M.P., Novikov V.A., Rassudov L.N., Sushnikov A.A. The automated electric drive – a basis of automation of technological processes	12
Gimmelman V.G., Zolotarev V.F., Postnikov Y.V., Sokolovskiy G.G. Main aspects of servo-drive design for large radio-telescopes	17
Demidov S.V. Electromechanical control systems for heavy metal-cutting machine tools of machine-tool plant by Sverdlov	21
Shestakov V.M., Alekseev D.V., Epishkin A.E., Nagibina O.L. Optimization of dynamic working modes of interconnected electromechanical systems of vibration test machines	25
Drobkin B. Z., Karzunov R. A., Krutyakov Y. A., Pavlov P. A., Pronin M. V. High-voltage thyristor frequency converters JJSC "Electrosila"	30
ELECTRICAL MACHINES	
Pinsky G.B. To the article hydrogenerators production at the "Electrosila"	34
Kadi-Ogli I.A. The medium power fire- and explosion-safe turbogenerators of new generation	40
Loginov A.G. JJSC "Electrosila" turbo- and hydrogenerators excitation systems	43
ELECTRICAL TECHNOLOGY	
Pinchuk N.D., Rybakov V.L., Antonyuk O.V. Highly-efficient technologies in JJSC "Electrosila"	48
Bezmenov F.V., Ivanov V.N. High-frequency technology	53
Vassiliev A., Demidovitch V. Prospectives of induction heating applications in metallurgical industry	58
Zagrivniy A.A., Kozyaruk A.E., Bataev S.N. Thermal-electric system based on hole electrode heater, which power is more than 500 kW, to thermally act upon productive extra-heavy oil bed	61
Abramovich B.N., Kabanov S.O., Krasavina M.A., Polischuk V.V. Surge arrestors as the most important element of the electromagnetic compatibility ensuring	66
About the authors	70

Уважаемые читатели!

Дорогие коллеги!

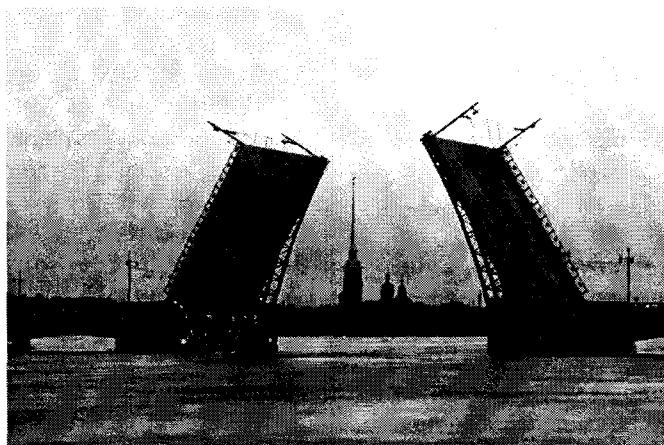
В 2003 г. великому городу России, городу науки, культуры и производства – Санкт-Петербургу исполняется 300 лет. Роль города в становлении и развитии Российского государства, мировой науки и культуры колоссальна.

Настоящий выпуск журнала посвящен истории и современному состоянию одного из важнейших направлений прикладной науки – электротехники.

Санкт-Петербург является местом рождения, развития и становления отечественной и мировой электротехнической науки и промышленности. Достаточно прийти на набережную Невы на Васильевском острове к дому, где жили члены Петербургской Академии и выдающиеся ученые, чтобы по памятным доскам на фасаде проследить историю развития электротехники. Здесь установлены доски памяти Л. Эйлера, Э.Х. Ленца, Б.С. Якоби и др. На Неве происходило испытание первого двигателя постоянного тока. В Петербурге были организованы первые в России кафедры электротехники, электропривода, электрических машин и др. В Санкт-Петербурге созданы и функционируют многочисленные предприятия электротехнической промышленности, проектные и научно-исследовательские учреждения.

В объеме одного номера журнала невозможно осветить все аспекты создания, производства и эксплуатации электрооборудования. С учетом направленности журнала в статьях, в основном, освещаются результаты исследований в следующих областях: электромашиностроение, электропривод, электротехнологии.

Санкт-Петербург является родиной специальных транспортных электротехнических установок: систем электродвижения судов, систем позиционирования технических средств ос-



воения шельфа, тяговых электроприводов различного назначения, созданием которых автор этих строк занимался более четверти века. Однако не представилось возможным осветить вопросы создания и внедрения специального электрооборудования. Важным разделом электротехники

является передача электроэнергии, электрические сети и системы. Роль Санкт-Петербурга в развитии этих направлений значительна, но не освещена в статьях данного выпуска журнала. Вероятно, эти вопросы будут отражены в специальных отраслевых журналах.

В номере приведены исторические сведения о Петербургской электротехнике, а также результаты исследований в ведущих вузах и на предприятиях.

Особое место занимают статьи о результатах работы флагмана Российской электротехники – ОАО "Электросила", оказавшего большую поддержку в выпуске данного номера журнала.

Настоящий выпуск журнала "Электротехника" даст возможность читателю проследить исторические вехи развития электротехнической науки Санкт-Петербурга и ознакомиться с современным состоянием и достижениями в отдельных областях.

И в науке, и в энергетической электротехнике, и в специальных электроустановках, и в быту роль и польза Петербургской и Ленинградской электротехнической школы неоспоримы.

Слава электротехникам Санкт-Петербурга – прошлым, настоящим и будущим.

Профессор А.Е. Козярук, член редколлегии журнала, ответственный за выпуск

Электротехника Санкт-Петербурга и ее научные школы за 300 лет (краткий исторический обзор)

КОВЧИН С.А., КОЗЯРУК А.Е., САБИНИН Ю.А.

Изложены основные этапы развития теории и практики электротехники в Петербурге XVIII–XX вв. Основное внимание уделено становлению Ленинградской-Петербургской научной школы электропривода.

Электротехникой можно назвать отрасль техники, связанную с производством, передачей, распределением и применением электроэнергии во всех областях жизнеобеспечения и деятельности людей.

Во всех областях электротехники С.-Петербург имеет достойное прошлое и настоящее, связанные не только с именами видных российских ученых, но и с историей и продукцией крупнейших и многочисленных промышленных предприятий, в которую заложены плоды труда рабочих, ученых и сотрудников научно-исследовательских и проектно-конструкторских организаций.

В этой работе авторы сузили обзор всей сферы электротехники, прослеживая развитие только электродвижения (электропривода) и связанных с ним систем автоматизации технологических процессов.

Мы полагаем, что другие статьи этого выпуска журнала осветят пути развития различных направлений научной школы *промышленных электротехнологий*, которой принадлежит будущее. Её основоположники в Петербурге: А.А. Чернышев (1882–1940), В.П. Вологдин (1883–1950), А.Е. Слутоцкий (1912–1991), А.В. Донской (1911–1990), А.С. Васильев (род. 1926 г.).

Мы остановились на этой научной школе Петербурга еще и потому, что сочетание средств современной электроники и вычислительной техники в устройствах автоматизации электроприводов и технологических установок дало *основной технико-экономический эффект*, который *позволил утроить объем мирового производства за последние два десятилетия XX в.* [1].

Даль веков сохранила имена первых российских электротехников – академиков Петербургской Академии наук Михаила Васильевича Ломоносова (1711–1765) и Георгия Вильгельмовича Рихмана (1711–1753) [2].

Заслуга их состоит в том, что они первыми в России и одними из первых в Европе занялись изучением *количественных оценок природы электричества*.

In the work the milestones of progress in the theory and practice of an electrical engineering in St. Petersburg on XVIII–XX centuries are explained. The main attention is given to becoming of Leningrad – St.Petersburg scientific school of the electric drive.

Г.В. Рихману принадлежит честь создания первого электроизмерительного прибора – "указателя электрической силы" – электрометра. Примерно в 1744 г. ему была поручена организация первой физической лаборатории по изучению электричества. Петербургская Академия нашла продолжателя этих исследований в лице Франца Ульриха Теодора Эпинуса (1724–1802), который в 1759 г. опубликовал работу "Опыт теории электричества и магнетизма" [3]. Эта теория стала фундаментом для последующих работ по электро- и магнитостатике.

Труды Ломоносова, Рихмана, Эпинуса и Эйлера были не только важным вкладом Петербургской Академии в науку об электричестве, но и заложили основу Петербургской школы электротехники и способствовали блестящим успехам российских ученых в этой области в XIX в.

После создания в 1800 г. "вольтова столба" – первого искусственного источника электрического тока появилось понятие "гальванического электричества" и практически прекратились исследования электростатики.

Первую славную страницу здесь открывает академик Петербургской Академии наук Василий Владимирович Петров (1761–1834). Мы, потомки, безусловно, можем считать его *родоначальником электротехнологий*. Основные научно-исследовательские работы по гальванизму В.В. Петровым выполнялись (с 1801 г.) в физическом кабинете Медико-хирургической академии (ныне Военно-медицинская академия). Ему принадлежит честь открытия "электрической дуги" и практического применения ее для освещения, плавки и восстановления металлов из окислов (руд). Он открыл явления тлеющего и искрового разрядов в вакууме, первым объяснил принцип действия гальванических батарей, ввел термин "электрическое сопротивление" и установил зависимость сопротивления проводника от площади его поперечного сечения. Примечательно, что все эти открытия сделаны в то время, когда еще не было единиц для оценки напряжений, токов и сопротивлений [4].

Телеграфия явилась первой широкой областью практического применения знаний об электричестве и магнетизме. Первые конструкции электромагнитного телеграфа были предложены и реализованы в 1832 г. Павлом Львовичем Шиллингом (1786–1837), человеком обширных энциклопедических знаний, чл.-кор. Петербургской Академии наук. Его труды в области практической электротехники широко известны [5]. *Главным же результатом* строительства линий электромагнитного телеграфа явилось: появление *первых производств электротехнического оборудования* (в Англии – Кука, в России – Якоби). Трудности, испытанные Шиллингом в электроизмерениях, потребовали *установления системы электрических единиц и стимулировали дальнейшее развитие теоретической электротехники*.

Академик Петербургской Академии наук Борис Семенович Якоби (1801–1874) не только успешно продолжил работы Шиллинга, но и внес огромный вклад в развитие российской электротехники. Он родился в г. Потсдаме и был наренчен Морисом-Германом, обучался в Берлинском и Геттингенском университетах и получил диплом архитектора. Его младший брат Карл, известный немецкий математик (определители – *якобианы*, многочлены *Якоби*), вводит его в среду ученых. Заинтересовавшись вопросами магнетизма, Б. С. Якоби в 1834 г. *первым в мировой практике создает электродвигатель вращательного движения* и демонстрирует его в Петербурге. Для реализации такой формы движения он же создал и коллектор. В 1835 г. Б. С. Якоби приглашают в Юрьевский (Дерптский, Тартуский) университет на должность профессора архитектуры. Якоби принимает российское подданство, женится на русской, принимает православие, получив при крещении имя Борис Семенович.

В 1838 г. Б.С. Якоби избирают чл.-кор. Петербургской Академии наук и позднее ее академиком. В том же году происходит известное испытание лодки с электродвигателем, в которой находилось 11 человек. Оно проводилось авторитетнейшей (по-современному "правительственно-академической") комиссией. Однако мало кому известно, что кроме лодки проводилось испытание и "наземного транспортного средства" – электротележки на рельсах с одним пассажиром [6].

Несовершенство источников питания (элементов Даниэля) и электроизоляции заставляли Шиллинга и Якоби заниматься улучшением их свойств. Известны их активные научные поиски в этих направлениях [7, 8].

Любопытен, например, факт выделения Якоби

Минфином примерно *восеми килограмм платины* на повышение свойств элементов Даниэля, предназначенных для проведения упомянутых выше испытаний.

Якоби открыл явление гальванопластики и предложил способы его практического использования.

Академик Эмилий Христианович Ленц (1804–1865) – выдающийся ученый-электротехник России первой половины XIX в. Всемирно известен закон Ленца (1844 г.) – Джоуля (1845 г.) (независимо установленный этими учеными). Не менее значительны и другие его работы по теоретической электротехнике (правило Ленца), в области электромашин (доказал принцип их обратимости, установил явление реакции якоря) [9].

Вторая половина XIX в. характеризуется расширением использования электротехники в различных сферах народного хозяйства. Назрела необходимость в подготовке квалифицированных кадров – электриков. Первым подготовку таких кадров для обслуживания электромагнитных телеграфов, дугового электроосвещения, электроподрыва мин и пр. организовало по инициативе Б.С. Якоби в 1840 г. Военное министерство. В 1856 г. было открыто Техническое училище для подготовки военных электротехников. В последние десятилетия XIX в. электротехнические курсы вводятся в Горном (1893 г.) и Технологическом (1896 г.) институтах и открытом в 1886 г. Телеграфном училище Министерства внутренних дел с трехлетним сроком обучения, преобразованном (в 1891 г.) в Санкт-Петербургский электротехнический институт им. Императора Александра III (позднее ЛЭТИ, ныне СПбГЭТУ) [10]. В 1900 г. состоялся первый Всероссийский электротехнический съезд. Эти события и промышленный подъем в России способствовали становлению Петербургской научной школы электротехники.

Её "колыбелью" в XVIII и первой половине XIX вв. была Петербургская Академия наук. Большинство российских ученых-электротехников второй половины XIX в. – выпускники физико-математического факультета Петербургского университета. По-видимому, в дальнейшем это сыграло положительную роль в их совместной разносторонней деятельности.

Во второй половине XIX в. появляются, а к концу века четко разделяются две области электротехники: "слабых" и "сильных" токов. В первую область входят электротелеграфия, электро- и (позднее) радиосвязь. Во вторую рождающуюся, новую область входят производство, распределение и применение электроэнергии в народном хозяйстве.

Приведем краткую справку о нескольких представителях славной плеяды петербургских электротехников второй половины XIX в.

Лачинов Дмитрий Александрович (1842–1902) – профессор Лесного института, активный участник Русского Технического Общества (РТО), основанного в 1866 г., один из инициаторов создания Электротехнического (VI) отдела РТО, первый редактор журнала "Электричество" (1880) [11]. Он первым, после Якоби, сумел оценить перспективность использования электродвигателя *как эффективного преобразователя электроэнергии в механическую работу*. В этом смысле особое значение имеет его статья "Электромеханическая работа", которая возвестила о появлении новой отрасли электротехники – *электропривода* [12].

Боргман Иван Иванович (1849–1914) – физик, профессор Петербургского университета, подготовил многих видных электротехников.

Боресков Михаил Матвеевич (1829–1898) – военный электротехник, руководитель Электротехнической части инженерного ведомства, специалист электроминного дела, автор ряда книг.

Войнаровский Павел Дмитриевич (1866–1913) – директор и профессор СПбЭТИ (ЛЭТИ). Автор ряда курсов электротехники, впервые читаемых в России, автор ряда книг и *первых литографического (1893 г.) и типографского (1900 г.) учебных пособий по электроприводу* [12].

Воронов Александр Александрович (1860–1938) – крупный специалист в области электрических машин, профессор СПбЭТИ (ЛЭТИ).

Вульф Александр Викторович (1864–1923) – специалист в области электротранспорта, создатель кафедры "электротяги", профессор СПбПИ.

Гаккель Яков Модестович (1874–1945) – специалист в области электротранспорта, конструктор и строитель первого мощного электровоза, профессор СПбЭТИ (ЛЭТИ).

Дмитриев Владимир Владимирович (1873–1946) – крупный специалист по электростанциям, создатель одного из первых учебных пособий по электроприводу (1903 и 1916 гг.), профессор СПбЭТИ (ЛЭТИ).

Константинов Константин Иванович (1817–1871) – пионер в области электроавтоматики, создатель аппаратуры для дистанционного управления.

Пироцкий Федор Аполлонович (1845–1898) провел в Петербурге (1876 г.) первые опыты по использованию трамвая, создал (1880 г.) *первую в мире опытную эксплуатацию трамвая*.

Писаревский Николай Григорьевич (1821–1895) – крупный ученый и специалист кабельной техники, *первый директор СПбЭТИ (ЛЭТИ)*.

Успехи практической электротехники Петербурга в XIX в.

1849 г. – первые опыты уличного освещения.

1867 г. – А.П. Давыдовым установлена синхронно-следящая система для управления артиллерийским огнем на кораблях "Россия" и "Веста".

1878 г. – основан телеграфно-телефонный завод (ныне им. Кулакова). 1879 г. – основан первый электромеханический завод (П.Н. Яблочков).

1879 г. – основан кабельный завод (ныне ОАО "Севкабель").

1880 г. – первая Всероссийская электротехническая выставка РТО.

1882 г. – построены две первые электростанции *общественного пользования*.

1885 г. – осуществлен пуск Царскосельской электростанции однофазного переменного тока.

1888 г. – предложен промышленный способ добычи водорода и кислорода с помощью электролиза воды (Д.А. Лачинов).

1892 г. – основан новый электромеханический завод (ныне ОАО "Электрик").

1894 г. – построена крупнейшая в России Василеостровская электростанция однофазного переменного тока (800 кВт, 2000 В).

1895 г. – основан телеграфно-телефонный завод (ныне завод им. Н.Г. Козицкого).

1897 г. – основаны аккумуляторный завод и телефонный завод (ныне ОАО "Красная заря").

1898 г. – основан электромеханический завод "Сименс – Гальске" (ныне ОАО "Электросила").

1899 г. – принято постановление правительства об организации Санкт-Петербургского политехнического института (СПбПИ).

Мы не упоминаем здесь многих видных ученых Петербурга, *основная деятельность* которых связывалась с решением проблем электроосвещения, производства и распределения электроэнергии, электро- и радиосвязи. Подробная справка о многих из них, творивших в XIX и XX вв., есть в [6, 15, 17].

Наступивший XX в. в силу многих причин стал эрой механизации и электрификации всех отраслей народного хозяйства России. Если еще в 1890 г. мощность установленных электродвигателей в промышленности не превышала 5%, то в 1914 г. она приближалась к 40%. Это не могло не сказаться на дальнейшем развитии научных школ как теоретической, так и прикладной электротехники.

Успехи электротехники Петербурга в XX в.

1902 г. – начало занятий в СПбПИ.

1903 г. – завод "Русский дизель" построил первый в мире теплоэлектроход.

1904 г. – на электростанции в Петербурге установлен первый турбогенератор мощностью 680 кВт.

1907 г. – профессор Технологического института Б.Л. Розинг изобрел телепередатчик с механической разверткой и телеприемник с электронно-лучевой трубкой.

1907 г. – сооружена первая очередь трамвая.

1908 г. – открыта фабрика "Светлана" (ныне ОАО "Светлана").

1908 г. – открыто "Русское общество беспроводной телеграфии и телефонии".

1909 г. – открыт электроаппаратный завод (ныне ОАО "Электроаппарат").

1910 г. – организовано "Радиотелеграфное дело" (с 1913 г. завод) Морского ведомства".

1911 г. – демонстрация первой в мире телепередачи.

Все это привело к расширению преподавания электротехники в вузах и формированию новых научных школ электротехники в Петербурге.

Будущие академики АН СССР М.А. Шателен, А.Ф. Миткевич, Л.Р. Нейман [1902–1975] – основоположники школы "теоретических основ электротехники".

Далее научная школа электромашиностроения создавалась трудами А.А. Воронова, В.А. Толвинского, В.Т. Касьянова, Л.М. Пиотровского и, особенно, будущих академика М.П. Костенко и чл.-кор. АН СССР А.Е. Алексеева, Р.А. Лютера, академика И.А. Глебова [15].

Запросы промышленности начала XX в. сформировали представление о необходимости подготовки инженеров нового профиля по электрификации промышленного оборудования, специалистов по электрооборудованию промышленных предприятий. Эту задачу успешно решили в 20-е годы С.А. Ринкевич и В.К. Попов – родоначальники научной школы электропривода [6, 12, 13, 17]. Предвоенные десятилетия были затрачены на создание учебно-методической базы для подготовки инженеров нового профиля. Активно поддерживали эту работу А.Т. Блажкин, С.А. Пресс, Ф.Н. Шклярский.

Активная деятельность Петербургской школы электропривода началась в 50–60-е годы. Этому способствовало несколько факторов.

Теория электропривода (или подобные курсы) вводилась в учебные планы многих инженерных специальностей. В ряде вузов города открывались новые кафедры такого же или родственного профиля.

Создавались новые или интенсивно расширялись проектно-конструкторские и исследовательские организации с лабораториями или отделами

электропривода. На многих промышленных предприятиях создавались группы или отделы электропривода для решения перспективных задач.

В 1951 г. под руководством М.П. Костенко организовано Ленинградское отделение Института автоматики и телемеханики АН СССР (ЛО ИАТ) (с 1953 г. Институт электромеханики АН СССР (ИЭМ)) [15].

В ЛО ИАТ, наряду с другими, созданы лаборатории, впоследствии отделы: электромашинной автоматики (руководитель В.В. Рудаков), автоматизированного электропривода (руководитель В.П. Андреев), лаборатория управления точными механизмами (руководитель Ю.А. Сабинин).

Интенсивная подготовка научных кадров и практическая работа по исследованию и созданию новых систем привода и средств управления ими создали потребность более активного научно-технического общения специалистов по электроприводу. Такой базой стало Центральноеправление научно-технического общества энергетики и электропромышленности (ЦП НТОЭиЭП), где под руководством В.К. Попова, а затем Ю.А. Сабинина активно работала секция "Электроприводы и промышленное электрооборудование". К участию в конференциях и семинарах ИЭМ ученых и инженеров города деятельно привлекали В.В. Рудаков и Ю.А. Сабинин. По инициативе В.К. Попова в Ленинграде (1947 г.) под эгидой ЦП НТО прошло первое Всесоюзное совещание по электроприводу, которое положило начало Всесоюзным конференциям по автоматизированному электроприводу (в 2002 г. в Нижнем Новгороде состоялась 13 Всероссийская – 2 международная конференция). Вместе с тем, ленинградские ученые продолжали проводить такие традиционные Всесоюзные совещания под эгидой ЦП НТО в различных регионах Советского Союза (кроме первого и второго, бессменный председатель оргкомитета последующих восьми совещаний Ю.А. Сабинин).

В конце 50-х годов при Ленинградском Доме Научно-технической пропаганды (ЛДНТП) была организована секция "Электропривода и систем промышленной автоматики" (руководитель А.В. Башарин). Артемий Васильевич собрал активно работающую творческую группу – бюро, члены которого представляли основные научные направления и коллективы сотрудников петербургской школы электропривода: Владимира Дмитриевича Барышникова (1911–1983), Татьяну Анатольевну Глазенко (1924–1999), Сергея Владимировича Демидова, Сергея Александровича Ковчина, Анатолия Евтихиевича Козярука, Виктора Васильевича

Рудакова (1918–1997) и Юрия Алексеевича Сабинина.

Начиная с 1961 г., секция проводила (почти ежегодно) краткосрочные семинары по насущным научно-техническим проблемам в области электропривода, которые стали очень популярны в стране и привлекали сотни участников. Далее последовали постоянно действующие семинары по современным научным проблемам электропривода, "школы" по повышению квалификации инженерно-технических работников (по конкретным вопросам: применения бесконтактных устройств автоматики, силовых полупроводниковых преобразователей и т.п.), издания небольших монографий (брошюр) по новым научным и техническим разработкам.

Та же группа ученых в ЦП НТО, под руководством Ю.А. Сабинина, определяла научные направления упомянутых Всесоюзных совещаний по электроприводу, осуществляла их подготовку и проведение, активно участвовала в традиционных ежемесячных заседаниях секции.

Естественно, выполнение такого объема научно-идеологических и организационно-практических работ требовало огромных затрат времени. Поэтому вокруг бюро секции ЛДНТП к концу 60-х годов сформировались группы ученых, работающих в следующих направлениях.

А.В. Башарин – графоаналитические и машинно-аналитические методы исследования динамики и синтеза нелинейных электромеханических систем. В том же направлении работали Б.Г. Коровин по методам синтеза систем с цифровым управлением и Л.Н. Рассудов по методам исследования динамики и синтеза электромеханических систем с распределенными параметрами.

В.Д. Барышников – электроприводы целлюлозно-бумажной промышленности. В том же направлении работали Ю.А. Борцов, В.М. Шестаков, В.А. Новиков.

Т.А. Глазенко – силовые преобразователи и электроприводы с полупроводниковыми силовыми и управляющим устройствами. Эти работы поддерживали С.Г. Герман-Галкин, А.Н. Кривцов, В.С. Томасов, В.А. Толмачев, В.Ф. Шукалов, В.И. Хрисанов.

С.В. Демидов – электроприводы и системы автоматизации технологических процессов в станкостроении. Это направление поддерживали в области программного управления и ЧПУ станками и роботами Б.Г. Коровин и О.А. Соколов, а в области теории и практики создания позиционных систем электропривода малых перемещений И.Г. Ефимов. Кроме того, С.В. Демидов представ-

лял в бюро "электротехнические" интересы машиностроительных отраслей промышленности города.

С.А. Ковчин и Ю.А. Сабинин – теория и практика создания прецизионных (и цифровых) систем электропривода для научных исследований и наукоемких отраслей промышленности. В этом направлении активно работали В.Н. Дроздов, В.А. Новиков и Е.А. Танский.

А.Е. Козярук и В.В. Рудаков – системы электроприводов переменного тока и частотные виды управления ими. В этом направлении работали многие ученые: В.Л. Грузов, В.А. Дартау, В.А. Прозоров, Ю.А. Сабинин и др. Кроме того, А.Е. Козярук представлял в бюро научно-технические интересы электротехнической и судостроительной отраслей промышленности региона.

Периодически участвовали в работе секции ЛДНТП Юрий Анатольевич Борцов и Георгий Георгиевич Соколовский, освещая аспекты проблемы упругих электромеханических систем (ЭМС). Кроме того, Ю.А. Борцов, совместно с В.В. Путовым и Н.Д. Поляховым, активно пропагандировал результаты разработок адаптивного и модального управления разнообразными ЭМС.

Все дальнейшие мероприятия, проводимые в ЛДНТП, осуществлялись оргкомитетами, в которые входили один-два члена бюро секции и перспективные молодые ученые. Большинство из них – сегодня ведущие представители петербургской школы электропривода.

В научно-методической комиссии Минвуза СССР по электроприводу "ленинградская группа" (А.В. Башарин, В.Д. Барышников, С.А. Ковчин) в 70–80-е годы активно выходила с разработанными предложениями по усилению подготовки инженеров в области преобразовательной и вычислительной техники, автоматического управления, робототехники. Эти предложения, как правило, получали поддержку председателя комиссии Ивана Ивановича Петрова.

По инициативе Т.А. Глазенко в 1980 г. Минвуз СССР принял научно-техническую программу "Оптимум" (научный руководитель Т.А. Глазенко, ученый секретарь В.С. Томасов), предусматривающую интенсификацию научных и проектно-конструкторских разработок в области преобразовательной техники для электроприводов и средств комплексной автоматизации отраслей промышленности, определяющих темпы научно-технического прогресса. В Координационный Совет программы вошли крупнейшие ученые и представители ведущих научно-исследовательских и научно-производственных организаций страны,

что определяло и важность задач, и высокий научный авторитет ее руководителя. Программа "Оптимум" успешно реализовывалась до 1990 г.

Спад в промышленности, развал Советского Союза, становление Российской Федерации в последнее десятилетие XX в., как и политические катаклизмы начала века, отразились в том, что ведущие представители Петербургской школы электропривода нашли резервы сил и финансов для продолжения научных исследований, оснащения учебных лабораторий вузов такими техническими средствами, которые позволяют обеспечить переквалификацию инженерных кадров, современность и престижность российского высшего технического образования в Европе и Азии.

Жизненность и развитие нашей научной школы подтверждают успешность и научная значимость материалов I Международной (XII Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу, проведенной в Санкт-Петербурге (сентябрь 1995 г.), научно-технический семинар "75 лет отечественной школе электропривода" (март 1997 г.) и аналогичный семинар "80 лет отечественной школе электропривода" (апрель 2002 г.). Председателем руководящих органов конференции и семинаров был Лев Николаевич Рассудов, заслуженный деятель науки и техники РФ, доктор техн. наук, зав. кафедрой СПбГЭТУ.

В составе Международной энергетической академии (МЭА) с 1995 г. под руководством заслуженного деятеля науки и техники РФ, доктора техн. наук, проф. Ю.А. Сабинина успешно действует секция "Электромеханические системы и средства управления ими". Традиционный ежемесячный семинар секции МЭА (руководитель семинара член МЭА доктор техн. наук, проф. А.Е. Козярук) пользуется высоким научным авторитетом среди ученых-электротехников Санкт-Петербурга.

В заключении авторы статьи просят извинить коллег-электроприводчиков, существенная деятельность которых не нашла отражения в этой работе в силу обширности темы, недостаточной глубины знакомства с первоисточниками, неточностей, допущенных при многократных уточнениях сведений, или обычной человеческой субъективности.

Список литературы

1. Martinsen Wolfram O. Digitale Antriebstechnik – neue Chancen für Produktivität und Qualität // Elektrischen Maschinen. 1989. 68, № 6. Р.153–157.
2. Дорфман Я.Г. Выдающийся русский физик Г.В. Рихман и его роль в истории науки об электричестве // Электричество. 1953. № 8. С.61–67.
3. Эпинус Ф. У. Т. Теория электричества и магнетизма (Классики науки). М.: АН СССР,1951.
4. Белькинд Л. Д. Василий Владимирович Петров (1761– 1834) // Электричество. 1961. № 9. С.86–90.
5. Яроцкий А.В. К 125-летию первой публичной демонстрации телеграфа П.Л.Шиллинга// Электричество. 1958. № 8. С.62–66.
6. Соловьев А.С., Козярук А.Е. История развития электроэнергетики и электромеханики в России: Учебное пособие. СПб.: СПбГИ, 2000.
7. Немировский Е.Л. Гальванический элемент П. Р. Багратиона // Электричество. 1953. № 9. С.73–75.
8. Голубцова В.А. Электрическая изоляция в работах П. Л. Шиллинга и Б. С. Якоби // Электричество. 1952. № 4. С.80–83.
9. Цверава Г.К. Эмилий Христианович Ленц // Электричество. 1954. № 2. С.68–72.
10. Андрющенко Ф.К., Теркан В.Л. Н.П. Клобуков (Из истории электротехнического образования в России)// Электричество. 1961. № 10. С.75–76.
11. Ржонсицкий Б.Н. Дмитрий Александрович Лачинов // Электричество. 1952. № 10. С.75–78.
12. Ковчин С.А. У истоков теории и практики электропривода // Приводная техника. 1999. № 1/2. С.4–7.
13. Электротехнический справочник. М.– Л.: Госэнергоиздат, 1952.
14. Санкт-Петербургский государственный технический университет (1889–1999)/Под общей ред. Ю. С. Васильева. СПб.: Историческая иллюстрация,1999.
15. Карцев В.П. Михаил Полиевктович Костенко (1889– 1976). М.: Наука,1981.
16. Радовский М.И. Владимир Федорович Миткевич (1872–1951) // Электричество. 1962. №8. С.88–92.
17. Тр. научно-технического семинара "80 лет отечественной школе электропривода" СПб.: Изд-во СПбГЭТУ "ЛЭТИ", 2002.
18. Ильинский Н.Ф., Юньков М.Г., Моцхейн Б.И., Шинянский А.В. Всесоюзные конференции по автоматизированному электроприводу (1947–1987)// Автоматизированный электропривод. М.: Энергоатомиздат,1990. С. 14 – 21.

Кафедре электротехники и электромеханики Санкт-Петербургского государственного горного института – первого технического вуза России – 110 лет

АБРАМОВИЧ Б.Н., КОЗЯРУК А.Е., РУДАКОВ В.В., ШКЛЯРСКИЙ Я.Э.

История кафедры "Электротехника и электромеханика" (Э и ЭМ) Санкт-Петербургского государственного горного института (технического университета) (СПбГГИ (ТУ)) начинается с 1893 г. [1]. Именно в этом году руководство института постановило организовать на базе курса физики курс электротехники. Необходимость создания такого курса была вызвана бурным развитием электричества и его технического приложения.

Чтение курса поручили преподавателю кафедры физики Михаилу Андреевичу Шателену (впоследствии заслуженному деятелю науки и техники, чл.-кор. АН СССР, Герою Социалистического труда).

С 1897 г. с М.А. Шателеном сотрудничал В.Ф. Миткевич (в будущем академик АН СССР), который впоследствии, в 1904 г., работая в Санкт-Петербургском политехническом институте, начал читать курс теории электрических и магнитных явлений. Этот курс послужил основой для создания фундаментального курса "Теоретические основы электротехники", являющегося в настоящее время базисной дисциплиной для электротехников всех специальностей.

Начиная с 1905 г. М.А. Шателен, оставаясь штатным преподавателем Горного института, ведет преподавание и в Санкт-Петербургском электротехническом институте. Связь со специализированным техническим учебным заведением благоприятно влияет на общий уровень преподавания электротехники в Горном институте, способствует обмену опытом и технической информацией.

В 1906–1907 гг. для преподавания электротехники были приглашены горные инженеры П.И. Шапирер и А.А. Лацинский, который впоследствии стал заведующим кафедрой.

Поворотным моментом в истории кафедры является появление в институте выдающегося ученого – Феликса Николаевича Шклярского. В 1926 г. им была создана специальная кафедра "Горной электротехники", которую он возглавлял до 1955 г. Впервые появились специализированные курсы "Электрооборудование и электроснабжение предприятий" (1926 г.), "Основы электропривода" (1932 г.), "Электровозная откатка" (1932 г.), "Электрификация открытых горных работ" (1934 г.). Под руководством Ф.Н. Шклярского были созданы электротехнические лаборатории. Многочисленные публикации основоположника горной электротехники стали



Ф.Н.Шклярский

платформой для развития новой науки, а его монография "Физико-механические основы рудничного подъема" до сих пор является фундаментальным трудом в области горной электротехники.

Слово "впервые" сопровождает историю кафедры со дня ее возникновения и по сегодняшний день. Впервые Ф.Н. Шклярским были изданы учебники и учебные пособия по электрооборудованию горно-шахтных установок, динамике электропривода подъема при неуравновешенных системах и др. Он впервые разработал комплексный анализ физико-механических свойств привода рудничной подъемной машины, оборудованной как асинхронными двигателями, так и двигателями постоянного тока, и рассмотрел сложные случаи электродинамического торможения.

В военные годы кафедра, правда в уменьшенном составе, функционировала в эвакуации (г. Черемхово) и вернулась в Ленинград в 1944 г.

В 1947 г. кафедра "Общая и горная электротехника" была разделена на две: "Общая электротехника и электрические машины" (заведующий проф. А.В. Рысьев) и "Горная электротехника" (заведующий проф. Ф.Н. Шклярский). В 1944–1949 гг. профессора Ф.Н. Шклярский и А.Е. Максимов выполнили оригинальную работу по применению гидроэлектропривода для шахтных машин и лебедок. Первые подъемные установки с гидроэлектроприводом были смонтированы на строительстве первой очереди Ленинградского метрополитена. Связь кафедры с метрополитеном не прерывается до настоящего времени.

В 1969 г. электротехнические кафедры, входящие в состав горно-электромеханического факультета, были реорганизованы в кафедры "Теоретические основы электротехники" (ТОЭ) (зав. кафедрой – проф. А.В. Рысьев), "Электроснабжение горных предприятий" (ЭГП) (зав. кафедрой – проф. С.А. Алаторцев) и "Электрические машины и автоматизированный привод" во главе с проф. В.В. Рудаковым. Профессора С.А. Алаторцев и А.В. Рысьев, будучи учениками Ф.Н. Шклярского, внесли значи-



А.В.Рысьев



С.А.Алаторцев

тельный вклад в развитие горной электротехники. Среди фундаментальных монографий, изданных под их руководством, следует выделить следующие: "Рудничная электроэнергетика открытых разработок" (1950 г.), "Горная электротехника" (1939 г.), "Электроприводы, электровозное хозяйство и вагонный парк" (1956 г.).

Под руководством и при непосредственном участии С.А. Алаторцева исследовались надежность систем электроснабжения и однофазные замыкания на землю при открытых и подземных горных работах. В результате этих работ впервые в горной технике была разработана и внедрена на производстве совершенная защита от однофазных замыканий на землю.

В 1963–1972 гг. проводились работы по совершенствованию систем электроснабжения открытых горных работ. Эти исследования (доцентов О.В. Иванова, В.Г. Баумана, Б.И. Комарова, В.М. Квятковского и др.) позволили на основе полученных электроэнергетических характеристик предприятий в целом и по отдельным производственным процессам нормировать электропотребление по временным и технологическим зонам. Эти работы, по сути дела, впоследствии превратились в направление управления электроснабжением предприятий.

В 1957–1959 гг. проф. С.А. Алаторцевым, доцентами Г.И. Покровским и В.А. Гардзишем впервые среди горных вузов СССР была организована и оборудована проблемная лаборатория автоматики и телемеханики. В 1959 г. она была передана вновь созданной в институте кафедре "Автоматизация производственных процессов".

1969 г. существенно изменил деятельность факультета в области горной электротехники [2]. Прежде всего, это связано с разделением научных направлений на четыре: теоретическая электротехника, электроснабжение, электрические машины и электропривод, автоматизация производственных процессов. Новое поколение ученых и преподавателей придало этим направлениям современность и динамичность.

Исследовательские работы по автоматизированному электроприводу велись под руководством проф. В.В. Рудакова. Работы были посвящены совершенствованию систем электропривода одноковшовых экскаваторов, горных машин, буровых станков и подъемных машин (работы проф. А.Е. Максимова, доцентов А.С. Соловьева, И.М. Столярова и др.).

Впервые созданы новые системы электрического привода постоянного и переменного токов с применением тиристоров. Разработан новый класс систем блочно-модульного управления с дифференциальной коррекцией для управления электроприводами горных машин. К этому времени относится начало сотрудничества с Ижорским заводом, выпускающим одноковшовые экскаваторы. Одними из первых сотрудники кафедры начали исследовать и вне-

дрять преобразователи для частотного регулирования асинхронного электропривода. Большое внимание уделялось созданию испытательных стендов в условиях максимального приближения к натурным. В этот период проф. В.В. Рудаков создает основы векторного управления электроприводом переменного тока, являясь основоположником нового направления в отечественной науке. Большой вклад в развитие теории векторного управления асинхронным приводом внес доц. В.А. Дартау, а в разработку регулируемого электропривода переменного тока различных механизмов доценты В.В. Алексеев и Ю.П. Павлов, канд. техн. наук Т.О. Рocco, доц. А.П. Емельянов, доц. Н.А. Амбарцумян и канд. техн. наук З.Б. Слепцова.

Под руководством нового заведующего кафедрой ТОЭ О.В. Иванова были созданы уникальные лаборатории. В этот период, и вплоть до конца прошлого века, на кафедре работали такие выдающиеся преподаватели как Е.М. Проскуряков (зав. кафедрой ТОЭ в 1974–1982 гг.), В.М. Квятковский, Б.Г. Бауман, Л.Н.

Смирнова и др. Большой вклад в науку электроснабжения горных предприятий внесли доценты В.П. Ганский, Н.К. Смирнов, К.Б. Мусс, В.И. Гвоздев, П.М. Каменев, а в решение задач по электроснабжению и электроприводу буровых станков нефтеразведочного бурения – доц. Н.В. Нефедова.

Появились новые направления, в которых специалисты этих кафедр подтверждали ведущие позиции Горного института среди организаций и предприятий, принимающих участие в совершенствовании горной электротехники.

Большое внимание уделялось электрификации рудничного локомотивного транспорта. Серьезные исследования в области тяговых расчетов, определения электронагрузок и расчета контактных сетей и тяговых подстанций принадлежат проф. В.Н. Кордакову, доцентам Б.Г. Анискину и О.Б. Лакоте.

В течение 1961–1970 гг. штат электротехнических кафедр регулярно пополнялся выпускниками горно-электромеханического факультета Ленинградского горного института (ЛГИ), что, несомненно, повысило значение традиций в воспитании молодого поколения. Состав преподавателей пополнялся работниками промышленных и проектных организаций (проф. А.Е. Козярук, доценты В.И. Вершинин и В.В. Рудаков).

До настоящего времени на кафедре работает выпускник ЛГИ 1951 г. доц. Я.П. Гринберг – специалист в области электропривода подземного добычного оборудования.

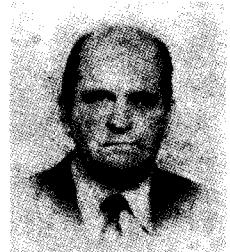
Необходимо отметить следующий факт – на электротехни-



О.В.Иванов



В.В.Рудаков



Е.М.Проскуряков

ческих кафедрах института развита семейная приемственность. Троє детей Ф.Н. Шклярского закончили ЛГИ (Людгер, Лех и Мечеслав). Людгер Феликович и Лех Феликович преподавали на кафедре отца. Людгер Феликович – академик Польской Академии наук организовал подобную кафедру в Krakовской Горной Академии. Лех Феликович переехал в Москву, и в должности профессора проработал в МВТУ им. Баумана до своей смерти (1994 г.). Ныне на кафедре работает внук Ф.Н. Шклярского – Я.Э. Шклярский.

В разные годы работали на кафедре В.И. и А.В. Гвоздевы и И.М. и И.И. Столяровы. В настоящее время работает на кафедре сын первого заведующего кафедрой электрических машин и автоматизированного привода доц. В.В. Рудаков.

Большую роль в становлении кафедры сыграли факультеты (филиалы) института. Эти факультеты в основном организованы выпускниками ЛГИ. Филиалы в городах Кировск, Мончегорск, Воркута, Сланцы, Костомукша и др. до последнего времени успешно справлялись с поставленной перед ними задачей – воспитанием специалистов высокой квалификации из местной молодежи. Учитывая близость к производству, в этих городах были созданы уникальные лаборатории благодаря помощи заинтересованных в этом производственных объединений. В становлении учебного процесса в филиалах активное участие принимали преподаватели К.А. Ананьев, А.И. Иванов, А.Ф. Дубинин и др. Большой вклад в становление кафедр внесли профессора Д.А. Башкиров и С.А. Васильевский, являясь заведующими кафедрой ЭГП (1972–1982 гг.).

В 1982 г. кафедра ТОЭ была слита с кафедрой ЭГП. Новая структура, существовавшая до 1999 г., получила название кафедра "Электротехника и электроснабжение горных предприятий" (ЭЭГП). Заведующим кафедрой стал проф. О.В. Иванов.

В 1999 г. произошло практическое возвращение к первоначальной структуре. В одну кафедру "Электротехника и электромеханика" были объединены кафедры ЭЭГП и ЭМАП во главе с проф. Анатолием Евтихиевичем Козяруком.

А.Е. Козярук – доктор техн. наук, проф., специалист в области математического моделирования и управления электромеханическими системами. Возглавляемая им научная школа электротехники и электропривода – одна из ведущих в области векторного управления бесконтактным электроприводом и современных алгоритмов микропроцессорного управления электроприводом. Большой вклад внесен этой школой в теорию и практику создания электроприводов специальных судов и технических средств освоения шельфов.

Ведущая роль в области автоматизированных систем управления электроснабжением, включая моде-

лирование электромеханических комплексов, принадлежит школе проф., доктора техн. наук Б.Н. Абрамовича.

Одним из крупнейших ученых в области динамических режимов горных машин и скважинных электротехнологий является проф., доктор техн. наук Э.А. Загривный. Работы, связанные с электромагнитными способами разрушения горных пород проводятся проф. О.Б. Шониным.

За последнее десятилетие преподавателями кафедры издано более десяти монографий, получено более 50 патентов, выпущено несколько десятков оригинальных учебных пособий, подготовлено более 30 кандидатов и три доктора технических наук.

В настоящее время кафедра целенаправленно занимается подготовкой научных кадров. Многочисленный отряд аспирантов и магистрантов ведет плодотворную работу по уже устоявшимся, а также новым направлениям горной электротехники.

Работа А.С. Бондарчука, недавно защищенная в качестве кандидатской диссертации, посвященная распространению блуждающих токов на горных предприятиях, является новой ступенью в области обеспечения безопасности ведения горных работ. Канд. техн. наук В.Б. Линник защитил оригинальную диссертацию по оптимизации режимов работы эскалаторов на базе бесконтактного регулируемого электропривода. Работы аспирантов Д.А. Устинова и Д.М. Тарасова по управлению электротехническими комплексами занимают достойное место в этом направлении науки и техники. И этот ряд можно продолжить.

К последним достижениям кафедры можно отнести работы: по созданию автоматизированных систем управления энергоресурсами нефтегазодобывающего комплекса, по разработке воздушных линий с изолированными проводами (проф. Б.Н. Абрамович); по управлению потоками реактивной мощности и повышению надежности работы источников реактивной мощности (доц. Я.Э. Шклярский); по совершенствованию установок защиты от однофазных замыканий на землю повышенной надежности (доц. В.П. Ганский); по разработке и внедрению блочных систем регулирования электроприводом и энергосберегающего электропривода шахтных подъемных машин и буровых станков, электротрансмиссии переменного тока автосамосвалов (проф. А.Е. Козярук, доц. В.В. Рудаков); по разработке электротехнологий бурения плавлением и скважинных электротехнологий для повышения производительности нефтеносных пластов (проф. Э.А. Загривный); по исследованию и созданию электроприводов движения и позиционированию глубоководных аппаратов (доц. В.И. Вершинин).

Выпускники кафедры – инженеры, магистры и закончившие аспирантуру специалисты работают в различных уголках России и стран СНГ. Везде их



Б.Н.Абрамович



А.Е.Козярук

принимают с большой охотой, так как известно, что выпускник кафедры – это всегда высокопрофессиональный и знающий специалист. Обновленные и оснащенные современной базой лаборатории (зав. лабораторией доц. Б.П. Коновалов), компьютеризированные классы (инж. С.М. Господарикова) и, наконец, преподавательский состав высочайшего уровня – вот основные компоненты, позволяющие готовить специалистов международного уровня.

Чрезвычайно широки связи кафедры с родственными кафедрами России и иностранными школами, учреждениями и специалистами. География этих связей включает практически все развитые страны Европы, Азии и Америки.

За 110 лет своего существования кафедре "Электротехника и электромеханика" Санкт-Петербургского государственного горного института (ТУ) есть чем гордиться. Традиции кафедры живы, здесь работают высококвалифицированные и доброжелательные сотрудники, готовые к расширению научно-технических контактов и сотрудничеству.

Список литературы

1. Ленинградский ордена Ленина и ордена Трудового Красного Знамени горный институт 1773-1973. М.: Высшая школа, 1973.
2. Соловьев А.С., Козярук А.Е. История развития электроэнергетики и электромеханики в России. СПб.: СПбГИ, 2000.

ЭЛЕКТРОПРИВОД

Автоматизированный электропривод – современная основа автоматизации технологических процессов

БЕЛОВ М.П., НОВИКОВ В.А., РАССУДОВ Л.Н., СУШНИКОВ А.А.

Показаны основные направления развития автоматизированных электроприводов как средства автоматизации технологических процессов. Дан анализ вариантов проектирования электроприводов для автоматизированных технологических комплексов.

In article the basic directions of development of the automated electric drives, as means of automation of technological processes are opened. The analysis of variants of designing of electric drives for the automated technological complexes is given.

Автоматизированные технологические комплексы (АТК) многих отраслей промышленности включают в себя технологические и транспортные машины и агрегаты, осуществляющие технологические процессы обработки и переработки различных веществ, изготавления готового продукта производства. Технологии, основанные на движении различных механизмов машин и агрегатов, доминируют над иными технологиями в промышленности и являются наиболее энергоемкими. Системы многодвигательных автоматизированных электроприводов совместно с компьютерными средствами являются мощным и высокоэффективным инструментом многих технологий.

Тенденции развития автоматизированных электроприводов подробно раскрыты в [1]. Основные из них сохраняются и до сего времени: расширяющееся применение регулируемых электроприводов для достижения новых качественных результатов в технологии, замена нерегулируемых электроприводов регулируемыми в энергоемком оборудовании с целью энергосбережения; динамичная компьютеризация электроприводов, механизмов, агрегатов и комплексов и развитие средств инжиниринга с использованием персональных компьютеров (ПК); развитие средств и методов самонастройки и автоматической оптимиза-

ции систем управления; активное развитие систем диагностики, обслуживания, визуализации технологических процессов и процессов управления.

Аналогичные тенденции имеют место и в развитии средств и систем автоматизации технологических процессов. Компьютерные средства автоматизации выполняются в соответствии с международными стандартами с высокой степенью унификации и широкой номенклатурой.

Общими для автоматизированных электроприводов и систем автоматизации является структура распределенного управления движением механизмов, машин, комплексов и блочно-модульная идеология построения средств электропривода и управления. Понятие "распределенный автоматизированный электропривод" широко используется наряду с понятием "распределенная автоматизированная система управления". Применительно к двум нижним уровням автоматизации рассматриваемых АТК оба эти понятия являются едиными. Вместе с этим, следует отметить, что понятие распределенного электропривода имеет значительно большую историю. Первой фундаментальной работой в этом направлении была монография проф. С.А. Ринкевича [2] – создателя первой в стране кафедры "Электрификации промышленных

предприятий" Петербургского электротехнического института (ныне кафедра "Робототехника и автоматизация производственных систем" Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ"), начавшей подготовку инженеров-электроприводчиков. В последующих многочисленных работах это направление получило большое развитие.

Однодвигательные автоматизированные электроприводы производственных механизмов выполняются на базе комплектных электроприводов постоянного и переменного токов. В настоящее время преимущественное распространение находят электроприводы переменного тока с асинхронными, синхронными и индукторными двигателями. В соответствии с идеологией блочно-модульного исполнения комплектных электроприводов (КЭП), как правило, предусматривается возможность широкого варьирования силовых модулей и модулей управления, входящих в состав силовых блоков и блоков управления комплектного электропривода, с целью их адаптации к режимам и условиям работы механизмов. Типовая структура комплектного электропривода показана на рис.1. Модули электронного преобразователя соответствуют конкретной схеме электропривода. Так, для преобразователей частоты со звеном постоянного напряжения применяются модули выпрямителя и инвертора. Рассмотрим их на примере частотно-регулируемых электроприводов.

Варианты выполнения выпрямителя обеспечивают: шести- или двенадцатипульсное преобразование

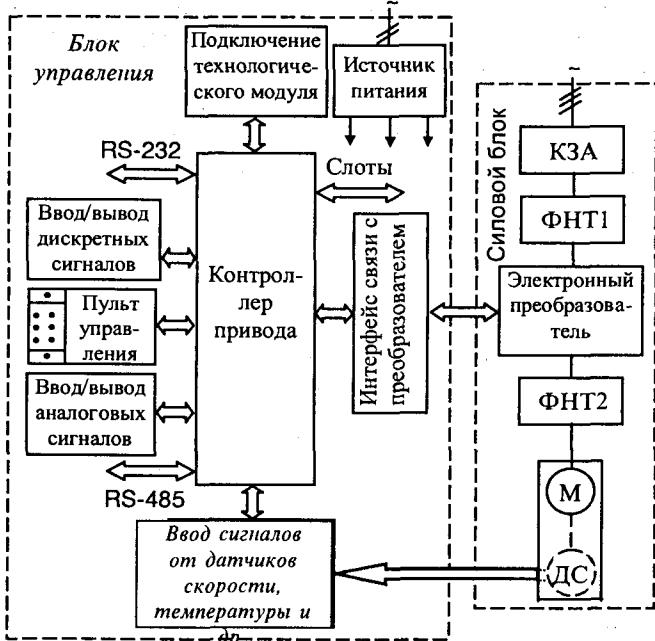


Рис.1. Типовая структурная схема комплектного электропривода:

KZA – коммутационно-защитная аппаратура; **FHT1**, **FHT2** – силовые модули фильтрации, согласования напряжений и ограничения токов на входе и выходе электронного преобразователя; **M** – электродвигатель с датчиком или без датчика скорости (**DC**)

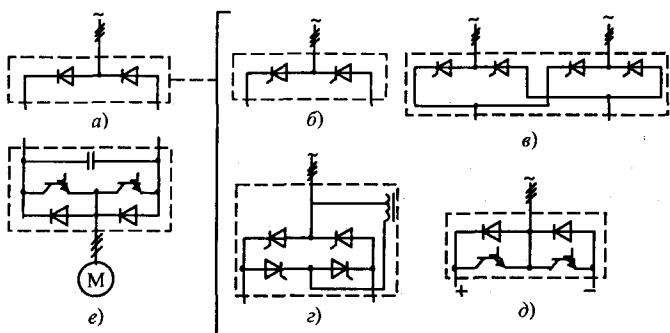


Рис.2. Силовые модули электронного преобразователя

переменного напряжения в постоянное (одноквадрантный режим) (рис.2,а,б,в); шестипульсное преобразование переменного напряжения в постоянное и наоборот, с использованием тиристоров (четырехквадрантный режим) (рис.2,г); шестипульсное преобразование переменного напряжения в постоянное и наоборот, с использованием силовых транзисторов, шунтированных диодами (четырехквадрантный режим) (рис.2,д). Последний вариант выпрямителя получил название активного выпрямителя. На схеме рис.2,е показан модуль автономного инвертора напряжения.

При использовании не рекуперативных выпрямителей применяются тормозные модули (ТМ) – транзисторные с внутренним или наружным резистором. В модуле электродвигателя возможна установка электромагнитного тормоза.

Центральной частью блока управления является программируемый контроллер привода (КП). Имеются базовый модуль контроллера и модули расширения. С помощью базового модуля решаются все задачи управления, защиты и сигнализации локального электропривода с учетом его функциональной ориентации на заданную область применения. С помощью интеллектуальных модулей расширения решаются задачи: позиционирования, синхронизации скоростей и положений, управления технологическими переменными, последовательного или параллельного управления электроприводами и др. Предусматривается возможность выбора различных вариантов модулей блока управления.

Комплектный привод имеет большие функциональные возможности. В частности, предусматривается: выбор варианта способа управления (векторного или по вольт-частотной характеристике (ВЧХ)); возможность выбора большого числа уставок скорости с пульта управления; регулирование времени разгона и торможения, задание вида кривой разгона, пропуск резонансных частот и автоматическая отстройка от этих частот, регулируемое токоограничение, ограничение частоты, задание вида ВЧХ, защита двигателя от перегрузки, автоматический запуск после пропадания питания, торможение при пропадании питания, самонастройка параметров регуляторов под конкретный двигатель, самоподстройка па-

раметров привода в работе, компенсация скольжения, регулирование переменных, программное управление, управление от ПК.

Многодвигательные автоматизированные электроприводы машин и комплексов могут выполняться с силовыми шинами электропитания переменного и постоянного токов. В первом случае применяются комплектные электроприводы, силовые блоки которых имеют модули выпрямителя и инвертора. Во втором случае используется один групповой выпрямитель и много инверторов (рис.3). Объединение комплектных электроприводов по цепям управления осуществляется через координирующий технологический контроллер с пультом оператора (ПО) или через интеллектуальный технологический модуль ведущего электропривода.

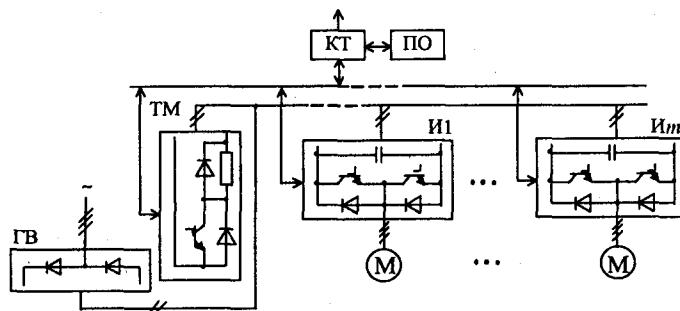


Рис.3. Схема многодвигательного автоматизированного электропривода с групповым выпрямителем:

ГВ – групповой выпрямитель; И1, ..., Иm – инверторы; ТМ – тормозной модуль; КТ – контроллер технологический; ПО – пост оператора

Система управления приводами с общей питающей шиной постоянного тока позволяет снизить расходы на настройку и обеспечивает высокую эффективность и экономичность при её использовании. Энергия торможения одного из двигателей может передаваться по сети постоянного напряжения на другие, не тормозящиеся двигатели. В этом случае модуль ТМ может не использоваться. В случае же группового торможения электродвигателей без такого модуля обойтись нельзя. Система с общей питающей шиной постоянного тока имеет гибкую конфигурацию силовых модулей и модулей управления. В качестве выпрямителей возможно использование вариантов, представленных на рис.2. При использовании рекуперативных ГВ модули ТМ не применяются.

Сетевые средства электроприводов имеют разветвленную структуру и используются для организации связей со средствами управления и контроля, инженерными средствами.

Интерфейсы локального электропривода разделяются на интерфейсы базового модуля и коммуникационные интерфейсы, использующие различные протоколы обмена. Интерфейсы базового модуля, в основе которых используются стандартные интерфейсы RS485 и RS232, предназначены для связи с

пультом управления приводом и пультом дистанционного управления (пультом оператора). Набор коммуникационных интерфейсных модулей, подключаемых на слоты контроллера привода (см. рис.1), обеспечивает связь с другими приводами и с сетями технологического уровня управления Industrial Ethernet, PROFIBUS, MODBUS, CAN и др. Связь системы комплектных электроприводов с инженерными средствами, реализуемыми на ПК, выполняется через интерфейс RS232.

Для АТК, в составе которых имеется несколько групп электроприводов, объединенных технологическим процессом, применяется структура системы распределенного управления с использованием ТК, присоединенных к информационной магистрали технологического уровня.

Информационная сеть представляет собой систему, состоящую из КП, КТ и ПК, взаимосвязанных между собой через каналы передачи данных, используемые для обмена информацией.

Организацию сетей рассмотрим на примере многодвигательных КЭП, интегрированных в промышленную сеть корпорации "Siemens" [3] (рис.4). На самом нижнем уровне используется сеть AS-интерфейс, стандартизованная IEC. На среднем уровне применяется шина PROFIBUS – это европейский стандарт EN 50170, поддерживаемый более чем 600 ведущими производителями средств автоматизации. Промышленная сеть Ethernet – самый высокий уровень из трех уровней сетей. Она характеризуется возможностью передачи больших объемов информации с наивысшей скоростью. Обычно для этого используется привычный MAP-протокол или современный TCP/IP. Промышленная сеть Industrial Ethernet предназначена для подключения персональных компьютеров к промышленным информационным сетям, а также для подключения программаторов и средств визуализации.

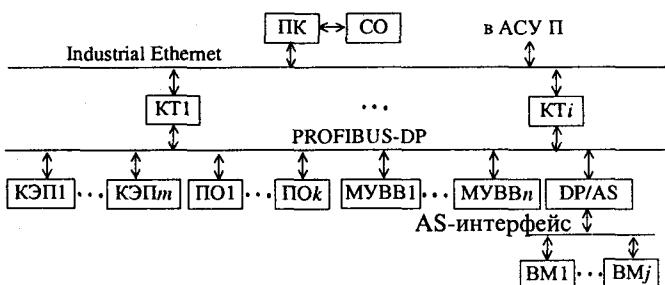


Рис.4. Структура промышленной сети корпорации "Siemens":

КЭП1, ..., КЭПm – комплектные электроприводы; ПО1, ..., ПОk – посты оператора; МУВВ1, ..., МУВВn – модули удаленного ввода/вывода; DP/DA - блок связи сетей; BM1, ..., BMj – вспомогательные механизмы, работающие в режиме "включен – выключен", датчики; КТ1, ..., КТi – контроллеры технологические; ПК – промышленный компьютер; СО – станция оператора; АСУ П – автоматизированная система управления производством

Для реализации промышленных сетей, кроме физических носителей данных применяются: коммуникационные процессоры, серверы, интерфейсные модули, трансиверы, модули OLM/ELM, повторители, разветвители, шинные терминалы. В качестве физических носителей в основном применяются различные виды кабелей: "витая пара", коаксиальный, волоконно-оптический.

Аналогичная идеология построения сетей применяется другими электротехническими корпорациями: ABB, "Schneider electrik", "Omron" и др.

Технологические функции автоматизированных электроприводов реализуются с помощью интеллектуальных технологических модулей, КТ и ПК. В однодвигательных электроприводах предусматривается возможность регулирования технологических переменных (производительности, давления, уровня, подачи, температуры, усилия и др.). В многодвигательных электроприводах – регулирование скоростей и соотношения скоростей (каскадное, независимое, смешанное); синхронизация положений; управление загрузкой электроприводов, имеющих жесткие кинематические связи и совершающих движения с одной скоростью; регулирование натяжений, толщины, массы и других параметров обрабатываемых веществ.

Средства управления более высокого уровня освобождаются от функций регулирования указанных переменных и выполняют только координирующие функции, что делает систему управления более стройной и простой.

Развивая блочно-модульную идеологию построения средств и систем управления электроприводами до уровня агрегатов и комплексов, выделяют типовые группы оборудования, для которых характерны общие функциональные задачи управления в технологическом процессе, и в соответствии с этим формируют программные модули и программные блоки, решающие задачу управления оборудованием [4]. В соответствии с этим обеспечивается экономичная технология проектирования компьютерных систем управления любыми АТК.

Проектирование автоматизированных электроприводов, создаваемых и модернизируемых технологических комплексов выполняется в настоящее время с использованием разнообразных инженеринговых средств.

По официальным данным уровень износа оборудования в большинстве отраслей промышленности РФ составляет в среднем 30–60%, а в горной промышленности достигает 80%. Полностью изношена пятая часть всех производственных фондов, а ежегодно обновляется в последние пять лет не более 2–2,5%. Повышение цен на электроэнергию и контроль качества электроэнергии создают новые проблемы для отечественного производства, приводящие его к нерентабельности в условиях свободного рынка. В существенной степени обновление и рентабельность производства связываются с использованием возможностей современных автоматизированных электропри-

водов и новых высокоавтоматизированных технологий.

Проекты нового технологического оборудования выполняются с использованием систем автоматизированных электроприводов переменного тока. Доля электроприводов постоянного тока в таких проектах незначительна. Иное положение в проектах модернизации действующего оборудования. В базовых отраслях промышленности РФ (металлургической, машиностроительной, целлюлозно-бумажной и др.) действующее оборудование оснащено в основном регулируемым электроприводом постоянного тока с устаревшими средствами и системами управления, а зачастую и с высоким уровнем энергозатрат в технологическом процессе с глубоким регулированием скорости.

Проекты модернизации действующего оборудования в части автоматизированных электроприводов выполняются в следующих основных четырех вариантах:

1. Замена аналоговых и релейно-контактных систем управления на цифровые с использованием промышленных компьютеров, технологических контроллеров, логических контроллеров, интеллектуальных модулей периферии и др., соответствующих нижнему и среднему уровню автоматизации.

2. Реализация варианта 1, дополненная заменой аналоговых блоков управления комплектных электроприводов постоянного тока на цифровые с использованием контроллеров привода.

3. Реализация варианта 2, дополненная заменой силовых блоков комплектных электроприводов. Электродвигатели и сети электропитания остаются неизменными.

4. Полная модернизация автоматизированных электроприводов. Замена электроприводов постоянного тока на электроприводы переменного тока.

Для крупных АТК затраты на модернизацию изменяются по параболической зависимости от глубины модернизации. Так, относительные стоимости затрат на модернизацию автоматизированных электроприводов мелкосортного прокатного стана 250 (функциональная схема которого показана на рис.5), соответствующие отмеченным вариантам, равны: $\bar{C}_1 = 1$, $\bar{C}_2 = 4$, $\bar{C}_3 = 12$, $\bar{C}_4 = 50$. Здесь $\bar{C}_i = C_i / C_6$, $i = 1, 4$. За базовое значение стоимости C_6 принята стоимость варианта 1. Наиболее затратным, но и наиболее эффективным является вариант 4. Основные составляющие эффективности: снижение энергозатрат за счет некоторого повышения КПД и роста коэффициента мощности до 1 без использования дополнительных средств, увеличение производительности благодаря сокращению времени технологического цикла прокатки и времени переналадки стана при смене сорта, повышение качества управления и соответственно стабильности характеристик производимых высококачественных марок стали и исключение брака.

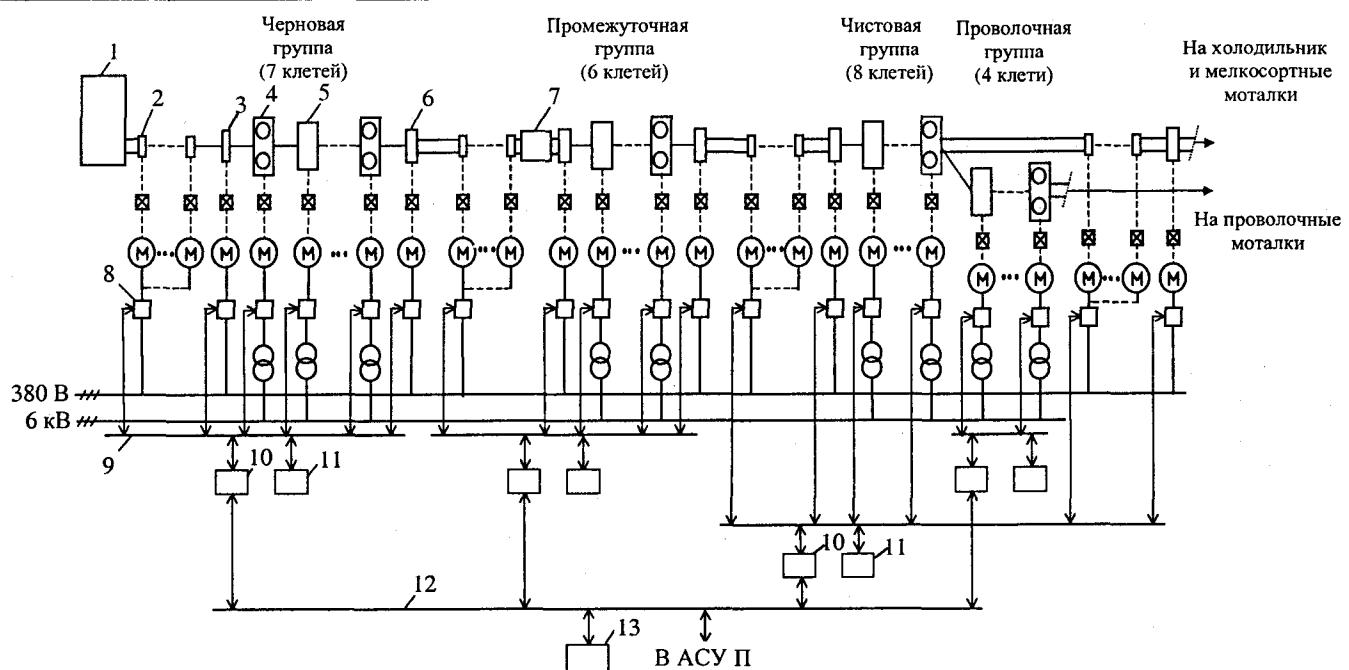


Рис.5. Упрощенная функциональная схема системы автоматизированных электроприводов стана 250:

1 – газовая печь; 2 – рольганг; 3 – трайбаппарат; 4 – вертикальная клеть; 5 – горизонтальная клеть; 6 – ножницы; 7 – индукционная печь; 8 – силовые блоки и блоки управления комплексных электроприводов; 9 – информационная магистраль электроприводов; 10 – КТ; 11 – ПО; 12 – информационная магистраль АТК; 13 – станция оператора; АСУ П – автоматизированная система управления производством

Клети с 1 по 21 оснащены электроприводами мощностью 500 кВт, с 22 по 24 – мощностью 400 кВт. Суммарная мощность электроприводов стана составляет более 13 МВт. Реализация системы автоматизированных электроприводов выполнена на базе технических средств фирмы "Siemens", характеристика которых, в частности, дана в [5].

Прокатка металла осуществляется непрерывно в одну нитку. В черновой и промежуточной группах клетей производится максимальное обжатие с малым натяжением металла, в чистовой и проволочной группах – без натяжения. Ножницы, расположенные после черновой и промежуточной групп клетей, отрезают передние и задние концы проката, а расположенные после чистовой группы разрезают прокат на мерные прутки.

Системой многодвигательных электроприводов решаются задачи управления технологическими переменными: скоростями и соотношением скоростей проката в клетях, усилиями проката, натяжением, прогибом и петлей проката в межклетевых промежутках, резкой прокатки и намоткой отдельных профилей.

Данная система является типичным примером распределенной системы управления многодвигательными электроприводами АТК, интегрированными в АСУ производством. В компьютерных средствах автоматизации наблюдается четкая тенденция более интенсивного и функционально расширяющегося раз-

вития двух нижних уровней управления. Эти уровни необходимо рассматривать в неразрывном единстве с приоритетом функциональных возможностей электроприводов.

От решения задач электрического распределения механической энергии до решения задач распределенного управления технологическим процессом – таков путь развития многодвигательного электропривода. Автоматизированный (компьютеризированный) электропривод является современной основой автоматизации многих технологических процессов в различных отраслях промышленности.

Список литературы

1. Новиков В.А., Рассудов Л.Н. Тенденция развития электроприводов, систем автоматизации промышленных установок и технологических комплексов//Электротехника. 1996. № 5.
2. Ринкевич С. А. Электрическое распределение механической энергии. Л.-М.: ГОНТИ, 1925.
3. SIMATIC. Totally Integrated Automation. Katalog Siemens. Вып. 9. 2002.
4. Белов М.П., Новиков В.А., Рассудов Л.Н. Автоматизация технологических комплексов средствами компьютеризированных электроприводов. СПб.: СПБГЭТУ, 2000.
5. Децюк В.М. Промышленные сети и электроприводы в концепции комплексной интегрированной автоматизации "Siemens"//Электроприводы и сетевые технологии: Доклады научно-технического семинара. М.: МЭИ, 2003.

Основные аспекты построения следящих электроприводов крупного радиотелескопа

ГИММЕЛЬМАН В.Г., ЗОЛОТАРЕВ В.Ф., ПОСТНИКОВ Ю.В., СОКОЛОВСКИЙ Г.Г.

Обсуждаются пути обеспечения высокой точности наведения радиотелескопа с диаметром главного зеркала 70 м. Рассматриваются аспекты применения электроприводов переменного тока с цифровой системой управления в качестве приводов наведения главного зеркала, перископического зеркала и контуррефлектора. Приводятся результаты отработки следящего электропривода на физической модели.

Одним из основных типов радиоастрономических инструментов, предназначенных для исследования космического пространства, являются наземные радиотелескопы с параболическим зеркалом. В 80-х годах в Узбекистане велось строительство радиотелескопа РТ-70 с диаметром зеркала 70 м, приостановленное в 1991 г. В 1995 г. между Правительствами Российской Федерации и Республики Узбекистан было подписано Соглашение о создании на плато Суффа Международной радиоастрономической обсерватории, в соответствие с которым строительство радиотелескопа РТ-70 должно быть продолжено.

Погрешность наведения радиотелескопа на исследуемый объект при работе в миллиметровом диапазоне радиоволн не должна превышать единиц угловых секунд. Это сложная научно-техническая задача и она решается целым комплексом технических мероприятий, к числу которых относятся: введение в дополнение к главному зеркалу перископического зеркала, применение подвижного контуррефлектора, обладающего несколькими степенями свободы, особая конструкция главного зеркала, при которой возможна компенсация искажений параболоида, возникающих в результате весовых деформаций и внешних воздействий.

В большой степени выполнение этих высоких требований определяется характеристиками силовых следящих электроприводов.

Начиная с 1970 г. в Конструкторском бюро специального машиностроения (ныне ФГУП "КБСМ") совместно с Ленинградским электротехническим институтом (ЛЭТИ) (ныне С.-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ") проводились работы, направленные на создание современных высокоточных электроприводов радиотелескопов и антенных установок, в частности, применительно к ныне действующим антенным установкам с диаметром зеркала 70 м, которые близки по своей конструкции к РТ-70, но предназначены для работы в сантиметровом диапазоне радиоволн.

Особенностью такой установки как объекта управления является весьма большое (порядка сотен тысяч ньютон-метров) значение момента нагрузки на поворотной части, обусловленное как массой самой поворотной части, так и ветровыми нагрузками на

We discuss possible ways to ensure high-accuracy positioning of a radio-telescope with the main mirror diameter of 70 m. The use of digitally controlled AC servo-drives for positioning of the main and periscopic mirrors, as well as the counter reflector, is considered. A physical model of the servo-drive is investigated.

главное зеркало. Это исключает возможность применения безредукторных двигателей в приводе главного зеркала и определяет необходимость применения редукторных приводов с передаточным числом редуктора порядка десятков тысяч.

К числу путей, обеспечивающих повышение точности следящего электропривода, могут быть отнесены [1]:

1. Исключение влияния зазоров в кинематической цепи привода главного зеркала при работе в основном режиме "Медленно", что достигается применением двухдвигательного электропривода азимутальной оси с электромеханической выборкой зазора.

2. Обеспечение плавного движения зеркальной части радиотелескопа, как при малых, так и при больших заданных угловых перемещениях путем применения регулятора положения с перестраиваемой структурой и изменяемыми параметрами.

3. Минимизация влияния на точность слежения упругих свойств конструкции путем введения в систему управления электропривода сигналов датчиков, реагирующих на колебания в отдельных представительных точках, и др.

Проведенная КБСМ оценка технического состояния ранее изготовленного и смонтированного на объекте механического оборудования позволяет сделать вывод о его удовлетворительном состоянии и возможности его использования при продолжении монтажно-сборочных работ. Однако прошедшее десятилетие было ознаменовано бурным развитием техники, в первую очередь вычислительной техники и электроники. Очевидно, что технические решения, принятые в 80-х годах, устарели и нуждаются в коренном пересмотре. К числу современных решений для следящих приводов радиотелескопов, рассматриваемых в настоящей статье, относятся:

1. Применение вентильных или асинхронных двигателей переменного тока в качестве электродвигателей в силовых следящих электроприводах. Это соответствует современным тенденциям развития электропривода и позволяет использовать в скоростной подсистеме комплектные электроприводы с приводными преобразователями, выпускаемыми отечественными и зарубежными фирмами.

2. Реализация алгоритмов управления цифровой

системой, включающей в себя микроконтроллеры управления электроприводами и ЭВМ, управляющую движением радиотелескопа.

При определении структуры привода для главного и перископического зеркал и контрефлектора было признано целесообразным ориентироваться на применение комплектного электропривода в качестве скоростной подсистемы. При определении производителя такого электропривода выбор был сделан в пользу фирмы "SEW Eurodrive", как фирмы, выпускающей все компоненты электропривода в требуемом диапазоне мощностей, хорошо зарекомендовавшей себя на рынке электроприводов и, что немаловажно, предоставляющей по своей продукции достаточно полную техническую информацию на русском языке.

Для приводов "Медленно" главного зеркала по азимутальной и угломестной осям применены одинаковые асинхронные двигатели с векторным управлением в режиме Servo (режим вентильного двигателя) и приводные преобразователи MOVIDRIVE ®MDV60A. Для приводов "Быстро" выбраны асинхронные двигатели с векторным управлением, для остальных приводов – синхронные двигатели с постоянными магнитами в режиме Servo и приводные преобразователи соответствующей мощности. Инверторы преобразователей подключены к устройствам рекуперации энергии MOVIDRIVE ®MDR60A, которые обеспечивают питание промежуточных конту-

ров приводных преобразователей постоянным напряжением и возврат в питающую сеть энергии торможения.

Основу цифровой системы управления составляют две управляющие ЭВМ и четыре контроллера (рис.1). ЭВМ ЭСП ориентирована, в основном, на управление электроприводами, ЭВМ СУ – на решение задач верхнего уровня. В случае выхода из строя одной из них существует возможность работать от оставшейся в работе машины. Контроллеры азимутальной (А3) и угломестной (УМ) осей предназначены для использования в системе управления положением главного зеркала. Контроллер ПЗ управляет тремя приводами перископического зеркала, контроллер КР – пятью приводами контрефлектора. Для организации управления радиотелескопом удаленными пользователями (отработка интернет-трансляций) в состав аппаратных средств может быть включен сервер.

Аппаратные средства решают следующие задачи:

– получение в режиме программного наведения требуемых значений пространственного положения элементов радиотелескопа, синхронизированных с системой единого времени (СЕВ);

– сбор информации о текущем положении элементов радиотелескопа (главного зеркала, перископического зеркала и контрефлектора) с заданным периодом дискретизации;

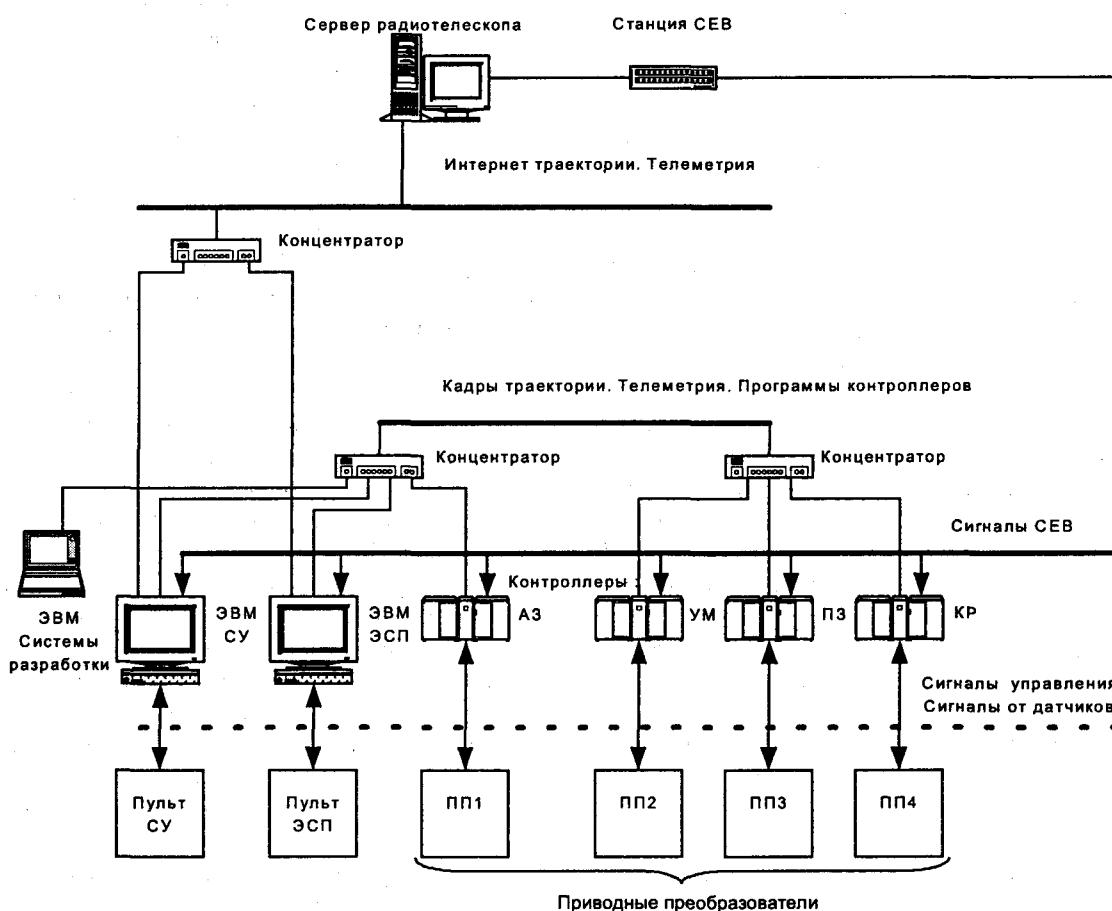


Рис.1. Структура цифровой системы управления следящих электроприводов

- вычисление управляющих воздействий для всех электроприводов наведения в соответствии с заданными режимами, входными воздействиями и алгоритмами, обеспечивающими наведение радиотелескопа с заданной точностью;
- отображение текущего состояния элементов системы управления и электроприводов наведения;
- контроль состояния электрооборудования и формирование команд технологической сигнализации;
- диагностика электрооборудования, относящегося к системе управления электроприводами наведения радиотелескопа.

В состав каждого контроллера, наряду с центральным процессором управления, входят сетевые платы для организации локальной информационной сети и сети синхронизации всех аппаратных средств управляющего комплекса во временной области. Предусмотрены также платы ввода/вывода дискретных и аналоговых сигналов и интерфейсные платы цифровых датчиков положения, установленных на соответствующих частях конструкции. Сигналы управления, вычисленные центральным процессором, подаются на входы приводных преобразователей скоростной подсистемы ПП1 – ПП4.

Синхронизация всех аппаратных средств управляющего комплекса во временной области производится ЭВМ СУ и ЭВМ ЭСП через отдельную локальную сеть, назначение которой состоит только в передаче сигналов точного времени от международной спутниковой навигационной системы GPS или другой станции точного времени.

Через систему концентраторов между аппаратными средствами управляющего комплекса организуется собственная локальная сеть, по которой ЭВМ обмениваются с контроллерами информацией, содержащей задание требуемого пространственного положения РТ, от ЭВМ передаются команды управления на соответствующие контроллеры, а от контроллеров на ЭВМ – данные о текущем состоянии РТ и средств автоматики.

Одной из основных характеристик локальной информационной сети является требуемая скорость передачи. Чтобы ЭВМ в режиме программного наведения задавала требуемые угловые координаты на входы всех систем управления электроприводами с требуемым периодом дискретизации, необходимо иметь высокоскоростной канал передачи информации. Кроме этого, на ЭВМ нужно реализовать операционную систему реального времени, в которой время обращения к каналу передачи было хотя бы на порядок меньше требуемого периода дискретизации, равного 0,001 с. Задачу можно существенно упростить, если перераспределить функции по заданию требуемых текущих координат пространственного положения элементов радиотелескопа между ЭВМ и контроллерами. Тогда обмен информацией между отдельными подсистемами управляющего комплекса будет производиться, например, один раз в секун-

ду. При этом ЭВМ каждую секунду будет сообщать каждому контроллеру один кадр информации, содержащий координаты нескольких, например трех, точек заданной траектории. Контроллер с использованием одного из известных методов интерполяции (Ньютона – Грегори, Эйткина, сплайн функций и др.), рассчитывает координаты 1000 точек траектории с требуемым шагом 0,001 с и запоминает результат расчёта в своем оперативном запоминающем устройстве. Рассчитанная траектория начинает отрабатываться следящим электроприводом с момента получения от ЭВМ по каналу синхронизации метки точного времени. Дискретизация цифровых следящих систем управления внутри временного интервала в 1 с выполняется контроллерами по собственным таймерам. За этот же временной интервал контроллеры получают от ЭВМ следующий кадр информации о траектории и производят по ней интерполяцию. Таким образом, к моменту получения очередной секундной метки точного времени, контроллер будет готов к продолжению наведения радиотелескопа по заданной траектории.

Рассмотренный алгоритм управления оценивался с точки зрения возможности реализации средствами микропроцессорной техники фирмы «INTEL». Рассчитано, что для его выполнения средствами языка "макро-ассемблер", процессору необходимо выполнить 20757 тактов. Если при принятом периоде дискретизации системы 0,001 с резервировать 50% мощности процессора для выполнения фоновых задач, то требуемая тактовая частота процессора при управлении шестью осями наведения (для контроллера кондрефлектора) должна быть не менее 240 МГц. Кроме программного наведения предусмотрены регламентный режим и режим полуавтоматического наведения, не требующие синхронизации с системой точного времени.

Управление электроприводами наведения может выполняться от одной из ЭВМ в соответствии с уровнем приоритета, зарегистрированным оператором для управления наведением. При этом одна ЭВМ становится ведущей, а вторая – ведомой, находящейся в "горячем" резерве. Ведомая ЭВМ получает информацию о текущем состоянии радиотелескопа, идентичную той, которую получает ведущая ЭВМ, но возможность управления с этой ЭВМ заблокирована. Допускается возможность создания режима, при котором обе ЭВМ могут работать как ведущие.

Для обеспечения возможности корректировки алгоритмов управления электроприводами наведения на этапе ввода системы в эксплуатацию и в процессе ее развития в состав технических средств комплекса включена ЭВМ системы разработки.

Интерфейс управления электроприводами наведения должен обеспечить возможность управления всеми электроприводами путём подачи соответствующих команд, позволяющих реализовать режим управления электроприводами, выводить основное зеркало в заданное пространственное положение, устанав-

ливать в нужное положение перископическое зеркало и контуррефлектор. Должно обеспечиваться оперативное отображение информации об их положении, об интегральных оценках готовности электроприводов к вращению; о среднеквадратичных и мгновенных значениях ошибок наведения по всем осям вращения, а также о режиме работы приводов наведения, аварийных ситуациях в процессе наведения, состоянии отдельных узлов электрооборудования и элементов автоматики, о текущей дате и времени. Интерфейс управления должен быть реализован как многооконный с использованием графических объектов, предоставляемых современными графическими редакторами.

Для отработки электропривода создан лабораторный макет привода. В состав макета входят: приводной преобразователь MOVIDRIVE MDS 60A 0015-5A3-4-00 с дополнительной платой расширения входов/выводов DIO, двигатель M типа DFY 71S, приборный редуктор с передаточным числом $i_{\text{ред}} = 5000$, на выходном валу которого установлен первичный датчик положения ВТ-70, управляющая ЭВМ, персональная ЭВМ системы разработки.

Приводной преобразователь питается от трехфазной сети 380 В промышленной частоты. Защита преобразователя осуществляется автоматическим выключателем и плавкими предохранителями. В цепи питания предусмотрен сетевой дроссель. Контактор KM1 при включении автоматического выключателя на входе преобразователя замыкает свои блок-контакты и подает питание на тормозной выпрямитель BMK. Двигатель растормаживается воздействием на катушку дискового электромагнитного тормоза при подаче на дискретный вход DI03 переключателем SA4 сигнала, имитирующего команду "Разрешение". Переключатели SA1 – SA3 имитируют дискретные сигналы, снимающие блокировку регулятора и определяющие направление вращения. Истинное значение скорости вводится на АЦП управляющей ЭВМ с аналоговых выходов AOV1 и AGNO (клеммник X21 блока DIO).

Описанная часть схемы выполняет функции скоростной подсистемы.

Внешний контур регулирования положения реализован средствами управляющей ЭВМ, в качестве которой используется одноплатный промышленный компьютер Advantech PCA-6770 половинного размера на базе процессора Pentium III. В состав компьютера введен ряд периферийных плат:

– плата 12-разрядного цифроаналогового преобразователя типа PCL-728 для задания входных воздействий на аналоговый вход приводного преобразователя (клеммы 2, 4, X11 основного блока);

– плата АЦПВТ-19П-Д1-ISA – аналого-цифровой преобразователь сигналов первичного датчика ВТ-70 в 19-разрядный двоичный код, пропорциональный углу поворота вала исполнительного органа с частотой преобразования 60 кГц и разрешающей способностью $\Delta = 2,5''$;

– плата 12-разрядного аналого-цифрового преоб-

разователя, которая используется для преобразования аналогового сигнала с выхода устройства расширения входов-выходов DIO11A, пропорционального скорости двигателя, в цифровой двоичный код.

Цифровой контур положения и интерфейс пользователя выполнены в среде разработки QNX 6.1 RTP¹. Программные средства цифрового контура положения содержат следующие процессы:

– программу "pult", реализующую интерфейс пользователя в графической оболочке Photon MicroGUI, включающую в себя задание параметров тестовых – управляющих сигналов, установку ограничений и параметров ПИД-регулятора положения, задание параметров отображения переходных процессов;

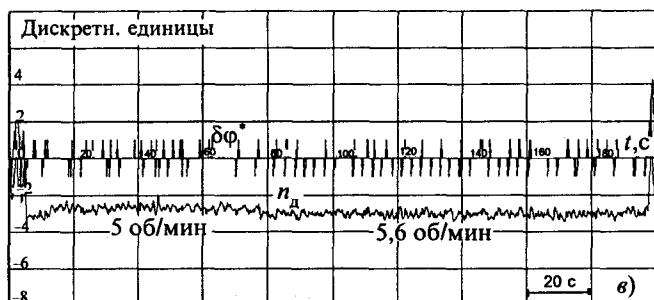
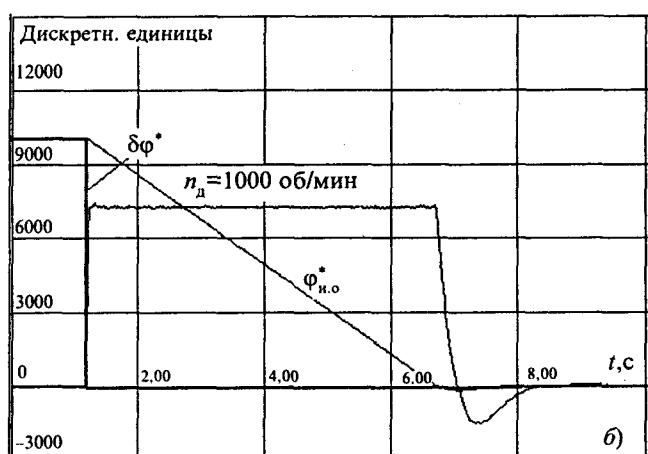
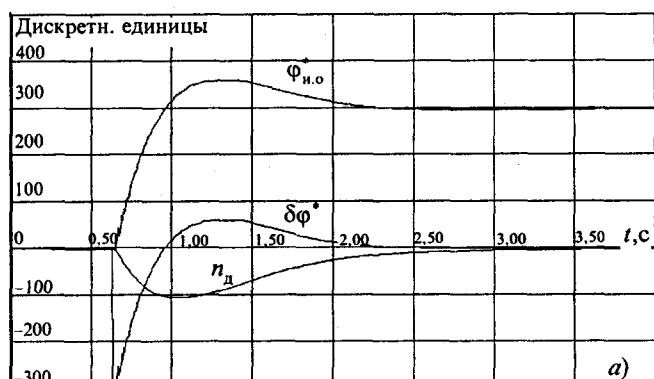


Рис.2. Осциллограммы переходных процессов

¹ В разработке программных и аппаратных средств для цифровых следящих приводов принимали участие Г.С.Белоруков, В.О.Осипов, С.Б.Соколинский.

– менеджеры ресурсов (Resource Manager) устройств ввода/вывода, реализующие обмен процессов в ОС QNX на основе POSIX запросов (open, read, write, close) и сообщений произвольного не специфицированного типа для связи с платой сопряжения с 19-разрядным датчиком угла, с платами АЦП и ЦАП;

– менеджер ресурсов "reg", реализующий регулятор положения с наивысшим возможным приоритетом, поддерживающий стандартные запросы ОС QNX, отработку событий, генерируемых таймером с периодом 0,001 с и обмен с устройствами ввода/вывода и интерфейсом пользователя.

Некоторые результаты исследования электропривода на лабораторном макете приведены в виде осцилограмм на рис.2, полученных средствами программы "pult". На осцилограммах по оси ординат отложены значения угла поворота датчика на выходе редуктора $\varphi_{i,o}$ или угловой ошибки φ^* в дискретных единицах. Значения скорости двигателя n_d указаны непосредственно на осцилограммах или в их описании, приведенном ниже.

Осцилограмма отработки ступенчатого управляющего воздействия $\Delta\varphi_3^* = 300$ дискр. единиц, что соответствует повороту датчика на 750", представлена на рис.2,а. Система работает в линейной зоне, время переходного процесса 2,3 с, перерегулирование составляет 20%. Максимальное значение скорости двигателя в процессе отработки заданного перемещения равно 440 об/мин.

Отработка начального углового рассогласования

от 1000 дискр. единиц до нуля показана на рис.2,б. Сигнал на выходе регулятора положения (входе скоростной подсистемы) ограничивается на уровне, соответствующем скорости двигателя, равной 1000 об/мин.

Рис.2,в иллюстрирует работу следящей системы при минимальной требуемой постоянной скорости двигателя 5 об/мин. Этот режим достигается изменением воздействия на входе контура положения по линейному закону с темпом 8,6 дискр. единиц в секунду. В момент времени $t = 70$ с дана команда на увеличение скорости исполнительного органа на 1 дискр. единицу в секунду, что соответствует увеличению скорости двигателя на 0,6 об/мин. Значение ошибки по углу φ^* составляет 1 дискр. единицу (2,5"), что соответствует инструментальной погрешности, определяемой цифровым датчиком углового положения. Точность поддержания минимальной скорости порядка 8%.

Таким образом, исследования на физическом макете показали, что с использованием принятых технических решений, аппаратных и программных средств задача получения требуемой точности следящих электроприводов может быть успешно решена.

Список литературы

1. Борцов Ю.А., Соколовский Г.Г. Автоматизированный электропривод с упругими связями. СПб.: Энергоатомиздат, 1992.

2. Кертен Роб. Введение в QNX® Neutrino™2. Руководство по программированию приложений реального времени в QNX Realtime Platform. СПб.: Петropolis, 2001.

Электромеханические системы управления тяжёлыми металлорежущими станками станкостроительного завода им. Свердлова

ДЕМИДОВ С.В.

Разработаны динамические модели металлорежущего станка как объекта управления. Сформулированы требования к элементам электромеханических систем управления станками. Рассмотрены вопросы создания, освоения производства и внедрения широкорегулируемых электроприводов, автоматических копировальных систем, систем ЧПУ и мехатронных систем.

Металлорежущий станок по-прежнему остаётся одним из основных видов технологического оборудования для производительной размерной обработки деталей. Он представляет собой машину, обеспечивающую относительные перемещения режущего инструмента и обрабатываемого изделия для придания изделию путём снятия стружки требуемой согласно чертежу формы с заданными точностью и производительностью. В зависимости от формы изделия и способа снятия стружки станки подразделяют на несколько групп, многие из которых производились

The dynamic models of metal-cutting machine tools are developed like controlled entity. The requirements are formulated to the components of electromechanical control systems for the machine tools. The questions of the creation, manufacture and adaptation are considered with respect to the broad-controlled electric drives, automatic profiling systems, numeric control systems and mechatronic systems.

стакнозаводом им. Свердлова за его 135-летнюю историю (торговой марке "Свердлов" 80 лет). Постепенно сложилась современная (уже более 30 лет) номенклатура станков, включающая:

– горизонтальные сверлильно-фрезерно-расточные станки для обработки корпусных деталей с линейными размерами 1 м и более;

– порталные координатно-расточные станки для обработки изделий с высокоточными отверстиями при размерах обработки 1,0–2,5 м;

– фрезерные станки для обработки пространствен-

но-сложных изделий с размерами обработки 0,5–4,0 м;

– специальные и специализированные тяжёлые и уникальные станки для обработки крупногабаритных изделий ведущих отраслей промышленности.

Непременным условием повышения производительности и точности станков, тем более тяжёлых и уникальных всегда была и остаётся автоматизация управления станками, причём преимущественное применение и развитие получили электромеханические системы управления (ЭСУ). В ЭСУ в качестве исполнительных двигателей (ИД) используются электродвигатели, а вся система управления строится на электронных (в том числе компьютерных) и электротехнических элементах. В дело создания, совершенствования и внедрения ЭСУ наши разработчики и конструкторы внесли неоценимый вклад. Достаточно лишь перечислить основные вехи развития ЭСУ на заводе им. Свердлова:

– создание и внедрение в станки первых в мире широкорегулируемых электроприводов подачи (пioneerское изобретение было сделано главным конструктором М.Е. Эльясбергом и его заместителем М.Е. Верхолатом в конце 40-х годов XX в., внедрено впервые в 1949 г., авторское свидетельство №98785 получено в 1954 г., в 1950 г. они удостоены за эту работу Государственной премии СССР);

– разработка, исследование и внедрение непрерывной ЭСУ копированием [2,3] (работы начаты под руководством научного консультанта Т.Н. Соколова ещё в 1937 г., серийное производство копировально-фрезерных станков (КФС) модели 6441А освоено в 1946–1947 гг., Государственная премия получена в 1948 г.), постоянное совершенствование ЭСУ копированием продолжалось и в 60-, и в 70-е годы XX в. (результаты этих работ внедрены в гамму КФС, выпускающуюся на нашем заводе с конца 60-х годов);

– создание, освоение производства и внедрение станков с числовым программным управлением (ЧПУ) (1-й в мире тяжёлый расточный станок модели 262ПР удостоен "Гран-При" и Золотой медали на Всемирной выставке в Брюсселе в 1958 г., причём устройство ЧПУ (УЧПУ) было собственной разработки и изготовления); серийное изготовление станков с ЧПУ начато в начале 60-х годов, в том числе и многооперационных станков (обрабатывающих центров (ОЦ), из которых первый в Европе изготовлен в 1964 г. – модель 262ПР2), и гибких производственных модулей (1985–1990 гг.);

– создание, освоение производства и внедрение тиристорных электроприводов (ТЭП) подачи (ТЭПП) и главного движения (ТЭПГ), в том числе с малоинерционными и высокомоментными двигателями (работы начаты в 1965–1967 гг., внедрение в станки в 1968–1969 гг., ТЭПП серии ЭТВС с двигателями серии ПГТ успешно сдан Госкомиссией в 1972 г.; впоследствии в 70- и 80-е годы создано и внедрено ещё три поколения ТЭП постоянного, а затем и переменного тока; получено около 40 авторских свидетельств);

– комплексная разработка, освоение производства и внедрение комплектных ЭСУ, включающих УЧПУ, ТЭПП, ТЭПГ, программируемые контроллеры (ПК), измерительные системы (ИС), электрошкафы (ЭШ), пульты управления (ПУ), кабели связи (в 70-е годы создано собственное электротехническое производство, изготавливавшее в год около 1500 ЭШ, более 600 ПУ и до 2000 ТЭП, при этом использовались УЧПУ и ПК различных фирм, в том числе ведущих зарубежных);

– создание и внедрение (1986–1987 гг.) цифровой автоматической копировальной системы (АКС), позволившей создать новый класс ФС – программенно-копировальных, обеспечивающих не только работу по копири и программе, но и запись управляющих программ и их корректировку непосредственно на станке в процессе копирования;

– создание и освоение производства мехатронных модулей вращения (начиная с 1990 г.), мехатронных поворотных столов (1991–1995 гг.) и мехатронного ОЦ (головной образец изготовлен в 2000 г. и успешно сдан Госкомиссией в 2001 г., патент РФ № 2101156, 1998 г.).

Создание, развитие и совершенствование различных ЭСУ потребовали проведения целого цикла научно-исследовательских, экспериментальных, конструкторских и технологических работ, которые включали следующие основные этапы:

1. Разработка и исследование динамических моделей различных станков как объекта управления. Основные результаты приведены в [1–5], где:

– показана необходимость комплексного, системного рассмотрения станка и его системы управления с целью учёта их взаимного влияния и выработки требований ко всем узлам станка и ЭСУ;

– показано, что в целом станок совместно с ЭСУ представляет сложную, замкнутую, нелинейную, многомерную и многосвязную систему;

– предложены динамические модели основных механических подсистем станка с учётом упругих деформаций и нелинейностей в исполнительных механизмах станков (ИМС), а также характера процесса резания; эти модели реализованы в виде алгоритмов и программ моделирования на ЭВМ, а параметры моделей уточнены с помощью статических (значения жёсткости и деформации) и динамических (переходные и частотные характеристики) экспериментов.

2. Выработаны и научно обоснованы требования к ЭСУ и всем её узлам с точки зрения требуемых качества изделия (точность размеров и формы, качество поверхности) и производительности обработки, силовых и скоростных параметров, надёжности работы и т. п. Так, для станков завода им. Свердлова требуется ТЭПГ с мощностью ИД 10–100 кВт, максимальной частотой вращения 2000–4000 об/мин, диапазоном регулирования 3000–4000 (в том числе при постоянной мощности 10–40 и постоянном моменте 25–300), погрешностью частоты вращения 2–10%.

Одновременно определены требования к параметрам ИМС [4,6], обычно входящих в контуры регулирования ЭСУ. Например, показано, что в КФС преобладающими факторами влияния ИМС на работу ЭСУ являются частота собственных колебаний ИМС (желательно не менее 40 Гц) и суммарный люфт (не должен превышать 0,05 мм).

3. Создание и внедрение нескольких поколений АКС [1,2,4,7–9], обеспечивающих высококачественную обработку пространственно-сложных изделий:

- разработано и научно обосновано обобщённое математическое описание АКС во всех режимах работы и для различных типов копировальных приборов (КП);

- сформулированы требования по точности (установившаяся ошибка не более $\pm 0,02$ мм, максимальная – 0,3 мм при обходе прямого внутреннего угла, точность поддержания частоты вращения $\pm 10\%$ при любом контуре обработки) и скорости копирования (не менее 1 м/мин, а в некоторых специальных станках до 4 м/мин);

- разработаны методы динамического анализа и синтеза АКС с учётом влияния нелинейностей (насыщение усилителей, люфт и трение в ИМС), режима (контур, строчки), скорости копирования (с переключением коррекции);

- разработаны, реализованы и внедрены функциональные и принципиальные схемы АКС, в том числе цифровой АКС, позволившей реализовать программно-копировальную ЭСУ;

- созданы и внедрены методы и способы повышения точности и скорости копирования (нелинейная коррекция, цифровая обработка информации с КП, пространственное разделение процессов копирования и резания);

- результаты работ по АКС широко внедрены в станки: за 30 лет выпущено около 2500 КФС.

4. Проведены работы [2–5, 8, 10–15] по созданию, освоению производства и внедрению ТЭП постоянного тока:

- с учётом технологических особенностей и режимов работы тяжёлых станков, условий их применения и технических (точностных, скоростных и силовых) характеристик сформулированы и научно обоснованы требования к приводам станков (при этом также учтены особенности построения и элементной базы ЭСУ, в частности электродвигателей);

- проведена подробная классификация приводов тяжёлых станков, позволившая выделить основные типы, подлежащие реализации: подачи, главного движения и вспомогательные, однозонные (с постоянным моментом) и двухзонные (с постоянным моментом и постоянной мощностью), регулируемые (с диапазоном до 250), широкорегулируемые (с диапазоном до 10000 и более), следящие (замкнутые по положению, с высоким быстродействием, при диапазоне регулирования скорости, как правило, более 1000) и следяще-регулируемые (с диапазоном до 10000);

- на базе требований и классификации проведен сравнительный анализ различных вариантов постро-

ения привода; показано, что с учётом необходимости унификации приводов и обеспечения высокой надёжности, простоты схемных и конструктивных решений, удобства применения, наладки и эксплуатации наиболее рационально использование ТЭП постоянного тока с тиристорным управляемым выпрямителем (ТУВ) в качестве силового полупроводникового преобразователя; как ИД используются высокомоментные или малоинерционные электродвигатели в ТЭПП и широкорегулируемые (по мощности) электродвигатели в ТЭПГ; при этом в ТЭПП с малоинерционным двигателем и повышенными требованиями по быстродействию (особенно по частоте среза и полосе пропускания) рационально применение ТУВ с повышенной частотой питания не менее 200 Гц (реализовано в ТЭПП серии ЭТВС [2–4,10]);

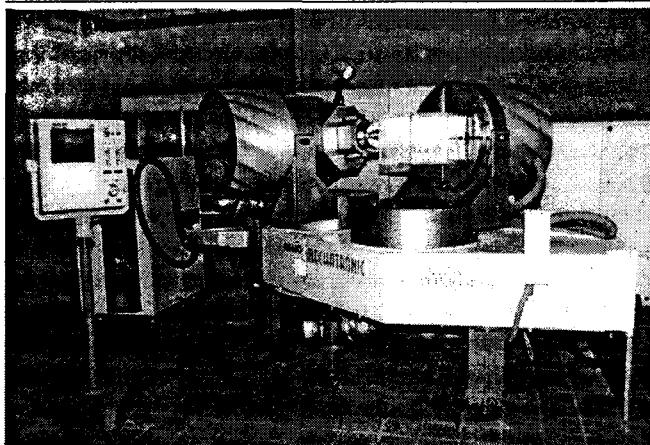
- разработана методика выбора ИД с учётом силовых и энергетических характеристик двигателя, а также специфики питания от ТУВ и оптимального выбора передаточного отношения редуктора;

- создана методика динамического синтеза ТЭП постоянного тока, доведенная до инженерных методов проектирования, наладки и испытания приводов и учитывающая основные неидеальности характеристик элементов ТЭП: особенности комплекса ТУВ-ИД как нелинейного время-импульсного элемента, нелинейность регулировочной характеристики ТУВ (зона нечувствительности и насыщение), ограниченность динамического момента и скорости ИД, люфт и упругие деформации в ИМС;

- разработана [1–4] методика математического моделирования ТЭП, а также других ЭСУ на ЭВМ, основные принципы которой сводятся к следующему: используется наглядный и эффективный метод структурного моделирования, выделены основные типовые звенья, составлено математическое описание различной степени детализации (например, для мгновенных и средних значений параметров ТУВ), реализованы структуры и программы моделей типовых звеньев (ТУВ, ИД, ИМС, регуляторы, датчики и т.д.), созданы пакеты прикладных программ, позволяющие решать различные задачи анализа и синтеза;

- предложены и реализованы (на уровне изобретений) специальные алгоритмы и устройства, обеспечивающие уменьшение влияния неидеальности ТУВ (оригинальное устройство раздельного управления), инерционности и нелинейности ИМС (нелинейные корректирующие устройства), нестабильности и нестационарности элементов ТЭП (адаптивные регуляторы), реализующие максимальное быстродействие в широком диапазоне сигналов (оптимальные регуляторы) и практически предельные характеристики во всех режимах работы (цифровое управление, вплоть до прямого управления тиристорами);

- результаты работ по ТЭП широко внедрены в станки: за последние 30 лет изготовлено более 30000 ТЭП, которыми оснащены около 13000 станков (в том числе более 200 ОЦ, около 2500 КФС, более 2000 экспортных станков).



5. Разработка, исследование и освоение производства мехатронных производственных систем [5,17]. За последние 10–15 лет произошло новое качественное развитие станков и инструментов в направлении существенного (в 3–4 раза) повышения производительности и точности металлообработки. Однако ресурс совершенствования традиционных конструкций станков близок к исчерпанию, так что любое улучшение требует значительных затрат. Поэтому ведущие производители станков в поисках кардинальных решений обратили внимание на мехатронные технологии и конструкции. Так сформировался новый класс блочно-модульного технологического оборудования на базе мехатронных модулей движения (ММД). Это произошло благодаря принципиальному отличию ММД от традиционных электромеханизмов и приводов: в ММД обеспечены конструктивное взаимопроникновение и синергетическая интеграция различных физических элементов (механических, гидравлических, технологических, электротехнических, электронных, информационно-измерительных, управляющих и т.п.).

Исследователи и конструкторы завода совместно с сотрудниками нескольких научно-технических организаций Санкт-Петербурга, Москвы и Новосибирска провели цикл работ по мехатронике, начиная с создания вращательных ММД (ММВ). Разработана, исследована и освоена в производстве гамма низкооборотных (10–50 об/мин) ММВ с длительным крутящим моментом 500–2500 Н·м при высокой точности позиционирования – до 3''. В состав ММВ входят высокомоментный синхронный электродвигатель, система управления двигателем (электропривод), прецизионный круговой датчик, электрогидравлический зажим. Одновременно разработана и изготовлена гамма унифицированных электроприводов переменного тока [5,15].

Следующим уровнем развития мехатроники являются мехатронные узлы (МУ), состоящие из одного или нескольких ММД и объединённые в одном конструктиве для выполнения определённой технологической функции. Примерами таких МУ в станках являются электрошпинели (ЭШ), построенные на базе

высокоскоростных ММВ, и мехатронные поворотные столы (МПС), построенные на базе низкооборотных ММВ. Создана и освоена в производстве гамма МПС диаметром 500–1000 мм с частотой вращения до 30 об/мин при точности позиционирования до 3''. Эти столы внедрены в двух основных исполнениях: автономном (со своей системой управления) и встроенным (с управлением от ЭСУ станка).

Высшим уровнем развития мехатроники является мехатронная машина, которая построена по блочно-модульному принципу и компонуется из ММД и МУ для выполнения конкретной технологической задачи. И здесь ясно видны две тенденции: внедрение ММД и МУ в традиционные по конструкции и компоновке машины и создание новых, нетрадиционных компоновок. На нашем заводе пошли вторым путём: в течение 1996–1999 гг. проведены разработка, исследование и проектирование мехатронного ОЦ (МОЦ), предназначенного для высокоскоростной пятисторонней обработки пространственно-сложных изделий с размерами до 0,5 м при линейных скоростях подачи до 20 м/мин и частоте вращения ЭШ 24000 об/мин. На базовую компоновку МОЦ, выбранную в результате многокритериальной сравнительной оценки различных (около 10) компоновок, в 1998 г. получен российский патент. В состав МОЦ входят 6 ММД: 4 одинаковых низкооборотных ММВ (для поворота и наклона шпиндельной бабки и изделия), 1 высокоскоростной ММВ (вращение ЭШ) и 1 линейный ММД (выдвижение шпинделя). В 2000 г. станкозавод "Свердлов" закончил изготовление головного образца МОЦ модели МС630МФ4 (рисунок), а в июне 2001 г. он был успешно сдан Госкомиссии. Планируется создание гаммы МОЦ для различных габаритов и технологий обработки, а затем освоение производства до 10 станков в год.

Список литературы.

1. Вавилов А.А., Верхолат М.Е., Рубашкин И.Б. Силовые электромеханические следящие системы копировально-фрезерных станков. М.-Л.: Машиностроение, 1964.
2. Исследования, расчёты и конструирование тяжёлых металлорежущих станков // Сб. трудов ОКБС. М.: НИИмаш, 1970.
3. Демидов С.В., Полищук Б.Б. Быстродействующий тиристорный электропривод с питанием от высокочастотного источника. М.: Энергия, 1977.
4. Электромеханические системы управления тяжёлыми металлорежущими станками / С.В. Демидов, С.А. Авдушев, А.М. Дубников и др. Л.: Машиностроение, 1986.
5. Основные направления исследований современных тяжёлых металлорежущих станков и их узлов / М.Г. Биндер, С. В. Демидов, В.А. Рыдов и др. В сб.: Отраслевая наука – производству. М.: ЭНИМС, 1991. С. 171–176.
6. Исполнительные механизмы быстродействующих следящих систем станков / С.А. Авдушев, И.А. Гидаспов, С.В. Демидов и др. Л.: ЛДНТП, 1975.
7. Авдушев С.А., Гольдшмид С.Ф., Демидов С.В. Автоматические копировальные системы станков. Л.: ЛДНТП, 1974.
8. Авдушев С.А., Вавилов А.А., Демидов С.В. Построение быстродействующих следящих систем металлорежущих станков // Программное управление станками. М.: Наука,

1975. С. 97–103.

9. Авдушев С.А., Гольдшмид С.Ф., Лившиц Л.Л. Автоматическая копировальная система на базе микро-ЭВМ для тяжёлых фрезерных станков // Станки и инструмент. 1982. № 8. С. 18–19.

10. Демидов С.В., Полищук Б.Б. Быстродействующий тиристорный электропривод. Л.: ЛДНТП, 1972.

11. Демидов С.В., Дубников А.М. Тиристорные электроприводы главного движения для станков с программным управлением. Л.: ЛДНТП, 1976.

12. Опыт разработки и применения следящих электроприводов для станков с программным управлением / Ю.А. Борцов, С.В. Демидов, Б.Б. Полищук и др. Л.: ЛДНТП, 1977.

13. Демидов С.В. Методические указания по проекти-

рованию и применению тиристорных приводов с высокомоментными двигателями. Л.: ОКБС, 1978.

14. Демидов С.В., Казанский В.А., Рыдов В.А. Опыт построения цифровых систем управления электроприводами станков. Л.: ЛДНТП, 1979.

15. Унифицированные электроприводы переменного тока для металорежущих станков и других машин / А.И. Волков, С.В. Демидов, Б.Б. Полищук и др. В сб.: Электроприводы переменного тока. Екатеринбург: УПИ, 1995. С. 156–159.

16. Демидов С.В. Мехатроника в металорежущих станках. В акад. вестнике: Информатизация: Естествознание-техника-образование-культура. Вып. 2. С.-Пб: ЛАЭС (ПИМАШ), 2000. С. 143–147.

Оптимизация динамических режимов работы взаимосвязанных электромеханических систем испытательных вибростендов

ШЕСТАКОВ В.М., АЛЕКСЕЕВ Д.В., ЕПИШКИН А.Е., НАГИБИНА О.Л.

Решены актуальные задачи построения взаимосвязанных электромеханических систем (ЭМС) двухроторных вибростендов с упругими приводными валами. Разработаны способы оптимизации динамики систем электропривода (СЭП), обеспечивающие качественное управление параметрами колебаний рабочего органа (платформы) за счет регулирования угла рассогласования роторов. Предложены эффективные способы подавления электромеханического резонанса в ЭМС, сформулированы рациональные требования к механической части СЭП.

Вибрационные установки нашли широкое применение в ряде отраслей промышленности и при испытаниях на виброустойчивость изделий различного назначения. Для создания виброколебаний стола (платформы) служат дебалансные роторы, имеющие соответствующие системы электропривода (СЭП). Установки могут быть одно- и двухроторными; за счет регулирования фазы θ между роторами в последнем случае возможно получение сложных колебаний платформы с необходимыми линейными и угловыми параметрами.

Исследованию динамики электромеханических систем (ЭМС) виброустановок посвящён ряд работ [1–3], в которых проанализировано поведение систем с "жёсткими" приводными валами. Однако существующие виброустановки имеют карданные валы, характеризующиеся определённой упругостью и зазором, что негативно сказывается на функционировании взаимосвязанных ЭМС и заставляет искать новые способы их оптимизации.

В соответствии с этим задачами исследований являются:

– разработка способов построения и оптимизации динамики взаимосвязанных СЭП с точным управлением фазовым рассогласованием роторов при влия-

There are actual tasks of construction of the interconnected electromechanical systems (EMS) double-rotor vibration machines with elastic driving shafts are solved. The ways of dynamic systems optimization of the electric drive system (EDS), providing qualitative control of vibration parameters of a working body (platform) by controlling of a phase between rotors are developed. The effective ways of reduction of an electromechanical resonance in EMS are offered, the rational requirements to a mechanical part EDS are formulated.

нии упругости приводных валов;

– исследование в СЭП электромеханического резонанса и возможностей его преодоления при выходе установок в зарезонансную зону;

– формулирование рациональных требований к механической части СЭП одно- и двухроторных виброустановок.

Способы построения и оптимизации взаимосвязанной СЭП двухроторного вибростенда с упругими приводными валами

Мехатронный двухроторный вибростенд СВ-1 оснащен СЭП постоянного тока с подчиненным регулированием параметров, управляющим компьютером и устройствами сопряжения с объектом [2]. Силовая часть СЭП содержит малоинерционные транзисторные преобразователи (ТрП), работающие в режиме ШИМ на несущей частоте $f_0 = 5$ кГц. Ведущий привод имеет контуры регулирования тока и скорости (САРС), а ведомый следящий привод – контуры тока, скорости и положения (САРП) [3].

Краткая техническая характеристика стенда:

– масса дебалансных роторов $m_6 = 1,5$ кг; радиус инерции дебалансов $\rho_6 = 40$ мм; масса платформы 9 кг;

– частота собственных колебаний несущего тела $f_{up} = 5$ Гц; амплитуда колебаний центра тяжести плат-

формы $y_{\text{п}} = 2\text{--}8 \text{ кГц}$;

– частота вращения электродвигателей $n_{\text{д}} = 100\text{--}1000 \text{ об/мин}$; потребляемая мощность не более 250 Вт;

– стенд оснащен датчиками скорости и угла поворота электродвигателей, а также положения платформы.

На рис.1,а показана расчетная кинематическая схема вибростенда, где введены обозначения: m_6 , ρ_6 , φ_6 – массы, радиусы инерции и углы поворота дебалансов; $m_{\text{п}}$, $y_{\text{п}}$, $\varphi_{\text{п}}$ – масса, вертикальное (линейное) и угловое перемещение платформы; c_0 , b_0 , $c_{\text{в}}$, $b_{\text{в}}$ – жесткость и внутреннее демпфирование пружинных вибропролонгаторов (ПВ) и карданных валов (КВ).

Динамическую модель механической части вибростенда представим на основе уравнения Лагранжа второго рода с учетом диссипативных сил в подсистеме [4]. После записи кинетической W_k и потенциальной $W_{\text{п}}$ энергии через геометрические координаты и физические параметры вибростенда и дифференцирования по обобщенным координатам $y_{\text{п}}$, $\varphi_{\text{п}}$ и φ_6 , получим преобразованные уравнения динамики для отдельных узлов исследуемой установки.

Уравнение вертикального перемещения платформы

$$m_0 \ddot{y}_{\text{п}} + m_0 g + c_0 (T_{d0} p + 1) y_{\text{п}} = F_0, \quad (1)$$

где $F_0 = -m_6 \rho_6 [\ddot{\varphi}_{61} \sin \varphi_{61} + \dot{\varphi}_{61}^2 \cos \varphi_{61} + \ddot{\varphi}_{62} \sin \varphi_{62} + \dot{\varphi}_{62}^2 \cos \varphi_{62}]$ – проекция вынуждающей силы дебалансов на ось y ; $T_{d0} = b_0/c_0$ – постоянная времени демпфирования ПВ; $m_0 = m_{\text{п}} + 2m_6$.

Уравнение углового движения платформы

$$J_0 \ddot{\varphi}_{\text{п}} + c_0 a^2 \sin \varphi_{\text{п}} \cos \varphi_{\text{п}} = M_{\text{п}}, \quad (2)$$

где J_0 – момент инерции платформы; $M_{\text{п}} = m_6 \rho_6 r \times [\ddot{\varphi}_{61} \sin(\varphi_{61} - \varphi_{\text{п}}) + \dot{\varphi}_{61}^2 \cos(\varphi_{61} - \varphi_{\text{п}}) + \ddot{\varphi}_{62} \sin(\varphi_{62} - \varphi_{\text{п}}) - \dot{\varphi}_{62}^2 \cos(\varphi_{62} - \varphi_{\text{п}})]$ – угловой момент дебалансов.

Уравнение движения дебалансов

$$J_{bi} p \ddot{\varphi}_{bi} = M_{yi} - M_{bi} - M_{ci}, \quad (3)$$

где J_{bi} – момент инерции дебалансов; $i = 1, 2$; M_{yi} – упругие моменты в приводных валах; $M_{bi} = m_6 \rho_6 [\ddot{y}_{\text{п}} \sin \varphi_{bi} + g \sin \varphi_{bi} + r(\ddot{\varphi}_{\text{п}} \sin(\varphi_{bi} - \varphi_{\text{п}}) - \dot{\varphi}_{\text{п}}^2 \cos(\varphi_{bi} - \varphi_{\text{п}}))]$ – собственные моменты дебалансов; M_{ci} – моменты сопротивления дебалансов, обусловленные сухим и вязким трением.

Уравнение динамики карданных валов

$$\frac{c_{bi}(T_{dbi} p + 1)}{p} (\omega_{di} - \omega_{bi}) = M_{yi}, \quad (4)$$

где $T_{dbi} = b_{bi}/c_{bi}$ – постоянные времени демпфирования КВ.

Уравнение двигателей

$$J_{di} p \omega_{di} = M_{di} - M_{yi}. \quad (5)$$

С использованием уравнений (1)–(5) на рис.1,б построена динамическая структурная схема СЭП, подготовленная для имитационного моделирования взаимосвязанной ЭМС в среде Matlab – Simulink. В правой части схемы в модульном представлении показана модель механической части установки с регулируемыми переменными. На рис.1,б также обозначены: $W_{\text{РП}}(p)$, $W_{\text{РС}}(p)$, $W_{\text{ДС}}(p)$, $W_{32}(p)$ – передаточные функции регулятора положения (РП), регуляторов скорости (РС), датчиков скорости (ДС), замкнутых контуров тока двигателей; $K_{\text{ФД}}$ – коэффициент передачи фазового дискриминатора (ФД).

Для устойчивого регулирования угла рассогласования роторов θ необходимо уменьшение биений скорости дебалансов, обусловленных гармоническим изменением моментов M_6 , а также подавление упругих колебаний скорости двигателей. Снижение биений ω_b до требуемого уровня можно получить при частотах среза контуров скорости $\omega_{cl} > \omega_{b,c}$, где $\omega_{b,c}$ – средние (установившиеся) скорости дебалансов. Целесообразно выбрать $\omega_{b,c} \approx \omega_{y,p}$ ($\omega_{y,p}$ – частота собственных упругих колебаний платформы), что обеспечивает окорезонансный режим работы виброустановки с малым энергопотреблением и высокой производительностью. В соответствии с изложенным контуры тока настраивают на максимальное быстродействие при частотах среза $\omega_{c2} = 1/T_{\Sigma 2}$, где $T_{\Sigma 2}$ – суммарные малые постоянные времени контуров.

Оптимизация контуров скорости выполняется поэтапно с введением дополнительных средств коррекции. Для эффективного подавления упругих колебаний якорей двигателей в контуры скорости могут быть включены соответствующие последовательные или параллельные корректирующие устройства (активные режекторные фильтры, ПД-коррекция) [5]. При этом параметры ПИ-регуляторов скорости двигателей (РСД) с передаточными функциями $W_{\text{РС}}(p) = \beta_1(\tau_1 p + 1)/\tau_1 p$ выбирают по условиям

$$\beta_1 = 0,5 \frac{K_{o.r} T_{\Sigma 2} \omega_{y,p}}{K_{o.c} K_d R_{y,u}} \sqrt{q}; \quad \tau_1 = \frac{4}{\sqrt{q} \omega_{y,p}}, \quad (6)$$

где $K_{o.r}$, $K_{o.c}$ – коэффициенты передачи обратных связей по току и скорости; $T_{\Sigma 2}$ – электромеханические постоянные времени приводов ($T_{\Sigma 2} = T_{\Sigma 2, \text{д}} + T_{\Sigma 2, \text{б}}$); $R_{y,u}$, K_d – сопротивления якорных цепей и коэффициенты передачи двигателей; $\omega_{y,p}$ – частоты упругих колебаний приводных валов; $q = T_{\Sigma 2, \text{д}}/T_{\Sigma 2}$ – коэффициенты соотношения инерционных масс.

Частоты среза контуров скорости двигателей $\omega_{cl} = 0,5\sqrt{q} \omega_{y,p}$. Настройка РСД по формулам (6) выполняется при условии $1/(\sqrt{q} \omega_{y,p}) > T_{\Sigma 1}$, где $T_{\Sigma 1} = T_{d,c} + T_{\Sigma 2}$ – суммарная малая постоянная времени контура скорости двигателя. В противном случае РСД настраивают как в "жесткой" системе [3].

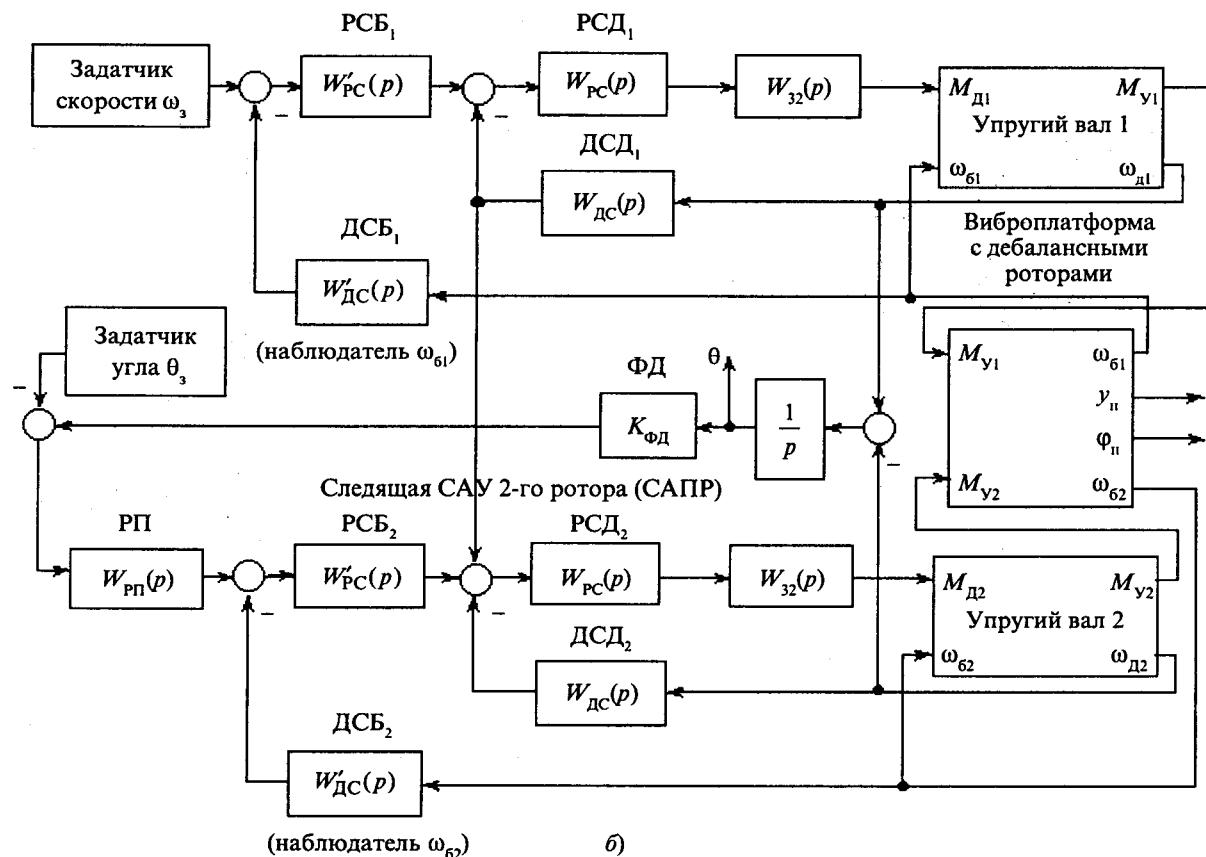
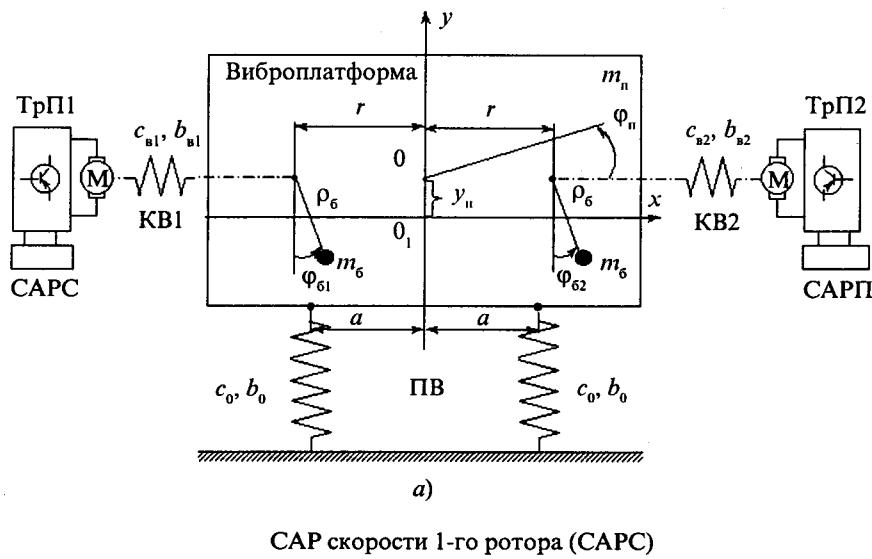


Рис.1. Расчётная кинематическая (а) и структурная динамическая (б) схемы ЭМС двухроторного вибростенда

Указанная коррекция СЭП может дать удовлетворительный результат при достаточно высоком значении $\omega_{y,v}$ ($\omega_{y,v} \geq 300 \text{ с}^{-1}$). В существующих установках с карданными валами $\omega_{y,v}$ значительно ниже ($\omega_{y,v} \approx 100 \text{ с}^{-1}$), что требует перехода к следующей ступени коррекции СЭП с введением собственных контуров скорости дебалансов с датчиками скорости ДСБ_i (см. рис.1,б). Для устойчивой работы системы параметры ПИ-регуляторов скорости дебалансов (РСБ_i) выбирают по формулам

$$\beta'_i = 2; \quad \tau'_i = 2 / (\sqrt{q} \omega_{y,v}) \quad (7)$$

при достижении частот среза контуров $\omega'_{cl} = \sqrt{q} \omega_{y,v}$.

Данная коррекция существенно повышает быстродействие СЭП ($\omega'_{cl} \approx 2\omega_{cl}$), обеспечивает необходимое подавление обратных колебаний скорости дебалансов, что, в свою очередь, является условием достижения точного управления угловым рассогла-

сованием θ роторов. Реализация этого способа коррекции СЭП базируется на использовании наблюдателя состояния упругого объекта [6].

Предложенная коррекция контуров скорости с настройками регуляторов (6) и (7) обеспечивает подавление резонансных пиков ЛАХ объекта на частоте $\omega_{y,v}$ и провалов на частоте $\omega_p = \sqrt{q} \omega_{y,v}$, поэтому характеристики оптимизированной СЭП приближаются к свойствам "жёсткой" системы [5] с эквивалентной инерционностью $T'_{\Sigma} = (2\sqrt{q} \omega_{y,v})^{-1}$. В соответствии с этим динамический коэффициент усиления β_0 и постоянная времени τ_0 ПИ-регулятора положения (РП) следящего привода определяются по формулам

$$\beta_0 = \frac{K_{o,c}}{4K_{\Phi D} T'_{\Sigma}}; \quad \tau_0 = 2T'_{\Sigma} \quad (8)$$

при частоте среза $\omega_{c0} \approx 1/(4T'_{\Sigma})$, что обеспечивает необходимое быстродействие САРП.

Имитационное моделирование взаимосвязанной ЭМС выполнялось на ЭВМ по модели рис.1,б. Исследования динамики проводились для различных значений θ_3 при пуске привода на окорезонансную скорость ($\omega_{di} \approx 30 \text{ с}^{-1}$).

На рис.2,а представлена осциллограмма $\theta(t)$ при задании $\theta_3 = 90^\circ$, где видна достаточно высокая точность поддержания θ в стационарном режиме (колебания $\Delta\theta \approx 0,05 \text{ рад}$).

На рис.2,б представлена осциллограмма $\theta(t)$ при задании $\theta_3 = 90^\circ$, где видна достаточно высокая точность поддержания θ в стационарном режиме (колебания $\Delta\theta \approx 0,05 \text{ рад}$).

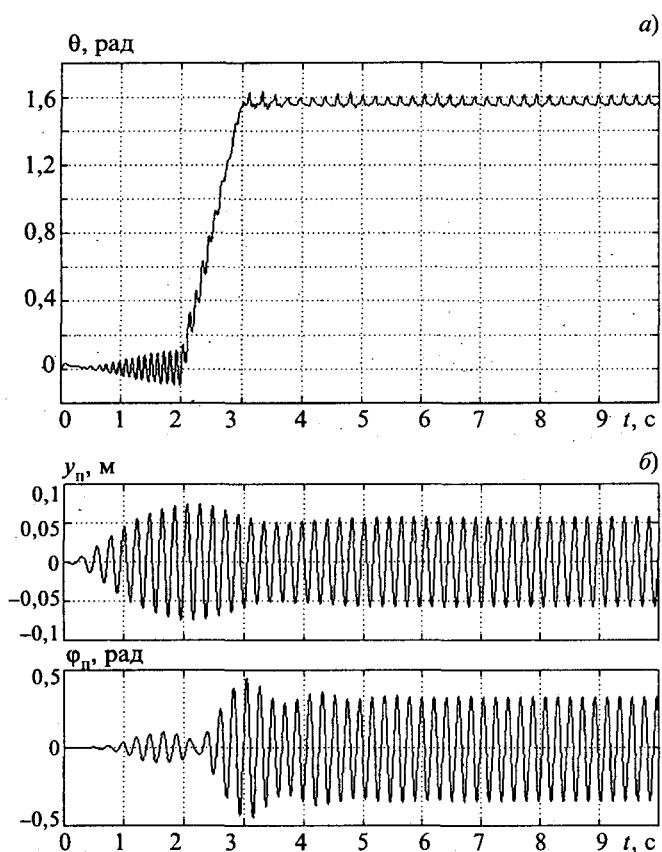


Рис.2. Осциллограммы углового рассогласования роторов (а) и колебаний виброплатформы (б) при задании $\theta_3 = 90^\circ$

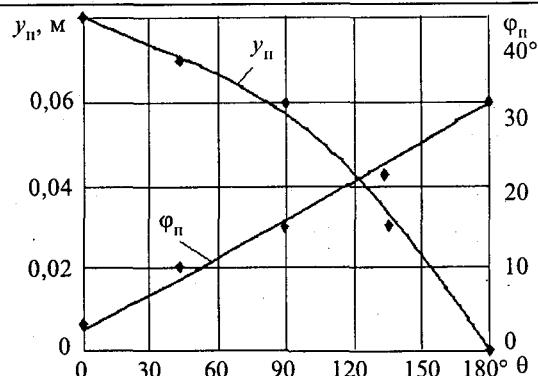


Рис.3. Графики изменения параметров линейных и угловых колебаний виброплатформы в функции углового рассогласования роторов

бания $\Delta\theta \approx 0,05 \text{ рад}$). Соответственно вертикальные (линейные) y_p и угловые ϕ_p колебания платформы (рис.2,б) имеют стабильные параметры. При вариации θ_3 значения y_p и ϕ_p можно изменять в значительных пределах (рис.3), что говорит о достаточно широких возможностях оптимизированных ЭМС двухроторных виброустановок генерировать колебания исполнительных органов с заданными линейными и угловыми координатами.

В процессе моделирования в структуру механической части СЭП вводились зазоры карданных валов. Исследования показали, что в рабочих режимах вибростенда зазоры не раскрываются и не влияют на динамику системы, поскольку валы нагружены моментами сопротивления M_{ci} . Следовательно, модель ЭМС с линеаризованными упругостями приводных валов является корректной.

Электромеханический резонанс и способы его подавления при выходе вибростенда в зарезонансную зону

В зависимости от технологических требований испытательные вибростенды могут работать как в дорезонансной, так и в зарезонансной зонах. При пуске СЭП в зарезонансную зону возникает электромеханический резонанс (эффект Зоммерфельда) [7], приводящий к "застреванию" двигателей и интенсивным колебаниям виброплатформы, что осложняется ограничением тока (момента) двигателей в структурах подчинённого регулирования. При низкой жёсткости механических передач, в частности, в редукторных приводах, может наблюдаться "двойной" резонанс, обусловленный равенством частот свободных упругих колебаний приводных валов $\omega_{y,v}$ и платформы $\omega_{y,p}$.

Указанные режимы являются опасными для механической части установок, поэтому необходимо их подавление. Для этого следует применять электродвигатели с большей перегрузочной способностью, например высокомоментные двигатели серии ПБВ, или использовать соответствующие средства электротехнической коррекции СЭП [8]. Достаточно простым и эффективным является введение пропорционально-дифференциальной коррекции по скорости двигате-

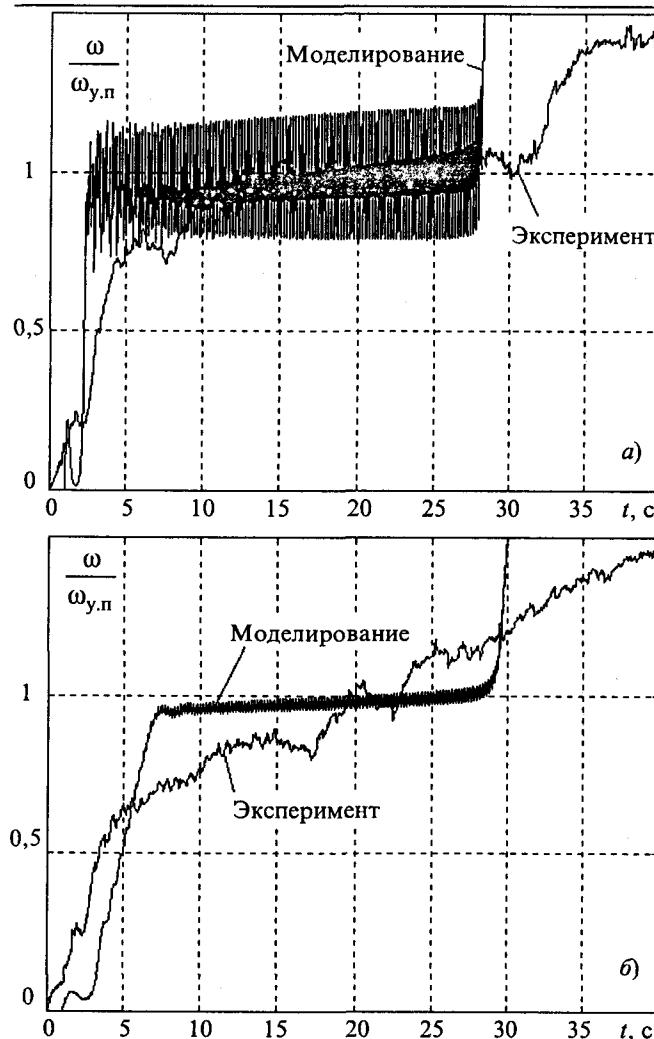


Рис.4. Исследование эффекта Зоммерфельда при пуске СЭП вибростенда в зарезонансную зону

лей на входы контуров тока. Передаточная функция ПД-коррекции

$$W_k(p) = \beta_k \frac{\tau_k p}{\tau_k p + 1}, \quad (9)$$

а её параметры для оптимального подавления колебаний выбирают по условиям

$$\beta_k = (\sqrt{2} \div 2\sqrt{2}) \frac{K_{o.t} T_{\text{эм}} q_m \omega_{y,p}}{K_{o.c} K_d R_{y,ц}}; \tau_k = (0,5 \div 1) / \omega_{y,p}, \quad (10)$$

где $q_m = m_6 / m_0$.

На рис.4 представлены осциллограммы относительной скорости двигателя $\omega_* = \omega_d / \omega_{y,p}$, полученные при имитационном моделировании и эксперименте на вибростенде СВ-1 при пуске СЭП в зарезонансную зону ($\omega_3 = 50 \text{ с}^{-1}$) до введения ПД-коррекции (a) и после её включения (b), где видно существенное подавление упругих колебаний и более плавный переход резонансной зоны на частоте $\omega_{y,p} = 31,4 \text{ с}^{-1}$.

Требования к механической части СЭП вибрационных установок

Проведённые исследования показали, что требуемые характеристики ЭМС вибростендов могут быть

получены за счет совершенствования как электрической, так и механической части систем, причём рациональными являются, как правило, компромиссные технические решения. Так, увеличение жёсткости приводных валов должно сочетаться с применением соответствующих средств электротехнической коррекции, подавляющих упругие и обратные колебания и повышающих быстродействие СЭП.

Для однороторных виброустановок достаточным является выполнение условия $\omega_{y,b} = (2 \div 3)\omega_{y,p}$, обеспечивающего отсутствие "двойного" резонанса в механической системе и подавление в оптимизированной СЭП эффекта Зоммерфельда при запуске установки в зарезонансную зону.

Повышение жёсткости приводных валов в двухроторных виброустановках с регулированием фазы θ между роторами зависит от ступени оптимизации СЭП. Для 1-й ступени коррекции с настройкой РСД по условиям (6) требования к жёсткости валов будут выше, так что $\omega_{y,b} = (10 \div 15)\omega_{y,p}$ даёт приемлемые характеристики взаимосвязанной системы. При применении 2-й ступени коррекции СЭП с введением контуров скорости дебалансных роторов рациональным будет выполнение условия $\omega_{y,b} = (3 \div 5)\omega_{y,p}$, что является достаточным для обеспечения заданной точности регулирования угла θ ($\Delta\theta \leq 0,05 \text{ рад}$). Вместе с тем снижение требований к механической части СЭП неизменно связано с повышением требований к регулирующей части системы и её усложнением.

Выводы

1. Предложенные способы построения и оптимизации динамики взаимосвязанных СЭП двухроторных вибростендов с упругими приводными валами обеспечивают устойчивую работу ЭМС и качественное управление параметрами колебаний рабочего органа (платформы) за счет точного регулирования угла рассогласования роторов.

2. Подавление нежелательных явлений в ЭМС (эффекта Зоммерфельда и др.), сопровождающихся неконтролируемым возрастанием амплитуды колебаний платформы, может быть выполнено с помощью электротехнических средств коррекции унифицированных СЭП.

3. Проектирование виброустановок должно базироваться на совершенствовании как электрической, так и механической частей ЭМС и ориентироваться на экономичные режимы работы СЭП.

Список литературы

1. Управление мехатронными вибрационными установками / Под ред. И.И. Блехмана, А.Л. Фрадкова. СПб.: Наука, 2001.
2. Лавров Б.П., Шестаков В.М., Томчина О.П. и др. Динамика электромеханических систем вибрационных установок // Электричество. 2001. № 1.
3. Шестаков В.М., Алексеев Д.В., Епишкин А.Е. Построение и оптимизация взаимосвязанных электромеханических систем двухроторных вибрационных установок // Электричество. 2002. № 10.

4. Блехман И.И. Вибрационная механика. М.: Наука, 1994.
5. Егоров В.Н., Шестаков В.М. Динамика систем электропривода. Л.: Энергоатомиздат, 1983.
6. Борцов Ю.А., Соколовский Г.Г. Автоматизированный электропривод с упругими связями. СПб.: Энергоатомиздат, 1992.
7. Merten F. Untersuchungen zum Sommerfeld-Effekt mittels Simulation und Experiment. Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Germany, Preprint Nr.6, 1995.
8. Шестаков В.М., Епишкин А.Е. Динамика электромеханической системы вибрационной установки при работе в зоне резонанса // Современное машиностроение: Сборник научных трудов. Вып. 2. СПб.: Изд. С.-Петербургского института машиностроения, 2000.

Высоковольтные тиристорные преобразователи частоты ОАО "Электросила"

ДРОБКИН Б.З., КАРЗУНОВ Р.А., КРУТЬЯКОВ Е.А., ПАВЛОВ П.А., ПРОНИН М.В.

Описаны производящиеся в ОАО "Электросила" высоковольтные тиристорные преобразователи частоты со звеном постоянного тока. Преобразователи используются для пуска турбогенераторов в парогазовых электроэнергетических установках, двигателей в приводах мельниц, для регулирования частоты вращения шахтных вентиляторов.

Для пуска турбогенераторных установок применяются тиристорные преобразователи частоты [1]. Наряду с турбогенераторами и системами возбуждения, они являются основными элементами комплексных поставок оборудования для парогазовых электроэнергетических установок. Аналогичные устройства используются для пуска двигателей в приводах мельниц, для регулирования частоты вращения вентиляторов, а также в других системах.

Для обеспечения комплектных поставок электрооборудования в ОАО "Электросила" выполнена разработка и освоено производство высоковольтных тиристорных преобразователей частоты со звеном постоянного тока (ПЧ). В состав ПЧ входят выпрямители, инверторы и системы управления, сглаживающие реакторы, токоограничивающие реакторы или трансформаторы. ПЧ разработаны на напряжения 1,15, 3,3 и 6 кВ. Основные характеристики выпрямительно-инверторных высоковольтных ПЧ указаны в таблице.

Силовые шкафы имеют длину 1200 мм, шкафы управления – 800 мм. Охлаждение воздушное от встроенных вентиляторов. Система управления микропроцессорная. Предусмотрены связи с внешними устройствами по интерфейсу RS-485.

В качестве примера применения ПЧ можно отметить поставку ПУ-1 для турбогенератора ТФГ-110 газотурбинной установки ГТЭ-110 мощностью 110 МВт (турбина НПО "Машпроект"). Мощность ПЧ 5 МВт, напряжение 3,3 кВ. Комплект оборудования поставлен на Ивановскую ТЭЦ в 2001 г., наладка выполнена за 12 дней. Аналогичные поставки

The production of high-voltage thyristor frequency converters with link of direct current in the JSC "Elektrosila" has been mastered. The converters are used for starting up turbogenerators in combined cycle electric-power plants, in motors of grinding machine drives and for regulation rotation speed of mine fans.

выполнены на опытно-промышленную станцию Канборга, на Тюменскую ТЭЦ. Разработаны приводы мельниц ММПС 50×84, 70×70 с преобразователями ПУ-6-08 и двигателями ДС3-4000-6-40 (4 МВт, 6 кВ). Два привода поставлены в ЗАО ЗДК "Полюс" в 2002 г. ПУ-6-08 обеспечивают частотный пуск мельниц и точную синхронизацию двигателей с сетью.

ТПЧ2-6-03 с двумя параллельно включенными ПЧ разработан для приводов вентиляторов главного проветривания рудника "Северный Глубокий". В приводе используются два двигателя СДН2-18-64-12 (2500 кВт, 6 кВ). Для уменьшения влияния привода на питающую сеть с помощью трансформаторов обеспечивается 12-пульсный режим работы. С этой же целью двигатели соединяются с вентилятором со сдвигом по фазе на 30°.

При использовании ПЧ в качестве пускового устройства турбогенератора пуск осуществляется от сети собственных нужд по схеме рис.1. После пуска генератор отключается от ПЧ и подключается к энергосистеме. При напряжении сети собственных нужд 6 кВ ПЧ содержит токоограничивающий реактор L , выпрямитель ТВ, инвертор ТИ, сглаживающий реактор L_d . При более высоком напряжении используется трансформатор. При пуске управление возбуждением генератора осуществляется от ПЧ. Для этого предусмотрен обмен сигналами между ПЧ и возбудителем. Пуск синхронных двигателей осуществляется по той же схеме с тем отличием, что сеть собственных нужд и энергосистема объединены.

Турбогенераторы и многие двигатели не оснащаются датчиками положения ротора. Перед пуском

таких машин положение ротора определяется с помощью ПЧ. Это позволяет исключить обратное вращение в начале пуска. Один из способов решения задачи основан на том, что в фазы машины через ПЧ подаются импульсы тока. Каждая следующая пара импульсов тока со-

Обозна- чение	Мощ- ность, МВт	Напря- жение, кВ	Дли- на, мм	Шири- на, мм	Высо- та, мм	Масса, кг
ПУ-6-08	6	6	5600	1000	2900	4940
ПУ-6-04	3	6	3200	1000	2900	2640
ТПЧ2-6-03	4	6	5600	1000	2900	4980

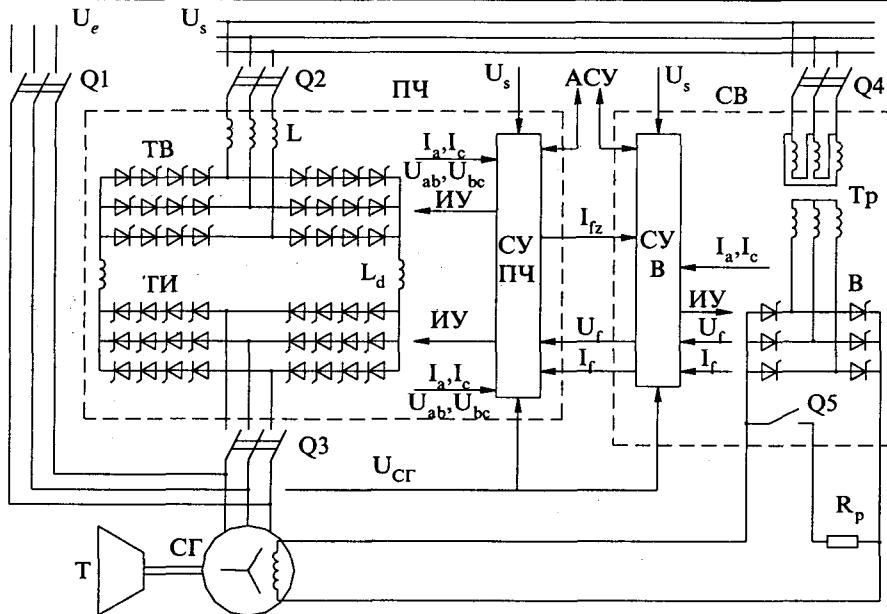


Рис.1. Функциональная схема пуска турбогенератора с использованием ПЧ:

СГ – синхронный генератор; *T* – турбина; *СВ* – система возбуждения; *ПЧ* – преобразователь частоты; *ТВ* – тиристорный выпрямитель; *ТИ* – тиристорный инвертор; *L* – токоограничивающий реактор; *L_d* – сглаживающий реактор; *T_p* – трансформатор; *B* – выпрямитель возбудителя; *СУПЧ* – система управления преобразователя частоты; *СУВ* – система управления возбудителя; *Q1*–*Q5* – выключатели; *U_s* – напряжение сети собственных нужд; *U_e* – напряжение энергосистемы; *U_{СГ}* – напряжение синхронного генератора; *I_a, I_c, U_{ab}, U_{bc}* – сигналы датчиков фазных токов и линейных напряжений преобразовательных мостов; *ИУ* – импульсы управления; *U_f* – напряжение возбуждения; *I_{fz}, I_f* – заданный и фактический токи возбуждения; *АСУ* – автоматизированная система управления

здаёт магнитное поле, смещённое на 60° относительно поля предыдущей пары импульсов. На обмотке возбуждения возникают импульсы напряжения, действующие значения которых (U_{f1}, U_{f2}, \dots) пропорциональны косинусам углов между продольной осью ротора и осями магнитных потоков, создаваемых импульсами тока:

$$\left. \begin{aligned} U_{f1} &= U_{fm} \cos(\tau_1); \\ U_{f2} &= U_{fm} \cos\left(\tau_1 + \frac{\pi}{3}\right), \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где τ_1 – начальное угловое положение ротора; U_{fm} – максимальное действующее значение импульсов напряжения возбуждения.

В системе двух уравнений (1) неизвестны два параметра – τ_1 и U_{fm} , поэтому для определения τ_1 достаточно двух импульсов тока. На практике для повышения точности используется большее количество импульсов. При этом положение ротора определяется с погрешностью до нескольких электрических градусов.

В приводах мельниц момент сопротивления на валу машины зависит от количества перемалываемой руды и ее состояния. При пуске он может быть больше номинального. Поэтому для повышения надеж-

ности привода применяются датчики положения ротора.

Другая операция, которая осуществляется перед пуском, – возбуждение неподвижной синхронной машины.

После выполнения указанных операций начинается пуск турбогенератора или двигателя. Для пояснения особенностей работы ПЧ на рис.2 представлена диаграмма мгновенных значений переменных системы в начале процесса пуска двигателя СДН2-18-64-12.

В процессе разгона машины система управления поддерживает заданный ток возбуждения. После увеличения напряжения статора до номинального напряжения преобразователя в турбогенераторах осуществляется стабилизация этого параметра. При этом по мере разгона ротора ток возбуждения уменьшается. В двигателях номинальное напряжение статора достигается обычно в конце пуска.

Если датчика положения ротора нет, то в зоне искусствен-

енной коммутации (от момента времени t_1 до момента t_2 на рис.2) разгон осуществляется в соответствии с заданной частотой вращения, которая увеличивается от 0 до частоты перехода на естественную коммутацию. Фаза системы ЭДС, с которыми синхронизируются импульсы управления инвертора, определяется путем интегрирования заданной частоты. Выпрямленный ток I_d стабилизируется регулятором, воздействующим на угол управления выпрямителя α . Угол инвертирования инвертора $\beta = 0$. Через каждые 60° поворота ротора выпрямленный ток гасится путем увеличения угла управления выпрямителя. После паузы ток восстанавливается, но протекает через другую пару фаз машины. За счет этого поворачивается вектор тока статора и обеспечивается необходимый врачающий момент в процессе разгона.

При указанном алгоритме управления возможны колебания частоты вращения ротора относительно заданной частоты и существует опасность выпадения машины из синхронизма. Улучшение процесса обеспечивается при использовании обратной связи по напряжению возбуждения [2]. Для ее реализации осуществляется цифровая фильтрация напряжения возбуждения U_f и коррекция заданной частоты импульсов управления инвертора ω_z :

Начало процесса пуска при искусственной коммутации (t_1-t_2)

Естественная коммутация

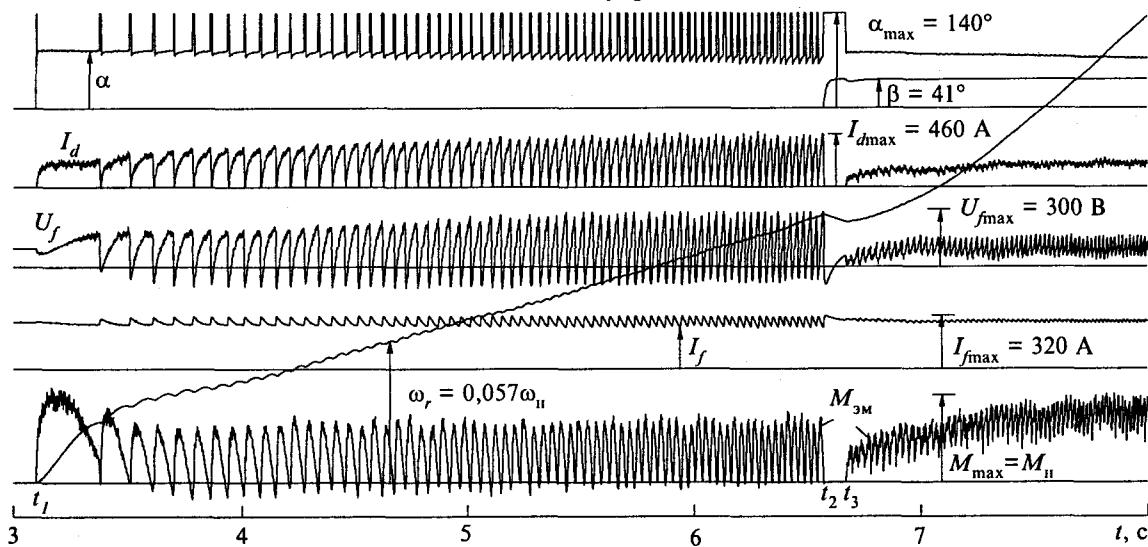


Рис.2. Начало процесса пуска синхронного двигателя СДН2-18-64-12:

t – время; α , α_{\max} – угол управления выпрямителя и его максимальное значение; β – угол инвертирования инвертора; I_d , $I_{d\max}$ – выпрямленный ток и его максимальное значение; U_f , $U_{f\max}$ – напряжение возбуждения и его максимальное значение; I_f , $I_{f\max}$ – ток возбуждения и его максимальное значение; M_{3m} , M_n – электромагнитный момент двигателя и его номинальное значение; ω_r , ω_n – частота вращения ротора и ее номинальное значение

$$\left. \begin{aligned} U_{g,t+\Delta t} &= U_{g,t} + (U_f - U_{g,t}) \Delta t / T_{uf}; \\ \omega_z &= \omega_z + [1 + K_y (U_f / U_{g,t+\Delta t} - 1)] \omega_e \Delta t / t_e, \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где t – время; Δt – время цикла работы системы управления; U_f – измеренное напряжение возбуждения в момент времени $t+\Delta t$; $U_{g,t}$, $U_{g,t+\Delta t}$ – отфильтрованное напряжение возбуждения в моменты времени t и $t+\Delta t$; T_{uf} – постоянная времени фильтра; ω_e – частота перехода на естественную коммутацию; t_e – время разгона до частоты ω_e ; K_y – коэффициент настройки.

Фаза системы импульсов управления инвертора с учетом начального значения (1):

$$\left. \begin{aligned} \tau_{z,0} &= \tau_1; \\ \tau_{z,t+\Delta t} &= \tau_{z,t} + \omega_z \Delta t, \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Обратная связь по напряжению возбуждения, действующая на частоту импульсов управления инвертора, позволяет устранить низкочастотные колебания ротора, увеличить перегрузочную способность машины, снизить вероятность выпадения ее из синхронизма.

При увеличении частоты импульсов до заданной уставки осуществляется переход на естественную коммутацию тока в инверторе (время t_2 на рис.2). В зоне естественной коммутации импульсы управления инвертора синхронизируются с отфильтрованными напряжениями фаз (в турбогенераторах) или со сверхпереходными ЭДС (в двигателях) [2].

Фильтрация напряжений или ЭДС осуществляется по следующему алгоритму [3]. В каждом цикле работы системы управления измеряются фазные напряжения синхронной машины u_n ($n = 1, 2, 3$), определяя-

ется их амплитуда U_m и синус угла сдвига системы напряжений u_n относительно трехфазной системы единичных синусоидальных ЭДС e_n :

$$\left. \begin{aligned} U_m &= \sqrt{\frac{2}{3}(u_1^2 + u_2^2 + u_3^2)}; \\ \sin \phi &= \frac{2}{3U_m} [u_1 \cos(\omega t) + u_2 \cos(\omega t - 2\pi/3) + \\ &+ u_3 \cos(\omega t - 4\pi/3)]. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Если частоты и фазы напряжений u_n и ЭДС e_n равны, то $\phi = 0$. При изменении режима работы разность фаз ЭДС и напряжений отклоняется от 0. Поддержание разности фаз на нулевом уровне осуществляется регулятором путем изменения частоты единичных ЭДС:

$$\left. \begin{aligned} \omega_{i,t+\Delta t} &= \omega_{i,t} + \sin(\phi) \Delta t K_i; \\ \omega &= \omega_{i,t+\Delta t} + \sin(\phi) K_o, \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

где K_i и K_o – коэффициенты настройки регулятора.

По отфильтрованным кривым определяются амплитуда и частота вращения вектора напряжения или ЭДС. Фаза отфильтрованных кривых ω используется для формирования импульсов управления инвертора. При этом угол инвертирования β регулируется в зависимости от индуктивности обратной последовательности машины L_2 , амплитуды напряжения U_m (или сверхпереходных ЭДС), частоты вращения вектора напряжения (или ЭДС) ω , выпрямленного тока I_d и заданного угла запаса δ :

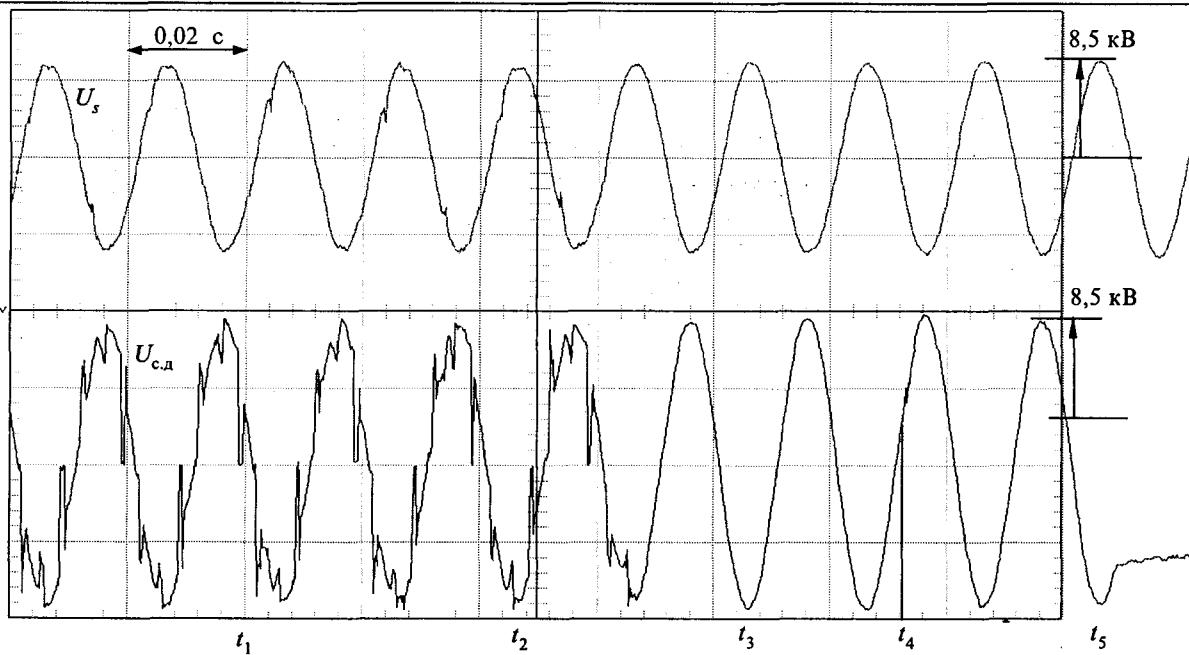


Рис.3. Оциллограмма процесса синхронизации двигателя СДЗ-4000 с сетью 6 кВ:

U_s – линейное напряжение сети; $U_{c,d}$ – линейное напряжение двигателя

$$\beta = \pi - \arccos \left[\frac{2I_d \omega L_2}{\sqrt{3} U_m} - \cos(\delta) \right]. \quad (6)$$

Частота вращения ротора определяется регулятором частоты, на выходе которого формируется заданный выпрямленный ток. Фактический выпрямленный ток формируется воздействием на угол управления выпрямителя.

При пуске газотурбинных агрегатов разгон до частоты зажигания турбины (около 30% номинальной частоты) осуществляется только ПЧ. Дальнейший разгон до частоты вращения 70–80% осуществляется ПЧ и турбиной при ограничении мощности ПЧ. В конце этого режима работы токи ПЧ плавно снижаются до 0 и он отключается. Дальнейший разгон агрегата осуществляется турбиной.

В приводах мельниц ПЧ осуществляют разгон двигателей до номинальной частоты. В конце процесса разгона двигатели синхронизируются с питающей сетью. На рис.3 представлена осциллограмма процесса синхронизации двигателя СДЗ-4000 с сетью 6 кВ.

На осциллограмме указаны характерные моменты времени t_1-t_5 . До момента t_1 система управления проверяет условия синхронизации по отфильтрованным напряжениям сети и двигателя. Команда на подключение двигателя к сети формируется в момент t_1 , когда частоты и амплитуды напряжений сети и двигателя близки по значению, а их взаимный сдвиг по фазе близок к 180° . При этом выдается сигнал на включение соответствующего коммутационного аппарата. Фактическое включение этого аппарата происходит с задержкой порядка 0,1 с в момент t_4 . Ко-

манда на гашение выпрямленного тока и на отключение коммутационных аппаратов на входе и выходе ПЧ формируется в момент времени t_2 . В момент t_3 токи ПЧ уменьшаются до 0. Подключение двигателя к сети происходит при закрытых вентилях ПЧ в момент t_4 . Двигатель отключается от ПЧ в момент t_5 .

Из осциллограммы рис.3 видно, что в момент времени t_4 искажения напряжений незначительны, т.е. происходит "бездарное" включение двигателя в сеть.

Для отладки алгоритмов управления разработана система наладки блоков управления (в работе активное участие принимал инженер А.Г. Воронцов). Система включает в себя компьютерные модели силовых частей установок, микропроцессорный блок управления и согласующее устройство. При работе компьютерной модели на каждом интервале расчета определяются мгновенные значения токов, напряжений и других переменных. Часть этих переменных, соответствующая имеющимся в реальной системе датчикам, поступает в блок управления через плату ввода-вывода. На выходе блока управления формируются сигналы, которые через плату ввода-вывода передаются в компьютер. В компьютерной модели они используются на каждом расчетном интервале времени для переключения вентиляй. На ЭВМ Pentium 4 с тактовой частотой 1700 МГц в операционной системе Windows 2000 система работает в режиме реального времени при шаге расчета 60–80 мкс.

Выводы

1. В ОАО "Электросила" выполнена разработка и налажено производство высоковольтных тиристор-

ных преобразователей частоты со звеном постоянного тока для пуска турбогенераторов и регулирования частоты вращения двигателей в электроприводах.

2. В процессе создания преобразователей частоты освоены современные технологии – разработана система наладки микропроцессорных блоков управления с использованием математических моделей силовой части установок.

Список литературы

1. Глебов И.А., Шулаков Н.В., Крутяков Е.А. Проблемы пуска сверхмощных синхронных машин. Л.: Наука, 1988.

2. Крутяков Е.А., Павлов П.А., Пронин М.В. Алгоритмы работы тиристорных пусковых устройств для турбогенераторов и синхронных двигателей производства АО "Электросила". СПб., 2001. Вып. 40.

3. Логинов А.Г., Фадеев А.В. Микропроцессорный автоматический регулятор типа АРВ-М для систем возбуждения АО "Электросила"//Электротехника. 2001. № 9.

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ

Гидрогенераторостроение в ОАО "Электросила"

ПИНСКИЙ Г.Б.

Проанализированы данные о состоянии и особенностях гидрогенераторостроения в ОАО "Электросила" за последнее десятилетие и подытожены основные достижения в расширении номенклатуры, развитии конструкций и технологий.

This article is represented and analysed data on state and special features hydrogenerators production at Electrosila plant during last ten years. The general of the development in this type of electrical machines, the main achievements in expansion of nomenclature, designs and technologies are expounded also.

ОАО "Электросила" – крупнейшее отечественное предприятие энергетического электромашиностроения и родина российского гидрогенераторостроения. Завод, история которого насчитывает более 100 лет, стал специализироваться на создании генераторов для энергетики с середины 20-х годов прошлого века в связи с реализацией плана ГОЭЛРО. За более чем 75-летнюю работу на этом рынке "Электросилой" изготовлено более 600 гидрогенераторов общей мощностью около 55 млн. кВт, что составляет почти 9% всего мирового производства таких машин.

В середине 50-х годов на "Электросиле" был введен специализированный четырехпролетный корпус по производству гидрогенераторов, единственный в стране и один из немногих в мире, что собственно и позволило заводу закрепиться на позиции одного из основных изготовителей этого оборудования.

Благодаря постоянным заказам на все более мощные гидрогенераторы в 50–80-е годы на заводе сложились научно-исследовательская база и собственная школа конструкторов, технологов, производственников и исследователей, которые вывели его в лидеры мирового гидрогенераторостроения. Уникальная серия самых крупных гидрогенераторов для Волжских ГЭС, первые в мире гидрогенераторы мощностью более 200 МВт (Братская ГЭС), а затем по 500 МВт (Красноярская ГЭС), непосредственное водяное охлаждение обмоток, ставшая теперь классической компоновка крупных гидрогенераторов с опорой подпятника на крышку турбины и с одним направляющим

подшипником в верхней крестовине, конструкции высоконагруженных подпятников, в том числе с двухрядным расположением сегментов – все это и многое другое впервые было создано на "Электросиле".

С середины 80-х годов, когда практически прекратился поток заказов на внутреннем рынке, "Электросила" обратилась к экспорту, который и стал доминирующим в объеме продаж завода. Экспорт и ранее всегда присутствовал на "Электросиле". Достаточно назвать гидрогенераторы для Асуанской ГЭС в Египте, для ГЭС "Сальто-Гранде" в Аргентине и Уругвае, "Собрадиньо" и "Капивара" в Бразилии, "Джердаг" в Югославии или "Железные Ворота" в Румынии. Однако, если ранее его доля составляла до 20% общего производства, то теперь она возросла до 80%. Несмотря на жестокую конкуренцию с зарубежными компаниями и проблемами, связанными с кредитованием поставок, в целом удалось обеспечить завод достаточным количеством заказов, чтобы сохранить инфраструктуру производства и персонал. Сегодня портфель заказов на гидрогенераторы практически укомплектован на много лет вперед.

В табл.1 приведены данные гидрогенераторов, изготовленных заводом с 1990 г. Как видно из табл.1, особенностью современной номенклатуры является, во-первых, многообразие параметров-мощностей, напряжений, частот вращения. Еще большим разнообразием характеризуются требования к исполнению гидрогенераторов, их отдельных узлов и систем. Другой особенностью спектра выполненных заказов яв-

ляется явное преобладание очень "коротких" серий и даже разовых машин, чего не наблюдалось никогда ранее. Это предопределяет значительно большую нагрузку конструкторских подразделений и служб, обеспечивающих подготовку производства.

Гидрогенераторы, представленные в табл.1, условно можно разделить на три группы.

Первая группа – генераторы ГЭС "Пьедра дель Агила", "Агуамильпа" и Бурейской ГЭС. Это мощные гидрогенераторы с косвенным воздушным охлаждением и с классическим полузонтичным исполнением (рис.1). Генераторы для ГЭС "Пьедра дель Агила" изготавливались частично на "Электросиле" (обмотка статора, полюсы, сегменты подпятников), частично на аргентинских заводах ИМПСА и "Кометарса" по документации завода, переданной в полном объеме на лицензионной основе и откорректированной вместе с инженерами ИМПСА применительно к местным условиям. В этих машинах впервые за рубежом осуществлена кольцевая сборка сердечников статора с использованием, для создания предварительно напряженного состояния сердечника, его нагрева относительно корпуса (рис.2).

В генераторах ГЭС "Агуамильпа" впервые была применена для обода ротора сталь с пределом текучести 72 кг/мм², что диктовалось требованиями тендера о полуторакратном запасе по прочности при угонной частоте вращения.

К этой группе машин близки гидрогенераторы Рыбинской, Цимлянской ГЭС и ГЭС "Капанда", изготовленные на замену физически изношенных, а также ГЭС "Урра-1". При изготовлении последних впервые на заводе была осуществлена сборка и окончательная

обработка с одной установки всех опорных и посадочных поверхностей валопровода: центральной части ротора, втулки с диском подпятника и надставки вала. Это позволило, как показали результаты монтажа всех 4 генераторов, отказаться от трудоемкой операции корректировки линии валопровода. Бой вала, измеренный на фланцевом соединении валов турбины и генератора и на подшипниках, не превысил 0,04 мм.

К другой группе гидрогенераторов могут быть отнесены машины со средними частотами вращения – для ГЭС Мингечаурской, "Памило", "Яли", выполненные в подвесном исполнении. В некоторых из них ("Яли") реализована осевая подача воздуха к торцам полюсов. При этом в генераторах ГЭС "Яли" для большей равномерности распределения воздуха по радиальным вентиляционным каналам сердечника статора последние расположены неравномерно по длине: более часто по краям сердечника и реже в средней его части. На этих же машинах вал генератора выполнен составным из двух частей с фланцевым соединением непосредственно над ротором – из условия доставки вала на ГЭС по территории Вьетнама.

В генераторах Рыбинской и Мингечаурской ГЭС реализована еще одна модификация конструкции статора, который изготавливается на заводе из секторов, а на месте путем подшиптовки у торцов секторов сегментов взамен временных, с использованием специальной технологии, стыки секторов в сердечнике устранились. При этом при монтаже необходимо произвести уже не полную опрессовку сердечника, а только частичную – в зоне стыков секторов корпуса.

Таблица 1

Гидрогенераторы последнего десятилетия

ГЭС	Страна	Количество, г/г	Номинальная мощность, МВ·А	Номинальное напряжение, кВ	Номинальная частота вращения, об/мин	Год производства
"Пьедра-дель-Агила"	Аргентина	4	390,0	15,75	125	1989 – 1991
"Бурджарская"	Узбекистан	2	4,75	6,6	187,5	1990
"Винучи"	США	1	19,4	13,8	327	1992
"Агуамильпа"	Мексика	3	341,0	13,8	150	1992 – 1993
"Бхакра"	Индия	5	174,4	11,0	187,5	1992 – 1995
"Капанда"	Ангола	2	144,5	13,8	315	1992 – 1994
Верхне-Свирская	Россия	4	50	15,75	68,18	1992 – 1995
Волховская	Россия	3	15,3	10,5	75	1993 – 1995
Рыбинская	Россия	2	79,0	13,8	62,5	1994 – 1996
Красноярская	Россия	4	590,0	15,75	93,8	1994 – 1999
Мингечаурская	Азербайджан	3	78,2	13,8	150	1995 – 1999
"Ниуил-4"	Аргентина	1	31,0	13,2	375	1996
"Памило"	Финляндия	1	30,0	10,5	230,8	1996
Цимлянская	Россия	2	65,6	10,5	88,3	1996 – 2000
Аушигерская	Россия	3	24,1	10,5	428,6	1997 – 1998
"Урра-1"	Колумбия	4	92,7	13,8	120	1997 – 1998
"Яли"	Вьетнам	4	211,8	15,75	250	1997 – 1998
Еникендская (капсульн.)	Азербайджан	4	41,7	6,3	115,4	1997 – 2001
"Калирайя"	Филиппины	2	19,4	13,8	720	1999
Туполянская	Узбекистан	2	18,75	10,5	750	1999 – 2000
"Ботокан"	Филиппины	2	11,7	13,8	600	2000
"Аль-Адайм"	Ирак	2	16,75	11,0	250	2000
"Ялхама"	Финляндия	2	23,52	10,5	115,4	2000 – 2001
"Катерма"	Финляндия	1	15	10,0	136,4	2001
Бурейская	Россия	6	372,2	15,75	125	2001 – 2004

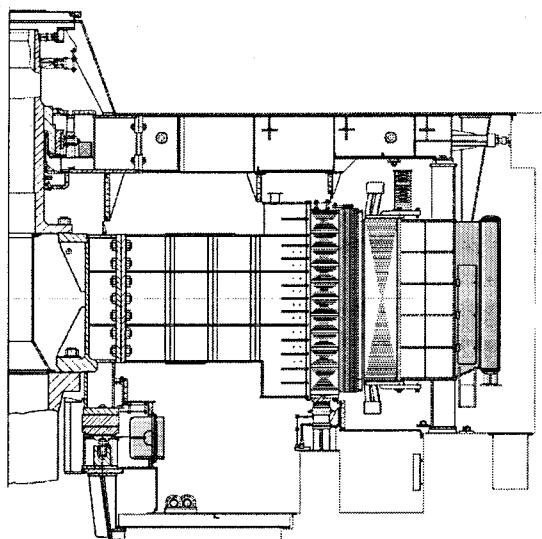


Рис.1. Общий вид гидрогенератора Бурейской ГЭС

На генераторе ГЭС "Памило" все три опоры скольжения – подпятник и оба подшипника, верхний и нижний, снабжены сегментами, облицованными ЭМП. Шум генератора, расположенного непосредственно в машинном зале, составляет не более 76 дБА (при норме 85 дБА).

К третьей группе относятся быстроходные генераторы для ГЭС "Винучи", "Ниуил-4", Туполанской, "Калирай" и "Ботокан". Особый интерес представляют три последних. До сих пор отечественная промышленность не создавала гидрогенераторы с номинальной частотой вращения выше 500 об/мин. Восьмиполюсные генераторы Туполанской ГЭС вообще, видимо, характеризуются частотой вращения, предельной для гидрогенераторов (рис.3). В этих машинах полюса крепятся непосредственно на валу. Торможение агрегата осуществляется с помощью установленных на крышке масляной ванны подпятника и верхнего подшипника тормозов и специального

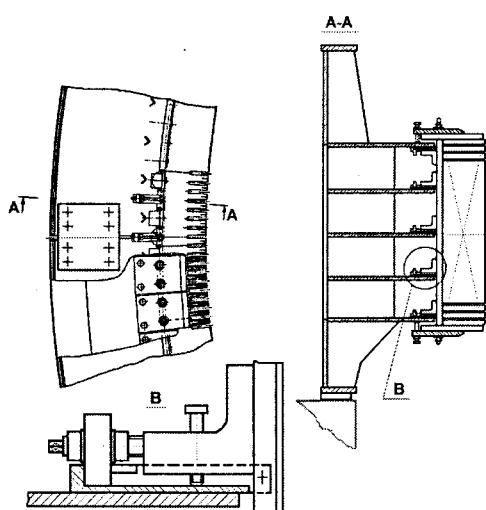


Рис.2. Конструкция корпуса статора с предварительно напряжённым сердечником

диска, закрепленного в верхней части вала. Система торможения генераторов ГЭС "Калирай" и "Ботокан", наоборот, традиционна. Особенностью этих машин является катушечная обмотка статора, что продиктовано относительно небольшой их мощностью и высоким номинальным напряжением 13,8 кВ. Ранее на отечественных заводах катушечные обмотки изготавливались на напряжение до 10,5 кВ. Впервые полностью собранные роторы этих генераторов прошли динамическую балансировку при номинальной частоте вращения на разгонно-балансировочном стенде завода и подверглись на нем испытанию на повышенную частоту вращения.

Особняком среди всех гидрогенераторов последних лет стоят машины для Енисейской ГЭС. Это капсульные гидрогенераторы, которые, в отличие от всех 27 ранее выпущенных заводом генераторов этого исполнения, выполнены не с непосредственным водяным, а с воздушным принудительным охлаждением, что было продиктовано требованием тендера. Если мировой лидер по капсульным агрегатам фирма "Альстом" (Франция) практикует для охлаждения крупных генераторов сжатый воздух и аксиальную систему вентиляции с использованием специальных аксиальных каналов в сердечниках статоров, то в гидрогенераторах Енисейской ГЭС реализована радиально-аксиальная схема вентиляции воздухом нормального давления, что, конечно, имеет неоспоримые преимущества при эксплуатации.

Таким образом, представленная в табл.1 гамма новых типов гидрогенераторов, созданных за последнее десятилетие, характеризуется прежде всего широчайшей палитрой своих параметров и исполнений. Практически освоена вся реальная номенклатура энергетически значимых гидрогенераторов применительно к самым различным условиям их установки и эксплуатации.

Общим для всех гидрогенераторов являлось применение высоколегированной холоднокатаной анизотропной электротехнической стали толщиной 0,5 или 0,35 мм (в зависимости от частоты – 50 или 60 Гц) с обязательным гратоснятием сегментов после штамповки и

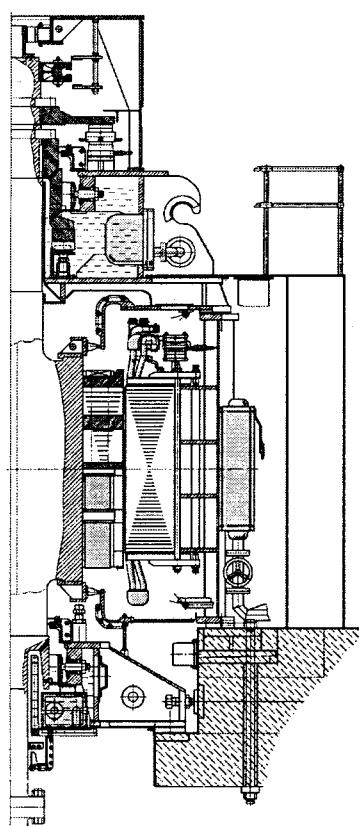


Рис.3. Общий вид гидрогенератора Туполанской ГЭС

контролем изоляции после нанесения лакового покрытия. С 1999 г. на заводе осуществлен переход на новый изоляционный лак, не содержащий компонентов органического происхождения, имеющий после нанесения двухстороннюю толщину до 8 мкм и обладающий при этом большой равномерностью нанесения на всей поверхности и более высоким электрическим сопротивлением. Также общим является применение изоляционных материалов нагревостойкости класса F. За прошедшие годы, с учетом изменений в технологии изготовления обмоток статоров и совершенствования исходных материалов, не раз пересматривались нормативы на толщину корпусной изоляции, рабочий градиент напряжения в которой достиг уровня 3 кВ/мм. Осуществлен переход на полупроводящее лаковое покрытие стержней обмотки статора с нелинейной вольт-амперной характеристикой. Все это позволило делать генераторы более легкими и компактными. Эти же цели преследовал переход к более "ажурным" сварным конструкциям корпусов статоров и крестовин, что одновременно должно было обеспечить и снижение остаточных напряжений и деформаций, вызванных сваркой. Внедрение на заводе виброотпуска крупногабаритных сварных узлов также способствовало повышению их качества.

В каждом конкретном типе нового гидрогенератора использовались оригинальные "фирменные" конструкции и технологии, некоторые из которых упомянуты выше при характеристике генераторов. Одной из таких конструкций являются полюсы с составными концевыми щеками, состоящими из 2 частей: верхней, со стороны статора, выполненной из немагнитного сплава, и нижней, в корне полюса, стальной. Такие полюсы позволяют не только уменьшить плотность магнитных потоков рассеяния и тем самым нагрев торцевых зон статора, но и существенно расширить область длительно допустимых режимов работы при потреблении реактивной мощности из сети (рис.4), что весьма актуально сегодня во многих энергосистемах.

С целью дальнейшего повышения надежности и долговечности в ОАО "Электросила" в начале XXI в. реализована технология изготовления полюсов, предусматривающая их вакуумно-нагнетательную пропитку в полностью собранном виде. Для этого используется недавно введенный специализированный производственный участок, позволяющий производить все необходимые операции по вакуумированию, пропитке, сушке полюсов любых размеров и массы, а также осуществлять автоматизированный контроль за параметрами технологических процессов. Корпусная изоляция полюсов выполняется из специального материала, который выбран из условия обязательного применения VPI технологии. Витковая изоляция не содержит асбеста (это диктуется международной практикой) и также рассчитана на новый способ производства полюсов. Как показал опыт применения вакуумно-нагнетательной пропитки, практически сняты все претензии к качеству изоляции со сторо-

ны заказчиков и, несмотря на впервые введенное дополнительное испытание изоляции импульсным методом, резко сократился брак в процессе производства. Эта технология до сих пор не имеет аналогов в мировой практике.

Подпятники, а иногда и направляющие подшипники, оснащаются сегментами с ЭМП покрытием с усовершенствованными конструкцией и технологией.

Особое внимание в последние годы было обращено на качество покрытий, консервации и упаковки, которое традиционно в отечественной практике относилось к категории малозначимых и потому достаточно запущенных. Наши применение современные многослойные твердые защитные покрытия металлоконструкций, ингибиторы и иные средства, удовлетворяющие любым требованиям по доставке оборудования до места и его успешной эксплуатации в любых климатических условиях.

В условиях, когда за десятилетия оптимизированы многие конструкции, дальнейший прогресс в электромашиностроении, в гидрогенераторостроении в частности, в значительной мере определяется совершенствованием методов проектирования и производства. Применение современных вычислительных средств и программных продуктов, позволяющих осуществить проектирование по трехмерным моделям и получить объемные картины распределения электромагнитных, тепловых и механических полей в зонах и телах со сложными граничными условиями, открыло новые перспективы в понимании всей проблематики задач по совершенствованию машин и новые возможности повышения их качества и надежности. Это обусловило изменения в сфере произ-

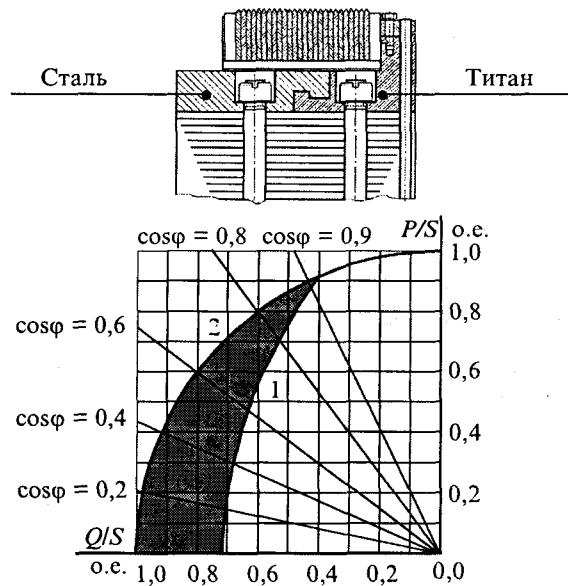


Рис.4. Полюсы с немагнитными концевыми частями и их эффективность (а) и диаграмма длительно допустимых нагрузок Бурейской ГЭС в режиме недовозбуждения:

1 – магнитные нажимные щеки полюсов; 2 – немагнитные составные щеки полюсов

водства. Как показал опыт работы на таком специальном рынке, как рынок гидрогенераторов с его остройшей конкуренцией между крупнейшими национальными монополиями, комплексный подход к одновременному обновлению компьютерных, информационных и производственных технологий – это единственный путь сохранения и упрочения позиций в изменяющемся мире.

Система организации работ по созданию новых типов гидрогенераторов претерпела существенные изменения во всех звеньях, что позволяет сегодня сократить цикл их освоения до 9 месяцев. При этом традиционно высокая оснащенность производства специальной технологической оснасткой (до 150 единиц на заказ) остается неизменной, что предопределяет высокое качество изделий и культуру их изготовления.

В последние годы все большую долю в общем объеме производства начинают занимать заказы, связанные с реконструкцией действующего парка гидрогенераторов. В ОАО "Электросила" накоплен немалый опыт в этой области. В табл.2 представлены наиболее крупные работы, выполненные "Электросилой" по реконструкции гидрогенераторов в России и за рубежом.

Главной целью реконструкции является, как правило, восстановление ресурса физически изношенного и морально устаревшего оборудования. Среди других целей можно отметить улучшение эксплуатационных характеристик генераторов, а также устранение недостатков проекта.

При реконструкции гидрогенераторов обычно ставится вопрос о повышении их мощности. Он рассматривается в комплексе всего сооружения и с учетом возможностей турбинного оборудования. В этом случае объем требуемой реконструкции в значительной мере определяется желаемым повышением мощности. При выполнении проекта реконструкции максимально используются существующие фундаменты, что исключает затраты на строительные работы, и, как правило, сохраняются массогабаритные характеристики машин.

Так, в гидрогенераторах ГЭС "Бхакра" заново создана собственно только активная зона. Были поставлены статоры, полюсы, сегменты подпятника и система тиристорного самовозбуждения, все остальные узлы сохранены прежними, изготовленными еще в 1964–1965 гг. При реконструкции удалось достичь мощности 157 МВт вместо прежней 120 МВт без повышения рабочей температуры и при сохранении габаритных размеров и фундаментов.

Выдача рекомендаций по реконструкции гидрогенератора базируется на знании его исходного состояния, особенностей конструкции, истории эксплуатации и ремонтов. Наличие опытных и квалифицированных специалистов, использующих в своей работе современные компьютерные программы, грамотно интерпретирующих результаты расчетов и могущих дать инженерные решения любой сложности, позволяет

осуществить комплексный подход к данной проблеме.

"Электросила" для всех объектов, где она осуществляла реконструкцию, детально прорабатывала рекомендации, принимая во внимание все аспекты: состояние сердечника и обмотки статора, обмоток возбуждения и демпферных ротора, торцевых зон статора, контактных колец и щеточного аппарата, систем охлаждения, возбуждения и т. д. Все эти рекомендации, будучи всесторонне аргументированными, реализовывались на практике и, как показал опыт, полностью подтверждались.

Для машин, проработавших 40–45 лет, обычно заменяются: статор (иногда сердечник и обмотка), полюсы и система возбуждения, а также сегменты подпятника. К этому перечню заказчик добавляет те элементы механических конструкций, состояние которых вызывает у него особую озабоченность.

Наиболее нагруженным узлом генератора, обычно лимитирующим его мощность, является статор. За последние десятилетия прогресс в области высоковольтной изоляции, разработанной и применяемой на "Электросиле", был весьма значителен. Непрерывно улучшались материалы, технология изготовления стержней и катушек статорных обмоток, противокоронных покрытий, способов уплотнения обмоток в пазах. Все это привело к уменьшению толщин изоляции более чем в 1,5 раза и примерно к такому же росту заполнения пазов медью. Таким образом, при реконструкции гидрогенераторов, выполненных в свое время с компаундированной микалентной изоляцией класса В, даже при сохранении конфигурации и размеров активной зоны машины, имеется возможность увеличить ее мощность без повышения рабочей температуры приблизительно на 20%. Кроме того, новая термореактивная изоляция имеет более высокий класс нагревостойкости – F, что дает дополнительную возможность повышения мощности.

Еще большие резервы открываются при одновременной замене сердечников и обмоток статоров. Впервые, современные электротехнические стали обладают более низкими удельными потерями, во-вторых, представляется возможным выбрать оптимальную геометрию зубцовой зоны сердечника и использовать современную технологию его сборки.

Опыт, накопленный "Электросилой", показывает, что повышение мощности при замене статоров на 30–35% с сохранением их габаритов и массы вполне достижимо и является далеко не пределом.

При выполнении новых статоров обеспечивается длительная и надежная эксплуатация, что гарантируется современными конструктивными и технологическими мероприятиями. К ним относятся, помимо уже упомянутых, прессовка сердечников с помощью многоцилиндровых гидравлических прессов, выполнение крайних пакетов сердечника монолитными, использование только немагнитных материалов в зоне лобовых частей обмотки статора, тангенциальное упругое уплотнение в пазах стержней статор-

Таблица 2

ГЭС	Страна	Коли-чество модер-низаций, г/г	Номинальная мощность, МВт		Номинальная частота вращения, об/мин	Год произ-водства	Год модер-низации	Объем модернизации
			старая	новая				
Братская	Россия	14	225	250	125	1960	1976	Замена обмотки статора
Волжская	Россия	20	115	120	68,2	1953	1978	Замена сердечника и обмотки статора
Волгоградская	Россия	22	115	120	68,2	1957	1978	Замена сердечника и обмотки статора
Нижне-Свирская	Россия	4	24	30	75	1932	1979	Замена статора, полюсов, системы вентиляции, подпятника
Воткинская	Россия	10	100	100	62,5	1963	1987–2002	Реконструкция полюсов
Днепровская	Украина	2	104,5	104,5	107	1946	1988	Замена сердечника и обмотки статора
Бурджаурская	Узбекистан	2	3,2	3,8	187,5	1934	1990	Полная замена гидрогенератора
Гюмушская	Армения	1	56	56	375	1952	1990	Замена статора
Бхакра	Индия	5	120	157	187,5	1964	1992	Замена статора, полюсов
Верхне-Свирская	Россия	4	40	40	68,2	1950	1992	Замена статора, полюсов, системы вентиляции, подпятника
Волховская	Россия	3	7	12	75	1925	1993	Полная замена гидрогенератора
Красноярская	Россия	5	500	500	93,8	1964	1994	Замена сердечника и обмотки статора, полюсов, системы водяного охлаждения, частей токоподвода
Рыбинская	Россия	2	55	63,2	62,5	1940	1994	Полная замена гидрогенератора
Цимлянская	Россия	2	40	52,5	88,2	1951	1996	Полная замена гидрогенератора
Мингечаурская	Азербайджан	3	59,5 / 72,5	70,4	150	1952	1996	Полная замена гидрогенератора
Калирайя	Филиппины	2	11,3	17,5	720	1948	1999	Полная замена гидрогенератора
Ботокан	Филиппины	2	8	10,5	600	1948	2000	Полная замена гидрогенератора
Ялхама	Финляндия	3	15,3	21,17	115,4	1950	2000	Замена статора, полюсов
Плявинская	Латвия	2	82,5	82,5	88,2	1964	2001–2002	Реконструкция полюсов
Катерма	Финляндия	1	6	12	136,4	1950	2001	Полная замена гидрогенератора

ной обмотки. Благодаря последнему в конструкциях "Электросилы" полностью исключено явление частичных пазовых разрядов (рис.5).

Все конструкторские и технологические решения, подбор новых материалов и компонентов проходят экспериментальную проверку на полномасштабной пазовой модели в жестких условиях одновременного воздействия термомеханических и вибрационных нагрузок и высокого напряжения.

В зависимости от диаметра статора, его параметров и, конечно, пожеланий заказчика используются как составные статоры из секторов, так и цельные бесстыковые сердечники, собираемые в кольцо на месте установки. Эти последние могут быть выполнены предварительно напряженными, с растяжкой относительно корпуса.

При реконструкции гидрогенераторов часто осуществляется и замена изоляции полюсов ротора на новую, также класса F. Если мощность генератора меняется незначительно, то сами катушки возбуждения обычно сохраняются. При существенном повышении мощности возникает необходимость в замене обмотки ротора.

Основные механические конструкции ротора, включая валопровод, обычно могут быть сохранены, если, конечно, отсутствуют следы усталостных повреждений. Кроме того, должна быть проверена

прочность вращающихся деталей при возможном увеличении угонной скорости, особенно при замене рабочих колес гидротурбин.

Наиболее распространенной модернизацией гидрогенератора является замена сегментов подпятника с баббитовым покрытием на сегменты с антифрикционным слоем на основе фторопластмассовой композиции с металлизированным пружинящим элемен-

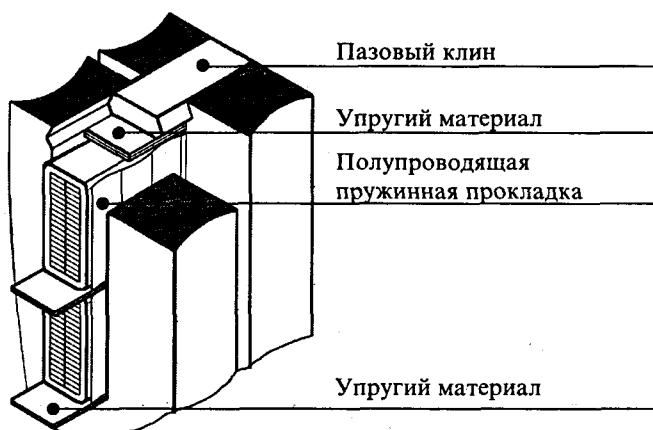


Рис.5. Современное уплотнение обмоток статора в пазах

том. Такая модернизация подшипников произведена более чем на 50 гидрогенераторах за рубежом, как на генераторах производства "Электросилы", так и изготовленных другими фирмами. В последнее время фторопластовое покрытие стало применяться и для сегментов направляющих подшипников гидроагрегатов.

Любая реконструкция давно работающих генераторов всегда включает замену электромашинных возбудителей (на валу или отдельно стоящих) на тиристорные системы самовозбуждения.

Выводы:

1. ОАО "Электросила" не только сохранило свой технический и производственный потенциал по гидрогенераторам, но благодаря внедрению нового оборудования, современных материалов и технологий, сделала шаг вперед в повышении качества и надежности гидрогенераторов.

2. Современные возможности ОАО "Электросила" позволяют удовлетворить практически любые запросы по созданию новых и реконструкции старых гидрогенераторов.

Пожаро-взрывобезопасные турбогенераторы нового поколения средней мощности

КАДИ-ОГЛЫ И.А.

Представлена серия синхронных и асинхронизированных турбогенераторов нового поколения средней мощности с полным водяным и воздушным охлаждением типа Т3В, Т3Ф, Т3ВА и Т3ФА. Отмечены их преимущества и высокие технико-экономические показатели.

Номенклатура турбогенераторов, изготавливаемых ОАО "Электросила", охватывает широкий диапазон мощностей, назначений, конструктивных исполнений и способов охлаждения. ОАО "Электросила" располагает собственными отработанными конструкциями важнейших узлов, зачастую превосходящими разработки конкурентов по простоте исполнения и эксплуатационной надежности. Среди новых разработок следует выделить конструкции, не имеющие аналогов и позволяющие превзойти продукцию конкурентов по основным технико-эксплуатационным показателям: уровню КПД, маневренности, перегрузочной способности, надежности, а также отсутствию в генераторе взрывоопасного водорода, используемого в качестве хладоагента. Это известные турбогенераторы с водяным охлаждением типа Т3В и турбогенераторы нового поколения с воздушным охлаждением типа Т3Ф мощностью 110–350 МВт.

In the article the new series of medium power synchronous and synchronized turbogenerators with complete water and air-cooling of Т3В, Т3Ф, Т3ВА, Т3ФА types is presented. The advantages and high performance characteristics of such generators are given.

Рассматриваемые турбогенераторы средней мощности предназначены для работы при сопряжении как с паровыми, так и газовыми турбинами. В последнем случае разворот агрегата осуществляется ротором турбогенератора от тиристорного пускового устройства.

Турбогенераторы с водяным охлаждением типа Т3В

В таблице приведены параметры турбогенераторов с полным водяным охлаждением. Генераторы представляют единую серию, выполнены в едином штампе статора и ротора и отличаются только длиной средней пазовой части, пропорциональной принятому стандартному напряжению обмотки статора.

Узел контактных колец, подшипники, торцевые зоны сердечника статора и лобовые части, их крепление имеют одинаковую конструкцию. Однаковы также щиты статора, выводы обмотки статора, демпферной обмотки и обмотки возбуждения ротора. Высокая унификация серии турбогенераторов типа

Турбогенераторы средней мощности с водяным и воздушным охлаждением

Тип генератора	Мощность, МВт	cos φ	Напряжение, кВ	Охлаждение			КПД	Максимальная мощность, МВт	Диаметр бочки ротора, мм	Место установки
				обмотки статора; температура, °C	стали статора; температура, °C	обмотки ротора; максимальная температура, °C				
Т3В-110-2У3	110	0,80	10,5	Вода	Вода	Вода	98,5	140	1115	Мосэнерго
Т3В-220-2У3	220	0,85	15,75	85	85	85	98,7	260	1075	Ленэнерго
Т3В-320-2У3	320	0,85	20				98,8	370		Минскэнерго
Т3Ф-110-2У3	110	0,80	10,5				98,4	132	1115	Мосэнерго
Т3Ф-160-2У3	160	0,85	15,75				98,6	184	1115	Ленэнерго
Т3Ф-165-2У3	165	0,85	18				98,6	184	1115	Проект
Т3Ф-220-2У3	220	0,85	15,75				98,6	242	1160	Проект
Т3Ф-320-2У3	320	0,85	20				98,7	352	1160	Проект
Т3ФА-110-2У3	110	0,95	10,5	Воздух	Воздух	Воздух	98,2	110	1200	Мосэнерго
Т3ВА-110-2У3	110	0,95	10,5	Вода	Вода	Вода	98,3	132	1100	Проект
Т3ВА-220-2У3	220	0,95	15,75	85	85	85	98,4	250	1130	Проект
Т3ВА-350-2У3	350	0,95	20				98,4	360	1130	Мосэнерго

ТЗВ позволяет удешевить производство и технологию изготовления, уменьшить номенклатуру применяемых материалов. Идентичность конструкции улучшает качество изготовления отдельных узлов и деталей, усовершенствование узла генератора одной мощности позволяет прямо переносить новшество на генераторы других мощностей без каких либо доработок.

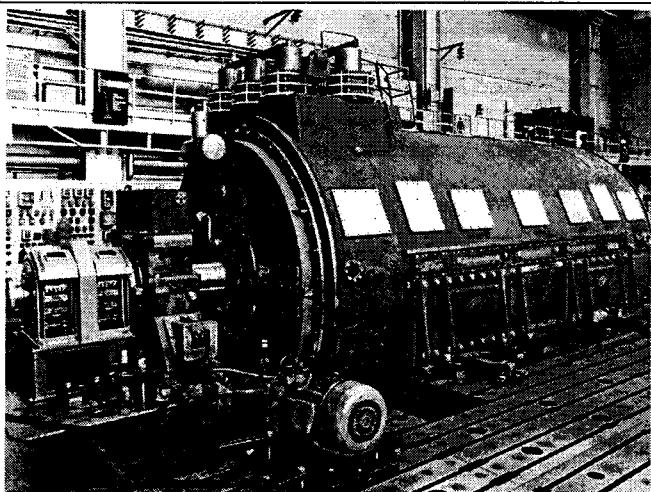
Полное водяное охлаждение расширяет перспективы дальнейшего повышения надежности турбогенераторов вследствие отсутствия масляных уплотнений вала, вентиляторов и встроенных в статор газоохладителей, снижения требований по газоплотности корпуса, позволяет обеспечить низкий нагрев изоляционных материалов и, соответственно, повысить их долговечность. В конструкции турбогенераторов применяются только негорючие материалы, для смазки подшипников допускается применять негорючую жидкость.

Турбогенераторы имеют непосредственное водяное охлаждение обмотки статора, стали статора при помощи плоских силуминовых охладителей, демпферной обмотки и обмотки возбуждения ротора. Генераторы характеризуются повышенной плотностью спрессовки сердечника статора и интенсивным охлаждением его торцевых зон. Внутреннее пространство турбогенератора заполнено воздухом при небольшом избыточном давлении. В генераторе используется самонапорный ротор, в котором отсутствуют гидравлические связи обмотки с валом. Для преодоления гидравлического сопротивления обмотки используется центробежная сила жидкости, подаваемой свободной струей во вращающийся напорный коллектор. Вода в ротор подается на уровне нижних витков обмотки помимо центрального аксиального отверстия вала, которое используется для размещения в нем токоподвода к обмотке традиционной конструкции [1].

В роторе принятые меры по выравниванию изгибающей жесткости вала ротора в двух плоскостях, для чего на полюсах фрезеруются продольные пазы, которые заполняются магнитными стальными вставками по специальной схеме с использованием стеклотекстолитовых прокладок, исключающих усталостные повреждения вала на стыках металлических вставок [2].

Турбогенераторы серии по всем параметрам соответствуют требованиям российских и международных стандартов, а по КПД, надежности, уровню нагрева и вибрации, массогабаритным характеристикам, простоте обслуживания, ремонтопригодности, оснащенности средствами контроля и диагностики превосходят показатели отечественных и зарубежных аналогов.

Все турбогенераторы серии устанавливаются на стандартные фундаменты блоков соответствующей мощности и поэтому одинаково пригодны как для вновь строящихся электростанций (в том числе для газотурбинных и парогазовых установок), так и для



Турбогенератор типа ТЗВ-320-2У3 на испытательном стенде

замены генераторов, отработавших ресурс на действующих электростанциях.

Турбогенераторы с полным водяным охлаждением – это качественно новый шаг в области крупного электромашиностроения. Оснащение тепловых и атомных энергоблоков такими безводородными генераторами обеспечивает наивысшую надежность и безопасность электростанций, персонала и окружающих территорий, в десятки раз снижает затраты на систему противопожарных мероприятий. РАО "ЕЭС России" рассматривает указанные генераторы как основу дальнейшего развития энергетики России, все проекты российских атомных энергоблоков нового поколения с повышенной надежностью и безопасностью предусматривают установку генераторов только с полным водяным охлаждением. Первый турбогенератор мощностью 110 МВт успешно работает на ТЭЦ № 27 Мосэнерго с 1997 г. Турбогенератор мощностью 320 МВт пущен в 1999 г. на Минской ТЭЦ № 5. Генератор ТЗВ-220-2У3 находится в монтаже на ТЭЦ № 5 Ленэнерго.

Турбогенераторы с воздушным охлаждением типа ТЗФ

В настоящее время в ОАО "Электросила" освоена серия турбогенераторов нового поколения средней мощности типа ТЗФ [3]. Известно, что турбогенераторы с воздушным охлаждением наиболее просты в эксплуатации, требуют минимального количества средств обеспечения и вспомогательного оборудования. При меньшем количестве средств автоматизации и диагностирования обеспечивается высокая степень готовности генератора к работе. Турбогенераторы типа ТЗФ имеют оригинальную конструкцию и схему охлаждения статора и ротора. В роторе для охлаждения обмотки используется принцип самовентиляции. Сталь статора охлаждается с периферии сердечника. В такой системе воздух циркулирует по зубцу и спинке с противоходом и равномерно охлаждает каждый пакет статора по окружности сердечника. Таким образом обеспечивается равномерное охлаждение стали статора и обмотки статора как по

окружности (поперечное сечение), так и по длине (продольное сечение). Неравномерность распределения температуры определяется точностью измерений и технологическими издержками.

Учитывая перспективность производства турбогенераторов с воздушным охлаждением, ОАО "Электросила" наметило глубокую модернизацию и внедрение новой технологии их изготовления. Внедрена новая технология укладки и выпечки обмотки статора. Стержни изолируются сухими лентами и укладываются в пазы сердечника статора. С помощью устройства вакуумно-нагнетательной пропитки осуществляется пропитка и последующая запечка обмотки статора в целом как в пазовой, так и в лобовой частях. Предусмотрено эластичное крепление обмотки в пазовой части, что обеспечивает ее упругое крепление и свободу перемещения стержней обмотки статора в аксиальном направлении при изменениях нагрузки на генератор. Вакуумно-нагнетательная пропитка обмотки статора повышает надежность ее работы и практически исключает ее обслуживание по крайней мере на 8–10 лет. В то же время конструкция обмотки статора ремонтопригодна и позволяет при необходимости заменить любой вышедший из строя стержень. Разработана технология сборки статора на специальном каркасе, при этом обеспечены минимальные внешние размеры статора обмотанного и его масса, что в свою очередь позволило выбрать оптимальные размеры технологического оборудования для вакуумно-нагнетательной пропитки и запечки обмотки статора.

Собственно статор такого турбогенератора состоит из поддона, средней части – статора обмотанного и верхней крышки. Такая разъемная конструкция обеспечивает минимальную монтажную массу наиболее тяжелой части турбогенератора (меньше массы статоров турбогенераторов с водородным охлаждением соответствующих мощностей). Это обстоятельство очень важно при замене отработавших свой ресурс генераторов на турбогенератор с воздушным охлаждением, что позволяет использовать существующее на станции крановое оборудование.

Пропитка и запечка статора обмотанного увеличивает жесткость сердечника примерно в два раза, что уменьшает вибрацию сердечника при работе во столько же раз.

Внедрена новая технология изготовления и укладки обмотки ротора с форсированным воздушным охлаждением. Эта технология обеспечивается, во-первых, за счет перехода на прямоугольные или прямоугольные ступенчатые пазы (вместо трапецидальных) для укладки обмотки возбуждения, что позволяет повысить производительность при механической обработке пазов в роторе с использованием дисковых фрез, во-вторых, за счет внедрения новой механизированной водоструйной технологии обработки радиальных каналов в витках обмотки возбуждения, в-третьих, за счет внедрения высокочастотной пайки проводников обмотки в лобовой части непосред-

ственно на роторе. Высокочастотная пайка обеспечивает стабильный (без перегрева) режим нагрева соединяемых концов обмотки и высокую надежность соединения. Место пайки требует незначительной зачистки, а затем изолировки места соединения.

Внедрение упругой подвески сердечника статора и высокое выравнивание двойкой жесткости ротора исключило в спектре виброскорости опор турбогенератора составляющую двойной оборотной частоты (100 Гц).

В турбогенераторах Т3Ф благодаря разделению воздушных потоков охлаждения ротора и статора, а также использованию центробежного вентилятора с лопатками специального профиля, имеющего высокий КПД, механические потери минимальны.

Как видно из таблицы, в турбогенераторе типа Т3Ф КПД близок или равен КПД турбогенератора Т3В соответствующей мощности. Турбогенератор типа Т3Ф-160-2У3 мощностью 160 МВт, установленный на Северо-Западной ТЭЦ, имеет 15% запаса по мощности, низкие уровни вибрации опор во всем диапазоне нагрузок.

Асинхронизированные турбогенераторы типа Т3ФА и Т3ВА

Асинхронизированные турбогенераторы используются в качестве управляемых средств компенсации реактивной мощности для нормализации напряжения в энергосистемах и повышения надежности параллельно работающих синхронных турбогенераторов.

В этой связи на базе турбогенераторов с воздушным и водяным охлаждением в ОАО "Электросила" разработаны и находятся в производстве асинхронизированные турбогенераторы мощностью 110 и 350 МВт. Асинхронизированный турбогенератор с воздушным охлаждением типа Т3ФА-110-2У3 мощностью 110 МВт, $\cos \varphi = 0,95$ будет установлен на ТЭЦ № 22 Мосэнерго в 2003 г. взамен отработавшего свой ресурс турбогенератора. Из-за отсутствия места для системы водяного охлаждения генератор выполнен по типу генераторов типа Т3Ф. На роторе генератора размещены две концентрические обмотки, оси которых сдвинуты на 90° относительно друг друга. Каждая обмотка питается отдельно через свои контактные кольца, установленные на валу ротора.

Наличие двух обмоток уменьшает использование ротора практически в 1,5 раза, а необходимость выполнения глубоких подпазовых каналов охлаждения приводит к дополнительному увеличению тока ротора. Поэтому рассматриваемый асинхронизированный турбогенератор типа Т3ФА с воздушным охлаждением имеет увеличенный диаметр бочки ротора, равный 1200 мм. Расчетная плотность тока в обмотке ротора в номинальном режиме составляет около 7 A/mm^2 . Особое внимание в генераторе уделено улучшению охлаждения торцевой зоны статора. Ее перегрев в обычном режиме нагрузки составляет около 20 К. Как показывают расчеты, в режиме потребления реактивной мощности при $\cos \varphi = 0,8$ наибольший перегрев в торцевой зоне статора ожидается на

уровне 80 К. По техническому заданию максимальная температура в торцевой зоне статора определена уровнем 135 °С.

Асинхронизированные турбогенераторы типа Т3ВА разработаны на базе синхронных турбогенераторов с полным водяным охлаждением типа Т3В и отличаются применением отработанных конструктивных узлов, широким диапазоном режимов эксплуатации, включая перегрузки, надежностью и простотой обслуживания. Благодаря непосредственному водяному охлаждению ротор такого генератора может быть рассчитан на дополнительные перегрузки, характерные для водоохлаждаемых обмоток. В результате необходимый запас статической и динамической устойчивости обеспечивается практически во всем диапазоне нагрузок. Из таблицы видно, что диаметры роторов турбогенераторов типа Т3ВА значительно меньше диаметра ротора асинхронизированного турбогенератора с воздушным охлаждением типа Т3ФА мощностью 110 МВт.

Работа асинхронизированных турбогенераторов с глубоким потреблением реактивной мощности позволит существенно повысить статическую и динамическую устойчивость энергосистемы в целом, улучшить качество вырабатываемой электроэнергии, исключить или резко ограничить режимы работы с недовозбуждением синхронных генераторов, работающих параллельно.

Турбоагрегаты с асинхронизированными генераторами будут обладать повышенным уровнем надеж-

ности и коэффициента готовности благодаря возможности работы с питанием только одной из обмоток возбуждения ротора, а также в неуправляемом асинхронном режиме при замыкании обмоток возбуждения накоротко. При этом без останова генератора могут выполняться профилактические или ремонтные работы в системе возбуждения [4].

Разработанные турбогенераторы с водяным и воздушным охлаждением отличаются более интенсивным и равномерным охлаждением активных частей, лучшим использованием электротехнических материалов и высоким КПД. Водяное охлаждение позволяет изготавливать асинхронизированный турбогенератор практически в габаритах обычной синхронной машины, а высокоеэффективная система воздушного охлаждения увеличить мощность генератора в единице до 350 МВт.

Список литературы

1. Кади-Оглы И.А., Антонов Ю.Ф., Брагин В.Б. и др. Серия турбогенераторов с полным водяным охлаждением // Электросила. СПб, 2000. № 39. С.14–21.
2. Иогансен В.И., Довгер Н.Е., Кади-Оглы И.А. и др. Неравножесткость ротора: критерий, методы выравнивания, норматив // Электросила. СПб, 2003. № 43.
3. Кади-Оглы И.А., Карташова Т.Н., Шалаев В.Г. Проблема повышения эффективности воздушного охлаждения турбогенераторов // Электросила. СПб, 2000. № 39. С.22–26.
4. Кади-Оглы И.А., Антонов Ю.Ф., Данилевич О.Я. и др. Асинхронизированные турбогенераторы разработки АО "Электросила" // Электросила. СПб, 2000. № 39. С.139–141.

Системы возбуждения турбо- и гидрогенераторов ОАО "Электросила"

ЛОГИНОВ А.Г.

В ОАО "Электросила" освоено производство тиристорных систем возбуждения нового поколения с цифровым управлением. Гибкость систем, построенных на основе цифровых технологий, позволяет удовлетворять самые разнообразные требования заказчика.

В 1999 г. ОАО "Электросила" приступило к производству систем возбуждения нового поколения. Особенности их составных частей, в том числе микропроцессорного регулятора, отражены в [1–3]. К концу 2002 г. номенклатура изготовленных и введенных в промышленную эксплуатацию систем возбуждения расширилась (табл.1). В новых системах возбуждения используются унифицированные тиристорные выпрямители с охлаждением дистиллированной водой, естественным или принудительным воздушным охлаждением.

Обусловленное потребностями рынка разнообразие типов выпускаемых ОАО "Электросила" систем

JSC Electrosila has developed the production of digital controlled thyristor excitation systems of new generation. Flexibility of systems built on the base of digital technologies permits us to meet all the range of customers' requirements.

свидетельствует о большом научно-техническом и производственном потенциале завода и является стимулом его развития. Вместе с тем, необходимость производить аппаратуру широкой гаммы порождает проблему, заключающуюся в следующем. Чем шире номенклатура новых изделий, тем больше времени и средств требуется на проектные работы и технологическую подготовку производства, тем сложнее обеспечить выполнение заказов в сжатые сроки. Понятно, что сокращение номенклатуры изделий неприемлемо, так как оно приведет к потере заказчика. Подход, выбранный заводом для решения этой непростой задачи, состоит в максимальной унифи-

кации отдельных узлов систем, радикальном упрощении технологии сборки и сокращении времени ввода в эксплуатацию новых изделий за счет повышения заводской готовности продукции. Именно он обеспечил стабильность производственного цикла, включающего разработку рабочей конструкторской и технологической документации, закупку комплектующих изделий, заготовительное производство, сборку, испытания и упаковку щитов возбуждения. Нормативный срок от момента заключения контракта до отгрузки системы возбуждения составляет 9 мес. Однако в случае острой необходимости для заказчика, и если возможно применение одного из уже разработанных типов систем, этот срок может быть сокращен до 5 или 6 мес. Например, работы по производству системы возбуждения для Нововоронежской АЭС (с учетом подготовки документации) были начаты в мае 2002 г. В сентябре 2002 г. система возбуждения была отгружена, а в ноябре того же года сдана в промышленную эксплуатацию.

Начиная с 1999 г. системы, выпускаемые ОАО "Электросила", комплектуются микропроцессорными регуляторами возбуждения (APB-M). Промышленному внедрению APB-M предшествовали его испытания на стендах ОАО "Электросила", лаборатории ВЭИ, электродинамической модели МЭИ и его последующая доработка. Важным шагом признания эффективности применения цифровых регуляторов стали их комплексные испытания на физической модели ОАО "НИИПТ" в схеме ОЭС Сибири при оснащении APB-M гидрогенераторов Саяно-Шушенской ГЭС (рис.1). Физическая модель была получена путем эквивалентирования расчетной схемы западной части ОЭС Сибири, содержащей 326 узлов, 450 ветвей, 73 эквивалентных генератора. В качестве базового электрического режима был принят режим зимнего максимума 2000 г. при параллельной работе ОЭС Сибири с энергосистемой Казахстана и ЕЭС России (загрузка Саяно-Шушенской ГЭС 3000 МВт).

Узел Саяно-Шушенской ГЭС был представлен четырьмя генераторами, два из которых моделировали сдвоенный блок, включенный на шины 500 кВ через трансформатор с расщепленной обмоткой, а каждый из двух оставшихся – сдвоенный блок ГЭС. Таким образом, в соответствии с исходными данными базового режима, в котором суммарная загрузка станции была задана равной 3000 МВт, смоделирована одновременная работа трех

из пяти установленных на ГЭС сдвоенных блоков, что явилось достаточным для обеспечения базового режима и позволило реализовать (по перетокам) практически все характерные режимы работы Саяно-Шушенской ГЭС. Все четыре моделировавших работу ГЭС генератора были оснащены промышленными образцами цифровых микропроцессорных регуляторов типа APB-M ОАО "Электросила". Комплексные испытания подтвердили высокую эффективность APB-M как в обеспечении стабилизации маловозмущенного движения, так и в полном использовании потенциальных возможностей силовой части системы возбуждения для достижения максимальных запасов динамической устойчивости при нормативных возмущениях. Испытания показали также высокую стабильность статических и динамических характеристик регуляторов, возможность их простой настройки в широких диапазонах без изменения параметров аппаратуры и реализацию сложных алгоритмов управления. По результатам испытаний Департамент научно-технической политики и развития РАО "ЕЭС России" утвердил разработанные ОАО "НИИПТ" научно-технические рекомендации по использованию APB-M на энергообъектах ЕЭС России при вводе новых генерирующих мощностей и плановой модернизации оборудования.

Достоинства цифрового регулятора и его основные преимущества перед аналоговым [1-3]:

- значительное сокращение количества и номенклатуры комплектующих изделий;
- снижение габаритных размеров аппаратуры;
- упрощение настройки, наладки и обслуживания;
- возможность организации глубокого внутреннего мониторинга;
- высокая точность регулирования и стабильность регулировочных характеристик.

Сейчас мало кого нужно убеждать в достоинствах APB-M, так как в его пользу говорит положительный опыт практической эксплуатации в России и за рубежом, в том числе на таких уникальных электростанциях как Волгодонская АЭС (рис.2), Красноярс-

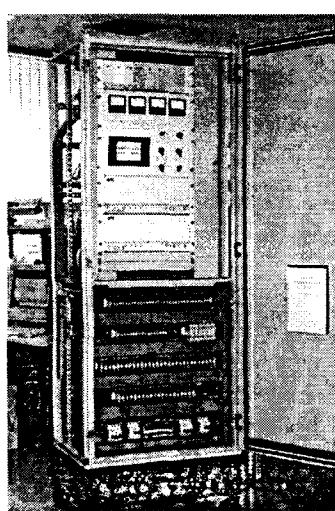


Рис.1. Шкаф APB-M Саяно-Шушенской ГЭС

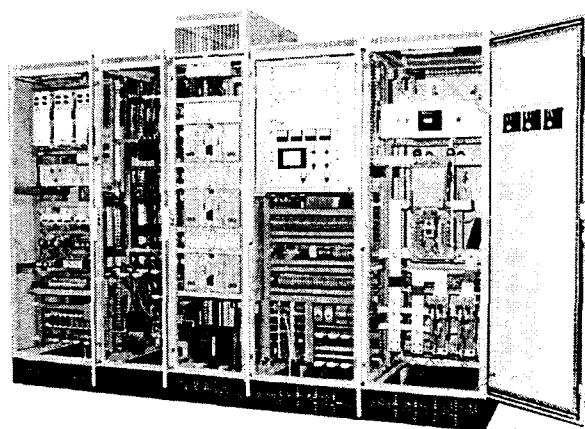


Рис.2. Щит двухканальной бесщеточной системы возбуждения турбогенератора мощностью 1000 МВт Волгодонской АЭС

Таблица 1

Тиристорные системы возбуждения нового поколения с цифровым управлением и регулированием

Станция	Страна	Мощность генератора, Мвт	Тип системы ¹	Количество систем	$U_{ном}$, В	$I_{ном}$, А	Тип охлаждения ²	Год выпуска	Год ввода
Мингечаурская ГЭС	Азербайджан	70,4	СТС	1	320	1400	• • •	2000	2000
Кузнецкая ТЭС	Россия	36	СТС	1	200	1000	• • •	2000	2001
Калирайская ГЭС	Филиппины	18,5	СТС	2	130	850	•	1999	2002
Ботокан ГЭС	Филиппины	10,7	СТС	2	130	850	•	2000	2003
Тюменская ТЭЦ	Россия	160	СТС	1	270	1900	• • •	2000	**
Нижнетагильский МК	Россия	40	СТС	1	210	1100	• • •	2000	2001
Нижнетагильский МК	Россия	40	СТС	1	210	1100	• • •	2000	2002
Мелити-Ахлада ТЭС	Греция	330	СТС	1	550	3200	• •	2000	2002
Сибирский хим. комбинат	Россия	110	СТС	1	210	1600	• • •	2000	**
Волгодонская АЭС	Россия	1000	СБД	1	380*	315*	•	2000	2001
ТЭЦ АО «Уралметром»	Россия	25	СТС	1	200	1000	• • •	2000	2001
Конаковская ГРЭС	Россия	350	СТН	1	550	3000	• • •	2000	2001
Тюменская ТЭЦ	Россия	63	СТСН	1	285	1300	• • •	1999	**
Невинномысская ГРЭС	Россия	110	СТС	1	200	2000	• • •	2000	**
Челябинский МК («Мечел»)	Россия	40	СТС	1	210	1100	• • •	2001	2002
Западно-Сибирская ТЭЦ	Россия	63	СТР	1	300	2000	• • •	2000	2001
Бушер АЭС	Иран	1000	СБД	1	380*	315*	•	2001	**
Юсифия ТЭС, агр. №1	Ирак	220	СТН	1	360	2800	• •	2001	**
Юсифия ТЭС, агр. №2	Ирак	220	СТН	1	360	2800	• •	2002	**
Аль-Адайм ГЭС	Ирак	13,4	СТС	2	210	630	• • •	2001	**
Красноярская ГЭС, агр. №5	Россия	500	СТС	1	675	4400	• • •	2001	2002
Красноярская ГЭС, агр. №6	Россия	500	СТС	1	675	4400	• • •	2002	**
Саяно-Шушенская ГЭС, агр. №5	Россия	640	ШРВ-М	1	530	3500	•	2002	2002
Саяно-Шушенская ГЭС, агр. №9	Россия	640	ШРВ-М	1	530	3500	•	2002	2003
Тяньванская АЭС, агр. №1	Китай	1000	СБД	1	380*	315*	•	2002	**
Тяньванская АЭС, агр. №2	Китай	1000	СБД	1	380*	315*	•	2002	**
Вологодзэнерго	Россия	6	СБД	1	30*	15*	•	2001	**
НПП «Машпроект	Украина	110	СТСН	1	200	2000	• • •	2002	**
Жезказганская ТЭЦ	Казахстан	40	СТС	1	210	1100	• • •	2002	**
Балхашская ТЭЦ	Казахстан	40	СТС	1	210	1100	• • •	2002	**
ТЭС «Харта»	Ирак	200	СТС	2	500	3500	• • •	2002	**
ГЭС «Капанда»	Ангола	130	СТС	2	300	1500	• • •	2002	**
Волжская ГЭС	Россия	115	СТС	1	420	2100	•	2002	**
Бурейская ГЭС	Россия	335	СТС	1	425	2100	• • •	2002	**
Калининская АЭС	Россия	1000	СБД	1	430	7800	•	2002	**
Нововоронежская АЭС	Россия	220	СТС	1	360	3000	• • •	2002	2002
Кармановская ГРЭС	Россия	350	СТС	1	550	3200	• •	2002	**
МК «Запорожсталь»	Украина	36	СТС	1	200	1000	• • •	2002	**

¹ СТС – тиристорная система самовозбуждения; СТН – тиристорная система независимого возбуждения; СТСН – тиристорная система возбуждения, получающая питание от источника собственных нужд электростанции; СТР – тиристорная резервная система возбуждения; СБД – бесщеточная диодная система возбуждения; ШРВ-М – шкаф регулятора возбуждения типа АРВ-М.

² • – естественное воздушное охлаждение; • • – охлаждение дистиллированной водой; • • • – принудительное воздушное охлаждение.

* – параметры возбуждения возбудителя.

** – ввод в эксплуатацию согласно планам заказчика.

кая (рис.3) и Саяно-Шушенская ГЭС. Вместе с тем, не все преимущества АРВ-М известны широко. Пожалуй некоторые из них. Прежде всего следует отметить, что название "регулятор возбуждения" лишь отчасти отражает те функции, которые выполняет это устройство. Помимо собственно регулирования АРВ-М решает следующие задачи.

1. Импульсно-фазовое управление. Если раньше система импульсно-фазового управления (СИФУ) представляла собой целый комплекс оборудования, то теперь это легко настраиваемая составная часть программного обеспечения регулятора. Программно реализованная СИФУ генерирует импульсы управления тиристорами требуемой фазы и длительности.

Это безусловно важное преимущество АРВ-М иногда может оказаться нежелательным. Речь идет о частичной реконструкции систем возбуждения, такой, при которой заказчик желает заменить только регулятор возбуждения, не меняя по тем или иным соображениям СИФУ тиристорами. Однако гибкость АРВ-М позволяет легко решить и эту задачу. В данном случае цель достигается путем установки в каскаде регулятора модуля аналогового вывода с гальванической развязкой. При этом АРВ становится полностью совместимым с широко применяемыми на электростанциях аналоговыми СИФУ тиристорами, в частности, с системами типа СУТ-В4. Так выполнена реконструкция регулятора возбуждения агрега-

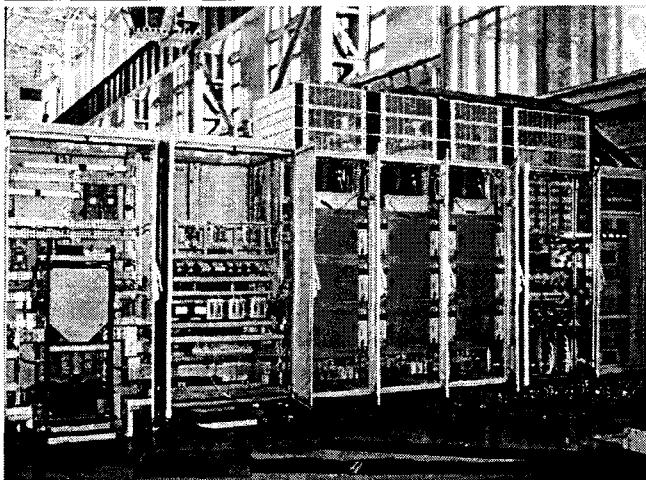


Рис.3. Щит системы самовозбуждения агрегата №5 Красноярской ГЭС

та №5 Саяно-Шушенской ГЭС в мае 2002 г. Благодаря гибкости программно-аппаратных средств микропроцессорного регулятора удалось повысить эффективность реконструкции уже в декабре 2002 г. при поставке второго АРВ-М, предназначенного для агрегата №9 Саяно-Шушенской ГЭС. АРВ-М был оснащен устройством передачи импульсов управления рабочей и форсировочной групп по оптоволоконному кабелю, что позволило исключить из состава систем СУТ-В4 в общей сложности четыре блока управления.

2. **"Интеллектуальный" контроль датчиков режимных параметров.** Быстрая цифровая обработка аналоговой информации, применяемая в АРВ-М, позволяет эффективно и достоверно контролировать исправность датчиков режимных параметров в темпе переходных процессов на основе анализа усредненных значений сигналов, их мгновенных значений и формы. Автоматический мониторинг такого рода не только повышает надежность регулятора, но положительно влияет на работу блока в целом. Теперь благодаря ему практически исключается неуправляемая форсировка возбуждения, реально обеспечивается безударный переход на резервный канал при любой неисправности датчиков, в том числе и таких трудно выявляемых как обрыв фазы напряжения синхронизации или обрыв фазы цепей измерения напряжения генератора.

3. **Измерение температуры обмотки ротора.** Эта функция регулятора, позволяющая эксплуатационному персоналу станции с приемлемой точностью контролировать текущее значение средней температуры обмотки ротора, практически не востребованная на российских электростанциях, становится едва ли не обязательной при выполнении экспортных заказов.

4. **Контроль вращающегося диодного выпрямителя** бесщеточных систем возбуждения как подпрограмма АРВ-М осуществляется путем логической обработки выходных импульсов индукционных датчиков, установленных на корпусе возбудителя. АРВ-М способен

определять не только количество вышедших из строя диодов, но и их порядковый номер, что важно для эксплуатационного персонала.

В ОАО "Электросила" разработано и поставляется автономное микропроцессорное устройство контроля вращающегося диодного выпрямителя УКВВ-М для встраивания в аппаратуру действующих систем возбуждения. Адаптация устройства к типу контролируемого возбудителя осуществляется при помощи малогабаритного дисплея, встроенного меню и четырех кнопок: "больше", "меньше", "ввод", "отмена". Меню констант защищено паролем доступа. Разработанная и действующая в среде Windows программа – конфигуратор (рис.4) посредством интерфейса RS-232 позволяет производить чтение и запись установок, наблюдать состояние главных переменных, читать дневник событий. Параметры системы и содержание дневника событий могут сохраняться в файле и загружаться из файла, что облегчает подготовку отчетов.

5. **"Мягкий старт"** – это процесс плавного программного возбуждения генератора на ХХ, предотвращающий перенапряжение на выводах генератора. Программа "мягкого старта" завершается автоматической подгонкой напряжения генератора к напряжению сети. В результате ее действия через 5–7 с после подачи команды "Возбуждение" генератор готов к синхронизации.

6. **Регулирование реактивной мощности.** Эта новая функция реализована таким образом, что внешний медленно действующий контур регулирования реактивной мощности, воздействуя на уставку внутреннего быстродействующего контура регулирования напряжения, автоматически поддерживает заданное значение реактивной мощности.

Во время пуско-наладочных работ часто возникает необходимость модификации исходных проектных алгоритмов. Цифровые технологии позволяют оперативно решать такие задачи. Например, поставленная на Западно-Сибирскую ТЭЦ (г. Новокузнецк) тиристорная резервная система возбуждения была легко приспособлена для обслуживания трех генераторов различных мощностей: первоначальная версия программы регулятора была дополнена алгоритмом коррекции базового значения тока возбуждения в функции стационарного номера генератора.

Предлагаемые сегодня системы возбуждения просты в эксплуатации. Вместе с тем, наличие сложных электронных блоков, внутреннее содержание которых представляется "черным ящиком", вызывает понятную настороженность. Осознавая, что внедрение новой техники возбуждения требует переподготовки обслуживающего персонала, ОАО "Электросила" проводит обучение специалистов электротехнических лабораторий и цехов заказчика на заводе или на объектах поставки. Сопровождение систем возбуждения осуществляется специализированным подразделением завода путем пусконаладочных работ, гарантийного и послегарантийного обслуживания.

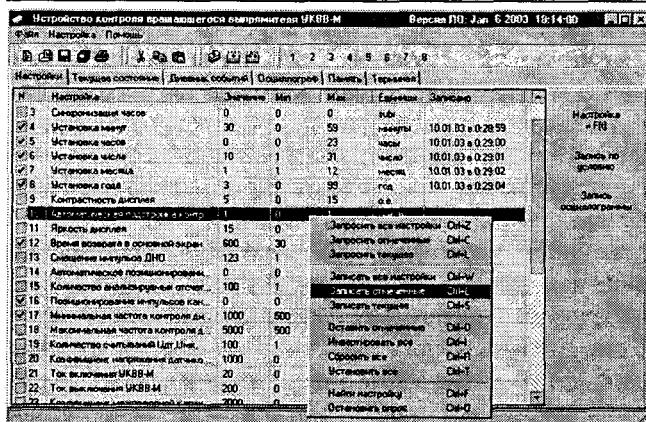


Рис.4. Конфигуратор системы

Комплект запасных частей включает модули всех типов, используемых в системе возбуждения. При этом в запасные программируемые устройства загружены исполнительные программы. В случае неисправности достаточно выявить и заменить вышедший из строя модуль. Развитый внутренний мониторинг оборудования облегчает поиск неисправностей.

Накопленный опыт и новые возможности позволили начать работы по кардинальному повышению номинальной нагрузки единичных тиристорных мостов. Задача ближайшего времени – освоить производство тиристорных мостов с нагрузочной способностью, указанной в табл.2.

Таблица 2

Охлаждение тиристоров	Номинальный ток единичного тиристорного моста, А
Естественное воздушное	1000
Принудительное воздушное	3000
Дистиллированной водой	6000

Эта цель достигается путем:

- применения современных силовых полупроводниковых приборов ведущих мировых производителей, изготовленных на основе 3-5-дюймовых кремниевых пластин последнего поколения;
- использования производимых специализированными фирмами радиаторов для воздушного охлаждения;
- разработки и внедрения собственных эффективных водяных охладителей в связи с отсутствием таковых на рынке готовых изделий;
- оптимизации конструкции силовой ошиновки;
- оптимизации параметров резистивно-емкостных ограничителей перенапряжения;
- разработки и внедрения формирователей выходных импульсов с повышенной скоростью нарастания тока (2-3 А/мкс) на основе MOSFET-транзисторов и разделительных импульсных трансформаторов с малой индуктивностью рассеяния и гальванической развязкой 10 кВ.

В настоящее время ОАО "Электросила" проводит работы в области схемотехники тиристорных преоб-

разователей по следующим направлениям, как наиболее перспективным:

– применение двухканального выпрямителя, каждый из каналов которого состоит из одного тиристорного моста;

– совершенствование способов и устройств быстродействующей защиты одномостовых тиристорных выпрямителей с целью обеспечения условий широкого внедрения преобразователей этого типа в практику возбуждения синхронных генераторов средней мощности;

– применение разъединителей на стороне постоянного и переменного тока каждого из группы параллельно соединенных тиристорных мостов систем возбуждения крупных турбогенераторов;

– отказ от индуктивных делителей тока при параллельном соединении тиристоров.

Благодаря великолепным характеристикам современных микропроцессоров сегодня могут быть легко реализованы алгоритмы, которые раньше не были жизнеспособны из-за чрезмерных аппаратных затрат. Первоочередного внедрения достойны те из них, которые способствуют улучшению массогабаритных и энергетических показателей систем возбуждения, снижению трудоемкости производства и повышению технологичности изготовления. Учитывая рост производительности, быстродействия и объемов памяти микропроцессоров, работы ОАО "Электросила" предполагают следующие цели:

– создание систем регулирования на основе мультипроцессорной сетевой архитектуры;

– создание устройств управления распределением нагрузок синфазно работающих тиристоров;

– внедрение программируемых логических контроллеров, имеющих стандартные протоколы обмена и использующих языки высокого уровня; это существенно облегчает интеграцию оборудования системы возбуждения в общестанционные системы автоматизации;

– внедрение экономичного варианта микропроцессорного устройства регулирования возбуждения с транзисторным широтно-импульсным преобразователем для генераторов малой мощности;

– внедрение в практику возбуждения алгоритмов регулирования, основанных на теории нечеткой логики и робастного управления;

– внедрение унифицированного фирменного программно-аппаратного комплекта электрических защит цепей возбуждения синхронных машин на базе микроконтроллера семейства C167;

– разработка аппаратуры и программного обеспечения удаленного мониторинга систем возбуждения.

В связи с широким внедрением микропроцессорных средств в технику управления электрическими машинами в ОАО "Электросила" в начале 2003 г. организована и оснащена тестовым оборудованием лаборатория электромагнитной совместимости (ЭМС). К сожалению, проблемам ЭМС в российской промышленности до сих пор не уделяется должного

внимания. Решения, реализуемые с целью защиты технических средств от помех, базировались в основном на теоретических представлениях, готовые изделия проверялись лишь частично, при помощи неспециализированного оборудования. Вместе с тем, международное сообщество пришло к пониманию необходимости ужесточить требования ЭМС технических средств еще в 1985–1990 гг. Это вызвано стремлением исключить опасность электромагнитных излучений для жизни и здоровья человека, обеспечить нормальное функционирование в окружающей электромагнитной обстановке не только различных радиоприемных устройств, но и технических средств других видов и назначений [4].

Для насыщенных электроникой современных систем возбуждения, работающих в условиях жестких электромагнитных воздействий, значение мероприятий, направленных на повышение помехоустойчивости, трудно переоценить. Благодаря приобретенному испытательному оборудованию открылась возможность целенаправленно вести работы по повышению помехоустойчивости электронной аппаратуры, производимой в ОАО "Электросила". Комплект тестеров фирмы "Haefely" позволяет исследовать опытные и промышленные образцы систем и их компонентов на устойчивость к электростатическим разрядам, наносекундным импульсным помехам, микросекундным импульсным помехам большой энергии, динамическим изменениям напряжения электропитания

ния, колебательным затухающим помехам, магнитному полю промышленной частоты, импульсному магнитному полю и другим воздействиям.

За последние несколько лет изготовлены и запущены в промышленную эксплуатацию десятки систем возбуждения нового поколения. Успешный опыт эксплуатации доказывает их высокую надежность и способность удовлетворять самые различные требования заказчика.

Принимая во внимание накопленный опыт разработки, производства и эксплуатации систем возбуждения, а также ожидаемое увеличение количества заказов, связанное с износом эксплуатируемого в настоящее время оборудования, ОАО "Электросила" наметила ряд мер по дальнейшему повышению надежности, улучшению качества, потребительских свойств и унификации оборудования систем возбуждения.

Список литературы

1. Кириенко Б.Г., Логинов А.Г., Фадеев А.В. Новое поколение статических систем возбуждения турбо- и гидрогенераторов//Электросила. СПб, 2000. № 39. С. 43–54.
2. Логинов А.Г., Фадеев А.В. Расширение производства и опыт внедрения статических систем возбуждения нового поколения ОАО "Электросила" // Электросила. СПб, 2001. № 40. С. 42–53.
3. Логинов А.Г., Фадеев А.В. Микропроцессорный регулятор типа АРВ-М для систем возбуждения ОАО "Электросила" // Электротехника. 2001. № 9. С. 66–70.
4. Кармашев В.С. Электромагнитная совместимость технических средств. Справочник. М., 2001.

ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЯ

Высокоэффективные технологии в ОАО "Электросила"

ПИНЧУК Н.Д., РЫБАКОВ В.Л., АНТОНЮК О.В.

Представлены наиболее эффективные и перспективные технологии и оборудование, внедренные в ОАО "Электросила" за последние годы. Приведены основные технические характеристики и показаны преимущества установок гидроабразивного и лазерного раскряя листовых материалов. Обсуждаются новые направления в технологии изготовления изоляции электрических машин с применением лентоизолировочного станка с ЧПУ и последующей вакуумно-нагнетательной пропиткой обмоток.

ОАО "Электросила" осуществляет разработку, поставку и комплексное сервисное обслуживание оборудования для электроэнергетики, транспорта, машиностроения, судостроения, металлургии, химии и нефтехимии, горнодобывающей и обрабатывающей промышленности и других отраслей.

The most efficient and promising technologies and the equipment implemented in JSC Electrosila in recent years are represented in the paper. The basic technical characteristics are given and the advantages of installations of water-jet and laser cutting-out of sheet materials are shown. The new trends in the technology of manufacturing the electrical machines insulation with the use of CNC tape insulating machine and subsequent vacuum-pressure impregnation of windings are discussed.

Производственная программа предприятия в настоящее время включает генераторы к газовым турбинам мощностью от 0,5 до 200 МВт, генераторы к паровым турбинам мощностью от 0,5 до 1300 МВт, генераторы к гидравлическим турбинам мощностью от 4 до 640 МВт, генераторы к дизель-электрическим

установкам мощностью от 0,1 до 10 МВт, крупные электрические машины постоянного и переменного тока, комплектный тяговый электропривод для вагонов метро, трамваев, электропоездов, системы возбуждения, контроля и диагностики электрических машин, низковольтную аппаратуру.

В области сервиса ОАО "Электросила" проводит шеф-монтажные и пусконаладочные работы, осуществляет сервисное обслуживание, модернизацию и ремонт, поставку запасных частей, экспертизу технического состояния турбо- и гидрогенераторов и систем возбуждения к ним, крупных электрических машин, тягового электропривода и другого оборудования, а также проводит технические консультации и обучение персонала клиентов.

Продукция "Электросилы" известна в 87 странах Западной и Восточной Европы, на Ближнем Востоке и в государствах Юго-Восточной Азии, в Южной и Северной Америке и Африке.

Для укрепления конкурентных позиций на рынке электротехнического оборудования ОАО "Электросила" непрерывно расширяет ассортимент своей продукции и улучшает ее качество при сокращении сроков выполнения заказов. Для поддержания необходимого уровня культуры производства предприятие непрерывно обновляет и модернизирует парк технологического и производственного оборудования.

Ниже описаны наиболее перспективные технологии, внедренные предприятием за последнее время.

Оборудование для изготовления металлоконструкций

В марте 2000 г. в ОАО "Электросила" было扑щено в эксплуатацию современное, высокопроизводительное оборудование для оптимального раскюра и высокоточной, до $\pm 0,1$ мм/м, вырезки сложных по конфигурации деталей из листовых материалов – это лазерная установка "BYSTAR 3015" и установка гидроабразивной резки "BYJET 3015" швейцарской фирмы "BYSTRONIK".

Оборудование, использующее для резки энергию лазерного излучения, состоит из двух центров, объединенных между собой системой автоматизированной загрузки и разгрузки BYTRANS. Рабочая поверхность стола – 3000×1500 мм. Обрабатываемый материал – сталь, в том числе нержавеющая и электротехническая, титан и другие цветные металлы толщиной до 12–15 мм, за исключением медных сплавов, резка которых требует поглотителя отраженного излучения.

Резка производится режущей головкой, соединенной оптической системой с лазерным резонатором мощностью 1800 Вт. Для обеспечения стабильной работы лазерного резонатора требуются газы: гелий – 27 л/ч; азот – 12 л/ч; углекислота – 2 л/ч.

Используемые технологические газы – азот и кислород. Давление технологических газов на выходе из сопла составляет от 0,1 до 20 бар. Ширина получаемого реза 0,1–0,2 мм. Скорость резания зависит от материала, его толщины и колеблется от 800 до 12000

мм/мин. Управление процессом резания осуществляется с помощью компьютерной программы и позволяет не только свести до минимума отходы производства за счет оптимизации раскюра, но и открывает широкие возможности по проектированию новых конструкций за счет снятия технологических ограничений металлорежущего станочного оборудования.

Высокие точностные характеристики лазерного комплекса и возможность выбора оптимального раскюра позволили перевести на него изготовление деталей, ранее производившиеся на газорезательных машинах с последующей механической обработкой на фрезерном, сверлильном и другом оборудовании, а также штамповкой с последующей операцией снятия заусенцев. Это существенно сократило время изготовления деталей, высвободило большое количество прессового, фрезерного и прочего станочного оборудования, позволило уменьшить, а в ряде случаев полностью отказаться от изготовления сложных и дорогостоящих штампов и оснастки.

Так, до внедрения лазерной установки время изготовления сегмента обода ротора гидрогенератора на прессе усилием 1600 т в среднем составляло 6–7 мес, из которых проектирование и изготовление штампа 4–5 мес, штамповка сегментов – 1–1,5 мес.

После внедрения лазерной резки цикл изготовления составил 2–2,5 мес, причем разработка управляющей программы занимает всего несколько часов. Такая высокая мобильность и гибкость в изготовлении деталей особенно важна в современных условиях, когда выполнение заказа в срок требует сокращения до минимума времени на разработку конструкторской документации и технологическую подготовку производства.

Получен значительный эффект в экономии материала за счет уменьшения расстояния между деталями при раскюре, уменьшения или полной ликвидации припусков под дальнейшую механическую обработку. Отказ в ряде случаев или уменьшение механической обработки деталей после вырезки снизило общую трудоемкость изготовления изделий.

При большой номенклатуре изделий, постоянной разработке все новых и совершенствовании старых конструкций немаловажную роль играет возможность отказа от проектирования и изготовления штамповой оснастки при проведении экспериментальных работ или производстве 1–2 машин определенной конструкции, когда изготовление оснастки, требующее больших материальных и трудовых затрат, нецелесообразно.

В настоящее время в эксплуатации находится еще одна, высокопроизводительная, со скоростью холостых перемещений до 150 м/мин, лазерная установка "BYSPRINT 3015" той же фирмы, встроенная в технологическую линию изготовления профильных заготовок из тонколистовых материалов методом гибки.

Кроме установки лазерной резки для изготовления профильных заготовок и металлоконструкций используется листоправильная машина модели TRM-

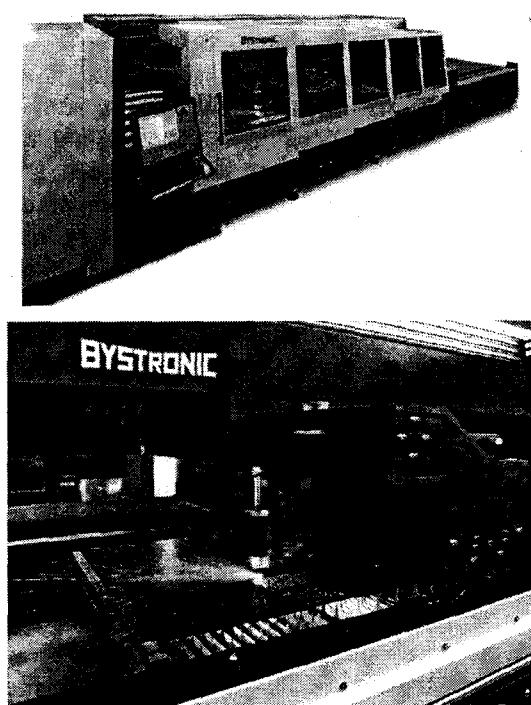


Рис.1. Установка лазерной резки фирмы "BYSTRONIC"

50-1600 и листогибочный пресс модели ВМ-200-3100 швейцарской фирмы "HAMMERLE" (рис.2).

Внутренние напряжения и температурные деформации в материале заготовок, полученных на установках лазерной резки, оказывают существенное влияние на точность гибки, технологичность сборки и внешний вид изделий. Листоправильная машина устраняет деформации и снижает внутренние напряжения в заготовках.

19 рабочих, упрочненных до 63-65 HRC на глубину 2 мм, и 270 поддерживающих валков машины позволяют обрабатывать детали толщиной от 0,5 до 12 мм, шириной до 1600 мм и длиной от 3000 до 100 мм. Точность гибки деталей, прошедших обработку на листоправильной машине повышается в 2 раза.

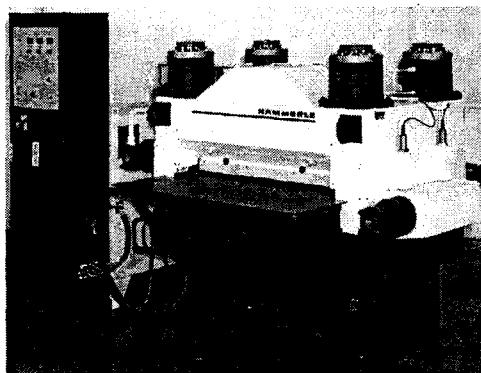


Рис.2. Листоправильная машина серии TRM фирмы "HAMMERLE"

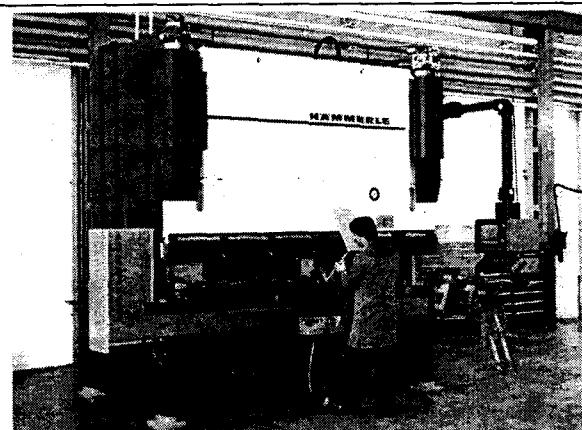


Рис.3. Листогибочный пресс модели ВМ-200-3100 фирмы "HAMMERLE"

В листогибочном прессе модели ВМ-200-3100 (рис.3) используется метод гибки "по трем точкам". В отличие от традиционной, гибка по трем точкам обладает следующими преимуществами:

- уменьшается погрешность гибки, вызванная неоднородностью толщины материала;
- повышается повторяемость результатов гибки;
- снижается количество оснастки за счет применения матриц с регулируемой глубиной.

Применение в прессе гидроподушки, встроенной в ползун, позволяет выравнивать усилие по длине сгиба и компенсировать деформацию элементов машины. Пресс позволяет гнуть заготовки размером до 3100 мм и толщиной до 16 мм с точностью $\pm 30'$ (без применения листоправильной машины).

Таким образом, применение комплекса оборудования, состоящего из установки лазерной резки, листоправильной машины и листогибочного пресса, позволяет изготавливать элементы металлоконструкций любой сложности с высокой точностью. При сборке металлоконструкций объем сварочных работ, вызывающих температурные деформации, значительно снижается и почти полностью заменяется сборкой с использованием крепежа.

Другим оборудованием, отвечающим тем же технологическим требованиям, но с более широкими возможностями в части номенклатуры и толщины обрабатываемых материалов является установка гидроабразивной резки. Она имеет стол для размещения заготовок площадью 3000×1500 мм, грузоподъемность 1000 кг и портал с режущей головкой.

Установка предназначена для высокоточного, $\pm 0,1$ мм/м, раскроя деталей различной конфигурации, практически из любого листового материала (сталей, титана, других цветных металлов и их сплавов, стеклопластиков, углепластиков, пластмасс, камня, стекла, а также мягких материалов, таких как пенопласт, поролон, кожа и т.д.) толщиной до 60 мм для металлов и до 100 мм для стеклопластиков и др. Резка осуществляется водяной струей под давлением до 3800 атм, проходящей через сапфирное сопло с отверстиями диаметром 0,25-0,50 мм.

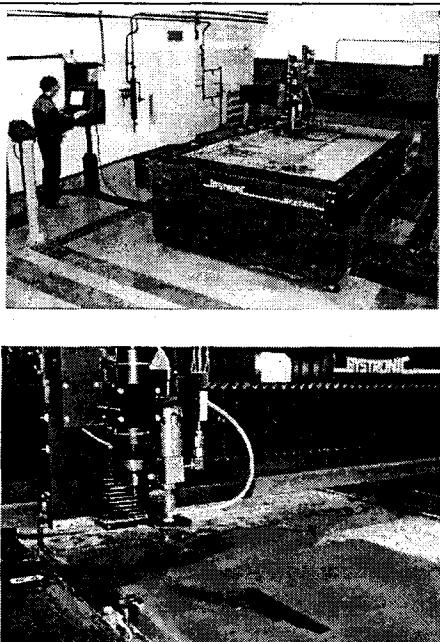


Рис.4. Установка гидроабразивной резки фирмы "BYSTRONIC"

ем $\varnothing 0,2$ мм. В смесительной камере происходит давление абразивного материала "Garnet 80 Mesch", затем гидроабразивная струя выходит через фокусирующую трубку с отверстием $\varnothing 0,7$ мм в зону резки. Получаемая ширина реза составляет 0,8–1,0 мм. При этом полностью исключается термическое влияние на материал в зоне реза. Скорость резания колеблется от 20 до 4000 мм/мин, в зависимости от толщины и твердости материала. Расход абразива составляет от 0 г/мин (для материала типа пенопласта) и до 470 г/мин (для особо твердых материалов), в зависимости от толщины материала и давления воды. Для резки стеклотекстолита и стали расход в среднем 350–400 г/мин.

Абразивный материал, используемый в установке, является природным продуктом, химически инертным и свободным от токсичных металлов, благодаря чему обеспечиваются безопасные условия эксплуатации и защита окружающей среды, а также максимально низкие затраты на утилизацию отходов. Абразив представляет собой гранатовый песок (размер зерна 0,15–0,35 мм) с высокой степенью очистки, который является одним из самых твердых из известных минералов. Его производитель фирма "GMA Garnet" (Австралия). В настоящее время ведутся поиски отечественных производителей аналогичного абразива. Установка в основном используется для обработки изоляционных материалов, в частности стеклотекстолита, и позволяет освободиться от опасной для здоровья сухой пыли, появляющейся в результате механической обработки.

Характерные особенности установки:

- возможность выполнения любых сложных контуров;

- обработка деталей без их механического нагружения и нагрева, что обеспечивает отсутствие изменений структуры материала в зоне реза, отсутствие деформаций, изменений химического состава и свойств;

- выбор оптимального раскroя листа.

Основные составляющие эффекта от внедрения установки:

- уменьшение сроков подготовки производства (уменьшение объемов оснастки);

- сокращение количества операций при обработке различных деталей – от одной операции до трех-четырех (за счет вырезки по контуру и ликвидации вследствие этого части токарной, токарно-карусельной, фрезерной и сверлильной операций);

- высвобождение 9 единиц оборудования;

- сокращение времени обработки деталей – от 20 до 70%;

- многократное сокращение времени обработки деталей при вырезке их "пакетом";

- увеличение коэффициента использования листовых материалов (стеклопластиков) до 0,68 вместо 0,56 за счет сокращения расстояния между деталями, применения совмещенного реза и за счет оптимального размещения деталей на листе; экономия материала в среднем составляет 12%.

Только за счет этого фактора объем потребления стеклотекстолита в 2001 г. снизился на 15 т, при среднем потреблении 120–150 т/год, что составило экономию 3 млн. руб.

Трудоемкость изготовления деталей на гидроабразивной установке в среднем в 2–3 раза ниже, чем при традиционной механической обработке. Можно привести пример обработки деталей из титанового листа. Лишь для одной электрической машины разница в трудоемкости изготовления этих деталей составила 260 н/ч, что дало экономию 14,5 тыс. руб. Расход листового титана при использовании традиционных технологий составил бы 21000 кг, а при использовании технологии гидроабразивной резки потребовалось 19500 кг, что дало экономию 1500 кг или 540000 руб.

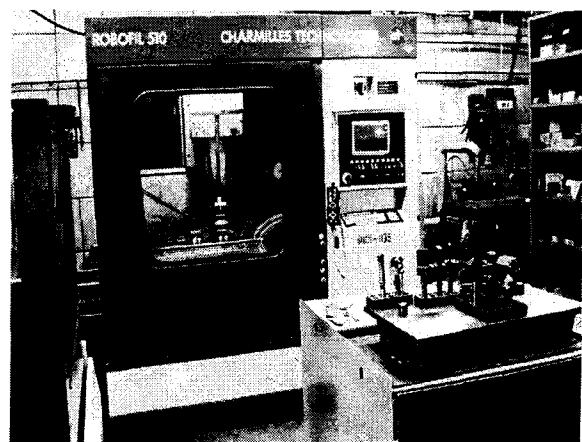


Рис.5. Вырезной электроэрозионный станок ROBOFIL 5310C с набором инструментов

В I квартале 2003 г. в ОАО "Электросила" введена в эксплуатацию еще одна уникальная установка гидроабразивной резки "WJ 11016/100x2/4Z" фирмы "WaterJet" (Италия) с рабочей поверхностью стола 11000×2000 мм. Уникальность установки заключается в том, что на ней установлены сразу 4 режущие головки, работающие как синхронно, так и по отдельности и имеющие возможность резать под углом $\pm 45^\circ$.

Эта установка предназначена для изготовления роторных обмоток турбогенераторов (мощностью до 1500 МВт) из медных полосовых заготовок, а также деталей из листов 3000×2000 мм.

Технология и оборудование для электроэррозионной резки

В связи с постоянным ростом требований к повышению качества технологического оснащения, особенно к формообразующей оснастке (штампам и прессформам), ОАО "Электросила" стремится к использованию наиболее передовых технологий в этой области. В комплексе технологического оснащения получил развитие участок электроэррозионной обработки. В настоящее время этот участок оснащен вырезными проволочными электроэррозионными станками (AGIGUT-300D и ROBOFIL-510R), обеспечивающими вырезку деталей из любых токопроводящих материалов независимо от их твердости, включая твердые сплавы, с особо высокой точностью ($\pm 0,003$ мм). При габаритах заготовок до 1200×700×400 мм станки позволяют производить вырезку деталей под большим углом реза (30° и выше), обеспечивают высокую чистоту обработанных поверхностей. Числовое программное управление данных станков позволяет вырезать детали самого сложного профиля.

Преимуществом перед традиционной технологией является значительное снижение трудоемкости фрезерных, шлифовальных, координатно-расточных и слесарных работ, значительное повышение точности изготавливаемых деталей, что в большой степени увеличивает качество и ресурс работы технологической оснастки. Данная технология позволяет из

одной заготовки вырезать одновременно пuhanсон и матрицу, а также съемник и выталкиватель штампа, что невыполнимо по традиционной технологии. Кроме того, имеется возможность изготовления специального режущего инструмента из твердых сплавов.

Кроме этих станков, участок электроэррозионной обработки оснащен прошивными электроэррозионными станками AGITRON-200C и ROBOFORM-31, дающими возможность выжигать самые сложные поверхности в любых токопроводящих материалах, независимо от их твердости. Данные станки позволяют производить чистовую обработку пuhanсонов и матриц прессформ. Кроме того, станки рассчитаны на круглосуточную работу даже без присутствия оператора.

Применение новых технологий значительно сокращает сроки изготовления технологической оснастки при значительном повышении качества и ресурса работы.

Штампы и другие изделия, изготавливаемые на установках электроэррозионной резки, пользуются высоким спросом среди отечественных и зарубежных заказчиков в ОАО "Электросила". Это позволяет эффективно использовать высокотехнологичное оборудование не только для собственных целей, но и реализовывать произведенную на нем продукцию в качестве готового товара на рынке.

Новые направления в развитии систем изоляции и технологии изготовления турбо- и гидрогенераторов, крупных машин постоянного и переменного тока, тяговых электродвигателей

В последние годы в связи с повышением конкуренции на мировом рынке, реконструкцией существующих и введением в эксплуатацию некоторых новых гидро- и теплоэлектростанций особые требования предъявляются к надёжности и долговечности электрических машин. Сокращение сроков изготовления машин при сохранении их высокого качества возможно только на основе внедрения новых материалов и технологий. Одним из важнейших факторов является создание современных систем изоляции и технологий. В этом направлении в ОАО "Электро-

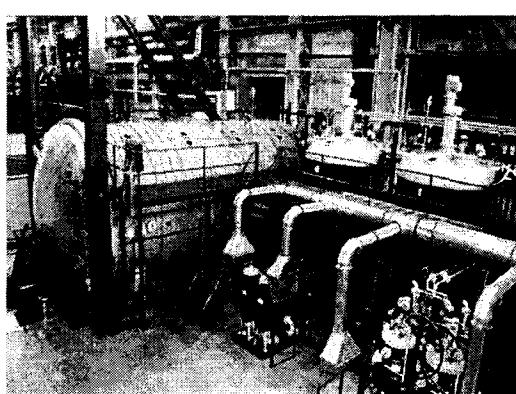


Рис.6. Установка вакуумно-нагнетательной пропитки фирмы "Isola Meier"

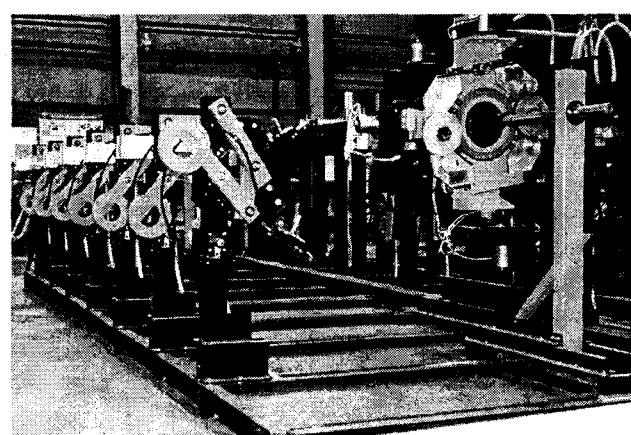


Рис.7. Лентоизолировочный станок фирмы "Модестат"

сила" в последнее время достигнуты значительные успехи. Так, введена установка фирмы "Isola Meier" (Германия) для проведения вакуумно-нагнетательной пропитки обмоток электрических машин. В короткие сроки установка была введена в эксплуатацию и на ней проведена пропитка статоров турбогенераторов мощностью 110 и 160 МВт, крупных машин переменного тока напряжением 6–10 кВ, полюсов гидрогенераторов.

С введением новой технологии за счёт отмены целого ряда операций по изготовлению обмоток были в кратчайшие сроки изготовлены турбогенераторы для Северо-Западной ТЭЦ, а также ряд мощных электродвигателей. При этом значительно повышается качество изделий, например роторов гидрогенераторов, полюса которых ранее не пропитывались. Статорные обмотки гидрогенераторов: Бурейской ГЭС, ряда электростанций Швеции, Финляндии, Вьетнама также изготавливаются с применением новых изоляционных материалов. За счёт применения новых предварительно пропитанных лент удается обеспечивать самые жёсткие требования заказчика по нагревостойкости изоляции, уровню электрических и механических характеристик. Качество изоляции во многом определяется технологическим оборудованием, которое используется при изготовлении обмоток электрических машин. В этом направлении также наметился определённый прорыв. Впервые в России Санкт-Петербургской фирмой "Модестат" спроектирован и изготовлен лентоизолировочный станок для изготовления стержневых обмоток турбо- и гидрогенераторов, не уступающий по своим характеристикам лучшим зарубежным образцам. С применением станка изготовлен целый ряд стержней, которые после укладки обмоток и вакуумно-нагнетательной пропитки статоров подтвердили высокое качество изготавливаемых изделий.

Значительные успехи достигнуты в ОАО "Электросила" в освоении тяговых электрических машин. За 3–4 года, в течение которых в ОАО "Электросила" ведётся производство тяговых двигателей, изготовлены сотни электродвигателей для электричек и метро, выполнены образцы новых электродвигателей

Высокочастотные электротехнологии

трамваев, троллейбусов, метро, большегрузных самосвалов. При изготовлении указанных машин применены современные обмоточные провода, изоляционные материалы и пропитывающие составы, не содержащие растворитель. Практически все тяговые двигатели и большинство других машин постоянного и переменного тока изготавливаются с применением технологии вакуумно-нагнетательной пропитки и оборудования фирм "Микафил" (Швейцария), "Миллиторр" (Англия), что позволяет повысить качество изоляции при улучшении экологических условий производства.

В перспективе полный переход на пропитку машин составами без растворителя. Для этого ведётся разработка новых современных пропитывающих составов.

Разрабатываются также и новые системы изоляции, что позволит повысить нагревостойкость, электрические характеристики и надежность электрических машин. В сочетании с внедрением нового технологического оборудования это обеспечивает решение самых перспективных задач по обеспечению энергетики, электротранспорта и других отраслей промышленности высоконадёжными электрическими машинами.

В 2002 г. были приобретены установки MINAK-20 и MINAK-15, что позволяет внедрить технологию индукционного нагрева деталей и пайки проводников токами ВЧ. В целом внедрение технологии высокочастотного нагрева повышает производительность в 1,5 раза, а при рациональном использовании оборудования сокращает производственный цикл работ по пайке в 2,2 раза. Внедрение данного оборудования повышает качество паяных соединений, поскольку облегчается нагрев рабочей зоны при высокой стабильности процесса. За счёт использования косвенного нагрева (без открытого пламени или раскаленных угольных пластин) улучшаются экологические условия производственного процесса.

Внедрение в ОАО "Электросила" прогрессивных высокоеффективных технологических процессов и оборудования направлено на обеспечение высокого технического уровня, качества и надежности выпускаемой продукции, сокращение технологического цикла и увеличение объемов производства.

Высокочастотные электротехнологии

БЕЗМЕНОВ Ф.В., ИВАНОВ В.Н.

Приведены наиболее интересные разработки ВНИИТВЧ в области создания технологических процессов и оборудования связанных с высокочастотным нагревом металлов проводников, полупроводников, ионизированных газов и диэлектриков.

В настоящее время невозможно представить промышленность без высокочастотных электротехнологий – технологических процессов, использующих особенности распространения переменного электромаг-

Presents the most interesting developments of VNIITVCh in the area of production processes and equipment involving high-frequency heating of metals, conductors, semiconductors, ionized gases and dielectrics.

нитного поля в различных средах. Во всех отраслях, где внедрены эти процессы, получены повышение качества продукции, улучшение условий труда, экономия материальных, трудовых и энергетических ресурс-

сов. В ряде случаев высокочастотные электротехнологии не имеют альтернативы. Наша страна по праву считается родиной промышленного применения токов высокой частоты, а Всероссийский научно-исследовательский институт им. В.П. Вологдина (ВНИИТВЧ) вот уже более 55 лет является научным центром высокочастотных электротехнологий.

Основатель и первый директор ВНИИТВЧ В.П. Вологдин (1881–1953), начиная с 1907 г. занимался созданием машинных преобразователей частоты для питания радиостанций флота России. Используя эти преобразователи на частотах от 1 до 10 кГц, В.П. Вологдин уже в 1918 г. провел первые опыты по индукционному нагреву металлов, а в 1935 г. – по поверхностной индукционной закалке машиностроительных деталей [1]. Во время Великой Отечественной войны лаборатория В.П. Вологдина в эвакуации в г. Челябинске отработала и внедрила поверхностную закалку деталей танков КВ и Т-34, грузовых автомобилей и других машин и механизмов. Преимущества индукционного нагрева были очевидны: выделение мощности непосредственно в нагреваемой детали, высокая скорость нагрева, возможность обеспечивать как равномерный нагрев, так и поверхностный в тонком слое. При этом оборудование для индукционного нагрева компактно и экологически чисто. Учитывая перспективность нового способа нагрева при создании различных электротехнологий, 1 апреля 1947 г. правительственным постановлением был создан Научно-исследовательский институт промышленного применения токов высокой частоты (НИИТВЧ).

В короткие сроки с использованием задела лаборатории В.П. Вологдина выявлены особенности протекания тока высокой частоты по металлическим изделиям, изучены законы и явления, которые необходимо учитывать – закон индукции, поверхностный эффект, явление близости и кольцевой эффект. Для любого технологического процесса основная задача индукционного нагрева – получение заданного температурного поля в металлическом изделии.

На первом этапе работ для получения заданных температурных параметров создавалось макетное оборудование, и на нем проводили отработку индукционных систем и режимов нагрева. Такая постановка работы требовала больших затрат времени и средств, которые росли по мере увеличения мощности оборудования. Поэтому математическому моделированию уделялось особое внимание. Уже к 1950 г. с использованием аналитических методов для решения в основном одномерных электротепловых задач были разработаны методики расчетов индукционных нагревателей, что обеспечило широкое внедрение индукционного нагрева в промышленность [2]. С момента организации института начались работы по нагреву диэлектрических материалов, а начиная с 1957 г. – по использованию плазмы.

За прошедшие 55 лет коллективом ВНИИТВЧ проделана огромная работа. Создана и непрерывно совершенствуется теория индукционного нагрева металлов, полупроводников, ионизированных газов, диэлектрического нагрева непроводящих материа-

лов. Совместно с различными отраслями промышленности созданы и производятся комплектующие изделия и электротехнические материалы, работающие в высокочастотных полях в качестве проводников, электро- и теплоизолирующих материалов, магнитопроводов. Созданы и выпускаются источники питания мощностью от нескольких ватт до 1600 кВт частотой от 500 Гц до 2450 МГц. Созданы различные технологические процессы и оборудование для их реализации.

Термообработка машиностроительных деталей. Принципиальная схема высокочастотной индукционной поверхностной закалки, самого распространенного вида термообработки, приведена на рис.1.

Свойства металла на поверхности детали определяются физическими и металлургическими процессами, которые в нем происходят. Поэтому во ВНИИТВЧ проведены тщательные исследования электромагнитных, тепловых процессов, структурных превращений, которые происходят на этапе нагрева и охлаждения. Проанализировано влияние параметров закалки (частоты закалочного тока, времени и температуры нагрева, скорости охлаждения) и исходного материала (состава и исходной структуры).

Определен состав углеродистых и малолегированных сталей, которые рекомендуются для изготовления закаливаемых деталей. Разработаны марки сталей с пониженной и регламентированной прокаливаемостью [3,4]. Установлена возможность закалки деталей из серого и ковкого чугуна с перлитной или перлитоферритной основой, меди, алюминия, титана и их сплавов. Определен диапазон частот (от 250 Гц до 1760 кГц) и удельных мощностей (от 1 до 1,5 кВт/см²), созданы электромагнитные системы и станки для закалки самых разных деталей. Разработаны специальные малогабаритные закалочные трансформаторы на частоты 1–10 кГц, позволяющие к индуктору с напряжением 25–150 В передать мощность от 500 до 4000 кВ·А от источника питания с напряжением 800 В.

Исследованы особенности использования различных охлаждающих жидкостей (воды, подогретой воды, водовоздушных смесей, масла и т.п.) для охлаждения закаливаемых деталей. Исследованы также варианты охлаждения с помощью душевых устройств и погружения [3,5]. В 1953 г. предложен и отработан способ закалки автомобильных шестерен с модулем $m = 4\div 6$ мм при нагреве токами двух частот.

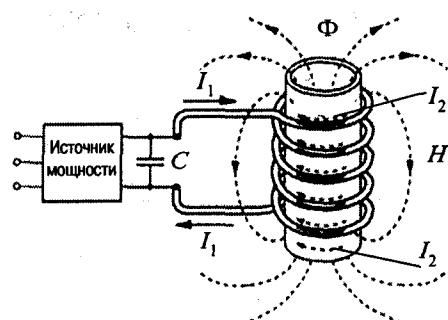


Рис.1. Схема взаимодействия переменного электромагнитного поля с нагреваемой заготовкой

Более 40 лет велась работа по созданию технологии и оборудования для закалки головки рельсов, в которой участвовали десятки организаций. Эта работа завершилась в 70-х годах созданием и внедрением на заводе "Азовсталь" агрегата производительностью 700 тыс. т рельсов в год. Разработанный процесс закалки обеспечивает повышение работоспособности рельсов в 2–2,5 раза.

Ведутся также работы по изучению влияния скоростного нагрева деталей из различных сталей на структуру и свойство металла. В результате этой работы возможно не только учитывать скорость нагрева при определении температуры закалки, но и создать совершенно новый процесс термообработки тонкостенных изделий, например, труб при скоростном нагреве, который обеспечивает либо повышение (в 2–2,5 раза) вязкости металла при сохранении прочности, либо увеличение прочности при сохранении вязкости.

Создана не имеющая аналогов в мире технология и индукционная система для закалки кулачков распределительных валов, которая состоит из нижней – активной части индуктора, подключенной к источнику питания, и верхней, связанной с нижней через магнитный поток. При использовании такой системы обеспечивается равномерный по периметру кулачка закаленный слой. Создание современных процессов и оборудования для закалки крупномодульных шестерен (более 8–10 мм) оказалось возможным после разработки одно- и двухпетлевого индукторов, которые обеспечивают достаточно хорошее распределение температуры по контуру зуба и впадины.

Прорывом в создании технологии закалки шеек коленчатого вала с выходом на галтель явилось создание немецкой фирмой "АЕГ Элоторм" петлевого индуктора с магнитопроводом. ВНИИТВЧ использовал такой индуктор для создания в 70-е годы трёхпозиционной закалочной установки для автомобильных заводов: КАМАЗ и ЗИЛ.

В настоящее время в России и СНГ работает более 120 тыс. закалочных установок, закаливается более 80% всех подвергаемых упрочнению машиностроительных деталей, термообрабатываются десятки тысяч тонн проката. Среди последних достижений можно выделить комплекс технологических процессов и оборудования для повышения работоспособности элементов и узлов железнодорожного транспорта (термообработка концов рельсов и сварных стыков при соединении рельсов в путь длиной до 900 м, термообработка ободов колесных пар перед обточкой), термообработка колец подшипников и шестерен диаметром до 3 м и т.п.

Высокочастотная сварка, пайка и наплавка металлов. Впервые идея применения токов высокой частоты для сварки металлов была предложена в 1946 г. советскими специалистами во главе с А.В.Улитовским (А.с. №72290). В 50-е годы в Советском Союзе и за рубежом начались интенсивные исследования по созданию технологии и оборудования для высокочастотной сварки труб, а несколько позже спирально-шовных труб, оболочек кабеля и профилей [6].

В короткий промежуток времени ВНИИТВЧ с

участием ИЭС им. Е.О.Патона, ВНИИМетмаш, ЭЗТМ отработал и внедрил на десятках заводов технологический процесс высокочастотной сварки труб диаметром от 10 до 530 мм из малоуглеродистых и низколегированных марок сталей, труб $\varnothing 10\div220\times0,5\div5,5$ мм из алюминия и его сплавов, алюминиевых и стальных оболочек кабелей дальней связи, стальных спирально-шовных труб $\varnothing 150\div1220\times0,8\div4,5$ мм. Несколько позже, в 1960–1968 гг. был отработан процесс высокочастотной сварки таврового соединения и разработаны и внедрены процессы и оборудование для приварки продольных и спиральных ребер к трубам для теплообменных устройств на Таганрогском котельном заводе и ряде других. В 70-е годы на опытном стане ВНИИТВЧ и ВИЛС был отработан процесс ВЧ сварки тонкостенного таврового и двутаврового профиля.

Для обеспечения этого направления во ВНИИТВЧ была разработана теория высокочастотной сварки, созданы оригинальные системы для передачи тока к свариваемым кромкам, источники питания мощностью от 100 до 1000 кВт, частотой 1760, 440 и 220 кГц. Разработана математическая модель процесса, включающая электромагнитную, тепловую и деформационную задачи, которая позволяет определить распределение электромагнитных, тепловых и деформационных полей, наблюдать за формированием сварного соединения по мере деформации нагретого металла и предсказать качество сварного соединения при заданных параметрах. В настоящее время в России, СНГ и 10 странах мира работает свыше 150 агрегатов для высокочастотной сварки труб, оболочек кабеля, профилей, оребрения труб. На ТЭСА в России и странах СНГ производится 50% по массе и 85% по длине всех производимых труб. Созданы и опробованы технология производства металлических оболочек оптического кабеля и технология сварки труб малого диаметра из меди и ее сплавов, а также из нержавеющих сталей. Создана и внедрена технология высокочастотной сварки тонкостенного профиля для изготовления тормозных колодок автомобилей.

Еще на первом этапе развития ВЧ электротехнологий в 1936–1941 гг. были заложены основы применения индукционного нагрева для пайки режущего инструмента и других деталей, создан первый автомат для пайки деталей в вакууме. В настоящее время широко внедрена технология пайки с индукционным нагревом режущего инструмента (резцов, фрез), токоподводов мощных электрогенераторов, трубчатых электронагревателей и многоного другого.

Наплавка тяжело нагруженных изделий твердо-сплавным материалом при индукционном нагреве возникла как альтернатива дорогим и сложным электродуговому и плазменно-порошковому способам упрочнения. В настоящее время созданы и внедрены в 25 пассажирских и 5 локомотивных депо процессы индукционно-металлургического упрочнения различных деталей автосцепных устройств. Ежегодно упрочняется до 35 тыс. автосцепных устройств. Срок службы деталей автосцепных устройств, изношенных и отремонтированных методом наплавки, в 5–10 раз больше, чем новых.

Индукционный нагрев металлов перед обработкой давлением имеет важные преимущества перед печным нагревом и нашел широкое применение. Его главная особенность – высокая скорость нагрева металла до температур пластической деформации – обеспечивает минимальные окалинообразование и обезугоживание поверхностных слоев, а значит повышение качества поковок и проката. Кроме того, индукционный нагрев позволяет механизировать и автоматизировать производство, улучшает условия труда, повышает производительность, экономит производственные площади.

Основная технологическая задача при создании установок для индукционного нагрева – получение заданного температурного поля во всем объеме заготовок к моменту приложения давления. Поэтому развитие индукционного нагрева перед пластической деформацией сопровождается как совершенствованием методов физического моделирования, так и развитием теории индукционного нагрева. На первом этапе использовались аналитические решения электротепловой одномерной задачи [3]. Несколько позже аналитическим методом была решена двумерная электротепловая задача нагрева прямоугольной длинной заготовки в длинном индукторе и весьма тонкой ленты в поперечном магнитном поле. В последние годы численные методы решения электротепловой задачи позволили получать с достаточной точностью электромагнитного и температурного полей в заготовке произвольной геометрии с учетом краевых эффектов. Созданы рациональные конструкции индукторов с качественной и стойкой электрической и тепловой изоляцией. Созданы и внедрены несколько десятков типов установок для нагрева заготовок с различными типами механизмов загрузки, подачи заготовок через индуктор и выгрузки из индуктора. Установки укомплектованы тиристорными преобразователями частоты, КПД которых более 90%.

В 60–70-е годы была отработана по тем временам новая технология так называемого ускоренного (изотермического) нагрева сталей, при котором температура поверхности заготовки быстро доводится до конечного значения, а затем поддерживается неизменной во время прогрева сердцевины. При ускоренном нагреве время сокращается в 2,5 раза. В настоящее время в России, СНГ и других странах с использованием индукционного нагрева работает более 200 кузнечных цехов, более 40 мощных прокатных станов, 60 поточных штамповочных линий. Общая мощность цехов превышает 200 тыс.кВт. Индукционным способом нагревается более 60% всех заготовок перед обработкой давлением.

В последние годы ВНИИТВЧ участвовал в создании автоматов, состоящих из прокатного стана и индукционного нагревателя для производства болтов, гаек, шурупов для железных дорог. Установки оснащаются компьютеризированными системами автоматического управления режимом нагрева, соединенными с системами управления прокатных станов. На мониторе компьютера отражается вся необходимая информация: мнемосхема установки с указанием состояния всех узлов, количества заготовок в ин-

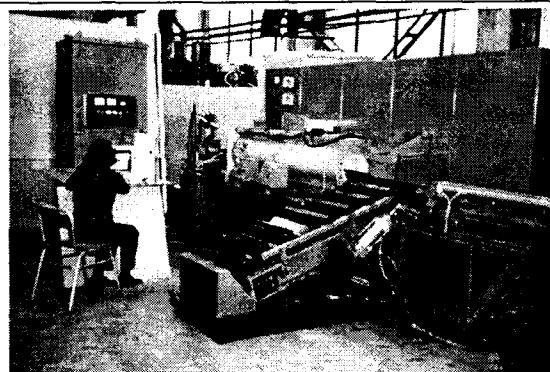


Рис.2. Индукционный нагреватель (320 кВт, 1,0 кГц) с компьютерной системой управления на испытательном стенде ВНИИТВЧ

дукторе, электрические параметры работы установки, кривые изменения температуры заготовки на поверхности, а иногда и по центру. Установка может быть переведена в режим терmostатирования в случае остановки стана (рис.2).

Дизэлектрический нагрев непроводящих материалов (рис.3). Нагреть дизэлектрик внешним источником тепла достаточно трудно из-за низкой теплопроводности. Основное преимущество дизэлектрического нагрева (в переменном электрическом поле) – выделение энергии непосредственно в нагреваемом материале. Первым процессом, который был создан и нашел широкое применение в промышленности в послевоенные годы, был предварительный нагрев термореактивных пластмасс перед прессованием пластмассовых изделий. За время существования института разработано несколько десятков технологических процессов с применением высокочастотного нагрева в электрическом поле. К ним относятся методы предварительного скоростного нагрева термореактивных пластмасс, склейки изделий из древесины. С 1959 г. ведутся работы по использованию нагрева в электрическом поле высокой частоты в процессе изготовления изделий из стеклопластиков.

Разработана также теория нагрева [7] дизэлектрических материалов в высокочастотном электрическом поле, аналитическим методом решена электромагнитная задача, позволяющая определить распределение источников тепла для однородного электрического

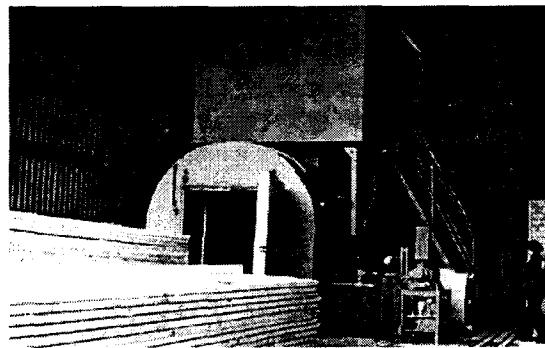


Рис.3. Высокочастотная установка дизэлектрического нагрева для сушки древесины

поля и однородного диэлектрика, определены предельные размеры диэлектрика, при которых нагрев равномерен. Решена также задача для диэлектрика, имеющего форму цилиндра, находящегося в продольном и поперечном высокочастотном электрическом поле. Созданы источники питания мощностью от 500 Вт до 60 кВт частотой от 5,27 до 2450 МГц.

В последние годы в России и СНГ работают созданные ВНИИТВЧ более 100 установок для сушки дорогостоящих особо чистых порошков (лекарственных препаратов, люминофоров), более 2000 установок для нагрева таблеток перед прессованием медицинских и электротехнических изделий, более 20 установок для сушки и вспенивания теплоизоляционных материалов, несколько установок для сушки дресины.

Высокочастотная сварка полимерных материалов. ВНИИТВЧ с 1949 г. ведет работы по применению высокочастотного нагрева при сварке изделий из термопластичных материалов, главным образом из поливинилхлоридного пластика и полиамидов. Для обеспечения этого направления во ВНИИТВЧ была разработана теория высокочастотной сварки диэлектриков, созданы оригинальные системы электродов и прессов, источники питания мощностью от 0,1 до 60 кВт частотой 27 МГц [5].

В настоящее время в России и СНГ работает более 2000 сварочных установок, на которых перерабатывается более 80% всех реактопластов.

Очистка и выращивание особо ценных кристаллов. В 1956 г. во ВНИИТВЧ были начаты работы по созданию технологии и оборудования по получению методом бестигельной зонной плавки монокристаллов кремния для отечественной силовой электротехники и электронной промышленности. Вскоре для бестигельной зонной плавки кремния были созданы установки "Кристалл" серии 100 и 200, оснащенные специализированными высокочастотными источниками питания, точными механизмами, системами автоматического управления процессом. Процессы очистки исходного материала проводились в вакууме до 10^{-5} мм рт. ст., а выращивание монокристаллов – в атмосфере аргона.

За прошедшие годы ВНИИТВЧ была проделана большая работа по исследованию процесса зонной плавки с использованием физического и математического методов моделирования [9]. Рассматривались тепловые условия бестигельной зонной плавки, силовое воздействие электромагнитного поля, оценивалось влияние этих факторов на возможность получения бездислокационного монокристалла. В результате установки этих серий позволили получить отечественный высокомониторный монокристаллический кремний диаметром до 150 мм, монокристаллы германия, антимонида индия, арсенида галлия, гексаборида лантана и др.

Для выращивания монокристаллов на основе тугоплавких окислов были разработаны установки "Кристалл" серии 400 с использованием метода плавки в холодном тигле (ИПХТ). На этом оборудовании можно получать кристаллы с температурой плавления 3000°C и более. Метод ИПХТ получил также



Рис.4. Технологический узел – холодный тигель индукционной установки для выращивания кристаллов фианитов

широкое распространение для плавки металлов и для утилизации радиоактивных отходов (рис.4).

Плазменные технологии. В конце 50-х годов во ВНИИТВЧ были начаты исследования высокочастотных разрядов – индукционных, емкостных, а также тлеющих и коронных, которые в настоящее время получили большое распространение. В результате этих работ созданы и используются в промышленности уникальные процессы с использованием химических свойств газов в высокочастотной индукционной плазме для получения пигментов (например двуокиси титана $TiCl_4 + O_2 = TiO_2 + 2Cl_2$). Аналогичный по протеканию реакций окисления процесс получения особо чистого кварцевого стекла ($SiCl_4 + O_2 = SiO_2 + 2Cl_2$).

Создается не имеющая аналогов в мире плазменно-мембранные технологии переработки природного сероводородсодержащего газа. При этом энергия, получаемая при сжигании водорода в 3–6 раз больше, чем требуется на разложение сероводорода. Процесс опробован на опытно-промышленных установках мощностью 1000 кВт частотой 440 кГц и 2450 МГц. Для промышленной реализации этого процесса создана и готовится к запуску установка мощностью 5 МВт частотой 66 кГц.

Разработаны процессы напыления износостойкого покрытия на штамповую оснастку и режущий инструмент, получения сферических частиц порошков с особыми свойствами для медицины и техники. Созданы также установки для оплавления поверхностей бетонных плит (рис.5). Оплавленные бетонные поверхности обладают существенно уменьшенной гигроскопичностью, их можно с помощью специальных добавок окрасить в различные цвета, нанести рисунок. Такие технологии могут быть использованы для плазменной росписи элементов городских зданий, метро, детских площадок, садов, парков, мемориальных сооружений и т.п. Используется также высокочастотная индукционная плазма для спектрального анализа.

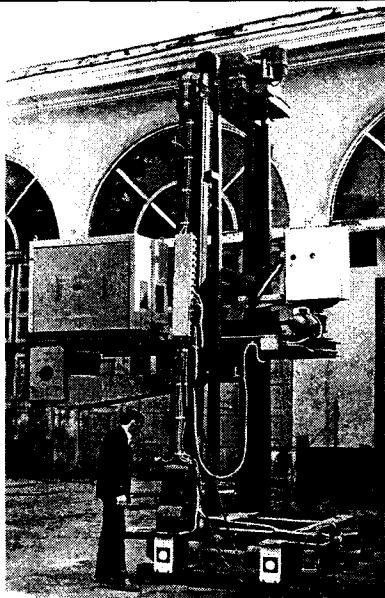


Рис.5. Высокочастотная плазменная установка для термо-обработки (оплавления) поверхности строительных бетонных деталей

Развитие численных методов позволило создать уникальную по сложности математическую модель разряда в высокочастотном плазмотроне, включающую уравнения баланса энергии, движения, неразрывности, электромагнитного поля.

Неравновесность емкостного разряда определяет область его применения – проведение плазмохимических реакций.

Примером использования емкостного разряда является процесс окисления хлоридов (SiCl_4 , GeCl_4 , BCl_3 , и др.) в потоке аргонокислой плазмы с целью получения высокочистых оксидов кремния, германия, бора и др. При проведении этой реакции окисления хлоридов кремния, германия и бора внутри кварцевой трубы осаждается кварц, легированный германием и бором. Так получают заготовку световода с низким затуханием передаваемого сигнала.

Высокочастотный коронный разряд используется для модификации поверхностных слоев с целью повышения адгезии полиэтилена, полипропилена, лавсана. Модификации в тлеющем разряде подвергают также и объемные изделия – сосуды, детские игрушки.

Ультразвуковые процессы. С помощью материалов, которые меняют свой объем при воздействии магнитного или электрического полей, удается преобразовать высокочастотные электрические колебания в механические и использовать эффекты и явления, проявляющиеся при распространении ультразвуковых механических колебаний. При использовании методов эхолокации созданы и выпускаются современные медицинские компьютеризированные приборы для диагностики заболеваний человека. Мощные ультразвуковые колебания используют для сварки, мойки, очистки деталей перед сборкой механизмов, фильтров летательных аппаратов, диспергирования. Весьма перспективным представляется использование ультразвуковых ванн для очистки металлоконструкций, деталей машин от радиоактивных загрязнений для вторичного использования.

Выводы

Все рассмотренные высокочастотные электротехнологии при внедрении в промышленное производство позволяют экономить трудовые, материальные и энергетические ресурсы, повышать качество производимого продукта. При их использовании не наносится вред среде обитания.

Список литературы

1. Вологдин В.П. Поверхностная индукционная закалка. М.: Оборонгиз. Главная редакция авиационной литературы, 1947.
2. Слуцкий А.Е., Рыскин С.Е. Индукторы для индукционного нагрева. Л.: Энергия, 1974.
3. Головин Г.Ф., Замятин М.М. Высокочастотная термическая обработка: Вопросы металловедения и технологии. Л.: Машиностроение, 1990.
4. Шепеляковский К.З. Упрочнение деталей машин поверхностью закалкой при индукционном нагреве. М.: Машиностроение, 1972.
5. Федорова И.Г., Безменов Ф.В. Высокочастотная сварка пластмасс. Л.: Машиностроение, 1990.
6. Шамов А.Н., Лунин И.В., Иванов В.Н. Высокочастотная сварка металлов. Л.: Политехника, 1991.
7. Глуханов Н.П., Федорова И.Г. Высокочастотный нагрев диэлектрических материалов в машиностроении. Л.: Машиностроение, 1983.
8. Дацкевич И.П. Высокочастотные разряды – промышленное применение. Л.: Политехника, 1991.
9. Бабиков О.И. Ультразвуковые приборы контроля. Л.: Машиностроение, 1985.

Перспективы применения индукционного нагрева в металлургической промышленности

ВАСИЛЬЕВ А.С., ДЕМИДОВИЧ В.Б.

Рассматриваются перспективы использования индукционного нагрева в металлургической промышленности. Даются сравнение печей по затратам первичной и вторичной энергии и эмиссии CO_2 для различных технологий нагрева в металлургии.

Техника высокочастотного индукционного нагрева металлов получила развитие в России с начала 30-х годов XX в., и она по-прежнему находит самое широкое

The paper is devoted to proscurities of induction heating applications in metallurgical industry. Comparison of primary and final energy consumption and CO_2 emission of different furnaces is given in the paper.

применение как в традиционных областях металлообрабатывающей промышленности, так и при разработке новейших технологий.

Расширенное применение непрерывных технологических процессов в конце XX в. привело к использованию индукционных нагревателей в металлургической промышленности индустриально развитых стран. Они идеально вписываются в непрерывные автоматизированные линии и способствуют структурным изменениям в металлургической промышленности. Если плавка металлов в индукционных тигельных и канальных печах занимала и ранее относительно большое место в металлургической промышленности, то внедрение технологических процессов непрерывной разливки с последующей прокаткой, непрерывной термообработки и покрытия ленты защитными материалами, термообработки труб, штамповки сплавов в твердожидком состоянии привели к потребности в высокоеффективных индукционных установках для прецизионного нагрева металла.

В настоящее время области потенциального использования индукционного нагрева в металлургической промышленности чрезвычайно велики. Нагрев толстых слябов перед прокаткой индукционным способом может осуществляться от температуры окружающей среды до температуры прокатки. Однако наиболее экономически выгодный подход, снижающий стоимость нагрева тонны металла при существенном уменьшении окалинообразования и обезуглероживания, заключается в нагреве металла индукционным способом после выхода из газовой печи (900–1150°C) до температуры прокатки (1150–1250°C).

Развитие технологий непрерывной разливки – непрерывной прокатки позволяет исключить зону хранения слябов и повторного их нагрева, что делает эту технологию энергосберегающей и существенно снижающей материальные затраты на производство тонны проката. Возможным согласующим звеном меж-

ду установкой непрерывной разливки и прокатным станом может быть индукционный нагреватель, который позволяет гибко и оперативно корректировать и формировать температурное поле сляба, обеспечивая максимальную производительность стана и, главное, высокое качество прокатки. Роль индукционного нагрева возрастает при использовании его в современных новейших линиях разливки тонких слябов с толщиной 20–50 мм. Чрезвычайно эффективно применение индукционного нагрева для подогрева кромок тонких слябов или полосы подката на промежуточных рольгангах между черновыми и чистовыми клетями прокатного стана.

Производство листового проката с покрытием повышенной стойкости против коррозии, улучшенными свойствами свариваемости, окрашиваемости, пылезащищенности значительно возросло во всем мире, что объясняется постоянным увеличением спроса автомобильной промышленности в данной продукции. Индукционный способ нагрева тонколистовых ферромагнитных материалов является одним из самых перспективных для применения в линиях непрерывного отжига, горячего цинкования и др.

Значительное распространение индукционный нагрев получил в трубном производстве. Индукционные нагреватели показали высокую эффективность в линиях с редукционными станами, станами профильной прокатки труб, для гибки и термомеханического упрочнения труб.

Начиная с 60-х годов, происходит активное вытеснение газовых и мазутных печей индукционными нагревателями цветных и легких металлов перед обработкой давлением. Крайне важно применение индукционного метода для прецизионного нагрева заготовок, например, в технологии тискоформовки, т.е.

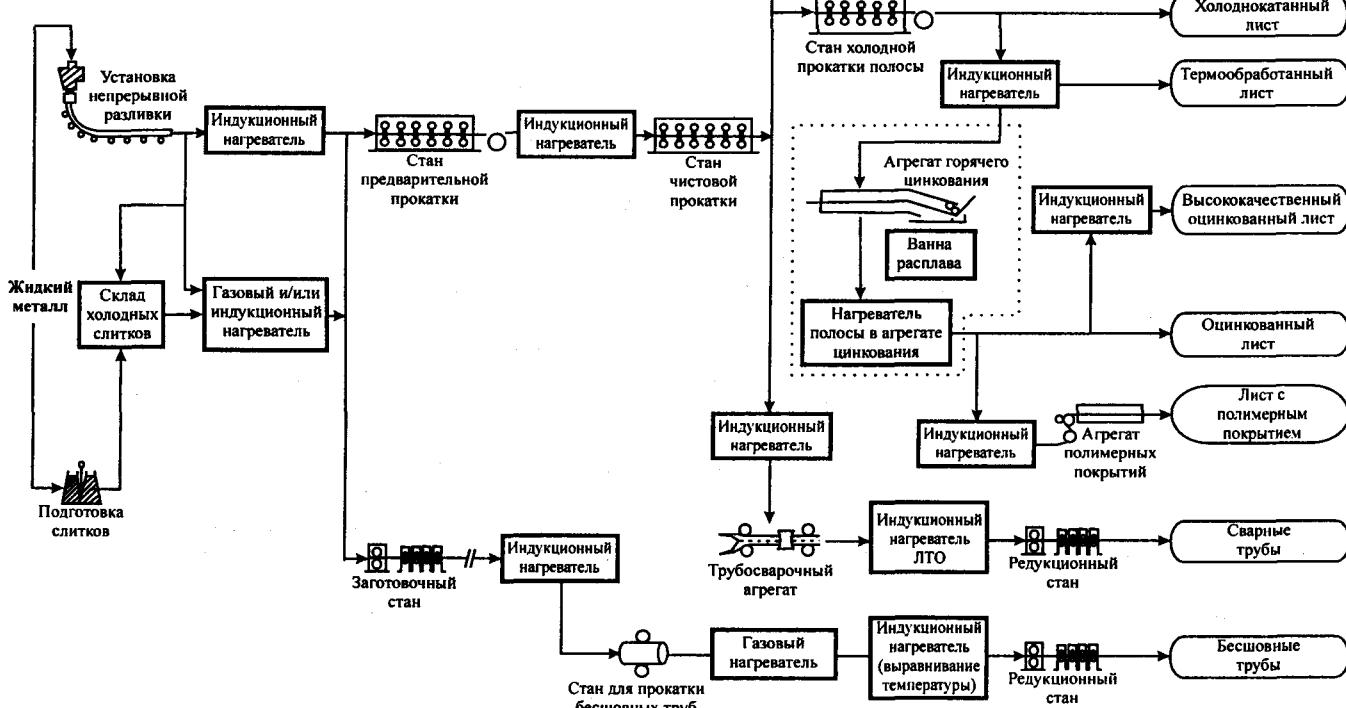


Рис.1. Использование индукционного нагрева в металлургии

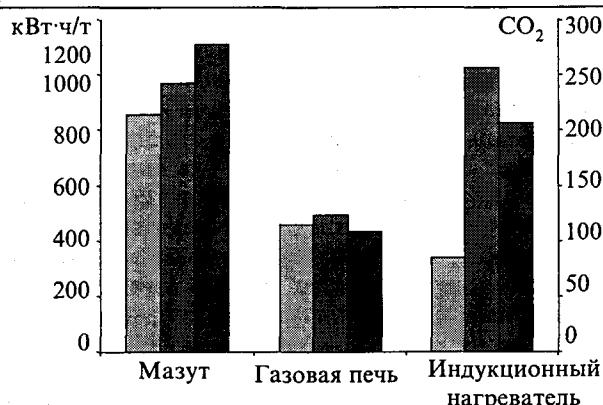


Рис.2. Сравнение потребления конечной и первичной энергии, а также выделения CO_2 при различных методах нагрева стальных слябов в прокатном производстве [1]:
 – конечная энергия; – первичная энергия;
 – выделение CO_2

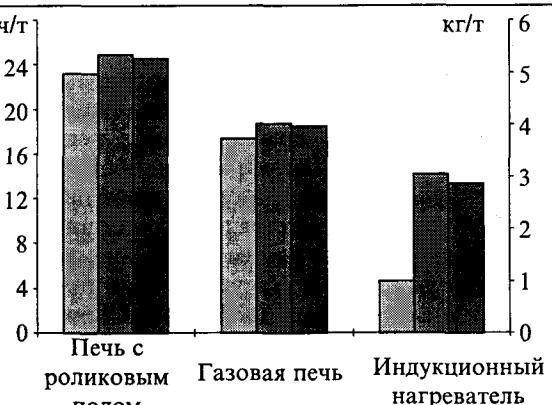


Рис.3. Сравнение потребления конечной и первичной энергии, а также выделения CO_2 при различных методах нагрева кромок стальных слябов:
 – конечная энергия; – первичная энергия;
 – выделение CO_2

штамповки заготовок в твердожидком состоянии за счет аномального снижения вязкости твердожидкого расплава при заполнении литейной формы.

В целом структура использования индукционного нагрева в металлургии отображена на рис.1. Обобщенно можно выделить три главные группы индукционных нагревателей, которые используются в металлургической промышленности:

- индукционные нагреватели блюмсов, слябов и полос;
- индукционные нагреватели лент;
- индукционные нагреватели цилиндрических заготовок, включая трубные заготовки.

С энергетической точки зрения трудно ожидать до последней трети XXI в. полную замену в металлургическом производстве газового нагрева индукционным нагревом. Перспективно комбинированное использование газового и индукционного нагрева. В будущем изменение структуры топливно-энергетического баланса делает электроэнергию наиболее перспективным энергоносителем для промышленного нагрева [1–8]. Следует отметить, что стоимость природных энергоресурсов постоянно возрастает, а стоимость производства электричества снижается, что создает хорошую основу для постепенного экономически обоснованного вытеснения в металлургическом производстве газового нагрева индукционным [8].

На рис.2 показано сравнение по потреблению конечной и первичной энергии, а также выделению CO_2 индукционной нагревательной установки стальных слябов мощностью 210 МВт на McLouth Steel Corporation ("Trenton", MI, USA) и методических печей, работающих на газе и мазуте [1]. При этом предполагается 50%-я загрузка, общая в прокатном производстве. Хотя потребление конечной энергии газовыми печами больше, потребление первичной энергии и выделение CO_2 газовыми печами по сравнению с индукционными установками примерно на половину меньше. В то же время индукционные нагреватели кромок стальных слябов обеспечивают минимальное потребление первичной и вторичной энергии, а также минимальное выделение CO_2 (рис.3) [9].

Продолжаются работы по использованию индукционного нагрева при термообработке машиностро-

ительных деталей, в том числе по технологии высокочастотной поверхностной закалки – самого распространенного вида термообработки.

В результате закалки на поверхности изделия образуется твердый износостойчивый слой, при этом сердцевина остается мягкой и вязкой. Такие изделия имеют повышенную прочность и высокую долговечность.

При индукционном нагреве используются мощности от долей ватта до десятков киловатт на квадратный сантиметр. Естественно, что чрезвычайная концентрация энергии в малом объеме приводит к использованию относительно высоких частот тока и иным физическим постоянным обрабатываемых материалов, чем это было бы в случае медленных процессов. Кроме того, свойства этих материалов часто зависят от частоты индуцированного тока. Таким образом, задача воздействия на материал высококонцентрированным потоком высокочастотной энергии содержит ряд проблем, часть которых не решена до сих пор.

К технологиям, использующим высоконтенсивный индукционный нагрев, в первую очередь следует отнести процессы, которые ведутся при удельных мощностях индуцированного тока более 10 кВт/см^2 . Обычно это связано с весьма коротким временем нагрева элементов материала. В ряде случаев это сотни доли секунды.

Примером таких технологий является высокочастотная индукционная сварка труб. При сварке труб плотность мощности в месте стыка достигает $10\text{--}80 \text{ кВт/см}^2$. Есть два метода высокочастотного нагрева при сварке шовных труб – без оплавления сварной кромки и с оплавлением последней. И в том и в другом случаях очень важным моментом является качество шва, которое обусловлено не только характером нагрева, но и остыванием, определяющим прочность сварного шва.

Свойства металла на поверхности детали определяются физическими и металлическими процессами, которые в нем происходят. Поэтому во ВНИИТВЧ и СПбГЭТУ проведены тщательные исследования электромагнитных, тепловых процессов, структурных превращений, которые происходят на этапе нагрева и охлаждения. Проанализировано влияние параметров закалки (частоты закалочного тока, време-



Рис.4. Сравнение потребления конечной энергии в кузнечном производстве при нагреве одной тонны стали в различных печах [1]:

■ – нагрев; ■ – окалина

мени и температуры нагрева, скорости охлаждения) и исходного материала (состава и исходной структуры) на качество закалки.

Создана технология и индукционная система для закалки кулачков распределительных валов, которая состоит из нижней, активной части индуктора, подключенной к источнику питания, и верхней, связанной с нижней через магнитный поток. При использовании такой системы обеспечивается равномерный по периметру кулачка закаленный слой без вращения распределительного вала. Идею метода использует фирма "INDUC-TOHEAT Inc." (США) при разработке аналогичных систем индукционной закалки распределительных валов [10].

В кузнечном производстве индукционный нагрев стали вытесняет обычную технологию нагрева в печах, работающих на топливе. Сегодня доля индукционного нагрева в кузнечно-штамповочном производстве составляет примерно 80%. Для заготовок с большим соотношением длина-диаметр, таких как проволоки и прутки, всё в большей мере используется кондукционный нагрев.

Проведенные сравнения печей и установок с про-

изводительностью 1–2 т/ч показали (рис.4), что печи, работающие на газовом топливе, имеют значительно большее потребление конечной энергии, чем электротермические агрегаты. Наряду с невысоким КПД процесса отчасти это определяется и большим образованием окалины на поковках. В то время как доля окалины при кондукционном и индукционном нагреве ограничена 0,5%, в газовых печах окалина составляет примерно от 2 до 2,5% массы обработанной стали. При определении энергетических затрат от образования окалины рассматривались только потери материала, увеличенный износ инструментов и снижение качества заготовки из-за окалины не учитывались.

Список литературы

1. Бааке Э., Йори У., Мюльбауэр А. Энергопотребление и эмиссия CO_2 при промышленном технологическом нагреве: Перевод с немецкого под ред. В.Б.Демидовича. VULKAN-VERLAG ESSEN, 1997.
2. Современные электротехнологии и экономические преимущества электронагрева. СПб.: Энергоатомиздат, 1998.
3. Блинов Ю.И., Васильев А.С., Никаноров А.Н. и др. Современные энергосберегающие электротехнологии. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ "ЛЭТИ", 2000.
4. Demidovitch V. Electric energy saving in metallurgy// Proceedings of the seminar. SPB.: EC Energy Center, 1995. November. P. 240–256.
5. Демидович В.Б. Электрическая энергия – потенциальные возможности энергосбережения (на примере металлургического предприятия) // Тр. семинара-совещания "Опыт проведения энергетического аудита и практическая реализация полученных результатов". СПб.: Центр энергетики Европейского сообщества. 1995. С.22–31.
6. Шульц Л.А. Развитие собственных электрогенерирующих мощностей – основа эффективного производства стали в будущем//Изв. вузов. Черная металлургия. 2002. №3. С.69–75.
7. Никифоров Г.В., Заславец Б.И. Энергосбережение на металлургических предприятиях. Магнитогорск: МГТУ, 2000.
8. Лякишев Н.П., Николаев А.В. Энергетические аспекты металлургии стали// Сталь. 2002. № 3. С.66–73.
9. Induction Heating for the Steel Industry: Technology Assessment and Economic Analysis Model // EPRI Center for Material Production. Pittsburgh, 1996.
10. Don Loveless et al. New wrinkles in induction hardening crankshafts // Heat Treating Progress. 2002. September. P.41–43.

Электротермический комплекс на основе скважинного электродного нагревателя мощностью более 500 кВт для теплового воздействия на продуктивный пласт высоковязкой нефти

ЗАГРИВНЫЙ Э.А., КОЗЯРУК А.Е., БАТАЕВ С.Н.

Обоснована целесообразность развития теории и методов электротермического воздействия на продуктивный пласт высоковязкой нефти. Приведены технико-экономические показатели скважинных электронагревателей.

Has been based the advisability of theory and methods development for the electric thermal influence on the productive seam of heavy oil. Has been listed technical economic parameters of the hole electroheaters

В конце XX в. существенно изменилась структура запасов нефти на месторождениях России. Так, степень выработанности текущих запасов нефти к

концу 90-х годов превысила 50%, в том числе более 30% в Тюменской области, 70% в Урал-Поволжье. За период 1980–1999 гг. запасы нефти в пластах со

степенью выработанности более 80% увеличились в 4 раза. Особенно значительно выработаны запасы на наиболее крупных и высокопродуктивных месторождениях, обеспечивающих основную часть добычи нефти в России.

Добыываемую нефть условно разделяют на легкую (плотностью менее 900 кг/м³) и тяжелую высоковязкую (плотностью выше 900 кг/м³). Запасы разведанной высоковязкой нефти достигают более 700 млрд.т. Самые крупные известные месторождения тяжелой нефти находятся в Канаде – примерно 300 млрд.т.; Венесуэле – примерно 200 млрд.т.; США около 25 млрд.т.; России около 9 млрд.т. В течение последних десяти лет в нефтяной промышленности США, Венесуэлы и Канады наблюдается устойчивая тенденция широкомасштабного освоения залежей тяжелой высоковязкой нефти.

В России большая часть запасов такой нефти (77%) связана с Западно-Сибирским и Волго-Уральским бассейнами. Для традиционных способов разработки таких месторождений среднее значение коэффициента нефтеотдачи составляет 7–15%. Без решения проблемы увеличения нефтеотдачи пластов (до 40–45%), особенно насыщенных высоковязкой и тяжелой нефтью, невозможна стабилизация, а тем более рост производительности скважин и месторождений в целом.

Основной причиной, ограничивающей рост добычи нефти в России, является не физическое истощение недр, а значительное усложнение природных условий поисков, разведки и разработки месторождений. Проблема нефтеотдачи, т.е. проблема коренного повышения полноты использования пластовых запасов нефти, еще не решена. Разработкой и внедрением методов повышения нефтеотдачи (МПН) пластов активно занимаются все нефтедобывающие страны, так как увеличение нефтеотдачи на эксплуатируемых месторождениях равносильно открытию новых. Учитывая, что МПН реализуются в регионах с развитой инфраструктурой, эффективность от их внедрения существенно выше по сравнению с поисками и разведкой новых месторождений, особенно в районах Восточной Сибири и Крайнего Севера [1,2].

Для повышения нефтеотдачи пластов во всех нефтедобывающих странах используют различные МПН. Широкое распространение в мировой практике добычи тяжелой нефти получили термические МПН:

1. Вытеснение нефти при постоянном нагнетании горячей воды или пара.

2. Циклическое паротепловое воздействие (ПТВ) на продуктивный пласт.

3. Внутрипластовое горение.

Для оценки технологической эффективности реализации процесса ПТВ в отечественной практике используют так называемый паронефтяной фактор (ПНФ), под которым понимают отношение количества пара, затраченного на добычу 1 т нефти. Значение ПНФ колеблется в широких пределах (от 0,5 до 5–7). По мнению зарубежных специалистов, терми-

ческие методы являются единственным средством извлечения высоковязкой и тяжелой нефти. За счет термических методов, главным образом, паротеплового воздействия на пласты, добывается около 0,75 общего добытого объема такой нефти. За период с 1970 по 1990 гг. число проектов по ПТВ увеличилось более чем в два раза.

Наиболее широко применяются термические методы добычи нефти в США. Интерес к добыче тяжелой нефти (934–1000 кг/м³) в США возрос в 70-х и начале 80-х годов в результате роста цен на нефть, наличия ресурсов и развития термических методов (паротепловое воздействие). В настоящее время основное внимание направлено на геологически благоприятные месторождения тяжелой нефти в Калифорнии. Добыча тяжелой нефти, составившая в среднем 14,5 тыс. т в 1960 г., удвоилась в 1970 г. и продолжала расти. Прошедшие три десятилетия показали, что доля добычи нефти за счет теплового воздействия возросла с 1/3 до почти 3/4 общей добычи тяжелой нефти. Суммарная добыча тяжелой нефти на крупных месторождениях составила уже более 2 млрд. т, из них за счет термического воздействия – 600 млн. т.

Большинство проектов по закачке пара характеризуется тем, что часть добытой нефти используется в парогенераторах как топливо. На 1 т сгорающей нефти добывается 3–4 т нефти. В настоящее время идет процесс использования природного газа вместо нефти.

Известны результаты применения ПТВ на месторождениях тяжелой нефти КНР. Китай обладает огромными ресурсами тяжелой высоковязкой нефти, которая классифицируется как обычная тяжелая нефть, сверхтяжелая нефть и супертяжелая нефть. В основном нефтяные коллекторы, содержащие тяжелую нефть, залегают в восточном Китае на глубине от 1000 до 2000 м. Во всех случаях после ПТВ дебит скважин в течение первого месяца эксплуатации возрастал в 5–40 раз, а в некоторых случаях составлял 60–70 т/сут, тогда как до ПТВ он был близок к нулю. Паронефтяной фактор при этом равнялся 0,3–0,7 т/т. По оценке китайских специалистов сухость пара на забое при этом близка к нулю.

Физическое моделирование и промысловые испытания показали, что отбор нефти после обработки горячей водой гораздо ниже (в кратное число раз), чем при сухости пара 0,27 и тем более при сухости пара 0,63 [2,3].

Обобщая приведенные данные, можно указать следующие основные недостатки традиционных технологий ПТВ:

1. Значительные потери теплоты в трубопроводах на поверхности и в скважине на глубинах выше 1000 м.

2. Сухость пара на забое при глубинах выше 1000 м близка к нулю даже при использовании термоизолированных труб.

3. Высокая капиталоёмкость теплоэнергетического оборудования.

4. Потери при сжигании добываемых углеводородов в парогенераторах (нефть, газ) по энергетическому эквиваленту составляют более 20%.

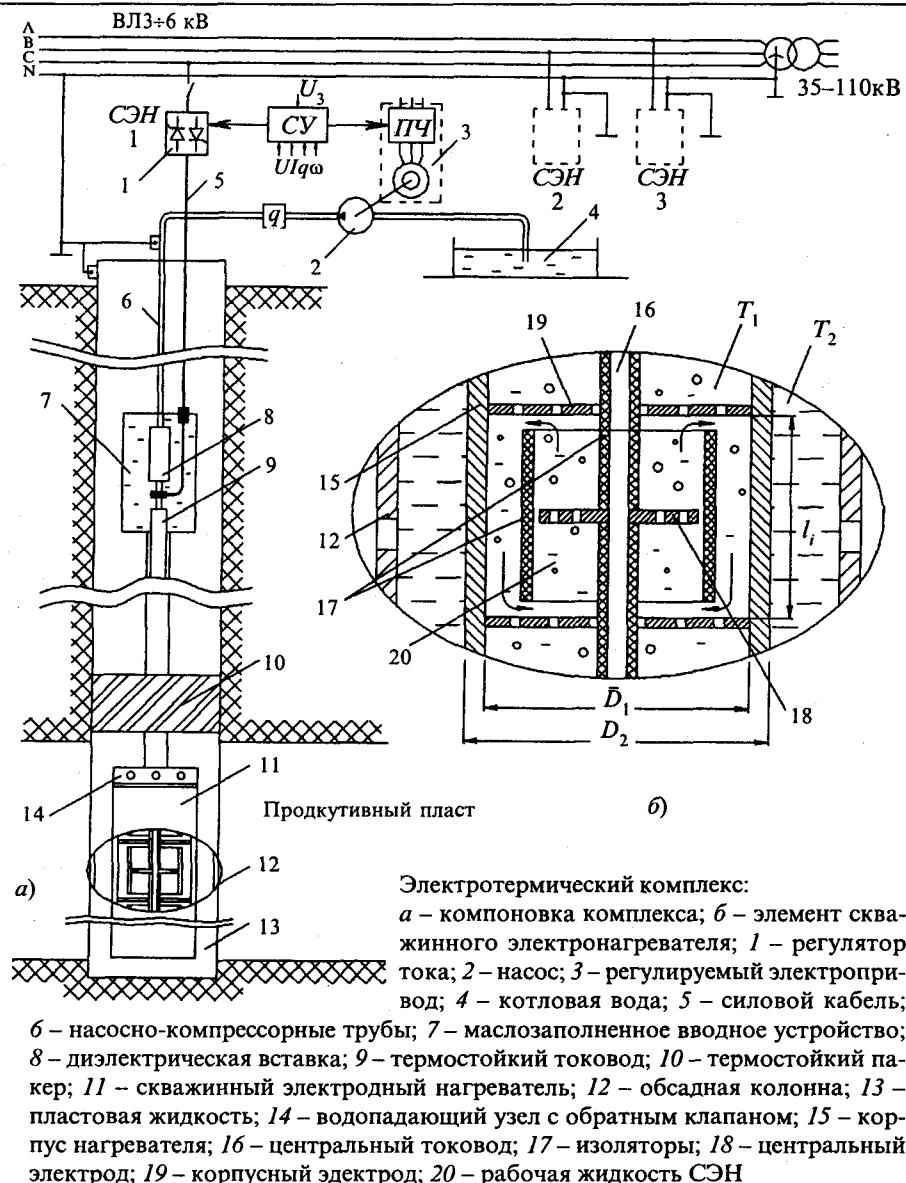
5. Высокая загрязнённость атмосферы вредными окислами азота и серы, что в ряде случаев вынуждает прибегать к запретам применения огневых парогенераторов (некоторые нефтедобывающие компании США для производства пара используют электроэнергию местных электростанций).

Одним из перспективных направлений развития термических методов добычи тяжелой нефти считается создание и широкое распространение забойных парогенераторов (генераторов теплоты) [3]. Работы по созданию огневых забойных парогенераторов находятся на стадии экспериментальных исследований и сдерживаются техническими сложностями одновременной подачи на большие глубины топлива, кислорода, воды, электроэнергии и реализации систем контроля и управления режимами работы парогенератора [4].

Эксплуатация современных электронагревателей на основе ТЭН показала их эффективность, но из-за относительно малой мощности (20–50 кВт) и низкой надёжности широкое распространение для повышения нефтеотдачи пластов они не получили [5].

В С.-Петербургском государственном горном институте (ТУ) на кафедре "Электротехника и электромеханика" разработан скважинный электродный нагреватель СЭН [6,7], на основе которого совместно с кафедрой "Техника и технология бурения скважин" спроектирован электротермический комплекс для теплового воздействия на продуктивные пласти (рисунок). Комплекс работает следующим образом.

При подаче напряжения ток через тиристорный регулятор 1 потечёт по бронированному кабелю 5 через вводное устройство 7 и далее по трубчатому изолированному тоководу на центральный электрод 16 СЭН. От центрального токовода 16 ток через перфорированные электроды 18 потечёт через токопроводящую жидкость 20 к корпусным электродам 19, выделяя требуемую мощность. Комплекс позволяет выполнять технологические операции по ПТВ, импульсно-дозированному тепловому воздействию (ИДТВ) и термогидродинамическому воздействию. Для этого в состав комплекса включены насос 2 с ре-



Электротермический комплекс:
 а – компоновка комплекса; б – элемент скважинного электронагревателя; 1 – регулятор тока; 2 – насос; 3 – регулируемый электропривод; 4 – котловая вода; 5 – силовой кабель; 6 – насосно-компрессорные трубы; 7 – маслозаполненное вводное устройство; 8 – диэлектрическая вставка; 9 – термостойкий токовод; 10 – термостойкий пакер; 11 – скважинный электродный нагреватель; 12 – обсадная колонна; 13 – пластовая жидкость; 14 – водоподающий узел с обратным клапаном; 15 – корпус нагревателя; 16 – центральный токовод; 17 – изоляторы; 18 – центральный электрод; 19 – корпусный электрод; 20 – рабочая жидкость СЭН

гулируемым электроприводом 3, ёмкость с котловой водой 4, насосно-компрессорные трубы (НКТ) 6, по которым котловая вода через диэлектрическую вставку 8 и водоподающий узел с обратным клапаном 14 поступает в изолированный интервал скважины 13. Автоматическое поддержание заданных технологических параметров (напряжения U , тока I , расхода котловой воды q , частоты вращения насоса ω) обеспечивается системой управления СУ.

Режим ПТВ реализуется при заданных часовых расходах тепловой энергии и котловой воды, которые обеспечивают определенное количество пара в зоне продуктивного пласта с сухостью, зависящей от соотношения часовых количеств энергии и воды. Режим ИДТВ обеспечивается чередующимися импульсами ПТВ и подачей котловой воды с увеличенными часовыми расходами, чем достигается ускоренное продвижение теплового фронта и снижение ПНФ [8,2].

Термогидродинамическое воздействие на призабойную зону скважин вплоть до гидроразрыва плас-

та основано на быстром нагреве жидкости в изолированном интервале скважины на уровне продуктивного пласта с удельной мощностью 3–9 МВт/м³ и обеспечивает восстановление гидравлической связи пласта со скважиной, увеличение нефтеотдачи пластов с высоковязкой нефтью и дебита скважин, а также возобновление эксплуатации нерентабельных скважин на нефть, природный газ, на пресные, минеральные и термальные воды [9].

Конструкция рассматриваемого электродного СЭН позволяет реализовывать мощность свыше 1000 кВт и в настоящее время ограничивается пропускной способностью погружных кабельных линий, используемых для питания центробежных нефтяных насосов. Выпускаемые для этой цели трёхжильные бронированные кабели отечественного (КППБКТ, КППБПТ) и зарубежного производства на рабочее напряжение до 4 кВ и токи 100–130 А при включении нагревателя по схеме "фаза – 3 жилы кабеля параллельно – СЭН – обсадная колонна и НКТ параллельно – нейтраль трансформатора" способны передавать на глубины 1000–1500 м не менее 1000 кВт [10].

В качестве источников питания группы СЭН могут быть использованы серийные силовые трансформаторы мощностью 10–16 МВ·А напряжением 35/3 кВ, что эквивалентно применению традиционных парогенераторов с паропроизводительностью до 20 т/ч. Основные конструктивные параметры СЭН (длина, наружный диаметр) определяются диаметром обсадной колонны и мощностью продуктивного пласта, а также удельной тепловой мощностью СЭН (Вт/см²).

Глубина залегания пластов с высоковязкой нефтью в основном 200–1000 м и реже 1000–2000 м. Мощность этих пластов составляет 3–30 м и более. Поэтому при проектировании электротермических комплексов для конкретных условий необходимо задать мощность СЭН, наружный диаметр и длину, которая должна быть соизмерима с мощностью пласта. При этом удельная тепловая мощность СЭН может быть принята в пределах 20–60 Вт/см².

Для реализации эффективного термогидродинамического воздействия СЭН должен обеспечивать нагревание пластовой жидкости в зоне обработки до кипения, что в свою очередь определяет давление и температуру внутри СЭН. Наиболее употребительные давления нагнетания пара при термических способах добычи нефти 4–10 МПа, реже 12–14 МПа. Указанные режимы ПТВ могут быть достигнуты при температурах жидкости-теплоносителя СЭН в диапазоне 280–360°C. С учётом сказанного основные параметры СЭН могут определяться следующим образом.

Диаметр и длина СЭН зависят от диаметра обсадной колонны в зоне продуктивного пласта, заданных мощностей СЭН и обрабатываемого пласта. Наиболее часто перфорированная зона скважин выполняется трубами с наружным диаметром 146 и 168 мм и с внутренни-

ми диаметрами 136 и 158 мм соответственно. Поэтому диаметр СЭН может быть принят в интервале от 110 до 130 мм. При этом могут применяться как серийные буровые трубы, так и специальные (например, оребрённые) стальные или медные трубы.

Длина СЭН может определяться по выражению:

$$L_h = \frac{10^{-2} P_3}{\pi D p_{yd}}, \quad (1)$$

где L_h – длина активной части СЭН, м; P_3 – заданная мощность СЭН, кВт; p_{yd} – удельная мощность СЭН, Вт/см²; D – наружный диаметр СЭН, см.

Масса заливаемой воды в СЭН при нормальных условиях в значительной мере определяет стационарный режим работы СЭН. Так, можно выбрать такую массу m_0 , при которой уровень (объём) воды в СЭН при заданной температуре T_b и давлении P будет оставаться практически неизменным. С другой стороны, можно определить m_0 таким образом, что при заданных T_b и P объём воды будет занимать заданную долю от свободного внутреннего объёма СЭН. Указанное свойство позволяет задавать мощность СЭН в зависимости от режима работы путём расстановки электродов по высоте СЭН по требуемому закону управления мощностью.

Масса заливаемой рабочей жидкости (воды) m_0 (кг) при нормальных условиях определяется выражением:

$$m_0 = V [q_{b1} - \varepsilon (q_{b1} - q_{p1})], \quad (2)$$

где V – внутренний объём СЭН, м³; q_{b1} , q_{p1} – удельные массы воды и пара в стационарном режиме при температуре T_b и давлении P ; $\varepsilon = V_p/V$ – заданный относительный объём пара в стационарном режиме работы СЭН.

В качестве примера в таблице приведены соотношения воды и пара в СЭН с внутренним объёмом $V = 45 \cdot 10^{-3}$ м³ и $m_0 = 10$ кг. Видно, что при изменении давления в СЭН от 10,8 до 18,1 МПа и температуры от 320 до 360°C объём воды изменяется незначительно.

Задавшись относительным объёмом паровой зоны СЭН при $P = 18,1$ МПа и $T = 360^\circ\text{C}$, например $\varepsilon = V_p/V = 0,1$ (V_p – объём паровой зоны), получим $m_0 = 22,1$ кг.

При $V_p = 0,1 \cdot 10^{-3}$ м³ объём воды при $P = 18,1$ Па и $T = 360^\circ\text{C}$ составит

$$V_b = V - V_p = (45 - 4,5) \cdot 10^{-3} = 40,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3,$$

что почти в 2 раза больше объёма воды, залитой в СЭН при нормальных условиях.

$T, ^\circ\text{C}$	$P, \text{МПа}$	$\gamma_b, \text{м}^3/\text{кг} \cdot 10^{-3}$	$\gamma_p, \text{м}^3/\text{кг} \cdot 10^{-3}$	$m_b, \text{кг}$	$m_p, \text{кг}$	$V_b, \text{м}^3/\text{кг} \cdot 10^{-3}$	$V_p, \text{м}^3/\text{кг} \cdot 10^{-3}$
320	10,8	1,49	15,45	7,79	2,21	11,6	33,4
330	12,4	1,56	12,96	7,5	2,5	11,7	33,3
340	14,3	1,63	10,75	6,85	3,15	11,16	33,84
350	16,0	1,74	8,8	6,09	2,91	12,06	32,94
360	18,1	1,89	6,9	4,8	5,2	9,12	35,88

Для снижения влияния неконденсирующихся газов (воздух) перед каждым спуском СЭН в скважину после заполнения его водой с заданной электропроводностью необходимо из свободного объёма откачать воздух и отвакуумировать залитую воду до давления $(0,1-0,5) \cdot 10^{-2}$ МПа, достигаемого при откачке газов механическими вакуумными насосами. Эта операция позволит кроме удаления кислорода стабилизировать электропроводность воды, увеличить в кратное число раз теплоотдачу пара при конденсации и обеспечит получение расчётных режимов [7].

Тепловой поток рассматриваемого нагревателя (рекуператора) в стационарном режиме может быть определён из условия равенства электрической и тепловой мощностей. Определение теплового потока СЭН относится к задачам передачи теплоты от теплоносителя с большей температурой к теплоносителю с меньшей температурой при свободной конвекции жидкостных теплоносителей. Конструкторский расчёт по определению поверхности нагрева по заданным тепловой мощности нагревателя и температурам теплоносителей не вызывает принципиальных затруднений. В общем случае тепловой поток от наружной стенки цилиндрического нагревателя определяется выражением [11]:

$$Q = k(T_{01} - T_{02})F, \quad (3)$$

где $k = \left[\frac{D_i}{\alpha_1 D_1} + \frac{D_i}{\lambda} \ln \frac{D_2}{D_1} + \frac{D_i}{\alpha_2 D_2} \right]^{-1}$ – коэффициент тепло-

передачи через единицу площади поверхности, Вт/м²·К; D_1 , D_2 , D_i – внутренний, наружный и расчётный диаметры; $D_i = (D_1 + D_2)/2$; T_{01} , T_{02} – характерные температуры сред, омывающих поверхности стенки ($T_{01} > T_{02}$); α_1 , α_2 – коэффициенты теплоотдачи внутренней и внешней поверхностей стенки, Вт/м²·К; λ – коэффициент теплопроводности стенки, Вт/м·К; L – длина стенки, м; $F = 2\pi D_i L$ – площадь стенки, м².

В рассматриваемой конструкции среднее значение $T_{01} = \text{const}$ по всей длине нагревателя. Коэффициенты теплоотдачи α_1 и α_2 могут быть определены из критериального уравнения при свободной конвекции жидкости:

$$Nu = C(Pr \cdot Gr)^n, \quad (4)$$

где $Nu = \alpha D / \lambda$ – критерий Нуссельта (безразмерная форма коэффициента теплопередачи); $Pr = v/a$ – критерий Прандтля; v – кинематическая вязкость, м²/с; $a = \lambda / \rho c$ – коэффициент температуропроводности, с·м⁻²; c – массовая теплоёмкость, Дж/кг·К; ρ – плотность, кг/м³; $Gr = \beta g \Delta T / v^2$ – критерий Грасгофа; β – коэффициент объёмного термического расширения, 1/К; ΔT – характерная разность температур, К; g – ускорение силы тяжести, м/с².

Значения C и n , являющиеся функциями аргумента $Pr \cdot Gr = Ra$ (число Рэлея), определяются по таблицам. После вычисления $Nu_{1,2}$ коэффициенты теплоотдачи

$$\alpha_{1,2} = \frac{Nu_{1,2} \lambda}{D_{1,2}}. \quad (5)$$

Выполнены расчёты мощности теплового потока СЭН при следующих условиях: $D_1 = 98$ мм; $D_2 = 108$ мм; $L = 6$ м; $Q = 500$ кВт; $\lambda = 50$ Вт/м·К; давление нагнетания теплоносителя в пласт $P_2 = 10$ МПа, температура кипения нагнетаемого теплоносителя $T_2 = 309$ °С, температура наружной стенки СЭН $T_{ctrl} = 319$ °С, $\Delta T_2 = 10$ °С, теплоноситель – вода. Корпус СЭН – гладкостенная буровая труба с толщиной стенки $\delta = 5$ мм. Теплопередача при свободной конвекции теплоносителей.

Определено, что для обеспечения заданного теплового потока необходимо обеспечить температуру внутренней стенки $T_{ctrl} = 355$ °С, т.е. поддерживать кипение воды внутри СЭН при давлении $P_1 = 18$ МПа. Удельная мощность теплового потока $p_{ud} = 24,6$ Вт/см². Тепловой поток при указанных условиях может быть существенно увеличен при применении поверхностей с повышенной интенсивностью конвективного теплообмена и использовании материалов для корпуса СЭН с большим коэффициентом теплопроводности.

Электрическая мощность СЭН в зависимости от избранного соотношения объёмов "вода-пар" в стационарном режиме может быть определена выражением

$$P_{эл} = Q = mP_i = \frac{L_b}{l_i} P_i, \quad (6)$$

где m – число элементов СЭН; P_i – мощность элемента СЭН, кВт; l_i – длина элемента СЭН, м; L_b – расчётная длина столба воды в стационарном режиме, м.

Мощность элемента СЭН (кВт)

$$P_i = \frac{U^2 R_i}{2} = \frac{U^2 \rho l_i}{2 S_i}, \quad (7)$$

где U – напряжение СЭН, В; ρ – удельное сопротивление воды, Ом·м; S_i – площадь электродов, м².

Экспериментально установлено, что плотность тока j на электродах во избежание электролиза воды не должна превышать $2 \text{ A/cm}^2 = 2 \cdot 10^4 \text{ A/m}^2$ [12]. Тогда при $j < 2 \cdot 10^4 \text{ A/m}^2$ площадь электрода (м²) будет равна

$$S = \frac{I_i}{j} = \frac{I}{2m j} = \frac{P}{2m j U}. \quad (8)$$

Требуемое удельное сопротивление воды, которое может быть получено экспериментально путём добавления, например, щёлочи в дистиллированную воду,

$$\rho = \frac{U}{2l_i j}. \quad (9)$$

Проведена укрупнённая технико-экономическая оценка стоимостей дополнительно добываемой нефти и затраченной электроэнергии при использовании скважинных электротехнических комплексов для условий Усинского месторождения тяжёлой нефти [13]. Приняты следующие исходные данные: мощность силового трансформатора – 10 МВ·А; давление нагнетания пара – 10–12 МПа; расход энергии на производство 1 т пара – 700 кВт·ч; паронефтяной фактор – 0,5 т/т; стоимость 1 т нефти – 100 у.е.; стоимость

1 кВт·ч электроэнергии – 0,8 руб.; число рабочих дней в году – 300.

Установлено, что стоимость электроэнергии не превышает 6–8% стоимости дополнительно добываемой нефти. Следует заметить, что полученная оценка может считаться пессимистической, так как при использовании СЭН количество вносимой в пласт тепловой энергии не зависит от глубины залегания пласта в отличие от традиционного способа воздействия на продуктивные пласти.

Технология термического воздействия на продуктивные пласти с использованием СЭН имеет следующие преимущества:

1. Низкие потери энергии (не более 5%).
2. Низкая капиталоемкость одного комплекта оборудования, позволяющая постепенно наращивать производительность до требуемой.
3. Возможность проведения ПТВ при заполненной жидкостью скважине.
4. Возможность использования как в зонах распространения многолетнемерзлых пород, так и при разработке шельфовых месторождений.
5. Возможность реализации методов импульснодозированного и термогидродинамического воздействия.
6. Пониженные требования к качеству закачиваемой в пласт воды.
7. Получение пара с сухостью 0,8–1 на глубинах свыше 1000 м.
8. При эксплуатации обводнённых месторождений возможность проводить ПТВ без подачи воды с поверхности.

Комплекс экспонировался на Брюссельской международной выставке "Эврика-2001" и был отмечен золотой медалью с отличием.

Широкое применение скважинного электротермического оборудования в регионах с высокой электрооруженностью позволит снизить стоимость термических скважин, автоматизировать процесс термо-

обработки, за счет высокой маневренности увеличить число добываемых скважин и получить экологически чистые и ресурсосберегающие технологии термической добычи тяжелой высоковязкой нефти.

Список литературы

1. Недра России: Полезные ископаемые / Под ред. Н.В. Межеловского, А.А. Смысюла. СПб., 2001. Т. 1. С. 63–66.
2. Байбаков Н.А., Гарушев А.Р., Антониади Д.Г. и др. Термические методы добычи нефти в России и за рубежом. М.: ВНИИОЭНГ, 1995.
3. Бурже Ж., Комбарну М., Сурио П. Термические методы повышения нефтеотдачи пластов. М.: Недра, 1989.
4. Глубинные теплогенераторы для повышения нефтеотдачи пластов / Под ред. А.Е. Шейдлина. М.: Институт высоких температур АН СССР, 1983.
5. Каплан Л.С., Семенцов А. В., Разгоняев Н.Ф. Развитие техники и технологий на Туймазинском нефтяном месторождении. Уфа: РИЦ АНК "Башнефть", 1998.
6. Пат. 2169830 РФ. Устройство тепловой обработки призабойной зоны скважины / Э.А. Загривный, А.Н. Сиротский.
7. Загривный Э.А., Козярук А.Е. и др. Разработка электротехнических комплексов и технологий теплового воздействия на продуктивные пласти для интенсификации добычи нефти // Научные исследования высшей школы по экологии и расширенному природопользованию. СПб.: СПГГИ, 2000.
8. Термические методы повышения нефтеотдачи пластов // Сб. научных трудов. М.: Наука, 1990.
9. Пат. № 2046184 РФ. Способ гидравлического разрыва пласта / В.С. Литвиненко, Ю.М. Парийский, Г.Н. Соловьев и др.
10. Месенжник Я.З. Кабели и провода специального назначения для нефтегазового комплекса // Электро. 2000. № 1.
11. Кутателадзе С.С. Основы теории теплообмена. М.: Атомиздат, 1979.
12. Корсак С.П. Электрические водонагреватели и паровые котлы. М.: Госэнерго, 1954.
13. Освоение ресурсов трудноизвлекаемых и высоковязких нефей // Сб. докладов международной конференции 16–20 июня 1997 // Краснодар, 1999.

Ограничители перенапряжений – важнейший элемент обеспечения электромагнитной совместимости

АБРАМОВИЧ Б.Н., КАБАНОВ С.О., КРАСАВИНА М.А., ПОЛИЩУК В.В.

Рассмотрены виды и уровни перенапряжений, действующих на изоляцию оборудования электротехнических комплексов. Предложено в качестве одного из основных элементов системы защиты использовать нелинейные ограничители перенапряжений. Показано, что применение ультразвука при производстве оксидноцинковых варисторов позволяет создавать ограничители перенапряжений с характеристиками на уровне зарубежных аналогов.

Характерной особенностью современного состояния электрооборудования для передачи и распределения электрической энергии напряжением 6–35 кВ на электротехнических комплексах является обеспечение электромагнитной совместимости, уровня изо-

Kinds and levels of overvoltages influencing onto the electro technical complexes equipment isolation are considered. Nonlinear surge arrestors are proposed to use as the basic elements of the protection system. It is shown that ultrasound usage in the zinc-oxide varistors production allows to manufacture the surge arrestors having the parameters of the up-to-date foreign level.

ляции, параметров энергозащитных устройств и устройств релейной защиты и сетевой автоматики в заданном объеме пространства, частотном и временном диапазоне [1]. Актуальность решения данной задачи особенно возрастает в связи со старением дей-

ствующего оборудования, широким внедрением вакуумной и элегазовой коммутационной аппаратуры, покрытых изоляцией (защищенных) проводов, микропроцессорных устройств, возрастанием доли нелинейных потребителей электроэнергии.

Устройства электротехнических комплексов подвергаются воздействию грозовых, внутренних и временных перенапряжений. Значение выдерживаемых $U_{\text{выд}}$ перенапряжений не должно превышать допустимых значений, связанных с уровнем испытательных напряжений [2, 3].

Грозовые перенапряжения. Опасные грозовые воздействия на воздушных (ВЛ) и кабельных (КЛ) линиях, подстанционном и двигательном электрооборудовании возникают при ударах молний непосредственно в провода и опоры линий, подстанции, распределительные устройства (РУ), а также при приходе по линиям электропередачи (ЛЭП) грозовых волн. Для РУ 6–35 кВ опасны перенапряжения, индуцированные на токоведущих частях при ударах молний в землю или другие объекты вблизи ЛЭП и подстанций.

При ударе молнии в опору ВЛ без троса импульсное напряжение на изоляции состоит из суммы составляющих:

$$U_{\text{ин.п.}}(t) = U_r(t) + U_{\text{ин.м.}}(t) + U_{\text{ин.э.}}(t),$$

где $U_r(t)$ – составляющая, вызванная потерей напряжения на сопротивлении заземления опоры; $U_{\text{ин.м.}}(t)$ – магнитная составляющая индуцированного напряжения, возникающая при протекании тока по опоре и каналу молнии; $U_{\text{ин.э.}}$ – электрическая составляющая напряжения.

Импульсное напряжение при ударе молнии в опору определяется параметрами молнии, геометрическими параметрами опоры и значением сопротивления заземления. Параметры импульса тока при грозовом разряде являются случайной величиной и зависят от скорости главного разряда и эквивалентного сопротивления канала молнии. Длительность фронта грозового импульса для различных точек присоединения составляет 1–10 мкс.

Внутренние перенапряжения. Виды и уровни внутренних перенапряжений в электроустановках 6–35 кВ приведены в табл. 1, откуда следует, что максимальные уровни внутренних перенапряжений имеют место при коммутации нагрузки вакуумными выключателями (до $7,0 U_\phi$), а также при отключении электродвигателей и ненагруженных трансформаторов (до $6,0 U_\phi$).

Временные перенапряжения. В соответствии с ГОСТ 13109-97 "Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения" в электротехнических комплексах может иметь место в среднем за год около 30 временных перенапряжений с параметрами, указанными в табл. 2.

Сопоставление фактического и выдерживаемого уровней перенапряжений, действующих на изоляцию электрооборудования электрических сетей 6–35 кВ, позволяет сделать вывод о необходимости ограничения

Таблица 1

Режимы	Перенапряжение
Включение воздушных и кабельных линий	$3,5 U_\phi$
Отключение воздушных и кабельных линий	$(4,0 \div 4,3) U_\phi$
Отключение ненагруженных трансформаторов	$(5,0 \div 6,0) U_\phi$
Отключение двойного КЗ на землю	$3,3 U_\phi$
Отключение двухфазных КЗ	$(2,0 \div 3,0) U_\phi$
Неодновременное включение фаз при пуске электродвигателей	$(3,0 \div 3,4) U_\phi$
Включение электродвигателей при АВР или АПВ	$4,2 U_\phi$
Отключение электродвигателей	$(4,0 \div 6,0) U_\phi$
Коммутация нагрузки вакуумными выключателями	$(2,6 \div 7,0) U_\phi$
Дуговые замыкания на землю	$(2,3 \div 3,20) U_\phi$
Резонансные повышения напряжения	$2,0 U_\phi$

ния грозовых и коммутационных перенапряжений с применением защитных аппаратов, устройств релейной защиты, сетевой автоматики, и эффективного заземления [4].

Важнейшим звеном в системе защиты от перенапряжений являются нелинейные ограничители перенапряжений (ОПН) на основе оксидно-цинковых варисторов.

ОПН целесообразно подключать на вводах, сборных шинах, отходящих присоединениях и непосредственно у электроприемников; схема соединения – звезда с выведенным на землю нулем. В случае, если не ограничивается длительность ОЗЗ, для обеспечения термической стойкости ОПН значение наибольшего длительно допустимого рабочего напряжения следует принимать равным 7,2 кВ для класса напряжения 6 кВ, 12 кВ для класса напряжения 10 кВ и 40,5 кВ для класса напряжения 35 кВ. Пропускная способность ОПН должна быть не менее 20 импульсов на прямоугольной волне 2000 мкс с амплитудой тока 300–500 А, и следует исключить возможность возникновения длительных резонансных и феррорезонансных перенапряжений в точке установки ОПН.

Наиболее современной конструкцией ограничителей является одноколонковое исполнение с изоляцией из кремнийорганической резины. Поскольку в большинстве случаев причиной выхода из строя ОПН является разгерметизация корпуса, то могут быть рекомендованы ограничители, выполненные по цельнолитой технологии, исключающие ручную сборку. Такие ограничители производят, в частности фирмы АББ, "Тайко", а из отечественных производителей ЗАО "Завод энергозащитных устройств"

Таблица 2

Длительность временного перенапряжения, с	До 1	До 20	До 60
Коэффициент временного перенапряжения, о.е.	1,47	1,31	1,15

(ЗАО "ЗЭУ") (С.-Петербург) и др. ЗАО ЗЭУ освоило производство оксидно-цинковых варисторов (ОЦВ) с применением современных технологических процессов, обеспечивающих высокую стабильность электрических характеристик. Формообразование оксидно-цинковой керамики, металлизация и пайка металлических электродов производятся с применением ультразвука. Защитные аппараты, изготовленные по такой технологии, по своим характеристикам соответствуют требованиям МЭК 99-4 и по эксплуатационным свойствам не уступают зарубежным аналогам.

Ультразвуковое формообразование оксидно-цинковой керамики. В многооперационном процессе изготовления ОЦВ формообразование является одной из основных операций, в которой закладываются будущие характеристики варистора. Основным преимуществом ультразвукового формообразования перед промышленным процессом холодного одноосного прессования является возможность создания изделий сложной конфигурации при одновременном снижении в несколько раз статического усилия прессования.

Физические представления о механизме воздействия мощного ультразвука на керамический порошок были сформулированы на примере процесса, при котором порошок засыпается в прессформу. При этом дно прессформы, соединенное с волноводом ультразвукового преобразователя, совершает продольные колебания [5].

Основные элементы разработанного механизма формообразования ОЦВ включают следующие этапы:

- выбирается частота акустического поля по условию превышения наименьшего размера длины упругой волны;
- в системе, включающей прессформу и рабочую среду – керамический порошок, создается поле упругих волн ультразвуковой частоты;
- из условия необходимости получения трехмерного поля колебательных скоростей частиц среды применительно к прессформе заданных размеров и конфигурации производится выбор способа подвода ультразвуковых колебаний и возбуждения поля;
- с помощью ультразвука производится равномерное перемешивание частиц шихты внутри прессформы.

Наличие составляющих скоростей, нормальных к стенкам прессформы и вектору силы статического давления, обеспечивает снижение силы трения частиц взвеси о стенки прессформы. Воздействие на частицы со стороны стенок прессформы способствует упрочнению граничащего со стенками поверхностного слоя керамического образца.

Структуру керамических образцов, изготовленных по ультразвуковой технологии формообразования, исследовали методом растровой электронной микроскопии. Установлено, что воздействие ультразвука приводит к уменьшению максимальных размеров пор в 4–5 раз и обеспечивает равномерное распределение пор по объему образца.

Ультразвуковая металлизация оксидно-цинковой керамики. В основу процесса положен способ ульт-

развуковой металлизации (УЗМ), реализуемый по схеме "тонкого слоя". Материалом электродов служат двойные и тройные эвтектические сплавы олова, цинка и кадмия. Технология обеспечивает повышенную адгезионную прочность соединения керамики с металлом, улучшение условий труда металлизатора, возможность соединения ОЦВ в колонки посредством пайки, а также возможность механизации процесса [6].

Использование схемы "тонкого слоя" предполагает создание поля ультразвуковых колебаний и волн в жидком слое и в твердом теле. Поле в тонком жидким слое, толщина которого, как правило, много меньше длины продольной волны, представляет собой интерференционное поле продольных волн и бегущих вязких поперечных волн. Ультразвуковой преобразователь вводится в слой жидкости, находящийся на жесткой твердой поверхности, сверху. Жидкость в слое выполняет функции акустического контакта, а также среды, в которой создаются необходимые для протекания технологического процесса УЗМ кавитация и акустические течения. В очень тонких слоях частицы жидкости совершают продольно-поперечные колебания. В пограничных слоях вблизи жесткой поверхности эти колебания создают гигантские градиенты скоростей, а вблизи мягкой границы – давлений. В свою очередь, кавитационные пузырьки генерируют мелкомасштабные течения. Поле в слое жидкости и вторичные акустические эффекты воздействуют на процессы смачивания твердого тела жидкостью, диффузию жидкости по границам зерен твердого тела и, при определенном сочетании жидкой и твердой фаз, инициируют физико-химическое взаимодействие фаз на границе их раздела. Для воздействия на поверхность твердого тела создается упругая волна на границе с жидким слоем. Скорость распространения волны, глубина ее проникновения в твердое тело, колебательные скорости частиц тела зависят от соотношения акустических свойств жидкости и твердого тела.

С использованием указанных технологий изготавливаются защитные устройства на основе варисторов диаметром от 35 до 120 мм и высотой от 6 до 26 мм. По дизлектрическим и физико-механическим характеристикам изготовленные крупногабаритные ОЦВ не уступают лучшим зарубежным образцам. В то же время по одной из определяющих электрических характеристик – амплитуде тока пропускной способности новые ОЦВ превзошли в два раза зарубежные аналоги. Так, оксидно-цинковые диски выдержали воздействие 20 импульсов тока длительностью 2000 мкс и амплитудой 2 кА.

В ЗАО "ЗЭУ" разработаны технологии производства защитных аппаратов в климатических исполнениях УХЛ1 и УХЛ2 без применения стеклопластиковых цилиндров. Колонка варисторов в исполнении УХЛ1 заливается композитным материалом на основе полиамида. На цилиндр данного композита напрессовываются ребра из полимерного материала на

Таблица 3

Параметр	Тип ограничителя				
	ОПН-П-6/7,2/10/1	ОПН-П-6/7,2/10/2	ОПН-П-10/12,0/10/1	ОПН-П-10/12,0/10/2	ОПН-П-35/40,5/10/2
Класс напряжения сети, кВ	6,0	6,0	10,0	10,0	35,0
Наибольшее длительно допустимое рабочее напряжение $U_{\text{н.р.}}$, кВ	7,2	7,2	12,0	12,0	40,5
Номинальный разрядный ток 8/20 мкс, кА	10	20	10	20	10,0
Напряжения, кВ, на ОПН при импульсе тока 30/60 мкс с амплитудой не более, А:					
– 250	17,0	17,0	28,4	28,4	96,0
– 500	17,5	17,3	29,0	29,0	98,0
– 1000	18,0	17,9	30,0	30,0	101,0
Напряжения, кВ, на ОПН при импульсе тока 8/20 мкс с амплитудой не более, А:					
– 5	23,5	21,5	38,0	36,0	118,0
– 10	24,5	23,0	40,0	38,0	127,0
– 20	27,0	25,3	45,0	42,0	141,0
Амплитуда импульса большого тока 4/10 мкс, кА	80	100	80	100	100
Напряжение на ОПН, кВ, при импульсе 1/4 мкс с амплитудой номинального разрядного тока не более	27,0	25,2	45,0	42,0	144,0
Амплитуда прямоугольного импульса тока пропускной способности, А	300	450	300	450	420

основе кремнийорганической резины. Выбранный материал имеет хорошую адгезию с кремнийорганической резиной, что обеспечивает ОПН высокие изоляционные свойства. Аппараты в исполнении УХЛ2 выпускаются в корпусах из стеклонаполненного морозоустойчивого ударопрочного материала. Аппараты герметичны, взрывобезопасны, трекинг-эрзационностойки и пожаробезопасны.

Основные электрические характеристики ОПН 6–35 кВ приведены в табл.3.

В настоящее время в эксплуатации находится более 50000 защитных аппаратов. Они установлены во многих энергосистемах и используются промышленными предприятиями, в том числе Мосэнерго, Минскэнерго, РАО "Газпром", ОАО "Татнефть", АО "Юганскнефтегаз", ОАО "ЛУКОЙЛ-Пермьнефть", ОАО "Тюменьнефтегаз", Горьковской ж.д., АО "Ростелеком" и др. За период с 1990 г. по настоящее время практически не было случаев отказов ОПН. Зарегистрировано значительное снижение аварийнос-

ти электротехнических комплексов, связанных с повреждением изоляции.

Список литературы

1. ГОСТ Р 50397-92. Совместимость технических средств электромагнитная.
2. РД 153-34.3-35.125-99. Руководство по защите электрических сетей 6–1150 кВ от грозовых и внутренних перенапряжений. СПб: ПЭИпк Минтопэнерго РФ, 1999.
3. РД 34.45-51.300-97. Объем и нормы испытаний электрооборудования. М.: НЦ ЭНАС, 1998.
4. Абрамович Б.Н., Кабанов С.О., Сергеев А.М., Полищук В.В. Перенапряжения и электромагнитная совместимость оборудования электрических сетей 6–35 кВ // Новости электротехники. 2002. №5.
5. Пат. №2100313 РФ. Способ изготовления изделий из порошка / А.А. Ерофеев, Г.М. Иманов, М.А. Красавина и др. // Открытия. Изобретения. 1997. № 36.
6. Пат. №1720260 РФ. Способ ультразвуковой металлизации изделий / Г.Л. Лубеницкий, М.А. Красавина и др. // Открытия. Изобретения. 1998. № 46.

Редактор отдела О.В. Кунавина.
Научный редактор Л.А. Романова.
Редактор Т.В. Штанько.

Сдано в набор 24.02.2003. Подписано в печать 10.04.2003. Формат 60×88 1/8

Бумага офсетная № 1. Печать офсетная. Печ. л. 8. Заказ 91

Цена свободная. Тираж 1000 экз. Зарегистрирован Комитетом РФ по печати, регистрационный №01330.

Макет выполнен и отпечатан в ОАО «Электропривод»
107078, Москва, ул. Садовая Спасская, 1/2, стр. 5

Сведения об авторах опубликованных статей

Абрамович Борис Николаевич – профессор С.-Петербургского государственного горного института (ТУ), доктор техн. наук. Окончил горно-электромеханический факультет Ленинградского горного института в 1961 г. Защитил диссертацию по теме «Электромеханические комплексы с синхронными двигателями и полупроводниковым возбуждением» в 1986 г.



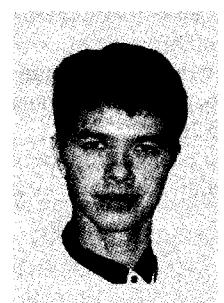
Алексеев Денис Васильевич – аспирант кафедры электротехники, вычислительной техники и автоматизации С.-Петербургского института машиностроения (ЛМЗ-ВТУЗ). Окончил С.-Петербургский институт машиностроения в 2001 г. по специальности «Автоматизация технологических процессов и производств».



Антонюк Олег Викторович – главный технолог по механической обработке и сборке ОАО «Электросила». Окончил электромеханический факультет Ленинградского политехнического института в 1984 г.



Батаев Сергей Николаевич – магистр техники и технологий, аспирант С.-Петербургского государственного горного института (ТУ). Окончил горно-электромеханический факультет С.-Петербургского государственного горного института в 2002 г. Защитил магистерскую диссертацию по теме "Электротехнические комплексы для теплового воздействия на нефтяные продуктивные пласты" в 2002 г.



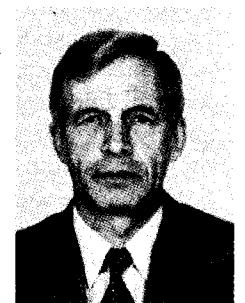
Безменов Феликс Васильевич – генеральный директор ФГУТ ВНИИТВЧ. Окончил механико-машиностроительный факультет Северо-Западного заочного политехнического института в 1961 г. Защитил докторскую диссертацию по теме «Электротехнологические проблемы сварки термопластичных материалов в переменных электромагнитных полях» в 1961 г. Академик С.-Петербургской инженерной академии.



Белов Михаил Петрович – доцент кафедры «Робототехника и автоматизация производственных систем» С.-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И.Ульянова (Ленина)» (СПбГЭТУ), канд. техн. наук. Окончил факультет электротехники и автоматизации Ленинградского электротехнического института им. В.И.Ульянова (Ленина) в 1981 г. Защитил диссертацию по теме «Автоматизация синтеза и исследования микропроцессорных систем управления прецизионными взаимосвязанными электроприводами» в 1989 г.



Васильев Александр Сергеевич – заслуженный деятель науки и техники РФ, профессор СПбГЭТУ. Окончил электроэнергетический факультет Ленинградского электротехнического института (ЛЭТИ) в 1949 г. Защитил докторскую диссертацию по теме «Статические преобразователи частоты для индукционного нагрева» в 1972 г.



Гиммельман Вадим Георгиевич – главный конструктор направления Федерального государственного унитарного предприятия «Конструкторское бюро специального машиностроения (ФГУП «КБСМ»). Окончил механический факультет Ленинградского механического института в 1971 г.



Демидов Сергей Владимирович – технический директор ОАО «Особое конструкторское бюро станкостроения», главный специалист ЗАО «Станкозавод «Свердлов», доцент С.-Петербургского института машиностроения (ВТУЗ). Окончил факультет автоматики и вычислительной техники ЛЭТИ в 1961 г. Защитил кандидатскую диссертацию по теме «Разработка и исследование быстродействующей следящей системы копировально-фрезерного станка с тиристорным приводом подачи» в ЛЭТИ в 1970 г.



Демидович Виктор Болеславович – доцент СПбГЭТУ. Окончил факультет электротехники и автоматизации Ленинградского электротехнического института (ЛЭТИ) в 1973 г. Защитил докторскую диссертацию по теме «Теория, исследования и разработка индукционных нагревателей для металлургической промышленности» в 2002 г.



Добриклин Борис Захарович – главный конструктор по электроприводу ОАО «Электросила», начальник отдела электропривода ОАО «Электросила». Окончил Ленинградский политехнический институт в 1961 г.

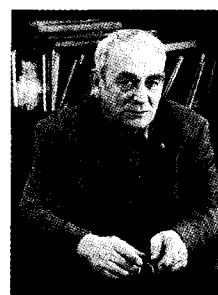


Кабанов Сергей Олегович – генеральный директор завода энергозащитных устройств. Окончил электромеханический факультет Ленинградского горного института в 1987 г.

Епишкин Александр Евгеньевич – старший преподаватель кафедры электротехники, вычислительной техники и автоматизации С.-Петербургского института машиностроения (ЛМЗ-ВТУЗ). Окончил С.-Петербургский институт машиностроения в 1998 г. Защитил кандидатскую диссертацию по теме «Исследование и оптимизация взаимосвязанных электромеханических систем автоматизированных вибрационных установок» в 2002 г.



Кади-Оглы Ибрагим Ахмедович – главный конструктор, начальник отдела турбогенераторов ОАО «Электросила», канд. техн. наук.



Карзунов Роман Анатольевич – инженер-конструктор отдела электропривода ОАО «Электросила». Окончил Ленинградский институт авиационного приборостроения в 1993 г. по специальности «электрооборудование летательных аппаратов».



Загривный Эдуард Анатольевич – доцент С.-Петербургского государственного горного института (ТУ). Окончил горно-электромеханический факультет Ленинградского горного института в 1963 г. Защитил докторскую диссертацию по теме "Динамические модели и устойчивость подсистем исполнительный орган - залог горной машины" в 1996 г.



Ковчин Сергей Александрович – профессор С.-Петербургского государственного политехнического университета (СПБГПУ), доктор техн. наук. Окончил электромеханический факультет СПБГПУ (ЛПИ) в 1951 г. Защитил диссертацию по теме «Основные вопросы теории и принципы построения точных электроприводов» в 1974 г.

Золотарев Владимир Федорович – генеральный директор ЗАО «Сев-Евродрайф». Окончил факультет технической кибернетики Ленинградского политехнического института в 1982 г.



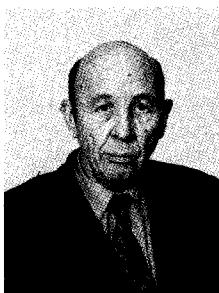
Козярук Анатолий Евтихиевич – профессор С.-Петербургского государственного горного института (ТУ), доктор техн. наук. Окончил факультет автоматизации Харьковского авиационного института в 1961 г. и математико-механический факультет Ленинградского государственного университета в 1972 г. Защитил диссертацию по теме «Силовые судовые электромеханические системы с полупроводниковыми преобразователями (теория и практика)» в 1987 г.



Иванов Владимир Николаевич. Окончил электротехнический факультет Ленинградского электротехнического института им. В.И.Ульянова (Ленина) (ЛЭТИ) в 1959 г. Защитил кандидатскую диссертацию по теме «Высокочастотная сварка металлов» в 1968 г., докторскую диссертацию по теме «Высокочастотная сварка металлов. Исследования, разработки, внедрение» в 1984 г.



Красавина Марианна Анатольевна – главный инженер завода энергозащитных устройств. Окончила электрофизический факультет Ленинградского электротехнического института в 1973 г. В 1990 г. защитила кандидатскую диссертацию по ультразвуковым технологиям.



Крутаков Евгений Александрович – ведущий инженер отдела электропривода ОАО «Электросила». Окончил Саратовский институт механизации сельского хозяйства в 1961 г. по специальности «электрификация процессов сельскохозяйственного производства». Защитил кандидатскую диссертацию в 1971 г. по теме «Энергетические соотношения в статических инверторах и в частотно-регулируемой системе инвертор – асинхронный двигатель».



Павлов Павел Аркадьевич – ведущий инженер отдела электропривода ОАО «Электросила». Окончил Ленинградский институт точной механики и оптики в 1997 г. по специальности «вычислительные машины, комплексы, системы и сети».

Логинов Александр Гаврилович – главный конструктор систем возбуждения ОАО «Электросила». Окончил факультет электрификации и автоматизации Ленинградского электротехнического института в 1977 г.



Пинский Григорий Борисович – главный конструктор по гидрогенераторам ОАО «Электросила». Окончил электромеханический факультет Ленинградского политехнического института в 1957 г. Защитил кандидатскую диссертацию по теме «Некоторые вопросы проектирования крупных гидрогенераторов» в 1968 г.



Нагибина Ольга Леонидовна – доцент кафедры электротехники, вычислительной техники и автоматизации С.-Петербургского института машиностроения (ЛМЗ-ВТУЗ). Окончила С.-Петербургский институт машиностроения в 1993 г. по специальности «Автоматизация технологических процессов и производств». Защищила кандидатскую диссертацию по теме «Синтез алгоритмов управления электромеханическими системами вибрационных установок» в 1998 г.



Пинчук Николай Дмитриевич – главный инженер ОАО «Электросила». Окончил электромеханический факультет Ленинградского политехнического института в 1965 г.

Новиков Владислав Александрович – процессор кафедры «Робототехника и автоматизация производственных систем» С.-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина) (СПбГЭТУ), доктор техн. наук. Окончил Красноярский политехнический институт в 1961 г. Защитил диссертацию по теме «Теория принципов построения и реализация систем управления взаимосвязанными электроприводами».



Полищук Вадим Васильевич – главный инженер инновационной электротехнической инжиниринговой компании «Оптима». Окончил электромеханический факультет С.-Петербургского государственного горного института в 1993 г. В 1996 г. защитил кандидатскую диссертацию по управлению режимами напряжения.



Постников Юрий Владимирович – доцент кафедры «Робототехника и автоматизация производственных систем» С.-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ». Окончил факультет электротехники и автоматизации ЛЭТИ в 1967 г. Защитил диссертацию по теме «Теоретические и экспериментальные исследования тиристорных следящих электроприводов высокой точности для больших антенных установок» в 1973 г.



Пронин Михаил Васильевич – начальник бюро отдела электропривода ОАО «Электросила». Окончил факультет ФКЭА Ленинградского электротехнического института в 1969 г. по специальности «электрооборудование судов». Защитил кандидатскую диссертацию в 1988 г. по теме «Разработка и применение математических моделей синхронных машин и полупроводниковых преобразователей для исследования гребных электрических установок ледоколов».



Сабинин Юрий Алексеевич – профессор С.-Петербургского института точной механики и оптики (ТУ), доктор техн. наук. Окончил электромеханический факультет Ленинградского политехнического института (ЛПИ) в 1938 г. Докторскую диссертацию по теме «Специальные вопросы теории и практики следящего привода» защитил в 1964 г.

Рассудов Лев Николаевич – профессор кафедры «Робототехника и автоматизация производственных систем» С.-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И.Ульянова (Ленина) (СПбГЭТУ), доктор техн. наук. Окончил факультет электротехники и автоматизации Ленинградского электротехнического института им. В.И.Ульянова (Ленина) в 1963 г. Защитил диссертацию по теме «Теория и расчет сложных электромеханических систем управления производством оболочек из композитных материалов».



Соколовский Георгий Георгиевич – профессор кафедры «Робототехника и автоматизация производственных систем» С.-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ». Окончил энергетический факультет ЛЭТИ в 1954 г. Защитил диссертацию по теме «Системы управления тиристорными электроприводами крупных антенных установок и оптических телескопов» в 1985 г.



Сушников Антон Александрович – младший научный сотрудник С.-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И.Ульянова (Ленина) (СПбГЭТУ). Окончил Ижевский государственный технический университет в 2001 г.



Рудаков Виктор Викторович – доцент С.-Петербургского государственного горного института (ТУ). Окончил факультет электрификации и автоматизации Ленинградского электротехнического института в 1973 г. Защитил кандидатскую диссертацию по теме «Многодвигательный тиристорный электропривод с аналого-цифровым управлением и самонастройкой для механизмов горизонтального перемещения» в 1990 г.



Рыбаков Валерий Леонидович – заместитель начальника технологического управления ОАО «Электросила». Окончил электромеханический факультет Ленинградского института авиационного приборостроения в 1976 г.

Шестаков Вячеслав Михайлович – заведующий кафедрой электротехники, вычислительной техники и автоматизации С.-Петербургского института машиностроения (ЛМЗ-ВТУЗ), профессор. Окончил факультет электротехники и автоматизации Ленинградского электротехнического института им. В.И.Ульянова (Ленина) (ЛЭТИ) в 1962 г. Защитил докторскую диссертацию по теме «Исследование, разработка научных основ и способов совершенствования многодвигательных электроприводов высокопроизводительных агрегатов бумагоделательного производства» в 1989 г.

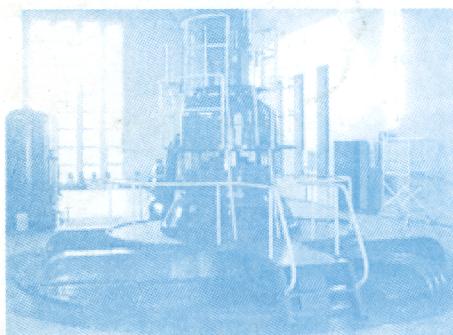
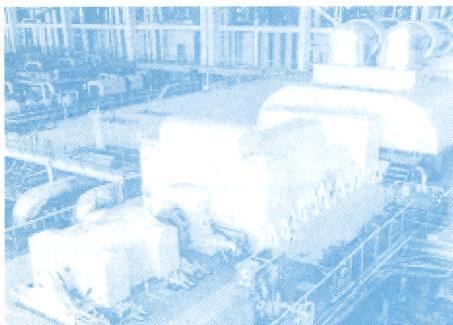


Шклярский Ярослав Элиевич – доцент С.-Петербургского государственного горного института (ТУ), канд. техн. наук. Окончил горно-электромеханический факультет Ленинградского горного института в 1974 г. Защитил диссертацию по теме «Продольно-поперечная емкостная компенсация в рудничных электрических сетях» в 1985 г.





ОАО "Электросила" входит в состав концерна "Силовые машины".



ОАО "Электросила" обеспечивает долговременное сервисное обслуживание оборудования и предоставляет полный спектр сервисных услуг: шеф-монтажные и пусконаладочные работы, модернизацию и ремонт оборудования, поставку запасных частей, экспертизу технического состояния электрооборудования, технические консультации и обучение персонала.



Система качества соответствует международному стандарту серии ISO 9001. Продукция отвечает требованиям стандартов МЭК и других международных стандартов.

ОАО "Электросила" — первое в России предприятие по производству электрических машин. Основано в 1898 г.



Работает на рынке электроэнергетического оборудования с 1924 г. и за это время завоевало лидирующие позиции среди крупнейших производителей аналогичного профиля как в России, так и за рубежом.

Продукция ОАО "Электросила" находит применение в важнейших отраслях промышленности, включая предприятия топливно-энергетического комплекса и транспорт. Электрические машины с торговой маркой "Электросила" эксплуатируются в 87 странах мира.

ОСНОВНЫЕ ВИДЫ ПРОДУКЦИИ

Синхронные генераторы для сопряжения с паровыми, газовыми, гидравлическими турбинами и дизельными двигателями с диапазоном мощностей от 0,1 до 1500 МВт.

Системы возбуждения для турбо- и гидрогенераторов: системы тиристорные независимые, самовозбуждения и бесщеточные диодные системы возбуждения.

Системы управления, контроля и диагностики генераторов.

Генераторы постоянного тока для питания электродвигателей главных приводов и вспомогательных механизмов прокатных станов (мощностью от 2 до 10 МВт) и вспомогательных механизмов карьерных экскаваторов (мощностью от 0,2 до 2,5 МВт).

Электродвигатели постоянного тока мощностью от 90 до 14000 кВт различного типа исполнения для использования в механизмах широкого спектра применения различных отраслей промышленности и судостроения.

Асинхронные (мощностью от 75 до 2500 кВт) и синхронные электродвигатели переменного тока мощностью от 250 до 22000 кВт.

Тяговые электродвигатели переменного и постоянного тока для привода электроподвижного состава городского и пригородного электротранспорта и большегрузных карьерных самосвалов мощностью от 50 до 640 кВт.

Электрооборудование для электроприводов постоянного и переменного тока, включая комплектные тиристорные и низковольтные устройства.

Аппаратура управления и коммутации электрических машин.



Россия, 196105 Санкт-Петербург, Московский пр., 139
тел.: +7(812) 387-95-34 факс: +7(812) 388-18-14
e-mail: elsila@elsila.spb.ru
http://www.electrosila.ru