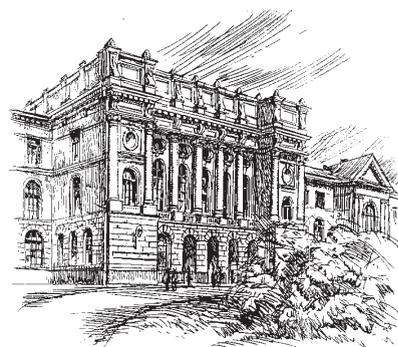


3(130)/2011



# Научно-технические ведомости СПбГПУ

НАУКА И ОБРАЗОВАНИЕ

Санкт-Петербург. Издательство Политехнического университета

Министерство образования и науки РФ  
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет

# НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ВЕДОМОСТИ СПбПУ

## РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ ЖУРНАЛА

*Васильев Ю.С.*, академик РАН (председатель); *Алферов Ж.И.*, академик РАН;  
*Костюк В.В.*, академик РАН; *Лопота В.А.*, чл.-кор. РАН;  
*Окрепилов В.В.*, чл.-кор. РАН; *Патон Б.Е.*, академик НАН Украины и РАН;  
*Рудской А.И.*, чл.-кор. РАН; *Федоров М.П.*, чл.-кор. РАН;  
*Фортов В.Е.*, академик РАН.

## РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ ЖУРНАЛА

*Васильев Ю.С.*, академик РАН (главный редактор); *Арсеньев Д.Г.*, д-р техн. наук, профессор;  
*Бабкин А.В.*, д-р экон. наук, профессор (зам. гл. редактора);  
*Боронин В.Н.*, д-р техн. наук, профессор; *Глухов В.В.*, д-р экон. наук, профессор;  
*Дегтярева Р.В.*, д-р ист. наук, профессор; *Иванов А.В.*, д-р техн. наук;  
*Иванов В.К.*, д-р физ.-мат. наук, профессор; *Козловский В.В.*, д-р физ.-мат. наук, профессор;  
*Рудской А.И.*, чл.-кор. РАН (зам. гл. редактора); *Юсупов Р.М.*, чл.-кор. РАН.

## СЕРИЯ «НАУКА И ОБРАЗОВАНИЕ»

### РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ СЕРИИ

*Васильев Ю.С.*, академик РАН — председатель;  
*Арсеньев Д.Г.*, д-р техн. наук, профессор;  
*Башкарев А.Я.*, д-р техн. наук, профессор;  
*Глухов В.В.*, д-р экон. наук, профессор;  
*Козлов В.Н.*, д-р техн. наук, профессор;  
*Рудской А.И.*, д-р техн. наук, профессор;  
*Федотов А.В.*, д-р экон. наук, профессор.

### РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ СЕРИИ

*Васильев Ю.С.*, академик РАН — председатель;  
*Акопова М.А.*, д-р пед. наук, профессор;  
*Боронин В.Н.*, д-р техн. наук, профессор — зам. председателя;  
*Дегтярева Р.В.*, д-р ист. наук, профессор — зам. председателя;  
*Иванов А.В.*, д-р техн. наук;  
*Ильин В.И.*, д-р физ.-мат. наук, профессор;  
*Кузнецов Д.И.*, д-р филос. наук;  
*Матенев О.А.*, технический секретарь;  
*Снетков В.Н.*, д-р полит. наук, профессор.

Журнал выходит под научно-методическим руководством Российской академии наук с 1995 года.

С 2002 года журнал включен в Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук.

Журнал издается в пяти сериях:

*Наука и образование;*  
*Физико-математические науки;*  
*Экономические науки;*  
*Информатика, телекоммуникации, управление;*  
*Гуманитарные и общественные науки.*

Журнал зарегистрирован в Госкомпечати РФ. Свидетельство № 013165 от 23.12.94.

Подписной индекс **18390** в каталоге «Газеты. Журналы» агентства «Роспечать».

С 2005 года журнал включен в базу данных «Российский индекс научного цитирования» (РИНЦ), размещенную на платформе Национальной электронной библиотеки на сайте <http://www.elibraru.ru>.

При перепечатке материалов ссылка на журнал обязательна.

Точка зрения редакции может не совпадать с мнением авторов статей.

Адрес редакции и издательства: Россия, 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29. Тел. редакции серии (812) 294-47-72.

© Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, 2011

## Содержание

### К 50-летию полета Ю.А. Гагарина

<b>Юревич Е.И.</b> Вклад ЦНИИ РТК в космонавтику .....	9
--	---

### Энергетика и электротехника

<b>Некрасов С.А.</b> О повышении энергоэффективности Российской экономики .....	13
<b>Фортов В.Е., Федоров М.П., Елистратов В.В.</b> Гидроэнергетика после аварии на Саяно-Шушенской ГЭС .....	17
<b>Ванин В.К., Попов М.Г., Попов С.О.</b> Повышение эффективности дифференциальных защит энергетического оборудования .....	27
<b>Артёмов А.В.</b> Методика расчета мощности воздушной турбины при использовании пневмоаккумулятора высокого давления .....	32
<b>Беркович А.Л., Полищук В.Г.</b> Впрыск нагретой воды в компрессор газотурбинной установки .....	35
<b>Нахди Т., Ватаев А.С.</b> Исследование высокочастотных параметров частотнорегулируемых асинхронных двигателей .....	38
<b>Куприянов А.С., Журавлев А.Н.</b> Выбор источника питания для электролитно-плазменного полирования цветных сплавов в проточном электролите .....	41
<b>Лapidус А.А., Соловьёва С.Н.</b> Анализ термического действия токов короткого замыкания в кабельных линиях напряжением 0,4 кВ в зависимости от места повреждения .....	46
<b>Плотников И.Г., Устинов Д.А.</b> Оптимизация режимов пуска электромеханического комплекса с синхронным двигателем .....	50
<b>Попов М.Г.</b> Совершенствование методов численного расчета расстояния до места повреждения воздушных линий электропередачи .....	54
<b>Тебуева Ф.Б., Торопцев Е.Л., Перепелица В.А.</b> Краткосрочное прогнозирование процесса ветрогенерации методом клеточных автоматов .....	61
<b>Бажанов В.В., Щуклинов А.П., Самченков И.В.</b> Оценка возможности использования электро-теплоаккумуляции на АЭС с ВВЭР .....	70
<b>Киселёв В. Г.</b> Основные принципы проектирования протекторной защиты подземных металлических сооружений .....	75
<b>Севастьянова А.В., Смоловик С.В.</b> Разработка алгоритма выявления возможности каскадного развития аварийных процессов в энергосистеме и мероприятий его предотвращения .....	80
<b>Молодкина М.А.</b> Возможности энергосбережения на парогазовых тепловых электростанциях большой мощности за счет утилизации выбросов низкопотенциальной теплоты продувки градирни .....	84

### Машиностроение

<b>Юревич Е.И.</b> Мини- и микроробототехника .....	89
<b>Будько И.А., Волков А.Н., Челпанов И.Б.</b> Задачи механики змееподобных роботов .....	91
<b>Добрецов Р.Ю.</b> К вопросу теоретической оценки эксплуатационных свойств шасси транспортных гусеничных машин .....	98
<b>Авотин Е.В., Добрецов Р.Ю.</b> Методика расчета нормальных давлений на опорной поверхности гусеницы транспортной машины .....	103

<b>Леонов Ю.А., Казаков Ю.М.</b> Многокритериальный выбор рациональных схем базирования заготовки при решении задачи синтеза единичных технологических процессов .....	108
<b>Кожубаев Ю.Н., Прокофьев О.В., Семёнов И.М.</b> Имитационная модель ленточного конвейера .....	116
<b>Шлепетинский А.Ю., Манжула К.П.</b> Коэффициенты интенсивности напряжений при росте трещины от непровара в тавровом сварном соединении, нагруженном поперечной силой .....	122
<b>Латышенко М.Б., Шемякин А.В., Соловьёва С.П., Морозова Н.М.</b> Исследование теплового баланса сельскохозяйственной техники при её хранении .....	129
<b>Волков А.Н., Гичев Ю.В., Дьяченко В.А., Петкова А.П.</b> Проблемы разработки и исследования вариантов конструкции автоматизированного оборудования для высокоскоростной намотки аморфной ленты .....	132

### Металлургия и материаловедение

<b>Туричин Г.А., Цибульский И.А., Кузнецов М.В., Сомонов В.В.</b> Решение обратной задачи по определению параметров режима гибридной Laser-MAG сварки для получения требуемых свойств сварного соединения стали 09Г2ФБЮ .....	139
<b>Камзин Ж.Ж., Выступов С.И., Янко Э.А.</b> О растворимости глинозема и криолито-глиноземной корки в электролите алюминиевых электролизеров АО «КЭЗ» .....	144
<b>Кириллов Н.Б., Петкова А.П., Звягин В.Б., Яковицкая М.В.</b> Разработка радиационно-стойкой дисперсионно-твердеющей хромоникелевой стали для внутрикорпусных систем атомных энергетических установок .....	149
<b>Нестеренко Д.Л., Шевченко Д.В., Боровков А.И., Сараев Д.Ю.</b> Конечно-элементное исследование процесса прокатки в геликоидальных валах .....	155
<b>Панченко О.В.</b> Сравнение методов определения диффузионного водорода .....	162
<b>Харченко Е.М., Жумашев К., Пикалова И.А.</b> Твердофазное восстановление меди и свинца металлическим железом .....	167
<b>Чуркин И.С.</b> Повышение эффективности нанесения покрытий воздушно-плазменным методом .....	171
<b>Гиршов В.Л., Цеменко В.Н., Мазуров С.А.</b> Исследование влияния дефектов структуры на прочность порошковых быстрорежущих сталей .....	175

### Строительство

<b>Деркач В.Н.</b> Анизотропия прочности каменной кладки при сжатии .....	181
<b>Кондрашов А.А.</b> Технологические решения для защиты природно-технических систем транспортно-строительной деятельности .....	186

### Природопользование

<b>Федотов А.И.</b> Технологии, позволяющие повысить производительность труда на предприятиях .....	191
<b>Аль-Ахваль Н.С., Семин Е.Г.</b> Характеристики фильтрации и грунтовых вод загрязнения на полигоне твердых отходов в городе Сана (Йемен) .....	203
<b>Москвин П.А., Мартынюк Ю.Н.</b> Внедрение альтернативного топлива в мире .....	211

### Моделирование. Математические методы

<b>Галёркин Ю.Б., Карпов А.Н., Кожухов Ю.В.</b> Моделирование напорной характеристики центробежного компрессорного колеса .....	217
<b>Космач В.Ф.</b> Квантово-механический анализ абсолютной палеомагнитной геохронологической шкалы .....	220
<b>Поспелов А.Ю., Жарковский А.А.</b> Расчет течения и прогнозирование гидравлических качеств гидротурбин .....	227
<b>Смирнов С.А., Колгатин С.Н.</b> Неустойчивость течения газа в HVPE реакторе с присоединенным барботером .....	231

<b>Коджаспиров Г.Е., Терентьев М.И.</b> Физическое моделирование эволюции зеренной структуры аустенитного сплава в процессе горячей пластической деформации .....	236
<b>Кукаленко Б. Д., Чулкин С.Г.</b> Нагрев поверхности трения шинно-пневматических муфт агрегатов нефтебуровых и газобуровых установок .....	241
<b>Бызов А.П.</b> Оценка вероятности поражения человека тепловым излучением с учетом перемещения в безопасную зону .....	247
<b>Куранова М.Л., Спивак И.М.</b> Эпигенетические изменения при атаксии — телеангиэктазии .....	252
<b>Воробьев В.А.</b> Использование метода переходных процессов для дистанционного определения электропроводностей проводящих объектов в виде оболочек вращения .....	256
<b>Чулин С.Л.</b> Приближенная оценка области устойчивости решения линейных систем дифференциальных уравнений с неопределенными коэффициентами .....	261
<b>Егоров М.Ю., Соколов К.В., Блинов М.А., Беленький М.Я., Смолкин Ю.В., Кругликов П.А., Федорович Е.Д.</b> Результаты модернизации сепараторов-пароперегревателей турбоустановок на четвертом блоке Ленинградской АЭС .....	263
<b>Борисевич А.В., Смородов А.В.</b> Управление электролизной ячейкой для обеззараживания воды на основе нелинейных стационарных моделей .....	272

#### Вопросы образования

<b>Речинский А.В.</b> Возможности использования технологии интеллектуального анализа данных для задач управления вузом .....	279
<b>Рогов И.М.</b> О культуре и патриотизме .....	288
<b>Симоненко И.В., Шалашов Е.В.</b> Пути интеграции военных и гражданских вузов России .....	292

#### Хроника событий

<b>Кесаманлы Ф.П.</b> Политехники – трижды Герои Социалистического Труда. Академик Игорь Васильевич Курчатov .....	297
<b>Умов В.А., Жарковский А.А.</b> Кафедра «Гидромашиностроение» (история создания и развития) .....	306
<b>Ларионов Б.</b> Ленинградский политехнический институт — Санкт-Петербургский государственный политехнический университет в фалеристике .....	317
Сведения об авторах, контактные данные .....	322
Аннотации, ключевые слова .....	331

## Contents

### On the 50th anniversary of flight UA Gagarin

<b>Yurevich E.I.</b> <i>The contribution of the CRI of RTC in space exploration .....</i>	9
---	---

### Power engineering and electrical engineering

<b>Nekrasov S.A.</b> <i>Improving the energy efficiency of the Russian economy .....</i>	13
<b>Fortov V.E., Fedorov M.P., Elistratov V.V.</b> <i>Hydropower after the accident at the hydroelectric Shushenskaya</i>	17
<b>Vanin V.K., Popov M.G., Popov S.O.</b> <i>Increase of efficiency of differential protection of the power equipment ..</i>	27
<b>Artyomov A.V.</b> <i>To calculation of capacity of the air turbine at use of the pneumoaccumulator of the high pressure .....</i>	32
<b>Berkovich A.L., Polichuk W.G.</b> <i>Injection of heated water in the air engine gas-turbine plants .....</i>	35
<b>Nahdi T., Vataev A.S.</b> <i>Investigation of high-frequency parameters of variation-speed induction motors ...</i>	38
<b>Kupriyanov, A.S., Zhuravlev A.N.</b> <i>Choice power supply for electrolytic-plasma polishing non-ferrous alloys in flow electrolyte .....</i>	41
<b>Lapidus A.A., Solovjeva S.N.</b> <i>The analysis of thermal action of currents of short circuit in cable lines voltage 0,4 kV depending on the damage place .....</i>	46
<b>Plotnikov I.G., Ustinov D.A.</b> <i>Optimization of mode start up of electromechanical complex with synchronous motor .....</i>	50
<b>Popov M.G.</b> <i>Perfection of methods of numerical calculation of distance to the place of damage of air-lines of the electricity transmission .....</i>	54
<b>Tebueva F.B., Toroptsev E.L., Perepelitsa V.A.</b> <i>Short-term forecasting wind power generation process by cellular automata .....</i>	61
<b>Bazhanov V.V., Shchuklinov A.P., Samchenkov I.V.</b> <i>Estimation of possibility of using thermal energy accumulation on the nuclear power plant uses reactor called VVER .....</i>	70
<b>Kiselev V.G.</b> <i>Basic principles of the design of the protector protection of underground metallic construction</i>	75
<b>Sevastyanova A.V., Smolovik S.V.</b> <i>The algorithm for the identification of possible cascade outage development in a power system and ways of their prevention .....</i>	80
<b>Molodkina M.A.</b> <i>Research of the possibilities of efficiency by means of utilization the low-potential heat of water-cooling tower's waste water in combined-cycle power plant with high power capacity .....</i>	84

### Mechanical engineering

<b>Yurevich E.I.</b> <i>Mini and microrobotics .....</i>	89
<b>Budko I.A., Volkov A.N., Chelpanov I.B.</b> <i>Problems of mechanics of colubrine robots .....</i>	91
<b>Dobretsov R.Yu.</b> <i>To the question of the theoretical estimation of operational properties the chassis of caterpillar .....</i>	98
<b>Avotin E.V., Dobretsov R.Yu.</b> <i>Methods for calculation of normal pressure, acting on the ground contacting area of the track of the transport vehicle .....</i>	103

<b>Leonov Y.A., Kazakov Y.M.</b> <i>Multicriterial the choice of rational schemes of basing of preparation at synthesis of individual technological processes</i> .....	108
<b>Kozhubaev U.N., Prokofiev O. V., Semenov I.M.</b> <i>The simulator of the band conveyor</i> .....	116
<b>Shlepetinskiy A.Yu., Manzhula C.P.</b> <i>Stress intensity factors for weld root crack in t-joint loaded shear force</i> .....	122
<b>Latyshenok M.B., Shemyakin A.V., Solovieva S.P, Morozova N.M.</b> <i>Investigation of heat balance of agricultural machinery as during its storage</i> .....	129
<b>Volkov A.N., Gichev J.V., Dyachenko V.A., Petkova A.P.</b> <i>Problems of development and research design options for high-speed automated equipment wound amorphous ribbon</i> .....	132

### Metallurgy and materials technology

<b>Turichin G.A, Tsibulskij I.A., Kuznetsov M.V., Somonov V.V.</b> <i>The decision of the return problem by definition of parameters of the mode hybrid Laser-MAG weldings for reception of demanded properties of welded connection of the steel 09G2FBYU</i> .....	139
<b>Kamzin J.J., Vystupov S.I., Yanko E.A.</b> <i>On the solubility of alumina and cryolite-alumina in the electrolyte crust aluminum electrolytic JSC «KAS»</i> .....	144
<b>Kirillov N.B., Petkova A.P., Zvyagin V.B., Yakovitsky M.V.</b> <i>The development of radiation-resistant dispersion-hardening chromium-nickel steel for thin-walled constructions of internals systems of nuclear power plants</i> .....	149
<b>Nesterenko D.L., Shevchenko D.V., Borovkov A.I., Saraev D.Yu.</b> <i>Study of rolling in helicoidal rolls with using the finite elements</i> .....	155
<b>Panchenko O.V.</b> <i>Comparison of methods for determining the diffusion of hydrogen</i> .....	162
<b>Kharchenko E.M., Zhumashev K., Pikalova, T.A.</b> <i>The solid-phase reduction of copper and lead by metallic iron</i> .....	167
<b>Tchurkin I.S.</b> <i>Increase of efficiency of drawing of coverings by the air-plasma method</i> .....	171
<b>Girshov V.L., Tsemenko V.N., Mazurov S.A.</b> <i>Investigation of the effect of defects in the structure of the strength of speed steel powder</i> .....	175

### Construction

<b>Derkach V.N.</b> <i>Anisotropy of durability of the masonry at compression</i> .....	181
<b>Kondrashov A.A.</b> <i>Technology solutions for the protection of natural and technical systems transportation and construction of</i> .....	186

### Nature management

<b>Fedotov A.I.</b> <i>Technology to improve productivity in enterprises</i> .....	191
<b>Al-Ahval N.S., Semin E.G.</b> <i>Features and filtrate groundwater pollution on solid waste testing ground (on the example of Sana'a (Yemen))</i> .....	203
<b>Martynuk J.N. Moskvina P.A.</b> <i>Introduction of alternative fuel in the world</i> .....	211

### Modelling. Mathematical methods

<b>Galerkin Y.B., Karpov A.N., Kozhukhov Y.V.</b> <i>Centrifugal compressor impeller pressure characteristic modelling</i> .....	217
<b>Kosmach V.F.</b> <i>Quantum-mechanical analysis of absolute paleomagnetic geochronological scale</i> .....	220
<b>Pospelov A.U., Zharkovsky A.A.</b> <i>The calculation and prediction of the hydraulic flow characteristics of hydraulic turbines</i> .....	227
<b>Smirnov S.A., Kolgatin S.N.</b> <i>Gas flow instability in HVPE reactor with an attached bubbler</i> .....	231

<b>Kodzhaspirov G.E., Terentyev M.I.</b> <i>Physical modeling of the grain structure evolution of the austenitic alloy during hot plastic deformation</i> .....	236
<b>Kukalenko B.D., Chulkin S.G.</b> <i>Heating of a surface of friction tire-type pneumatic clutch in drives of oil-drilling and gas-drilling installations</i> .....	241
<b>Byzov A.P.</b> <i>Probability estimation of human injuries from thermal radiation exposure taking into account moving to the safe zone</i> .....	247
<b>Kuranova M.L., Spivak I.M.</b> <i>Epigenetic changes at ataxia - telangiectasia</i> .....	252
<b>Vorobyev V.A.</b> <i>The use of the transients for remote determination of the conductivities of conductive objects in the form of shells of revolution</i> .....	256
<b>Chulin S.L.</b> <i>The approached mark of area stability linear systems the differential equations with uncertain factors</i> .....	261
<b>Egorov M.Yu., Sokolov K.V., Blinov M.A., Belenky M.Ya., Smolkin Yu.V., Kruglikov P.A., Fedorovich E.D.</b> <i>The results of modernized moisture separators-reheaters of the turbines 7, 8 on 4 unit at Leningrad NPS</i> .....	263
<b>Borisevich A.V., Smorodov A.V.</b> <i>Nonlinear stabilization via numerical continuation approach</i> .....	272

#### Education issues

<b>Rechinskiy A.V.</b> <i>Possibilities for applying of intellectual data analysis in management of high educational institutions</i> .....	279
<b>Rogov I.M.</b> <i>On culture and patriotism</i> .....	288
<b>Simonenko I.V., Shalashov E.V.</b> <i>Possible ways of integration military and civilian universities in Russia</i> ...	299

#### Chronicle of events

<b>Kesamanly F.P.</b> <i>Polytechnic — three times Hero of Socialist Labor. Academician Igor Kurchatov</i> .....	297
<b>Umov V.A., Zharkovsky A.A.</b> <i>Department « Hydromechanical engineering» (History and Development)</i> ...	306
<b>Larionov B.A.</b> <i>From the Leningrad Polytechnic Institute — St. Petersburg State Polytechnic University in faleristics</i> .....	317
<i>About the authors, contact information</i> .....	322
<i>Abstracts, key words</i> .....	340

## ВКЛАД ЦНИИ РТК В КОСМОНАВТИКУ

Все началось с «Кактуса» (1967 год) — системы управления двигателями мягкой посадки космических спускаемых аппаратов для ОКБ С.П. Королева в Подлипках (в будущем РКК «Энергия»). Затем по заказу НПО им. С.А. Лавочкина главного конструктора Г.Н. Бабакина последовало создание системы «Квант» (рис. 1) для посадки на Луну (1970 год) и много позже системы «Орион» для мягкой посадки на спутник Марса Фобос (1986 год). Попутно для той же организации были разработаны и поставлены системы контроля забираемого лунного грунта РУНП и РУНК.

Система «Кактус» открыла путь для эксплуатации нового корабля «Союз», поскольку только с ее помощью удалось реализовать заложенную в него идею мягкой посадки. И до сих пор аналогов этой системы ни у кого нет. Однако значение этой разработки оказалось еще большим, что связано с двумя ее последствиями. Во-первых, до того в отечественной космической технике бытовал жесточайший принцип, который можно сформулировать как известное положение: «лучшее враг хорошего». Чтобы обеспечить надежность этой техники в условиях гонки при соревновании с США практически официально существовало подсказанное практикой положение: использовать только хорошо отработанную технику и ее комплектующие, не допускать никаких усовершенствований в уже эксплуатируемых штатно системах, кроме случаев их отказов и других замечаний. При разработке мягкой посадки, возможно, впервые возникла ситуация, когда существующая техника (какую только не пробовали) не позволила решить проблему, т. е. не было иного выхода, кроме как рискнуть и попробовать найти принципиально новое научно-техническое решение.

Им и стал наш «Кактус». Это был прецедент нарушения упомянутой сложившейся традиции.

Вторым следствием стало возникновение новой технической науки, которая впервые в 1973 году в закрытом правительственном документе получила название «Фотонная техника» [1]. Ее назначением стало создание устройств, работающих с конечным участком электромагнитного спектра — гамма и рентгеновским излучениями, которые на семь порядков превышают частоты, используемые современной радиотехникой. Головной организацией по развитию этого нового научно-технического направления была определена наша организация. В ее рамках уже тогда были созданы различные, тоже уникальные и не имеющие аналогов в мире системы. К ним, например, относятся такие еще ждущие своего внедрения системы, как принципиально новый тип параметрических высотометров. В отличие от традиционных барометрических высотометров, у них много больший диапазон измерения высоты (вплоть до орбит космических аппаратов), нет подвижных частей, а при управлении вводом

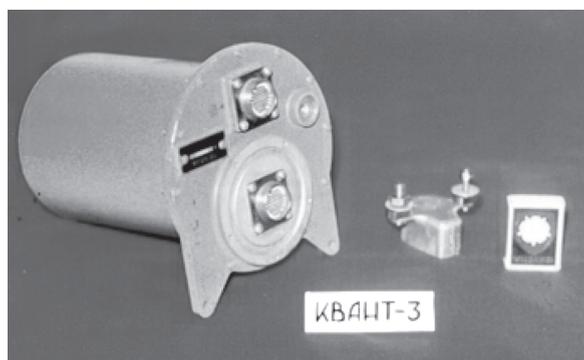


Рис. 1. Внешний вид системы «Квант»: передатчик (справа) и приемник

парашютных систем спуска они принципиально обеспечивают лучшее качество, так как реагируют не на давление воздуха, а на его плотность. Второй пример — это системы типа «Акация», которые измеряют ту же плотность воздуха и другие воздушные параметры (воздушная скорость, углы набегающего воздушного потока, лобовой воздушный напор), причем все это через обшивку летательного аппарата и через возмущенный поверхностный слой воздуха, включая плазму, образующуюся на сверхзвуковых скоростях.

Как и в случае с «Кактусом», эти системы могут произвести революцию в управлении космическими аппаратами при сходе их с орбиты путем обеспечения управляемого аэродинамического спуска. Помимо ракетно-космической техники такие системы, очевидно, необходимы и авиации.

Таковыми же принципиально новыми системами стали системы ручной стыковки типа «Арс» (1971 год), системы измерения массы топлива и других жидкостей, в том числе неориентированных, находящихся в баках (разработаны для корабля «Буран»), системы измерения массового расхода и контроля подачи топлива в ракетные двигатели типа «Иней» (1972 год). В частности, созданные для КБ «Южное» главного конструктора М.К. Янгеля подобные системы позволили почти на четверть увеличить дальность полета ракет. Попутно, по срочному правительственному заданию, с помощью таких систем была решена проблема измерения массового расхода нефти на межгосударственных нефтепроводах (1978 год).

После успешного применения систем типа «Кактус» с их по-прежнему загадочным для многих принципом действия в ЦНИИ РТК начали поступать все новые и новые задания от нашего ставшего впоследствии традиционным заказчика — РКК «Энергия». Так, после гибели на корабле «Союз» космонавтов Г. Добровольского, В. Волкова и В. Пачаева была срочно создана система контроля аварийной разгерметизации «Дюза» (1971 год) (рис. 2). Затем для космических станций типа «Мир» были разработаны сигнализаторы давления ДСД (1974 год) и унифицированный комплекс контроля давления КНД.

После «Дюзы» нас попросили разработать газоанализатор воздуха, а в дальнейшем взять на себя проблему жизнеобеспечения в целом.

Был создан трехкомпонентный газоанализатор «Агат». Однако нам пришлось впоследствии отказать от развития этого направления в связи с резко возросшим объемом других работ, более соответствующих уже сложившемуся профилю нашей организации. Такие системы в дальнейшем нашли применение в шахтах, метро и в закрытых спортивных сооружениях. В этот же период для возможности корректировки орбиты космических кораблей типа «Мир» была создана система измерения лобового напора от набегающего потока частиц.

Следующей новой работой для космонавтики стало создание принципиально нового счетчика ампер часов САЧ (1971 год), а затем и целой системы унифицированных приборов управления бортовой энергетикой (САЧ, ТТ, БИП, БКИП, ПВУ) и организация их серийного производства на выделенном для этого Черниговском приборостроительном заводе (1979 год). Первое применение эти приборы нашли в космических аппаратах главного конструктора Д.И. Козлова (Самара), а затем и у главных конструкторов В.Ф. Уткина, С.С. Крюкова, Г.А. Ефремова. Под руководством Б.З. Михлина была разработана и испытана перспективная система магнитной навигации космических аппаратов «Кедр» (1976 год), однако в связи с преждевременной смертью ее идеолога и разработчика эти работы не получили дальнейшего развития.

Другим новым научно-техническим направлением, возникшим несколько позже фотонной техники и первоначально не связанным с космонавтикой, стала робототехника. Здесь наша организация также оказалась инициатором и была определена головной по этому направлению в стране. По последней причине именно нам было поручено создание системы манипуляторов для многоцветного космического корабля «Буран». Работа эта была успешно выполнена (1985 год), однако в связи с закрытием самой программы по этому кораблю созданная система применения не получила. Вместе с тем работы по этому направлению не прекратились и продолжились в основном в инициативном порядке. Были разработаны космический шагающий робот «Циркуль» и манипулятор «Дорес» [2] (рис. 3).

Как выше отмечено, начиная с «Кактуса» основной особенностью нашей организации стал поиск нетривиальных, принципиально новых решений, основанных прежде всего на научном

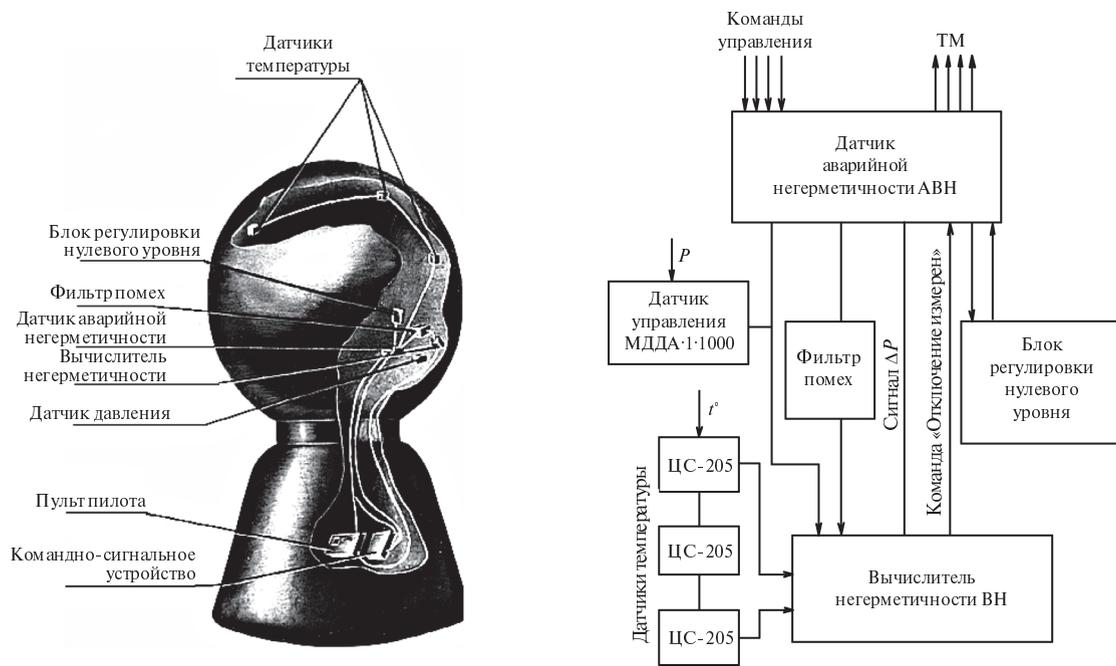


Рис. 2. Система «Дюза-1М» прецизионного контроля герметичности космических аппаратов



Рис. 3. Космический манипулятор «Дорес»

подходе к анализу решаемой задачи, но при этом с обязательным доведением найденных решений «до железа», т. е. до создания промышленных образцов, пригодных для постановки «на борт». Такая принципиальная особенность создала славу нашему ЦНИИ РТК как коллективу, к которому следует обращаться для решения задач, требующих именно неординарного подхода, отличного от традиционного подхода отраслевых НИИ и КБ, где опираются прежде всего на использование ранее накопленного опыта. К нам все чаще начали обращаться практически все известные главные и генеральные конструкторы сперва из систем министерства общего машиностроения, авиационной и оборонной промышленности, а затем и всех других министерств и ведомств, их министры (в том числе министр обороны С. Ф. Устинов) и даже руководители Академии наук.

Сегодня, когда именно такой подход необходим для реализации инновационного пути развития страны, будет весьма своевременно восстановить, а возможно, и развить в новых условиях этот стиль работы старого ЦНИИ РТК. Начать можно с простого — с использования имеющегося уникального задела по решению научно-технических проблем, сохранивших

свою актуальность: с упомянутых параметрических высотомеров, систем измерения воздушных параметров через плазму, окружающую летательные аппараты на сверхзвуке; систем измерения массы и массового расхода топлива и других жидкостей. В космической робототехнике такими перспективными системами могут стать, например, многофункциональные системы переменной структуры, а в перспективе, при освоении Луны, — самоорганизующиеся робототехнические системы и комплексы с распределенным искусственным интеллектом, обеспечивающим автономность функционирования. Для организации этих работ надо только одно — привлечь и заинтересовать талантливую молодежь двадцати-тридцати лет, обеспечить им помощь со стороны наших ветеранов и научные консультации зрелых докторов наук, которых не раздражают «всякие изобретатели».

И, конечно, как и при становлении ЦНИИ РТК, возникшего в недрах нашего вуза — Ленинградского политехнического института — на основе его научных школ и традиций, большую роль опять могут сыграть наши ученые, аспиранты и студенты. Новой России нужны новые Кулибины, Туполевы, Зворыкины!

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Юревич, Е.И. Фотонная техника [Текст] / Е.И. Юревич.— СПб.: Изд-во СПб ГПУ, 2003.

2. Юревич, Е.И. Основы робототехники [Текст] / Е.И. Юревич.— СПб.: БХВ — Петербург, 2010.

## О ПОВЫШЕНИИ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ РОССИЙСКОЙ ЭКОНОМИКИ

Переход от сырьевого сценария развития реального сектора экономики к инновационному, базирующемуся в первую очередь на обрабатывающей промышленности, должен стать основой экономического развития Российской Федерации. Однако существующий уровень энергоемкости в совокупности с высокими тарифами — одна из причин, препятствующая этому в связи с низкой конкурентоспособностью ее промышленности.

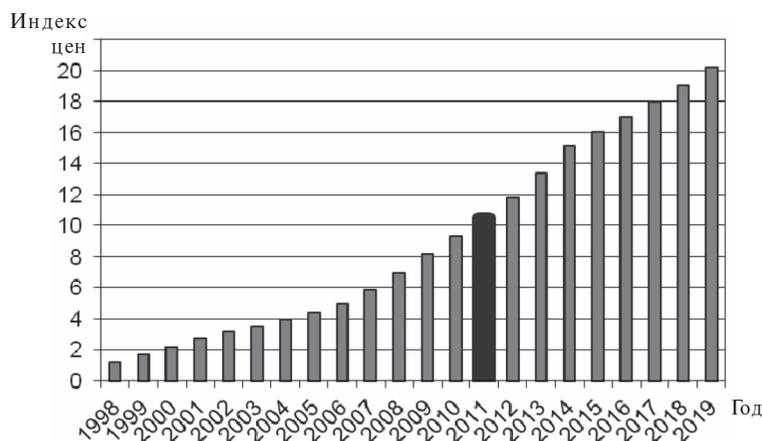
В Российской Федерации происходил регулируемый государством рост стоимости электроэнергии, динамика которого представлена на рис. 1 (построен на основе данных Минэкономразвития России [1, 2]).

Уровень 2011 года не является переломным в 30-летнем тренде; до 2016-го года не предполагается изменения темпов существующей динамики роста стоимости электроэнергии. До 2012

года Министерством экономического развития Российской Федерации прирост цены электроэнергии прогнозируется в пределах 12,5–14 % в год [1]. В Концепции долгосрочного социально-экономического развития Российской Федерации до 2020 года, утвержденной Распоряжением Правительства Российской Федерации от 17 ноября 2008 года № 1662-р, предполагается продолжение ежегодного роста стоимости электроэнергии в ближайшие десять лет, средняя цена на электроэнергию повысится за 2012–2015 годы примерно на 40–50 %, за 2016–2020 годы — на 25–27 % [2].

Приведем цены электроэнергии в абсолютных величинах 2010 года.

Согласно Постановлению РЭК Москвы № 121 от 25.12.2009 одноставочный тариф для прочих потребителей на 2010 год на низком напряжении в зависимости от числа часов исполь-



Индекс цен электроэнергии по Российской Федерации в 1998–2020 г. (фактические для 1998–2011, прогноз на 2011–220 г.; за единицу принят 1998 г., номинальные цены). Выделен 2011 год

зования заявленной мощности составлял от 3005,7 до 3481,7 руб./МВт·ч без НДС (при числе часов использования заявленной мощности соответственно более 7000 и менее 5000 часов) [3].

Произвольно взятые регионы Российской Федерации показывают аналогичные значения (в руб./МВт·ч без НДС):

3417,96 и 3454,94 (Постановление департамента Смоленской области по энергетике, энергоэффективности и тарифной политике от 25 декабря 2009 № 246 [4]);

3232,04 и 3233,54 (Приказ региональной энергетической комиссии — департамента цен и тарифов Краснодарского края от 30 декабря 2009 года № 47/2009-э [5]).

Согласно Постановлению Комитета по тарифам и ценам Администрации Курской области от 30 декабря 2009 года № 188 «О тарифах на электрическую энергию, отпускаемую ОАО «Курскэнерго» потребителям Курской области на 2010 год» стоимость электроэнергии для прочих потребителей с использованием заявленной мощности менее 2000 часов в год составляет 5176,06 руб./МВт·ч без НДС [6].

Электроёмкость обрабатывающей промышленности согласно исследованию ИНЭИ РАН в 2008 году составила 32,9 кВт·ч/тыс. руб. (около 1 кВт·ч/долл.), в добывающих отраслях — 35,2 кВт·ч/тыс. руб. [7].

Удельные расходы и стоимость электроэнергии определяют в структуре себестоимости обрабатывающей промышленности по состоянию на 2011 год долю затрат только на электрообеспечение в размере 12–16 % (32,9 кВт·ч/тыс. руб., или 5,1 руб./кВт·ч). К энергетической составляющей затрат необходимо добавить расходы на теплоснабжение (составляющие не менее 8–10 % от себестоимости) и прочие виды энергоносителей. Если принять во внимание динамику стоимости электроэнергии, представленную на рис. 1, то можно предположить увеличение этих значений на менее, чем в 1,5 раза к 2020 году.

Высокая энергоёмкость обрабатывающей промышленности определяет отсутствие перспектив для ее развития в России и достижения уровней стран, находящихся в аналогичных климатических условиях, что соответствует от 2,5- до 5-кратного снижения удельных показателей. Для примера: электроёмкость промышленности Канады, Норвегии и Швеции — менее 0,4 кВт·ч

на доллар ВВП, Великобритании, Франции, Германии — менее 0,2 кВт·ч на доллар ВВП [7].

Снижение 2,5-кратное позволит приблизиться к уровню наиболее электроёмких мировых экономик. И только дальнейший рост энергоэффективности сделает правомочной саму постановку вопроса о конкуренции российской обрабатывающей промышленности. В противном случае реализовывать и строить особо ничего не надо: Российская Федерация продолжит потерю не только внешних, но и внутренних рынков — импортозамещение отечественных продуктов будет продолжаться во все большем объеме. Одновременно будет происходить вытеснение с мирового рынка российского сырья как менее энергозатратными конкурентами, так и в результате замещения альтернативными способами энергообеспечения, в том числе на основе возобновляемых источников энергии. По-видимому, именно замещение потребления сетевого газа в большей степени, нежели кризис, определил потерю 28 % выручки ОАО «Газпром» в 2009 году. Данное предположение подтверждается тем фактом, что, несмотря на восстановление европейского рынка, поставки российского газа в Европу упали в 2010 году по сравнению с 2009-м на 2,1 млрд кубометров (до уровня 138,6 млрд кубометров) [8].

В перспективе имеют право на существование только отрасли, снизившие энергоёмкость. Мероприятия по экономии энергии значительно менее капиталоемки, чем создание новых энергетических мощностей.

Государственная поддержка технологий, направленных на целенаправленное уменьшение электропотребления в экономике, — необходимое условие для роста конкурентоспособности отечественной промышленности и перехода к устойчивому развитию. Конкретизируем данное утверждение на примерах отраслей экономики с наибольшим потреблением энергетических ресурсов — металлургии и ЖКХ.

Как показал первый этап экономического кризиса, начавшегося в 2008 году, в России металлургия — отрасль, наиболее сильно подверженная колебаниям мировых цен. Одна из ключевых причин столь высокой зависимости металлургической отрасли от мировой ценовой конъюнктуры — ее высокая электроёмкость. Единственной возможностью сохранения и расширения доли рынка отечественной металлургии



связана с комплексной модернизацией и снижением электроемкости.

Структура производства стали в России и в мире характеризуется постепенным переходом от мартеновского и конверторного производства к выплавке стали в электродуговых печах. Основное преимущество электродуговых печей — сокращение времени плавки (со 180 мин до 40 и меньше), менее вредные условия эксплуатации, экономичность (снижение расхода электроэнергии с 630 кВт·ч/т до 345 кВт·ч/т, снижение расхода графитированных электродов с 6,5 до 1,1 кг/т), поэтому доля данного способа выплавки в общем объеме производства стали постепенно растет. По прогнозам доля производства стали в электропечах составит в России к концу 2011 года 28 %, в 2015 году — 35 %.

Модернизацию металлургии целесообразно проводить с учетом мировых тенденций и опережающего развития электросталеплавильного производства на основе сильноточных электродов большого сечения, выпуска высокотехнологичных электросталей и спецсталей. Сегодня это важнейшее стратегическое направление российской металлургии, прямо связанное с обороноспособностью страны и ее экономической безопасностью, сдерживается тем, что в России отсутствует собственное производство игольчатого кокса (сегодня 100 % его импортируется из США и Японии) из которого изготавливаются наиболее качественные электроды, позволяющие снизить удельные расходы электроэнергии.

В Минэкономразвития России представлена технологическая платформа «Российский углерод», инновационные решения которой предполагают организацию отечественного производства высококачественного игольчатого кокса и других углеродных и углеграфитовых материалов для конструкционных и электродных изделий, а также синтетических топлив на основе технологий глубокой переработки недефицитного коксохимического сырья (каменноугольные смолы).

Производство отечественного игольчатого кокса позволит российским металлургам нарастить выпуск высокотехнологичных электросталей, спецсталей и обеспечить выполнение масштабной задачи по перевооружению российской армии, будет достигнуто снижение электроемкости и себестоимости, появится возмож-

ность сохранения и расширения позиций Российской Федерации на рынке металлов. Кроме того, игольчатый кокс сам является ценным экспортным товаром: Китай и Индия его не производят, но потребляют в постоянно растущих объемах.

Переход на производство электросталей с электродами на основе игольчатого кокса приведет к значительному снижению удельных расходов электроэнергии в процессах электроплавки металлов. Экстенсивное, основанное на росте объема, развитие металлургии бесперспективно. По объему выпуска черных металлов СССР занимал первое место в мире, но целый ряд высокотехнологичных металлов (в первую очередь — электросталь и значительный сортамент проката) закупался за рубежом.

Таким образом, принятие государством решения о поддержке технологической платформы «Российский углерод» может служить примером продуманной государственной политики, направленной на снижение электроемкости отечественной промышленности.

Проанализируем на основе ранжирования финансовой эффективности проектов по энергосбережению, какие технологические решения наиболее результативны в жилищно-коммунальном хозяйстве и обладают максимальной емкостью рынка [9].

Для приближенной оценки относительной финансовой эффективности технологий введем коэффициент  $K_{эфф}$ , равный отношению годового дохода до налогообложения к капитальным затратам на единицу установленной тепловой или электрической мощности. Доход внедряемой технологии определялся исходя из действующих в России средних тарифов продажи электроэнергии и газа конечным потребителям. Предложенный вариант оценки инвестиционной привлекательности проектов позволил в первом приближении сравнить наиболее финансово-перспективные направления работ по энергосбережению.

Проведенное исследование, показало, что в России наиболее инвестиционно привлекательны наукоемкие технологии комбинированного производства электроэнергии и тепла уже существующими отопительными котельными, которые в настоящее время являются крупными потребителями электроэнергии, о чем говорят следующие данные:

Технология	$K_{эфф}$	
Электрогенерирующие надстройки отопительных котельных с паровыми противодавленческими турбинами средней мощности (4–30 МВт)	0,67	показал анализ опыта развития стран Западной Европы, Северной Америки и Японии, граница зоны эффективности комбинированного производства тепловой и электрической энергии сместилась на уровень единиц мегаваттов, в некоторых странах законодательно закреплено комбинированное производство тепловой и электрической энергии при тепловом потреблении более 1 МВт [11]. Прогнозируется, что в ближайшие двадцать лет граница эффективности комбинированного производства тепловой и электрической энергии сместится на уровень единиц киловаттов [12]. Удельные расходы топлива на производство электроэнергии при комбинированном производстве тепловой и электрической энергии в два и более раза меньше, чем на лучших газотурбинных и паротурбинных установках (ГТУ и ПТУ), и в 1,5 раза меньше, чем на самых современных парогазовых установках (ПГУ) [13]. При этом, если единичная мощность блока ПГУ составляет сотни МВт, то экономически эффективные решения по надстройке котельных когенерационными установками начинаются от единичных мощностей 200–500 кВт.
Электрогенерирующие надстройки с газовыми турбинами средней мощности (16–30 МВт)	0,27	
Электрогенерирующие надстройки с паровыми противодавленческими турбинами малой мощности (250–750 кВт)	0,23	
Электрогенерирующие надстройки с газовыми турбинами малой мощности (1,5–6 МВт)	0,19	
Системы частотного регулирования электродвигателей	0,18	
Утепление зданий	0,058	
Система регулирования отопления жилых и общественных зданий	0,033	

На основе энергетического обследования, проведенного в г. Обнинск (Калужская область), показано, что интегральный финансовый эффект от внедрения наиболее эффективных технологий по энергосбережению (частотное регулирование электроприводов; системы управления отоплением зданий; отмывка теплообменных поверхностей энергетического оборудования) не превысит 5–8 % от проекта создания электрогенерирующих мощностей в виде надстроек по комбинированному производству тепловой и электрической энергии котельными города [10, п. 5 Заключения].

Использование возможностей совместного производства тепловой и электрической энергии стало преобладающим направлением повышения энергоэффективности во всех странах. Как

Разработка и поддержка наиболее результативных программ по повышению энергоэффективности ЖКХ может быть примером государственной энергетической политики в области модернизации российской экономики.

Развитие научно-технического прогресса требует, чтобы государство заняло четкую прогнозируемую позицию по вопросу энергоёмкости российской экономики и поддержки мероприятий по ее снижению. Это — необходимое (но не достаточное) условие для достижения Российской Федерацией лидирующих позиций в мировой экономике.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Прогноз социально-экономического развития Российской Федерации на 2010 год и плановый период 2011 и 2012 годов. — [Электрон. ресурс]: <http://www.economy.gov.ru/minec/activity/sections/macro/prognoz/doc1254407742765>
2. Концепция долгосрочного социально-экономического развития Российской Федерации до 2020 года. Индексы цен производства и распределения электроэнергии, газа и воды по Российской Федерации в 1998–2009 гг. — [Электрон. ресурс]: <http://www.gks.ru>
3. [Электрон. ресурс]: <http://www.mosenergobyt.ru/portal/pls/portal/docs/1/1206082.PDF>
4. [Электрон. ресурс]: [http://www.smesk.ru/urid\\_face/tarif\\_2010/](http://www.smesk.ru/urid_face/tarif_2010/)
5. [Электрон. ресурс]: <http://www.kubansbyt.ru/legal/rastet/regulzena/index.shtml>
6. [Электрон. ресурс]: [http://kurskenergobit.ru/tarify\\_na\\_2010\\_god\\_prochie\\_ptrebiteli\\_7](http://kurskenergobit.ru/tarify_na_2010_god_prochie_ptrebiteli_7)
7. [Электрон. ресурс]: Энергоэффективность российской экономики: современное состояние и перспективы. // Известия Академии наук. — 2010. № 4. — С. 56–65.



8. [Электрон. ресурс]: <http://www.vesti.ru/doc.html?id=427227>

9. **Федоров, В.А.** Приоритетные направления развития энергосберегающих технологий в жилищно-коммунальном хозяйстве России [Текст] / В.А. Федоров, О.О. Мильман / МГТУ им. Баумана.— М., 2004.

10. **Мионов, И.М.** Приоритетные пути реконструкции жилищно-коммунального хозяйства наукограда Обнинска с использованием энергоэффективных технологий [Текст]: монография /

И.М. Мионов, И.В. Дайнеко, В.А. Федоров [и др.].— М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2004.— 132 с.

11. Закон о теплоснабжении Дании № 382 от 1990 г., ст. 6.1, п.4 // The Heat Supply Act.

12. Green Light to Clean power. Энергетическая Стратегия Лондона 2002.

13. **Фаворский, О.Н.** Эффективные технологии производства электрической и тепловой энергии с использованием органического топлива [Текст] / О.Н. Фаворский, А.И. Леонтьев, В.А. Федоров [и др.] // Теплоэнергетика. 2003.— № 9.— С. 19–21.

УДК 621.22

*В.Е. Фортов, М.П. Федоров, В.В. Елистратов*

## ГИДРОЭНЕРГЕТИКА ПОСЛЕ АВАРИИ НА САЯНО-ШУШЕНСКОЙ ГЭС\*

Семнадцатого августа 2009 года в 8 часов 13 минут на крупнейшей гидроэлектростанции России — Саяно-Шушенской ГЭС (СШГЭС) — произошла авария на 2-м гидроагрегате. В результате аварии часть машинного зала, несколько агрегатов были разрушены, часть агрегатов, электротехническое и вспомогательное оборудование были залиты водой и вышли из строя. Были человеческие жертвы. В силу случайного стечения обстоятельств один из авторов уже через два часа был на станции и имел возможность видеть весь масштаб разрушений. Следует отметить, что авария не повлияла на устойчивость и надежность конструкции и не было никакой опасности затопления и других катастрофических последствий в зоне водохранилища и нижнего бьефа. Благодаря активным действиям МЧС России машинный зал в кратчайшие сроки был расчищен от обломков конструкций и оборудования, откачана вода из помещений. При проведении аварийно-спасательных работ в целом было привлечено до 2,7 тыс. человек (из них около 2 тыс. человек непосредственно на ГЭС), более 200 единиц техники, в том числе 11 воздушных судов и 15 плав-

средств. Было разобрано свыше 5 тыс. кубометров завалов, откачано более 277 тыс. кубических метров воды. Установлено 9683 метра боновых заграждений, собрано 324,2 т маслосодержащей эмульсии. Интенсивные работы по ликвидации последствий аварии, ремонту оборудования и восстановлению функционирования гидроэлектростанции позволили в кратчайшие сроки воссоздать перекрытие машинного зала и тепловой контур, давший возможность выполнять строительномонтажные и пусконаладочные работы в машзале и вводить наименее пострадавшие агрегаты в эксплуатацию.

Авторы участвовали в работе экспертной комиссии по установлению причин аварии на ГЭС. Сейчас, по истечении уже более чем двух лет, можно более точно объяснить технологические причины аварии на этом уникальном энергетическом объекте, определить необходимые действия по предотвращению подобных происшествий, а также роль и задачи науки в обеспечении безопасности объектов гидроэнергетики.

Саяно-Шушенская ГЭС им. П.С. Непорожного является крупнейшей гидроэлектростанцией России и одной из крупнейших в мире (см. табл.), расположена на юге Республики Хакасия, в верховьях р. Енисей. Установленная мощность ГЭС — 6,4 млн кВт. Десять гидроагрегатов ГЭС имеют номинальную мощность 640 МВт каждый при расчетном напоре 194 м. Общая пропускная способность турбин 3400–3600 м<sup>3</sup>/с.

\* Статья подготовлена с использованием материалов публикации авторов: **Фортов В.Е., Федоров М.П., Елистратов В.В.** Научно-технические проблемы гидроэнергетики после аварии на Саяно-Шушенской ГЭС.— Вестник Российской Академии наук— 2011. Т. 81, № 7.— С. 579–586.

Параметры крупнейших ГЭС мира

Название ГЭС, страна	Река	Мощность, МВт	Выработка энергии, ТВт·ч	Напор, м	Диаметр рабочего колеса, м	Число агрегатов
Три ущелья, Китай	Янцзы	18200	84,7	112	9,2	26
Итайпу, Бразилия	Парана	12600	71,0	118	8,5	18
Гури 2, Венесуэла	Карони	10300	51,0	136	7,17	10+10
Тукуруи, Бразилия	Токантис	8000	32,4	68	7,8	12+12
Грэнд-Кули, США	Колумбия	10830	20,3	108	9,75; 9,91	18+6
Саяно-Шушенская ГЭС, Россия	Енисей	6400	23,7	194	6,77	10
Красноярская ГЭС, Россия	Енисей	6000	34,5	101	7,5	12

Среднегодовое производство электрической энергии составляет 21,84 млрд кВт·ч, но в последние годы она была выше. Общий вид ГЭС представлен на рис. 1.

Строительство ГЭС началось в 1963 году, ввод первого агрегата на пониженных напорах с временным рабочим колесом во временную эксплуатацию произошел в 1978 году, окончание строительства — 2000 год. Основным потребителем электрической энергии, вырабатываемой Саяно-Шушенской ГЭС, является Федеральная сетевая компания, из региональных потребителей — Саянский производственно-территориальный комплекс (г. Саяногорск).

В состав гидротехнических сооружений СШГЭС входят арочно-гравитационная плотина и здание ГЭС приплотинного типа.

Арочно-гравитационная плотина (рис. 1) воспринимает давление воды массивной своей частью, а также передает часть давления на борту арочной частью. Горизонтальные сечения плотины представляют собой арки кругового и трехцентрового очертания. Радиус верховой грани в руслевой части плотины составляет 600 м. По фронту плотина разделена радиальными швами через 15,8 м на 68 секций. По толщине плотины разрезана на 4 столба шириной 25–27 м.

На станционной части плотины имеется 10 водоприемников, сопрягающихся с 10 сталежелезобетонными турбинными водоводами, прианкеренными к низовой грани станционной части плотины. Внутренний диаметр турбинных водоводов — 7,5 м. Водоприемники оборудованы соудерживающими решетками, аварийно-ре-

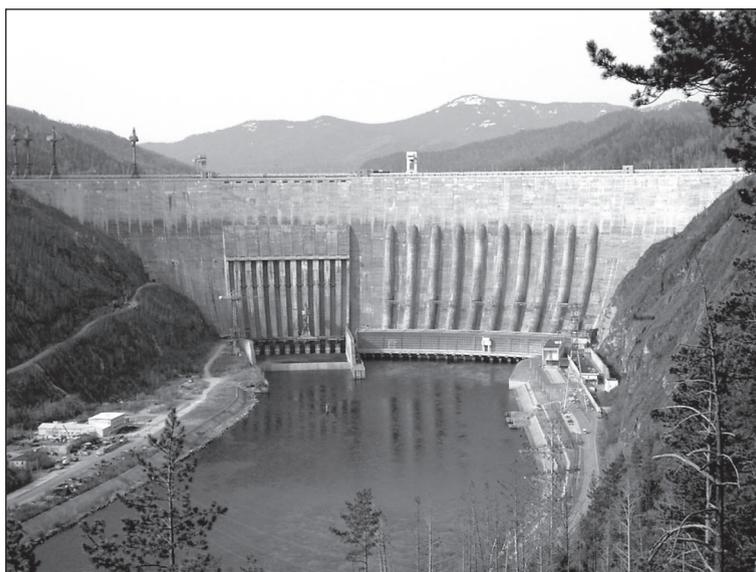


Рис. 1. Общий вид Саяно-Шушенской ГЭС

монтажными (быстропадающими) затворами с индивидуальными гидроподъемниками, а также пазами для установки ремонтных затворов.

Водосбросная часть плотины имеет 11 водосбросных отверстий с размерами расчетного сечения 8,2×5,4 м и заглубленными водозаборами, пороги которых ниже на 60 м относительно НПУ = 539 м. Отверстия перекрыты плоскими колесными затворами, обслуживаемыми двумя козловыми кранами грузоподъемностью 500 т каждый. Объем бетона, уложенный в арочно-гравитационную плотину, — около 8,5 млн м<sup>3</sup>.

Здание ГЭС имеет длину (с монтажной площадкой) 289 м, ширину — 35 м, объем бетона — 290 тыс. м<sup>3</sup>.

В здании ГЭС (рис. 2) уставлены 10 гидроагрегатов, объединяющих гидротурбину и генератор. Гидравлическая турбина типа РО230/833-В имеет параметры: мощность номинальная — 650 МВт, нормальная частота вращения — 142,8 об/мин, разгонная частота — 280 об/мин, диаметр рабочего колеса — 6,77 м, масса турбины — 154 т. Гидрогенератор типа СВФ1285/275-42 имеет параметры: полная мощность — 711 МВА, напряжение — 15,75 кВ, диаметр расточки ротора — 11,85 м, масса генератора — 1790 т, масса ротора — 912 т.

Разрез по водопроводящему тракту и зданию ГЭС приведен на рис. 3.

В состав гидроузла входит водохранилище, имеющее параметры: нормальный подпорный уровень (НПУ) — 539,00 м; форсированный подпор-

ный уровень (ФПУ) — 540,00 м; уровень мертвого объема (УМО) — 500,00 м; полный объем — 30710 млн м<sup>3</sup>; полезный объем — 14710 млн м<sup>3</sup>; площадь зеркала при ФПУ 324,00 м — 608 км<sup>2</sup>; длина водохранилища при ФПУ — 312,0 км; ширина максимальная — 7,0 км; глубина максимальная — 226,0 м.

До момента аварии Саяно-Шушенская ГЭС работала в режиме автоматического регулирования. На сеть работали 9 агрегатов СШ ГЭС.

16.08.2009 в 23:14 агрегат ГА-2 был введен в работу под автоматическим управлением в качестве приоритетного. Начиная с 23:14 16.08.2009 и до 8:13 17.08.2009 агрегат ГА-2 пять раз проходил нерекондуемую режимную зону II, которая характеризуется повышенным уровнем динамических нагрузок и вибраций (рис. 4). Во время 6-го прохода зоны II в 8 часов 13 минут местного времени произошла авария.

В момент аварии произошло лавинообразное нарастание вибраций ГА-2, что привело к ослаблению крепления крышки турбины — часть шпилек не была закручена (или раскрутилась в результате вибрации), а часть шпилек имела усталостный износ до 80–95%:

№ шпильки	% усталостного излома
1	5
2	80
3	95
4	7



Рис. 2. Общий вид машинного зала Саяно-Шушенской ГЭС

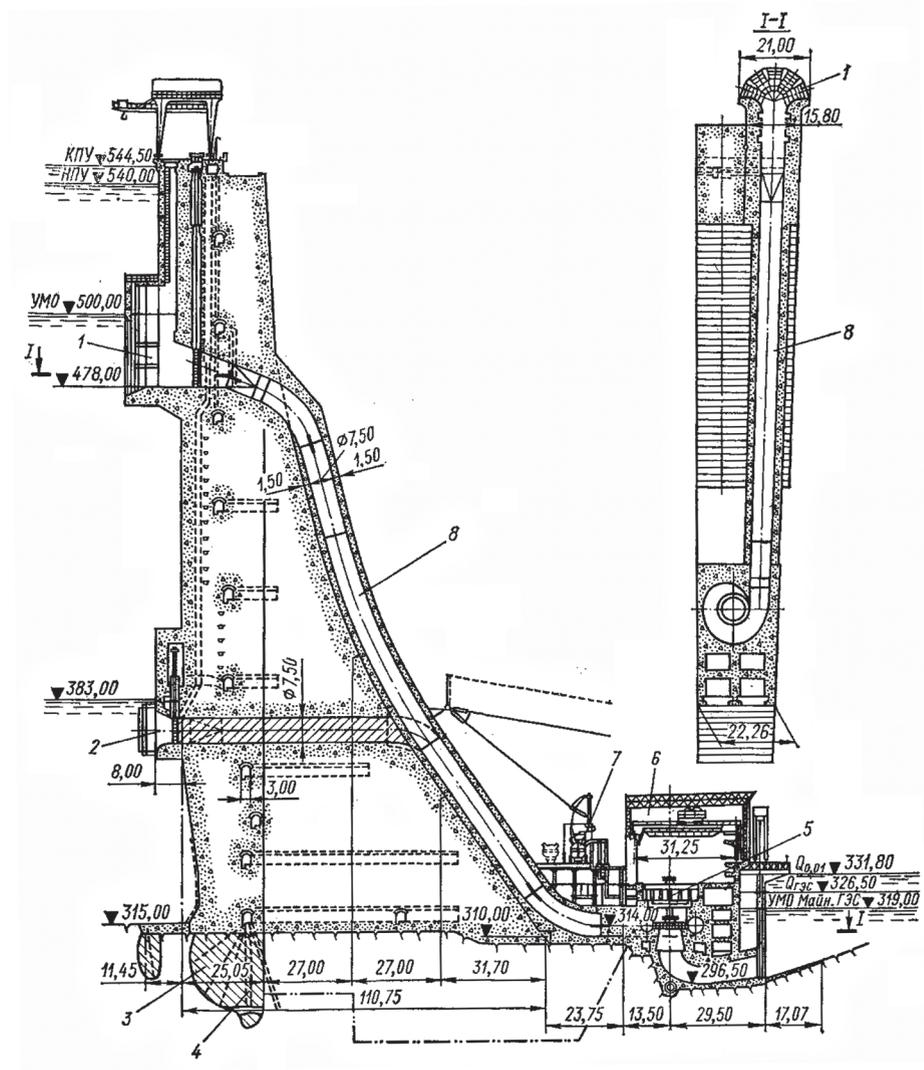


Рис. 3. Разрез по водопроводящему тракту

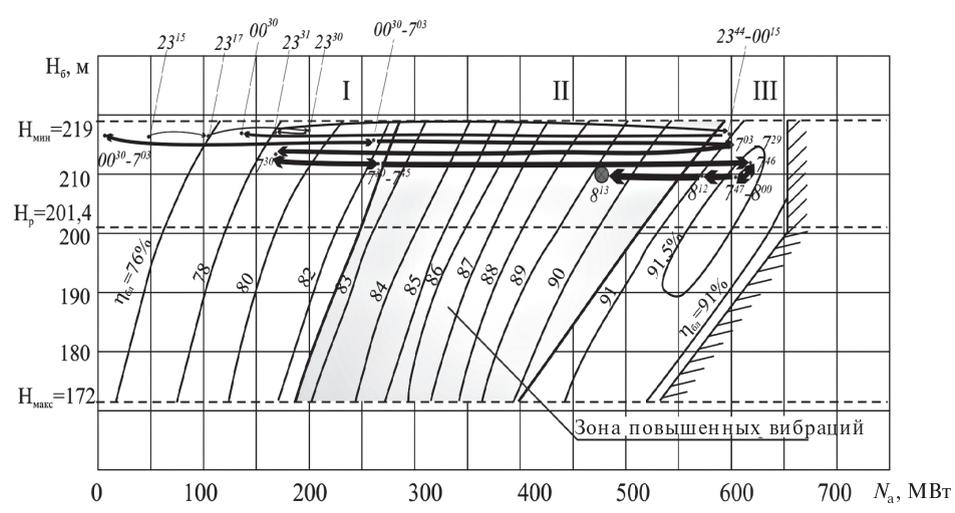


Рис. 4. Эксплуатационная характеристика ГА-2 с линиями движения режимной точки

5	55
6	не разрушен
11	4
14	55
18	98
19	95
20	85
21	5
22	35
23	0
	(трещин нет)
24	50
25	40
27	50
28	20
30	50
31	90
32	95
34	65
35	60
38	35
39	35
41	35
42	35
43	не разрушен
44	95
45	35
47	не разрушен
48	95
53	не разрушен
54	не разрушен
57	5
60	60
62	70
64	98
65	85

66	20
68	70
69	97
70	55
71	не разрушен
73	40
74	0
	(трещин нет)
75	70
76	25
80	60

Среднее состояние площадей усталостного излома шпилек — 64,9 %

Произошел отрыв крышки турбины от фланца на статоре. Анализ показывает, что спровоцировать начало аварии могло существенное ослабление шпилек со 2-й по 20-ю, и в силу этого мог начаться лавинообразный отрыв крышки. Далее произошло отделение гидроагрегата, включая рабочее колесо, вал, крышку турбины, ротор генератора (общая масса около 1700 т), и его выталкивание давлением воды (около 7500 т) из шахты гидроагрегата.

Из шахты вырвался столб воды расходом около 300 м<sup>3</sup>/с, который привел к разрушению кровли машзала, заливу электротехнического оборудования и коротким замыканиям в других гидроагрегатах. Из-за потери собственных нужд не удалось сразу закрыть аварийно-ремонтный затвор верхнего бьефа, и вода из водовода около часа поступала в машзал (пока персонал ценой колоссальных усилий в темноте вручную не закрыл затвор). На рис. 5. показан агрегат ГА-2 после аварии.



Рис. 5. Вид агрегата ГА-2 сразу после аварии до откачки воды

Многочисленные экспертные заключения и ряд комиссий выдвигали и анализировали множество версий и причин произошедшей аварии. В конечном итоге основными техническими причинами аварии можно назвать следующие:

работа гидроагрегата ГА-2 с частыми переходами через зоны нерекомендуемых нагрузок при пуско-остановочных операциях и регулировании нагрузки;

продолжительная эксплуатация ГА-2 с недопустимо сильной вибрацией, в том числе в период эксплуатации с временным рабочим колесом;

*начало* аварии могло произойти в результате отрыва шпилек в проблемной зоне — с 2-й по 20-ю — из-за увеличения давления под крышкой турбины на 10 м при закрытии направляющего аппарата и пульсаций давления в размер 15–22 м *при прохождении зоны повышенной вибрации.*

*непосредственной причиной* является то, что суммарное давление на крышку турбины снизу превысило несущую способность *шпилек крепления крышки турбины*, ослабленных длительной эксплуатацией со знакопеременными вибрациями.

Таким образом, основными причинами аварии являются статические и динамические усилия, возникающие при работе гидроэнергетического оборудования и действующие на элементы проточного тракта, в том числе на крышку турбины. Сила, оторвавшая крышку, с учетом пульсационной составляющей (не путать с гидроударом) по расчетам МГСУ составила 5277 т, что значительно превысило несущую способность шпилек (по данным ЦНИИТМАШ, с учетом износа на 64,9%, составлявшую 3457 т). Вспоминая похожую, но не приведшую к столь тяжелым последствиям аварию на Нурекской ГЭС, можно отметить, что причиной там тоже было превышение давления снизу больше уровня сопротивления удерживающих крышку турбины работоспособных шпилек. Но там авария была локализована своевременным закрытием предтурбинного затвора. На СШГЭС таких затворов не было.

Причина аварии на СШГЭС носила за-проектный характер, ее было невозможно предсказать на стадии проектирования. Следует вспомнить, что в 70-е годы проектирование и сооружение СШГЭС проводилось на основе проведения многочисленных научных исследований, обобщения опыта предыдущих крупных проектов, объединения усилий профильных про-

ектных, строительных, монтажных, энергетических, электротехнических предприятий и организаций. Объективности ради следует отметить, что на момент проектирования и затем строительства на СШГЭС были применены самые передовые и эффективные решения и технологии. Тем не менее с сегодняшнего уровня знаний можно отметить ряд принятых проектных решений, которые могли спровоцировать такую аварию и жертвы:

объединение в узком створе водосливной плотины и здания ГЭС, имеющих значительные вибрации каждое по себе;

размещение на затапливаемых отметках оборудования собственных нужд, ремонтных служб, вспомогательного оборудования (что из-за разлива масла привело к загрязнению Енисея);

отсутствие резервирования энергоснабжения аварийного затвора, направляющего аппарата и других аварийных устройств.

Ряд причин аварии лежит в области эксплуатации ГЭС (несвоевременное и некачественное выполнение ремонтных работ и др.) и сфере управления объектом, причем как на уровне внутристанционного управления (неоптимальное распределение нагрузки между агрегатами), так и на уровне внешнего управления со стороны Системного оператора (необоснованное увеличение маневренности СШГЭС).

После произошедшей аварии проведена большая работа не только по восстановлению станции, но и по анализу и корректировке нормативной документации по эксплуатации ГЭС, по повышению надежности и безопасной эксплуатации оборудования и сооружений, выполнен комплекс НИР по отдельным направлениям и процессам работы гидротехнических сооружений, водопроводящего тракта и гидроэнергетического оборудования. Вместе с тем после аварии стало понятно, что крайне необходимо восстановить научно-техническое сопровождение процессов создания и эксплуатации крупных и уникальных гидроэнергетических объектов. Необходимо проведение междисциплинарных исследований для получения комплексных результатов на основе объединения усилий научных коллективов РАН, отраслевых институтов и вузов по таким направлениям, как:

научные основы и методы обоснования продления срока службы гидроэнергетического оборудования и сооружений ГЭС за пределы проектного срока;

анализ перспективных требований к вторичному регулированию частоты и мощности с участием ГЭС для разработки методов проектирования и управления агрегатами ГЭС;

повышение надежности проектных решений по ГЭС и гидроэнергетическому оборудованию, в т.ч. новые компоновочные решения приплотинных ГЭС с выносом водосбросов из створа и сооружение береговых водосбросов; ограничение зоны применения приплотинных ГЭС с напорами 120–150 м, разработка новых типов гидротурбин, не имеющих запрещенных зон; применение новых схем использования водной энергии с более низкими напорами и выносом регулирующих емкостей на притоки; разработка новых типов гидротурбин, обладающих высокоманевренными свойствами в плане регулирования мощности и др.;

разработка принципов оптимального формирования сложных природно-технических систем с гидроэнергетическими объектами и оценка надежности и безопасности их элементов с учетом безопасных проектных компоновочных решений, безопасных и независимых схем управления и обеспечения экологической безопасности бьефов;

расчет условий и параметров запроектных аварий и выработка рекомендаций по их предотвращению и снижению ущербов;

разработка правил каскадного регулирования и оптимизации управления водными ресурсами на многоагрегатных ГЭС с учетом требований Системного оператора, неэнергетических отраслей и охраны природы, а также в условиях нарушения проектных режимов;

разработка основ и принципов создания систем мониторинга и диагностики, расчет состояния оборудования и сооружений на гидроэнергетических объектах.

Хроника событий за последние два года по восстановлению ГЭС выглядит следующим образом:

В ноябре 2009 года были завершены работы по созданию теплового контура машинного зала, что позволило, не снижая темпов, продолжить работы по восстановлению Саяно-Шушенской ГЭС.

24 февраля 2010 года был включен в сеть гидроагрегат № 6.

22 марта 2010 года был возвращен в строй гидроагрегат № 5. В результате рабочая мощность станции выросла до 1280 МВт.

15 апреля 2010 года был закончен демонтаж гидроагрегата № 2, полностью разрушенного во время аварии.

1 июня 2010 года завершены строительномонтажные работы по обеспечению готовности первой очереди строительства берегового водосброса к пропуску паводковых расходов.

2 августа 2010 года был введен в эксплуатацию гидроагрегат № 4. Мощность станции составила 1920 МВт.

1 октября 2010 года завершились гидравлические испытания берегового водосброса, которые подтвердили готовность сооружения к пропуску паводковых вод.

22 декабря 2010 года был включен в сеть для проведения эксплуатационных испытаний гидроагрегат № 3. Рабочая мощность Саяно-Шушенской ГЭС достигла 2560 МВт (40 % от установленной мощности). Суммарная выработка электроэнергии на восстанавливаемой станции преодолела отметку в 10 млрд кВт·ч.

12 октября 2011 года введен в эксплуатацию береговой водосброс, обеспечивающий сброс более 4000 м<sup>3</sup>/с по боковому тракту мимо плотины станции.

Запуск гидроагрегата № 3 в декабре 2010 года подвел черту под первым этапом реконструкции Саяно-Шушенской ГЭС, в ходе которого после восстановительного ремонта были введены в работу четыре наименее пострадавших в аварии гидроагрегата.

В 2011 году ОАО «РусГидро» начало работы по реализации второго этапа восстановления станции. В рамках этого этапа (в 2011–2013 гг.) в машинном зале СШГЭС будут установлены шесть абсолютно новых гидроагрегатов, изготовление которых в настоящий момент ведется концерном «Силовые машины» (Санкт-Петербург).

На завершающем этапе реконструкции в 2013–2014 году новыми гидроагрегатами будут также заменены четыре восстановленных в 2011 году. Срок службы новых гидроагрегатов будет увеличен до 40 лет, при этом максимальный КПД гидротурбины составит 96,6 %. Турбины будут оснащены более эффективной системой технологических защит, приводящих к автоматическому останова агрегата в случае возникновения недопустимых режимных отклонений контролируемых параметров.

Для снижения динамических нагрузок при совместной эксплуатации здания ГЭС и экс-

плутационного водосброса и улучшения работы его водобойного колодца в июне 2010 года была введена в эксплуатацию первая очередь берегового водосброса (рис. 6).

Большой общественный резонанс после аварии вызвали слухи о возможности разрушения самой арочно-гравитационной плотины. Для проверки такой опасности были проведены исследования напряженно-деформационного состояния плотины с использованием самых современных вычислительных средств. Рядом организаций, в том числе и СПбГПУ, были созданы конечно-элементные модели системы «плотина СШГЭС — основание — береговые примыкания» (рис. 7), которые позволяют учитывать: неоднородность физико-механических свойств материалов плотины и скальных пород; нелинейные свойства материалов плотины и скальных пород; произвольную гидростатическую нагрузку, в том числе противодействие; произвольное температурное воздействие; реальную последовательность возведения и нагружения плотины; возникновение и раскрытие швов и трещин в теле плотины и скальном массиве. Общее количество неизвестных (степени свободы) в конечно-элементной модели СПбГПУ — около 850000. На основе данных натурных наблюдений, представленных службой мониторинга состояния плотины

СШГЭС, была проведена параметрическая идентификация конечно-элементной модели. Это позволило повысить достоверность прогнозных расчетов по определению реакции плотины на возможные экстремальные воздействия.

В ходе расчетов было проверено соответствие количественных диагностических показателей в определенных местах плотины и результатов расчетов. К числу важнейших количественных диагностических показателей, по которым оценивается состояние плотины, относятся радиальные перемещения гребня плотины, а также сжимающие напряжения: арочные (горизонтальные) на верхних отметках и консольные (вертикальные) в низовом клине плотины. Для этих показателей установлены критериальные значения, при превышении которых можно говорить об опасности нарушения режима нормальной эксплуатации.

Результаты расчетов при НПУ 539 м приведены на рис. 8 и 9. Максимальные значения полученных в результате расчетов показателей (перемещения гребня — 124,5 мм, арочные напряжения — 6,32 МПа, консольные напряжения — 10,1 МПа) на 15–30 % меньше установленных критериальных значений. Этот факт, наряду с данными натурных наблюдений, подтверждает, что плотина Саяно-Шушенской ГЭС после аварии находится в режиме нормальной эксплуатации.

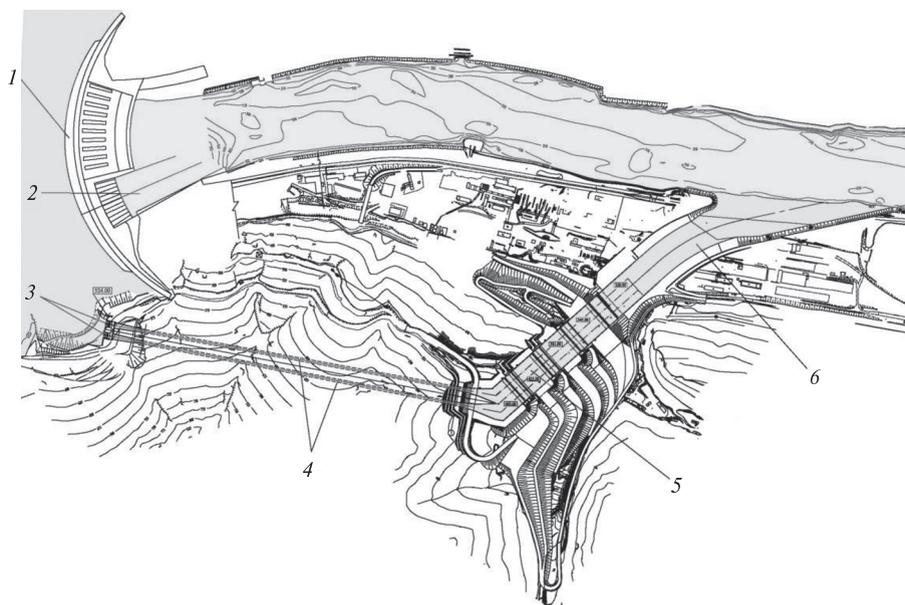


Рис. 6. Береговой водосброс Саяно-Шушенской ГЭС (поз. 3–6):

1 — здание ГЭС; 2 — эксплуатационный водосброс; 3 — входные оголовки берегового водосброса; 4 — водоводы; 5 — пятиступенчатый водогаситель; 6 — отводящий канал

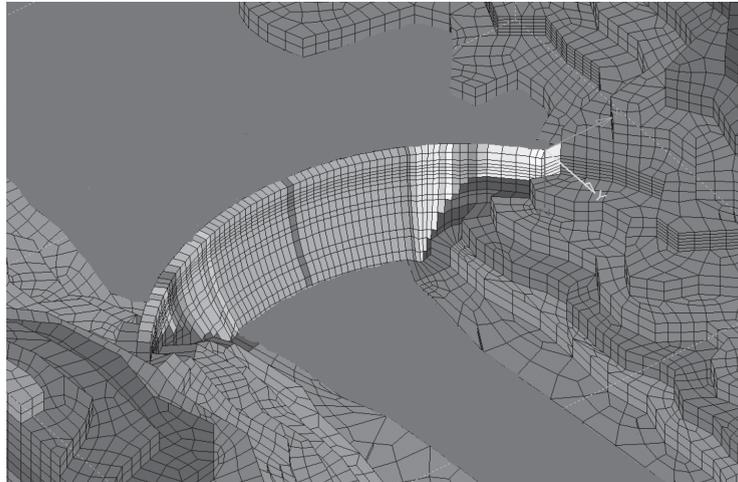


Рис. 7. Конечно-элементная модель плотины СШГЭС и участка вмещающего скального массива (вид с низовой грани)

В ходе многочисленных дискуссий о причинах аварии рассматривалось также явление гидроакустического удара и возникновение вихревого жгута в отсасывающей трубе. Для исследования этих процессов в элементах водопроводящего тракта в СПбГПУ были созданы численные модели (состоящие из нескольких миллионов конечных элементов) и выполнены расчеты с использованием суперЭВМ, включающей 64 процессора, по определению полей давлений и скоростей при различных режимах работы. Примеры расчетов полей скоростей приведены на рис. 10 и 11.

Расчеты позволили представить картину преобразования энергии в проточном тракте гидроагрегата, выявить наиболее сложные места с точки зрения обтекания в проточном тракте, в том числе и параметры вихревого жгута за рабочим колесом. Данные исследования могут быть использованы при модернизации оборудования.

Анализ наиболее вероятных причин аварии на основе изучения разносторонней информации, полученной авторами статьи, в том числе непосредственно на СШГЭС, позволил оперативно выявить возможные сценарии аварийного процес-

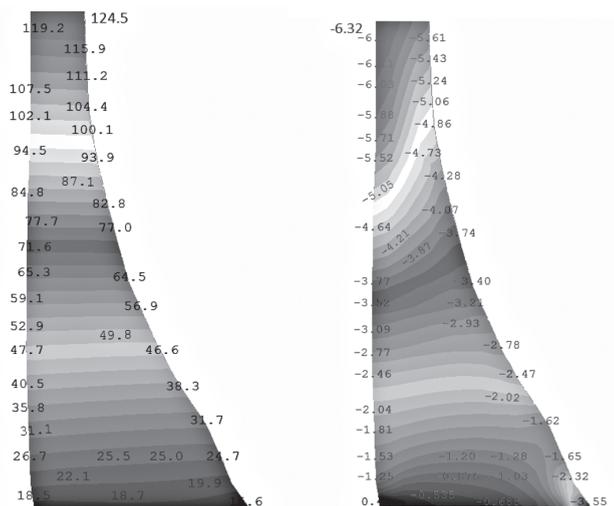


Рис. 8. Горизонтальные перемещения, мм (а) и вертикальные напряжения, МПа (б), секции 33 плотины при НПУ 539 м

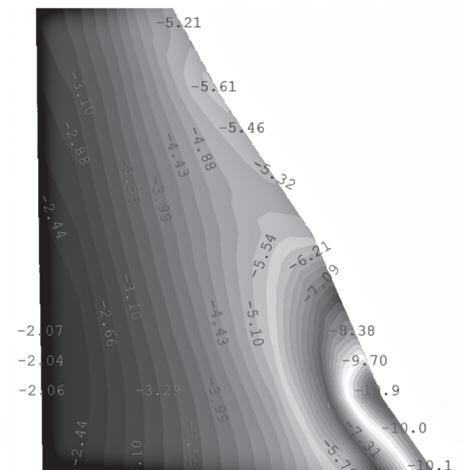


Рис. 9. Вертикальные (консольные) напряжения, МПа в низовом клине плотины при НПУ 539 м

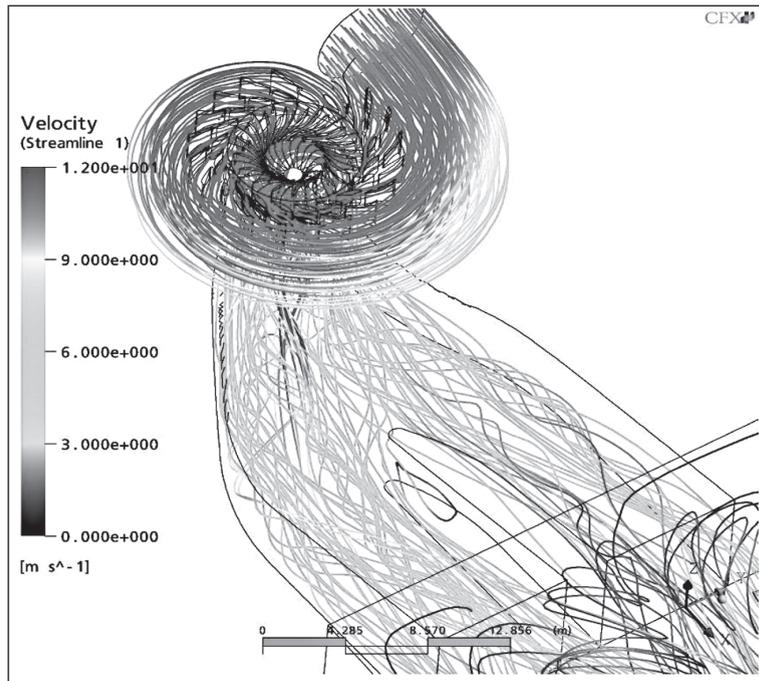


Рис. 10. Поля скоростей в элементах водопроводящего тракта (спиральная камера и отсасывающая труба)

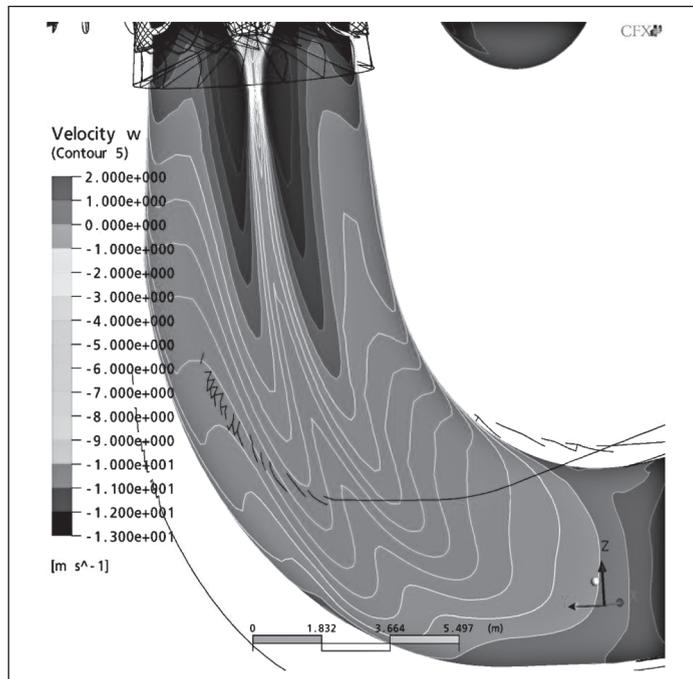


Рис. 11. Исследование вихревого жгута в отсасывающей трубе



са, определить основные направления научного сопровождения при восстановлении ГЭС. Однако сегодня, по прошествии более двух лет с момента аварии, не определен перечень научно-технических работ и не сформирована Федеральная целевая программа по повышению безопасности ГЭС, как действующих, так и строящихся либо намечаемых к проектированию и строительству.

В ближайшие 2–3 года необходимо разработать и внедрить в практику эксплуатации ГЭС системы обеспечения безопасности, включая системы интеллектуального управления по ана-

логии с тем, как это делается на других крупных энергетических и промышленных объектах — тепловых, атомных электростанциях, потенциально-опасных предприятиях.

Авария на СШГЭС в значительной мере может повлиять на перспективы развития гидроэнергетики России. Тем более важен своевременный анализ факторов безопасности, их учет на стадиях проектирования, строительства и эксплуатации. Безопасность в конечном счете связана и со значительной экономической эффективностью использования этого источника возобновляемой энергии.

УДК 621.316

*В.К. Ванин, М.Г. Попов, С.О. Попов*

## **ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ ЗАЩИТ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ**

Критический анализ состояния электроэнергетической отрасли указывает на необходимость существенного повышения надежности транспортировки и распределения электроэнергии, что отмечается во многих работах и официальных документах. Основной причиной этого является рост числа серьезных аварийных событий, приводящих к большим экономическим потерям как в России, так и в мире в целом. Вероятность аварийных событий во многом определяется условиями эксплуатации. При этом в условиях рыночной экономики и дефицита электроэнергии в некоторых регионах электрогенерирующие и сетевые компании эксплуатируют энергооборудование в максимальных режимах работы, близких к критическим. Этому способствует развитие и все более широкое внедрение новых средств интенсивного управления электрооборудованием, которые недостаточно исследованы. Безусловно, такая эксплуатация приводит к ускоренному износу отдельных электроустановок, что существенно влияет на снижение надежности системы электроснабжения в целом. Это становится особенно актуальным для оборудования с близким к истечению нормативным сроком службы или превысившим его.

В этой связи к надежности и эффективности средств релейной защиты электрооборудования предъявляются повышенные требования [1].

Основные показатели эффективности релейной защиты — это ее быстродействие, чувствительность и селективность. Совершенствование средств релейной защиты уменьшает как объем разрушений при внутренних КЗ, так и длительность воздействия возмущения на режим энергосистемы. Основной защитой электрооборудования, обладающей абсолютной селективностью, является дифференциальная защита. Поэтому преимущественное внимание при решении задачи повышения эффективности средств защиты электрооборудования уделяется совершенствованию дифференциальных защит.

### **Влияние погрешности трансформаторов тока на эффективность функционирования дифференциальных защит**

Упрощенная структурная схема дифференциальной защиты представлена на рис. 1. Она содержит первичные преобразователи тока, устройства сопряжения с объектом (УСО) и решающий блок (РБ). В качестве первичных измерительных устройств наибольшее распространение получили электромагнитные трансформаторы тока. В некоторых случаях используются опико-электронные устройства, датчики Холла и др. Устройства сопряжения выполняют функции преобразования сигналов к одному виду, их масштабирование и приведение к единым относи-

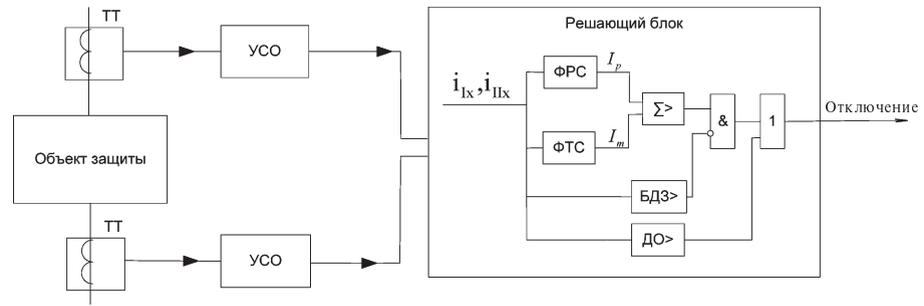


Рис. 1. Структурная схема дифференциальной защиты

тельным единицам. В электромеханических защитах данные функции выполнялись с помощью электромагнитных систем с переменным коэффициентом трансформации, в аналоговой интегральной технике — с использованием пассивных  $R, C$  элементов и операционных усилителей. В микропроцессорных устройствах к УСО относятся вторичные преобразователи сигналов, блок АЦП, а также часть программного обеспечения. В решающем блоке реализуется алгоритм формирования рабочего сигнала защиты и уставка, с которой он сравнивается.

Рабочий сигнал защиты получается как сумма сигналов, пропорциональных токам плеч, за положительное направление которых принимается направление в трансформатор. Далее эти сигналы для удобства восприятия обозначаются как соответствующие токи защищаемого оборудования:

$$i_p = i_{I3} + i'_{II3}, \quad (1)$$

где  $i_I$  — ток первого плеча;  $i'_{II}$  — ток второго плеча, приведенный к току первого плеча.

Таким образом, рабочий сигнал в нормальных режимах и при внешних коротких замыканиях соответствует дифференциальному току силового трансформатора. При КЗ в зоне действия защиты он резко увеличивается, что и является непосредственным признаком внутренних повреждений. Однако в рабочем сигнале, сформированном по уравнению (1), необходимо выделять составляющие, которые обуславливаются факторами, не являющимися признаками внутренних повреждений, и могут привести к неправильному действию защиты. В общем они определяют инструментальную и методическую погрешность работы дифференциальной защиты, которые имеют различную физическую при-

роду. Общепринято говорить о суммарной погрешности и представлять ее виде некоторого абстрактного тока, приведенного к току одного из плеч защиты; его принято называть током небаланса. В случае защиты трансформаторного оборудования он определяется выражением

$$I_{нб} = I_{нб\text{ ит}} + I_{нб\text{ выр}} + I_{нб\text{ РПН}} + I_{нб\text{ нам}}, \quad (2)$$

в которое входят составляющие тока небаланса, обусловленные следующим: погрешностью измерительного тракта дифференциальной защиты ( $I_{нб\text{ ит}}$ ), неточным выравниванием токов плеч ( $I_{нб\text{ выр}}$ ), регулированием коэффициента трансформации под нагрузкой ( $I_{нб\text{ РПН}}$ ), а также составляющая тока небаланса, обусловленная током намагничивания силового трансформатора ( $I_{нб\text{ нам}}$ ).

Здесь важно отметить, что первые две составляющие — это инструментальные погрешности, которые определяются погрешностью первичных преобразователей и устройств сопряжения с объектом. Их можно интерпретировать как несовершенство устройства дифференциальной защиты и средств измерения и называть током небаланса дифференциальной защиты трансформатора. Ток небаланса, обусловленный током намагничивания трансформатора и устройством регулирования под нагрузкой (РПН), определяется исключительно параметрами трансформатора и является методической погрешностью. Таким образом, последние составляющие должны обуславливать определенную коррекцию алгоритмов работы защиты.

Инструментальная погрешность нормируется только в установившихся режимах и не превышает 10 % относительно установившегося значения тока. Однако в переходных режимах данная погрешность может значительно возрастать (до 60 % и более) и тем самым ограничивать быстродействие и чувствительность защиты. При этом

ток небаланса будет определяться током намагничивания первичных преобразователей тока. В случае внешнего КЗ и при допущении о малости методической погрешности можно записать

$$i_{нб} = i_{2I} - i_{2II} = (i'_{1I} - i'_{\mu I}) - (i'_{1II} - i'_{\mu II}) = i'_{\mu II} - i'_{\mu I}, \quad (3)$$

где  $i'_{1I}, i'_{2I}, i'_{\mu I}$  — приведенные значения соответственно первичного, вторичного и намагничивающего тока ТТ первого плеча;  $i'_{1II}, i'_{2II}, i'_{\mu II}$  — то же для второго плеча защиты.

Для обеспечения правильного функционирования защиты необходимо использовать тормозные сигналы (токи). Противоречивые требования к алгоритмам формирования тормозных токов обуславливают их большое разнообразие. Широко распространены следующие алгоритмы: сумма абсолютных значений токов всех присоединений; максимальная сумма положительных и отрицательных полувольт токов плеч; разность суммы абсолютных значений и модуля дифференциального тока; максимальный ток плеча [4].

При этом условии срабатывания дифференциальной защиты описывается в общем случае неравенством

$$I_p - I_{смин} - k_T I_T > 0,$$

где  $I_p$  — дифференциальный ток;  $I_{смин}$  — минимальный ток срабатывания защиты;  $I_T$  — тормозной ток;  $k_T$  — коэффициент торможения.

Основная характеристика дифференциальной защиты при использовании тормозных токов — тормозная, представленная в виде зависимости тока срабатывания защиты от сквозного тока (рис. 2). Она состоит из нескольких участков, на которых принимается различное значение коэффициента  $k_T$ . Выбор этого коэффициента производится исходя из требования обеспечения селективности и необходимой чувствительности защиты. Для этого следует провести исследования переходных процессов при внешних и внутренних повреждениях (рис. 3).

Минимальный требуемый коэффициент торможения определяется из условия обеспечения

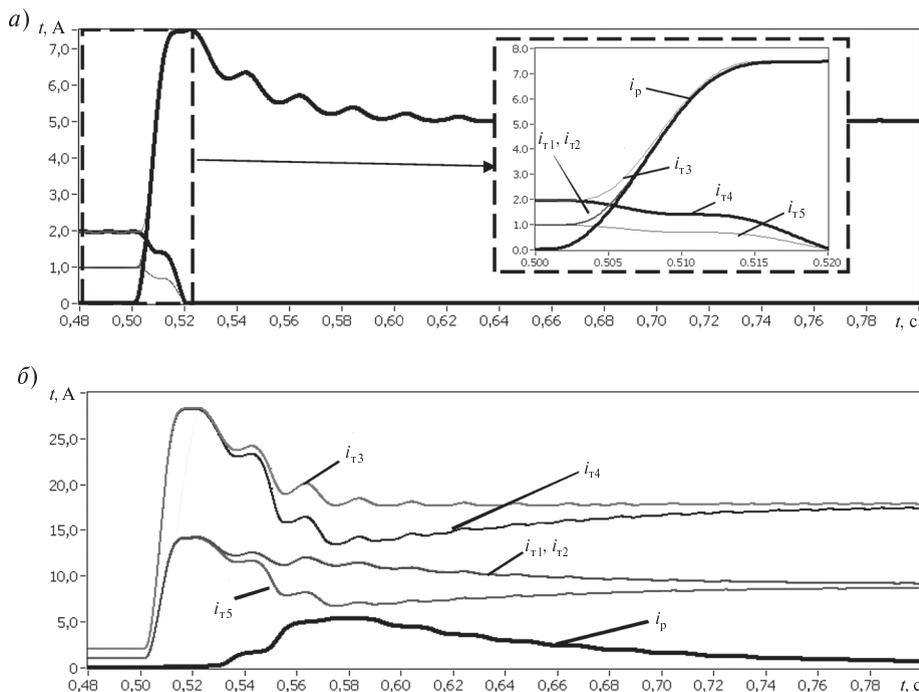


Рис. 3. Рабочие (а) и тормозные ( $i_{T1}, i_{T2}, i_{T3}, i_{T4}, i_{T5}$ ) сигналы при внутренних (а) и внешних (б) коротких замыканиях:  $i_{T1}$  — максимальный ток плеча;  $i_{T2}$  — максимальная сумма положительных и отрицательных полувольт токов плеч;  $i_{T3}$  — сумма абсолютных значений токов плеч;  $i_{T4}$  — разность абсолютных значений токов плеч и дифференциального тока;  $i_{T5}$  — минимальная сумма положительных и отрицательных полувольт

правильной работы защиты при внешних КЗ. При выборе этого коэффициента необходимо учитывать возможность насыщения ТТ и, как следствие, вероятность возрастания погрешности ТТ до больших значений. Исследования показали, что при погрешности ТТ до 60 % минимальный коэффициент торможения должен приниматься в пределах 0,4–0,6 в зависимости от используемого тормозного алгоритма

Снижение коэффициента торможения возможно при использовании фазного торможения или фильтров гармонических сигналов. В этом случае возможно снижение тормозных коэффициентов до 0,2–0,4 (рис. 5, кривая 1). Однако общим недостатком этих методов является замедление действия защиты на 20 мс и более, связанное с необходимым временем расчета соответствующих величин и методической погрешностью этих методов.

В этой связи наиболее целесообразное направление совершенствования дифференциальных защит — это разработка фильтров тока небаланса, обусловленного измерительным трактом, и, соответственно, восстановление значений первичных токов в темпе переходных процессов.

**Использование нелинейного фильтра тока намагничивания в алгоритмах дифференциальных защит**

В общем случае при решении задачи восстановления первичных токов необходимо учитывать параметры всего измерительного тракта, включая характеристики и схему соединения измерительных трансформаторов тока, сопротивление проводов вторичной коммутации и вторичных преобразователей, а также параметры

АЦП. При правильном выборе АЦП и высококачественных вторичных преобразователей с достаточным динамическим диапазоном работы можно считать, что сигналы тока, поступающие на вход решающего блока, линейно пропорциональны вторичному току ТТ  $i_{2A'} = i_{2A}$  (см. рис. 4). Тогда целесообразно использовать фильтр тока намагничивания.

Для полной компенсации тока небаланса фильтр должен проектироваться на основе строгого математического описания ТТ. При этом основные трудности вызывает аппроксимация кривой намагничивания ферромагнитного материала, обусловленные необходимостью учитывать следующие факторы: остаточную индукцию трансформаторов тока; предельные частные циклы характеристики  $H = f(B)$ ; частотную зависимость характеристики намагничивания. Некоторые методы, учитывающие данные явления, представлены в [5]. Сказанное обуславливает то, что время расчета адекватной математической модели может быть недопустимо велико. Вместе с тем в некоторых практических приложениях можно использовать упрощенное математическое описание ТТ.

При использовании фильтра тока намагничивания рабочий и тормозные сигналы формируются согласно следующим выражениям:

$$i_{1Bk} = i_2 + i_{\mu B};$$

$$i_p = i_{1B1} + i_{1B1} = i_{21} + i_{\mu B1} + i_{211} + i_{\mu B11}. \quad (4)$$

Очевидно, что при полной компенсации погрешности ток небаланса защиты будет отсутствовать. При неточной компенсации погрешности ТТ необходимо рассматривать эф-

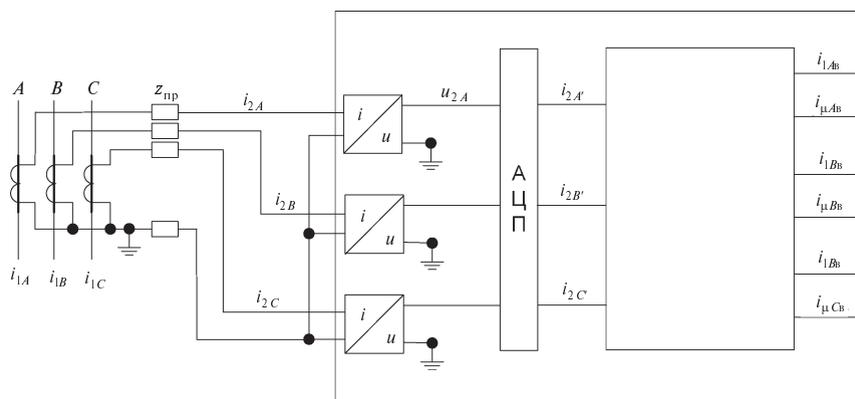


Рис. 4. Структурная схема восстановления первичных токов

фektivность применения фильтра в наихудших условиях работы. В результате исследований, проведенных на кафедре электрических станций и автоматизации энергосистем, была установлена целесообразность использования фильтра тока намагничивания, если его погрешность не превосходит 50 %. В частности, при максимальной погрешности восстановления первичных токов, равной 35 %, удалось снизить минимально требуемый коэффициент торможения до 0,12 при использовании алгоритма торможения «максимальная сумма положительных или отрицательных полуволн токов плеч» (рис. 5, кривая 6).

Дальнейшее совершенствование дифференциальных защит возможно при использовании алгоритмов торможения в функции намагничивающих токов трансформаторов тока.

Для дифференциальной защиты при внешнем КЗ

$$0 = i_{II} + i'_I = i_{II2} + i_{\mu II} + i_{I2} + i_{\mu I}.$$

Рабочий сигнал защиты при этом определяется следующим образом:

$$i_p = i_{\mu II B} - i_{\mu II} - i_{\mu I B} + i_{\mu I}. \quad (5)$$

Работа защиты при внутреннем КЗ описывается выражением

$$i_{K3\Sigma} = i_{II} + i'_I = i_{II2} + i_{\mu II} + i_{I2} + i_{\mu I}.$$

Рабочий сигнал защиты при внутреннем КЗ можно записать в виде

$$i_p = i_{K3\Sigma} - i_{II\mu} - i_{\mu I}. \quad (6)$$

Таким образом, как следует из выражений (2), (3), чтобы, во-первых, дифференциальная защита обладала требуемой селективностью несрабатывания при КЗ вне зоны действия и, во-вторых, ток срабатывания защиты в режиме внутреннего КЗ имел слабую зависимость от тока КЗ, необходимо и достаточно использовать в качестве тормозного сигнала величину, определяемую намагничивающими токами ТТ:

$$i_T = f(i_{\mu TT}).$$

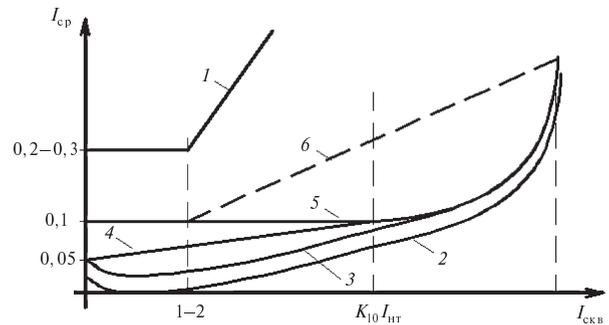


Рис. 5. Тормозные характеристики для различных тормозных алгоритмов

В связи с тем, что намагничивающий ток используется также для компенсации погрешности ТТ, условие (3), (5) можно записать в виде

$$i_{нбк} = i_{II} + i'_I = i_{II2} + i_{\mu II} + i_{I2} + i_{\mu I},$$

где  $i_{нбк}$  — небаланс сигналов дифференциальной защиты с компенсацией погрешности ТТ.

Рассмотренные положения в некоторой степени уже привлекали внимание специалистов [5]. Однако реализация дифференциальных защит с торможением в функции намагничивающих токов стала возможной только благодаря использованию современных средств микроэлектроники, позволяющей качественно производить фильтрацию токов намагничивания в темпе переходных процессов в ТТ.

Исследования показали большую эффективность данного метода. В частности, на рис. 5 показана сравнительная характеристика рассмотренных в работе тормозных алгоритмов, а также погрешность фильтра тока намагничивания (кривая 2) и суммарная погрешность измерительного тракта при частичной компенсации погрешности ТТ (кривая 3).

В заключение отметим, что данные исследования проводились при частичной финансовой поддержке правительства РФ согласно ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Bartley, W.H.** Analysis of transformer failures. William H. Bartley P.E. // International association of engineering insurers [Текст] / 36-th annual conference.— Stockholm.— 2003  
 2. **Львов, М.Ю.** Анализ повреждаемости силовых трансформаторов напряжением 110 кВ и выше

[Текст] / М.Ю. Львов // Электричество.— 2010.— № 2. С. 27–31.

3. **Гараева, Н.Р.** Разработка методики синтеза усовершенствованных математических моделей автотрансформатора [Текст] / Н.Р. Гараева, К.Э. Медина Гарай, М.Г. Попов // Изв. Вузов. Электромеханика

ханика. Спецвыпуск: «Диагностика энергооборудования». — 2010. — С. 28–30.

4. Дроздов, А.Д. Тормозные характеристики дифференциальных защит силовых трансформаторов [Текст] / А.Д. Дроздов, Е.М. Ульяницкий //

Электрические станции. — 1970. — С. 65–69.

5. Ванин, В.К. Релейная защита на элементах аналоговой вычислительной техники [Текст] / В.К. Ванин. — Л. : Энергоатомиздат, 1983. — 206 с.

УДК 62-97: 6г-98

А.В. Артемов

## МЕТОДИКА РАСЧЕТА МОЩНОСТИ ВОЗДУШНОЙ ТУРБИНЫ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ПНЕВМОАККУМУЛЯТОРА ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ

В ряде корабельных устройств может использоваться турбонасос, рабочим телом турбины которого служит воздух высокого давления (ВВД) из пневмоаккумулятора. Давление на входе в сопловой аппарат турбины может достигать 25 МПа, а температура сжатого воздуха изменяется в пределах от 350 до 200 К. Ввиду реализации турбонасосом большой импульсной мощности и ограниченности емкости источника энергии процесс является скоротечным (до 5 с), поэтому теплообменом между рабочим газом и окружающей средой можно пренебречь.

Существующие методики расчета газовых турбин [1–3] разработаны на основе модели идеального газа, которая с достаточной точностью описывает параметры реального газа при высокой температуре. Однако в данных условиях использование этой модели может приводить к значительным погрешностям.

Предлагаемая статья посвящена уточненной методике расчета мощности газовой турбины для высоких давлений и относительно низких температур рабочего тела на основе модели реального газа.

Внутренняя мощность турбины активного типа определяется соотношением [1]

$$N_i = \eta_{0i} \Delta h G, \quad (1)$$

где  $\eta_{0i}$  — внутренний коэффициент полезного действия турбины;  $\Delta h = h_0 - h_2$  — располагаемая энергия турбинной ступени, равная разности энтальпий  $h_0$  на входе в сопловой аппарат турбины и  $h_2$  на выходе из рабочего колеса турби-

ны;  $G$  — массовый расход газа через проточную часть турбины.

Оценим возможный диапазон отклонений в расчетах внутренней мощности турбины при одинаковом расходе воздуха  $G$ , вычисляя его по формулам идеального газа и по соотношениям, учитывающим свойства реального газа.

Значение энтальпии реального газа определяется выражением

$$h = c_p^0 T + h_{\Delta}(\rho, T), \quad (2),$$

где  $c_p^0$  — значение изобарной теплоемкости, определяемое по формулам идеального газа;  $h_{\Delta}(\rho, T)$  — поправка энтальпии, обусловленная учетом реальных свойств газа и зависящая от его параметров состояния.

В рассматриваемом диапазоне давлений и температур приемлемой для проектного расчета точностью обладает уравнение состояния реального газа Редлиха — Квонга. При использовании этого уравнения поправка энтальпии  $h_{\Delta}(\rho, T)$  имеет вид

$$h_{\Delta}(\rho, T) = RT \left[ \left( b - \frac{5a}{2RT^{3/2}} \right) \rho + \left( b^2 + \frac{7ab}{4RT^{3/2}} \right) \rho^2 \right], \quad (3)$$

где  $a$  и  $b$  — коэффициенты уравнения Редлиха — Квонга, определяющиеся видом газа [4].

Внутренний коэффициент полезного действия  $\eta_{0i}$  в проектном расчете воздушной турбины с полным подводом рабочего тела и относи-

тельной высотой рабочей лопатки  $d/l$  в диапазоне 10–15 учитывает следующие виды потерь: в соплах —  $h_c$ ; в каналах рабочего колеса —  $h_{л}$ ; с выходной скоростью —  $h_{\text{вых}}$ ; от утечек газа в зазорах внутри турбины —  $h_{\text{ут}}$ ; от трения диска о газ и вентиляционные потери —  $h_{\text{тв}}$ .

Внутренний коэффициент полезного действия  $\eta_{0i}$  определяется соотношением

$$\eta_{0i} = 1 - \zeta_c - \zeta_{л} - \zeta_{\text{вых}} - \zeta_{\text{тв}} - \zeta_{\text{ут}}, \quad (4)$$

где  $\zeta_i = \frac{h_i}{\Delta h}$  — соответствующий вид потерь;

$$\zeta_{\text{ут}} = \frac{G_{\text{ут}}}{G}.$$

Коэффициенты  $\zeta_c$ ,  $\zeta_{л}$ ,  $\zeta_{\text{вых}}$  и  $\zeta_{\text{ут}}$  при постоянных коэффициентах скорости  $\phi$  и  $\psi$  независимы от располагаемого теплоперепада  $\Delta h$  [1].

Ввиду зависимости коэффициентов скорости от соответствующих чисел Маха изменение  $\phi$  и  $\psi$  при изменении начальных параметров рабочего газа в случае использования источника энергии ограниченной емкости для расширяющегося сопла оценивается по методике, предложенной в [5]. Из-за рассогласования скорости звука для идеального и реального газа в зависимости от его параметров [4] различие коэффициентов скорости оценивается в указанном диапазоне параметров рабочего газа в пределах 5 %.

Коэффициент  $\zeta_{\text{тв}}$  потерь на трение и вентиляцию зависит от соотношения параметров реального газа  $\frac{\rho\sqrt{\Delta h}}{G}$  [2], суммарная погрешность

от которого по сравнению с идеальным газом (при одинаковом расходе) оценивается в пределах 1 %. Вместе с тем вклад коэффициента  $\zeta_{\text{тв}}$  в общую сумму может превышать 10 % [4].

Отношение энтальпий, рассчитанных по моделям реального и идеального газов, проиллюстрировано на рис. 1.

Как видно из представленных результатов, для высоких давлений и относительно низких температур рабочего газа располагаемая энтальпия, рассчитанная по методике для идеального газа, существенно отличается от энтальпии, рассчитанной по методике для реального газа.

Расход рабочего газа через проточную часть турбины  $G$  отражается соотношением (5). Поскольку мы используем источник энергии отно-

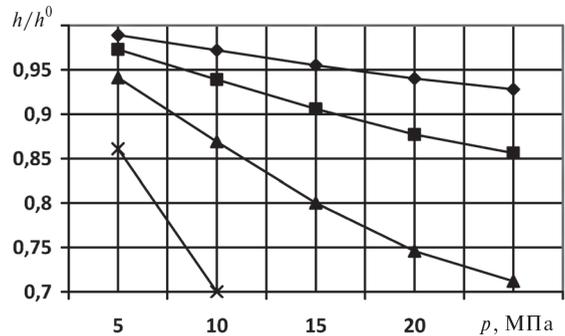


Рис. 1. Отношение значений располагаемой энтальпии, рассчитанных по формулам реального и идеального газа:

◆ — 350 К; ■ — 300 К; ▲ — 250 К; × — 200 К

сительно низкой температуры, то располагаемый теплоперепад в основном создается за счет сверхкритического перепада давления на сопловом аппарате, поэтому истечение газа из сопел будет носить критический характер.

$$G = f_{\text{кр}} \frac{p_0}{\sqrt{RT_0}} q, \quad (5)$$

где  $f_{\text{кр}}$  — площадь критического сечения проточной части;  $q$  — коэффициент режима истечения.

Для критического истечения идеального газа значение коэффициента режима  $q$  является постоянным и определяется соотношением

$$q_0 = \sqrt{k} \left( \frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k+1}{2(k-1)}}; \text{ для реального газа в указанном}$$

диапазоне давлений и температур значение коэффициента  $q$  переменное, определяется начальными и критическими параметрами состояния газа  $q = q(p_0, T_0, p_{\text{кр}}, T_{\text{кр}})$  [4].

Для равных начальных условий относительный критический расход  $G_{\text{кр}}/G_{\text{кр}0}$  будет определяться отношением коэффициентов режима  $q(p_0, T_0, p_{\text{кр}}, T_{\text{кр}})/q_0$ .

Как видно из рис. 2, рассогласование критических расходов реального и идеального газов при различных начальных давлениях  $p_0$  в сопловом аппарате турбины может достигать 30 %.

Сравнив рис. 1 и 2 между собой, можно сделать вывод о том, что при расчете мощности турбины по соотношению (1) при использовании модели реального газа уменьшение располагае-

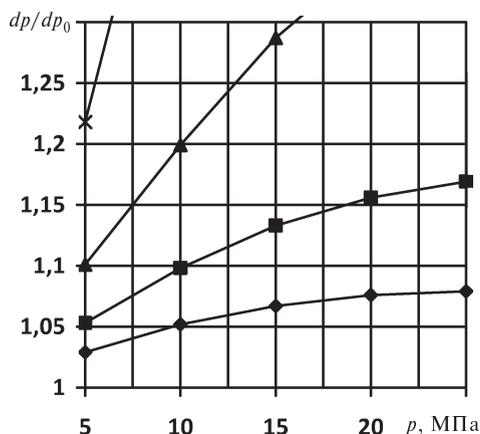


Рис. 2. Относительный критический расход:  
◆— 350 К; ■— 300 К; ▲— 250 К; ✕— 200 К

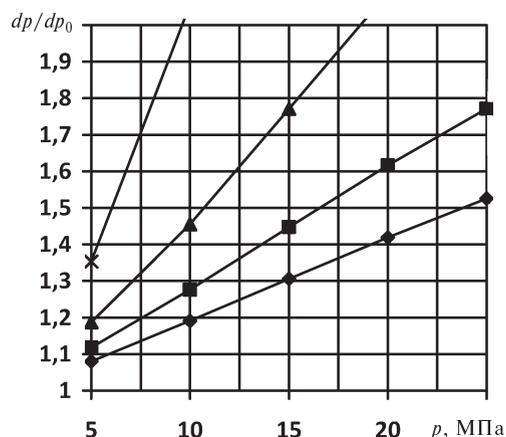


Рис. 3. Относительный градиент давления  
в пневмоаккумуляторе  
◆— 350 К; ■— 300 К; ▲— 250 К; ✕— 200 К

мого теплоперепада компенсируется увеличением расхода через проточную часть. Однако относительный градиент изменения давления в пневмоаккумуляторе  $\frac{dp}{dt} / \frac{dp_0}{dt}$  показывает, что в каждый момент времени давление на входе в сопловый аппарат турбины при использовании модели реального газа значительно ниже давления, рассчитанного по формулам идеального газа. Это рассогласование градиентов давления демонстрирует рис. 3.

Из рис. 3 можно сделать вывод о том, что скорость падения давления в баллоне-ресивере при использовании модели реального газа на 50 % превышает скорость падения давления при использовании модели идеального газа.

Таким образом, предлагаемая усовершенствованная методика расчета турбины в рассматриваемом диапазоне давлений и температур рабочего тела с использованием модели реального газа Редлиха — Квонга позволяет существенно увеличить точность проектного расчета.

Выводы, сделанные в результате исследования:

При одинаковом расходе газа реальная мощность воздушной турбины для рассматриваемого диапазона давлений и температур на входе в турбину может составлять 90–70 % от мощности аналогичной турбины, вычисленной по формулам, справедливым для идеального газа.

Расход реального газа через критическое сечение турбины зависит от его термодинамических параметров и может отличаться от расхода идеального газа на 30 %.

Значение градиента давления в пневмоаккумуляторе при использовании модели реального газа на 50 % превышает величину скорость падения давления при использовании модели идеального газа.

Влияние реальных свойств газа проявляется в большей степени при определении энтальпии. Отличия в соответствующих значениях внутреннего коэффициента полезного действия турбины не превосходит 5 %.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Костюк, А.Г. Турбины тепловых и атомных электрических станций [Текст]: учебник для вузов.— 2-е изд. переработ. и доп. / А.Г. Костюк, В.В. Фролов, А.Е. Булкин, А.Д. Трухний; под ред. А.Г. Костюка, В.В. Фролова.— М. Изд-во МЭИ, 2001.— 488 с.
2. Шляхин, П.Н. Паровые и газовые турбины [Текст] / П.Н. Шляхин.— М.-Л.: Энергия, 1966.— 262 с.
3. Дейч, М.Е. Исследование и расчеты ступеней

- осевых турбин [Текст] / М.Е. Дейч, Б.М. Трояновский.— М.: Машиностроение, 1964.— 627 с.
4. Красильников, Е.П. Теоретические основы расчета корабельных систем воздуха высокого давления [Текст]: учебное пособие / Е.П. Красильников / СПбГМТУ.— СПб., 2007.— 66 с.
5. Ушенин, Л.Н. Проектировочный расчет турбинной установки открытого цикла [Текст]: учебное пособие / Л.Н. Ушенин / СПбГМТУ.— СПб., 2004.— 85 с.



УДК 621.51

А.Л. Беркович, В.Г. Полищук

## ВПРЫСК НАГРЕТОЙ ВОДЫ В КОМПРЕССОР ГАЗОТУРБИННОЙ УСТАНОВКИ

Впрыск воды в компрессор — эффективное средство улучшения параметров работы газотурбинной установки (ГТУ), широко применяемое за рубежом [1]. Степень положительного воздействия впрыска существенно возрастает с уменьшением размеров капель впрыскиваемой воды. Во всех случаях впрыск осуществлялся холодной водой. В последнее время в научной литературе появились сведения о возможности получения очень тонкого распыла воды путем предварительного ее нагрева [2]. В этих работах вода с параметрами свыше примерно 15 бар по давлению и 200 °С по температуре подавалась на обычные центробежные форсунки, где осуществляется ее предварительный распыл. Далее эти капли воды вскипали из-за своей высокой температуры и разрывались на очень мелкие частицы. Непосредственно за форсунками размеры капель равны примерно 20 мкм, а после вскипания они распадаются до размеров менее 1 мкм. Капли столь малого размера, в отличие от капель, образующихся в случае впрыска холодной воды, движутся в большей мере вместе с основным потоком воздуха. Вследствие этого непосредственно после впрыска капли находятся в относительно узкой трубке тока воздуха, т. е. происходит процесс их «шнурования», описанный в [2]. Этот процесс существенно снижает эффект от впрыска, так как основная часть потока воздуха не орошается водой. Для увеличения эффективности такого впрыска требуется дополнительно проведение инженерных мероприятий, позволяющих более равномерно распределить капли в потоке воздуха. Если эти мероприятия будут успешно осуществлены, то следует ожидать значительную интенсификацию процесса испарения воды в проточной части компрессора. В результате этого существенно возрастает эффективность впрыска воды в компрессор ГТУ.

Целью исследований, о которых идет речь в данной статье, была оценка параметров работы компрессора и ГТУ в целом при впрыске нагретой воды и равномерном распределении ее капель в потоке воздуха. Сопоставление полученных результатов с результатами при впрыске холод-

ной воды свидетельствует о целесообразности использования впрыска нагретой воды и продолжения работ по его внедрению.

Оценка производилась на примере использования впрыска в компрессор газотурбинной установки ГТК-10-4, широко используемой на компрессорных станциях магистральных газопроводов. Данная установка выполнена по простой тепловой схеме с регенератором, ее полезная мощность на номинальном режиме равна 10 МВт. Оценка ее эффективности при впрыске воды в компрессор производилась расчетом по программам, разработанным на кафедре турбинных двигателей и установок в СПбГПУ [1].

Параметры работы установки ГТК-10-4 с впрыском холодной воды были ранее подробно изучены и опубликованы [1, 3]. В результате такого впрыска параметры ГТУ значительно возрастают. Так, например, при температуре наружного воздуха + 15 °С мощность ГТК-10-4 увеличивается на 15 %, а при 35 °С — на 30 %. Соответствующие этим условиям относительные приращения КПД установки равны 4,5 и 7 %.

В расчетах параметров ГТК-10-4 с впрыском нагретой воды было принято, что вода с давлением 15 бар и температурой 200 °С впрыскивается в воздушный тракт перед компрессором. Расчеты выполнялись для температур наружного воздуха 15 и 35 °С. Максимальный расход впрыскиваемой воды принимался равным 3 % от расхода воздуха через компрессор. При этом учитывались возможности снижения коэффициента запаса компрессора по помпажу, попадания неиспарившейся воды в регенератор, ухудшения работы камеры сгорания и др. Величина максимального расхода воды должна быть в дальнейшем скорректирована при продолжении работ по внедрению впрыска.

Результаты расчетов параметров работы компрессора при впрыске нагретой воды представлены на рис. 1. В точке совместной работы компрессора и турбины при максимальном расходе воды относительный прирост КПД компрессора

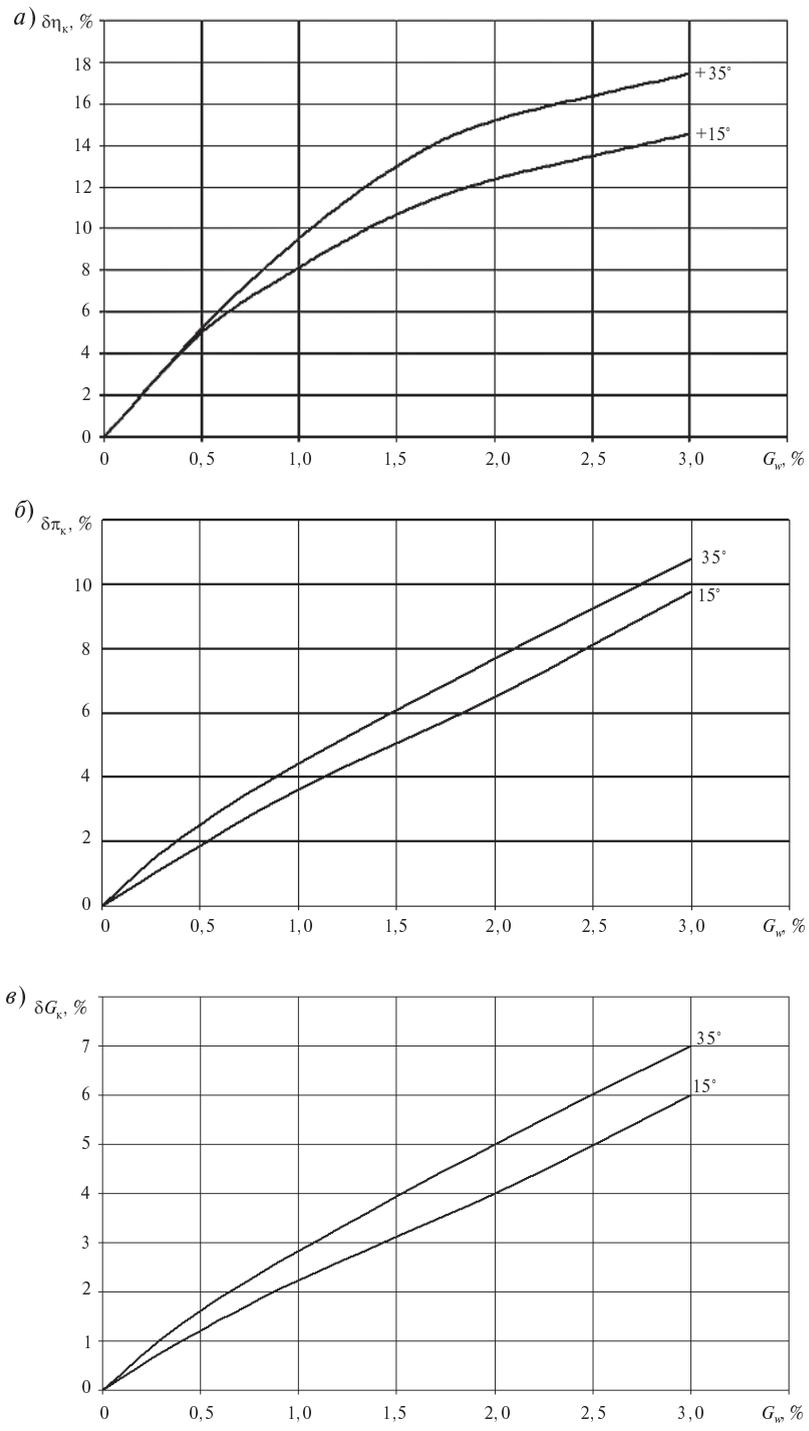


Рис. 1. Параметры работы компрессора при впрыске различного количества  $G_w$  горячей воды в точке совместной работы с турбиной при температурах наружного воздуха 15 и 35 °С: *a* —  $\delta\eta_k$ , приращение КПД компрессора, отнесенное к КПД без впрыска; *б* —  $\delta\pi_k$ , приращение степени повышения давления, отнесенное к  $\pi_k$  без впрыска; *в* —  $\delta G_k$ , приращение расхода воздуха через компрессор, отнесенное к расходу без впрыска

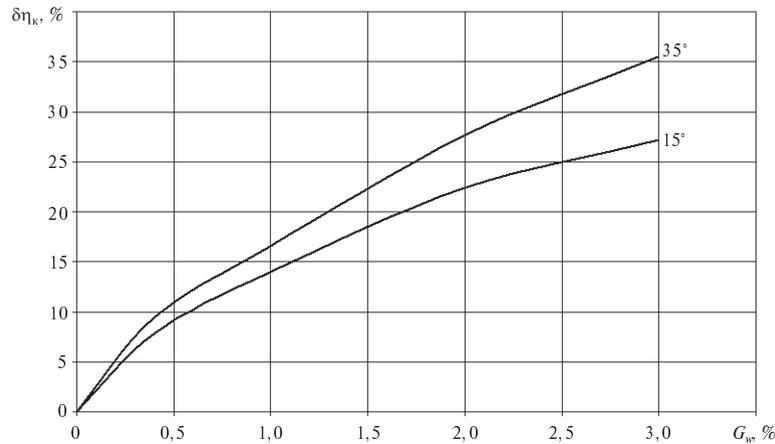


Рис. 2. Величина приращения КПД установки ГТК-10-4 при впрыске различного количества  $G_w$  горячей воды, отнесенного к КПД без впрыска

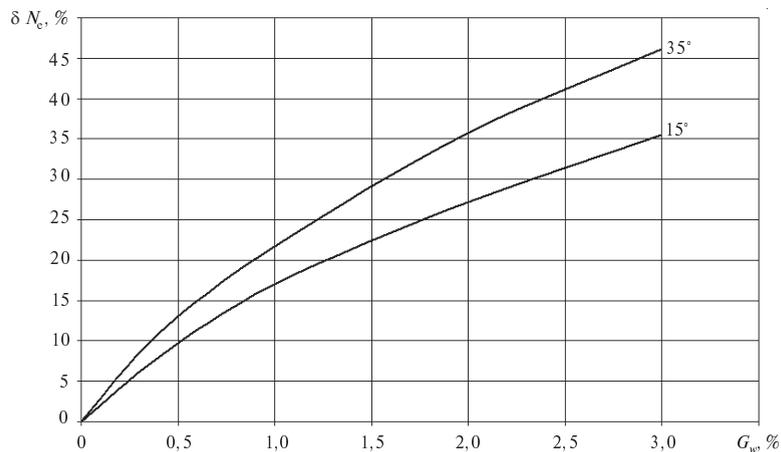


Рис. 3. Величина приращения мощности установки ГТК-10-4 при впрыске различного количества  $G_w$  горячей воды, отнесенного к мощности без впрыска

достигает величин  $\delta\eta_k = 14,5\text{--}17,4\%$ , степени повышения давления  $\delta\pi_k = 9,7\text{--}10,8\%$ , расхода воздуха  $\delta G_k = 6\text{--}7\%$ . Здесь и далее относительные приращения величин (символ  $\delta$ ) равны отношению разницы между их значениями при впрыске воды и без впрыска, отнесенной к значению без впрыска. В результате такого роста параметров компрессора значительно возрастают полезные КПД  $\eta_e$  и мощность  $N_e$  установки. Так, их величины достигают относительных приращений  $\delta\eta_e = 26\text{--}35\%$  и  $\delta N_e = 35\text{--}46\%$  (рис. 2 и 3).

Сравнение параметров при впрыске холодной и нагретой воды показало, что нагретая вода дает

в 1,4–2 раза больший прирост полезной мощности установки, а по коэффициенту полезного действия — в 4–6 раз выше. Использование впрыска нагретой воды дает возможность поддерживать номинальную мощность установки при высоких температурах наружного воздуха. При этом одновременно будет обеспечиваться более высокий по сравнению с номинальным коэффициент полезного действия установки.

Таким образом, выполненные на кафедре ТДУ СПбГПУ расчетные исследования свидетельствуют о целесообразности продолжения работ по внедрению впрыска нагретой водой.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Беркович, А.Л. Впрыск воды в компрессор ГТУ [Текст] / А.Л. Беркович, В.Г. Полищук, В.А. Рассохин.— СПб.: Изд-во Политехнического университета, 2010.— С. 154.
2. Домбровский, Л.А. Распыление перегретой воды: особенности процесса, его диагностика, результаты экспериментальных исследований [Текст] / Л.А. Домбровский, В.И. Залкинд, Ю.А. Зейгарник [и др.] // Теплоэнергетика 2009. № 3.— С. 12–21.
3. Беркович, А.Л. Оптимизация применения впрыска воды в компрессор газотурбинной установки ГТК-10-4 [Текст] / А.Л. Беркович, В.Г. Полищук // Труды СПбГПУ.— 2010. январь (юбилейный выпуск).

УДК 621.313.39

*Т. Нахди, А.С. Ватаев*

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ ПАРАМЕТРОВ ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМЫХ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Результат расчета высокочастотных перенапряжений в обмотках многофазных электрических машин, питаемых от полупроводниковых преобразователей частоты, существенно зависит от того, насколько точно определены параметры схем замещения элементов обмотки и насколько адекватно структура схемы замещения обмотки отражает процессы, протекающие в ней.

В настоящее время при исследовании высокочастотных электромагнитных процессов и перенапряжения наибольшее распространение получили математические модели, где обмотка представляется в виде цепной схемы, число звеньев которой равно числу катушек [1–4]. При определении параметров схемы замещения необходимо учитывать не только собственные, но и взаимные параметры обмотки, обусловленные наличием индуктивных и емкостных связей между смежными элементами катушек, принадлежащих как одной, так и соседним фазам. Наиболее точно отразить влияние взаимных связей между катушками можно при использовании в расчетах интегральных параметров схем замещения обмотки, определяемых в результате эксперимента [3–5].

В статье представлены результаты исследований высокочастотных параметров (ВЧП) обмоток плоского линейного асинхронного двигателя (ПЛАД), разработанного в СПбГЭТУ «ЛЭТИ» и изготовленного во ВНИИМЭМ [2–4].

Все катушки статорной обмотки исследуемого двигателя имеют выводы на измерительную плату, что позволяет определять междукатушечные и межфазные емкости и индуктивности. Для измерений ВЧП использовался *LCR*-измеритель QuadTech 7600 Model B [7]. В работе выполнены измерения ВЧП при подключении измерителя согласно схеме, представленной на рис. 1, а именно: к началу и концу обмотки, между началом обмотки и корпусом при изолированном конце фазы, а также между началом обмотки и корпусом при подключении конца фазы к корпусу. Здесь же представлено обозначение определяемых при этом параметров — продольных эквивалентных индуктивностей ( $L_S$ ) и активных сопротивлений ( $R_S$ ), а также эквивалентных поперечных входных емкости ( $C_{PXX}$ ) и активного сопротивления ( $R_{PXX}$ ). За начало фазы обмотки в указанных опытах принималась точка А.

Число последовательно соединенных катушек в фазах изменяли от 1 до 12. Полученные экспериментальные зависимости представлены в работе [6].

Анализ показал следующее:

экспериментальные зависимости параметров имеют резонансные максимумы и нулевые точки, которые смещаются в область больших частот при уменьшении числа последовательно соединенных катушек в фазе обмотки;

резонансные значения  $R_{Smax}$  соответствуют значениям частоты, при которых  $L_S = 0$ ;

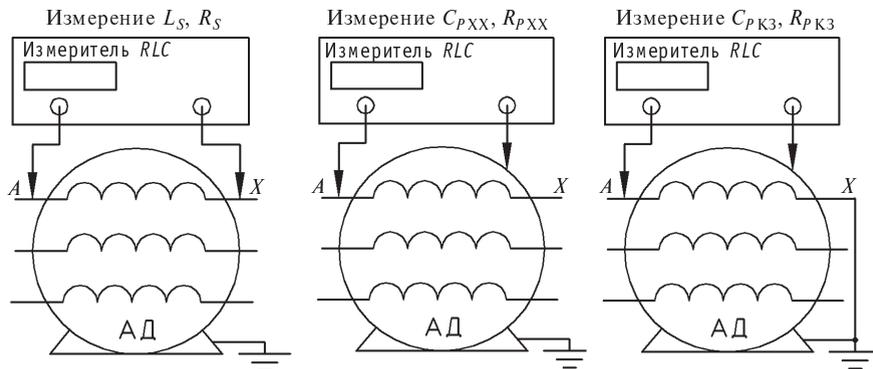


Рис. 1. Схемы подключения RLC-измерителя к исследуемой фазе ПЛАД

частотные зависимости поперечной входной емкости  $C_{PXX}$  также имеют резонансные максимумы и нулевые значения, определяемые взаимными индуктивными и емкостными связями между проводниками, расположенными в одном пазу, и проводниками, расположенными в разных пазах;

экспериментально получены неравенства вида  $L_{S(N_K)} \neq N_K L_{S1}$ ;  $C_{P(N_K)} \neq N_K C_{P1}$ ;  $R_{P(N_K)} \neq N_K R_{S1}$ , которые обусловлены наличием взаимных индуктивных и емкостных связей.

Таким образом, экспериментально подтверждается необходимость учета взаимоиндуктивных связей между проводниками, расположенными в одном пазу, и проводниками, расположенными в разных пазах, при расчете параметров схем замещения катушек для анализа высокочастотных электромагнитных про-

цессов и перенапряжений в статорной обмотке частотно-регулируемых двигателей.

Помимо представленных опытов было также проведено исследование ВЧП при подключении RLC-измерителя согласно схемам, изображенным на рис. 1, с той лишь разницей, что за начало обмотки была принята точка X.

Выявлено, что при изменении схемы подключения измерителя величины параметров  $C_{PXX}$ ,  $R_{PXX}$ ,  $C_{PK3}$  и  $R_{PK3}$  в диапазоне частот от 10 кГц и выше различаются более чем в два раза. Максимальное расхождение (примерно 500 %) получено для значений продольной емкости  $C_{PXX}$  при частоте 58 кГц. В качестве иллюстрации на рис. 2 представлена зависимость эквивалентной продольной емкости  $C_{PXX}$  от частоты. Число последовательно соединенных катушек равно одиннадцати.

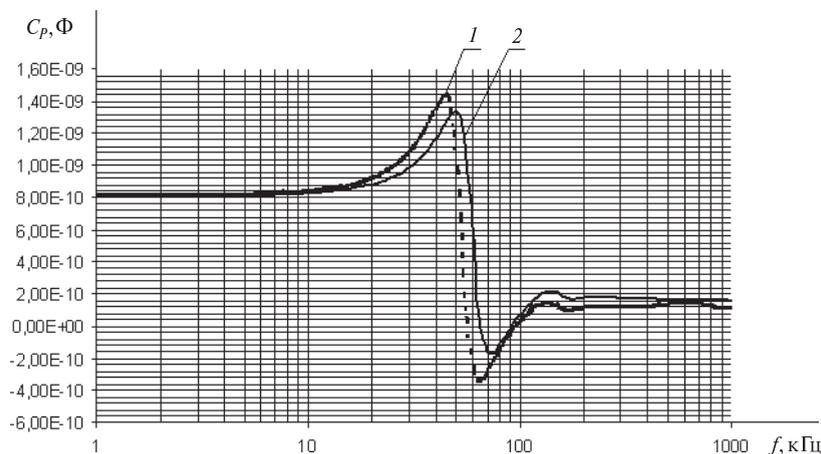


Рис. 2. Частотные зависимости эквивалентной продольной емкости полученные при принятии за начало фазы точки А (1) и точки X (2). Число катушек равно 11

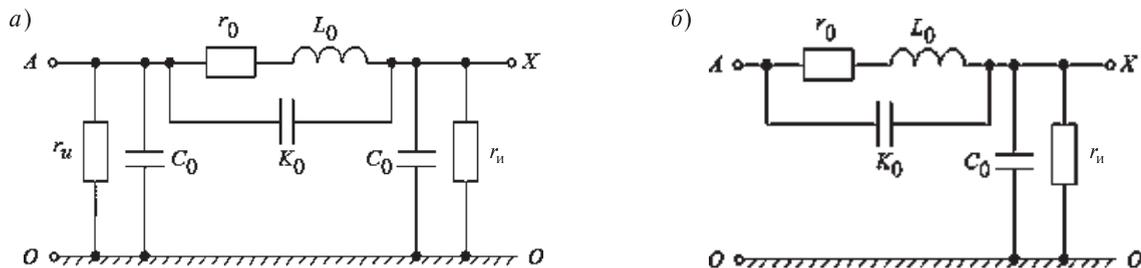


Рис. 3. Эквивалентные схемы замещения элементов обмотки статора:

$r_0$  — активное сопротивление, учитывающее потери в меди, стали и экранах двигателя, Ом;  $L_0$  — индуктивность, учитывающая взаимноиндуктивные связи, Гн;  $C_0$  — емкость проводников катушки относительно корпуса, Ф;  $K_0$  — продольная емкость, учитывающая емкостные связи между витками и катушками, Ф;  $r_n$  — активное сопротивление, учитывающее потери мощности в изоляции обмотки, Ом.

Выявленные обстоятельства должны быть отражены в используемых схемах замещения обмотки, применяемых в численных исследованиях высокочастотных электромагнитных процессов и перенапряжений. В настоящее время для расчетов применяются эквивалентная П-образная и Г-образная схемы замещения, представленные соответственно на рис. 3, а и б.

Параметры схем замещения определялись численно с помощью методики, подробно описанной в [5, 6], по отдельности для каждой из схем замещения и устанавливались в виде функций, учитывающих зависимости каждого ВЧП от частоты, числа катушек, параллельных ветвей, типа обмотки и наличия экранирующих оболочек и т. д.

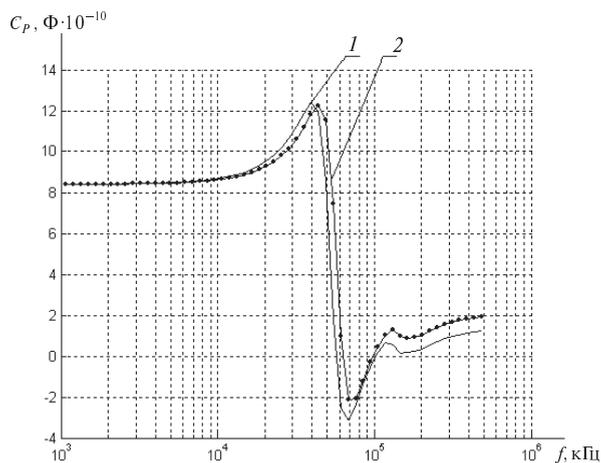


Рис. 4. Расчетные частотные зависимости эквивалентной продольной емкости полученные при принятии за начало фазы точки А (1) и точки Х (2)

Так, например, схеме замещения статорной обмотки ПЛАД, представленной на рис. 3, а, с  $N_K = 6-12$  соответствуют следующие значения первичных ВЧП:

$$r_0 = \begin{cases} 4,05 \left(\frac{f}{f_0}\right)^{1,043} & \text{при } f < 160000 \text{ Гц;} \\ 754 & \text{при } f \geq 160000 \text{ Гц;} \end{cases} \quad (1)$$

$$L_0 = \begin{cases} 3,39 \cdot 10^{-3} \left(\frac{f}{f_0}\right)^{-0,141} & \text{при } f < 160000 \text{ Гц;} \\ 1,643 \cdot 10^{-3} & \text{при } f \geq 160000 \text{ Гц;} \end{cases} \quad (2)$$

$$K_0 = 300 \cdot 10^{-12} \text{ Ф;} \quad (3)$$

$$C_0 = 70 \cdot 10^{-12} \text{ Ф;} \quad (4)$$

$$r_n = \begin{cases} 36,44 \cdot 10^7 \left(\frac{f}{f_0}\right)^{-1,3} & \text{при } f < 160000 \text{ Гц;} \\ 1,5 \cdot 10^{3,75} & \text{при } f \geq 160000 \text{ Гц.} \end{cases} \quad (5)$$

После определения параметров было симметрировано подключение RLC-измерителя между началом фазы и корпусом при подключении конца фазы к корпусу и изолированном от корпуса конце фазы. За начало обмотки, как и в случае экспериментального исследования ВЧП, принимались поочередно точки А и Х. Рассмотрены случаи П-образной и Г-образной схем замещения. Выявлено, что при использовании П-образной схемы замещения ввиду симметрии последней



расхождения волновых параметров не наблюдается. В то же время при использовании Г-образной схемы замещения данное расхождение удастся получить, однако его величина заметно меньше, чем обнаруженная в результате эксперимента. Тем не менее качественный характер изменения зависимостей параметров совпадает с экспериментальным. В качестве примера на рис. 4 приведены расчетные зависимости эквивалентной продольной емкости  $C_p$ , полученные при выборе в качестве начальной точки обмотки точек А и Х.

Таким образом, применение П-образной схемы замещения для анализа перенапряжений в обмотках электрических машин, питаемых от полупроводниковых преобразователей частоты, не всегда оправдано, т.к. она не отражает в полной мере особенности протекания в обмотке высокочастотных электромагнитных процессов,

а сама обмотка не может считаться симметричной цепью при частотах от 10 кГц и выше.

Зависимости входных ВЧП от частоты выражаются графиками, имеющими резонансные максимумы и нулевые точки в области 100–150 кГц, смещающиеся в сторону увеличения частоты при уменьшения числа катушек в фазе обмотки.

Выявлено, что при частотах выше 10 кГц величины поперечных параметров обмотки зависят от того, какая ее точка выбрана в качестве начальной.

Показано, что при анализе высокочастотных электромагнитных процессов обмотка статора не может быть представлена с помощью симметричной схемы замещения.

Авторы выражают сердечную благодарность доктору технических наук профессору Ю.П. Коськину за ценные советы и помощь в работе над статьей.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Каганов, З.Г. Электрические цепи с распределенными параметрами и цепные схемы [Текст] / З.Г. Каганов.— М.: Энергоатомиздат, 1990.— 248 с.
2. Коськин, Ю.П. Перенапряжения в частотно-управляемых линейных асинхронных двигателях [Текст] / Ю.П. Коськин, М.Н. Беналлал.— СПб: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2003.— 60 с.
3. Беналлал, М.Н. Перенапряжения в частотно-управляемых линейных асинхронных двигателях при широтно-импульсной модуляции напряжения [Текст]: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.09.01/М.Н. Беналлал / Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет им. В.И. Ульянова (Ленина) «ЛЭТИ».— СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ».— 2004.— 14 с.
4. Доан Ань Туан. Высокочастотные электромагнитные процессы в электроприводе с линейным асинхронным двигателем при питании от преобразователя частоты с широтно-импульсной модуляцией [Текст] / автореферат дисс. ... к. т. н. / Доан Ань Туан // СПбГЭТУ (ЛЭТИ).— 2007.— 16 с.
5. Ватаев, А.С. Высокочастотные электромагнитные процессы и Перенапряжения в частотно-регулируемых асинхронных электродвигателях с короткозамкнутым ротором [Текст]: автореферат дисс. ... канд. техн. наук // СПбГП.— 2009.— 16 с.
6. Беналлал, М.Н. Определение высокочастотных параметров электрических машин переменного тока [Текст] / М.Н. Беналлал, А.С. Ватаев, Доан Ань Туан, Т. Нахди // Известия СПбГЭТУ (ЛЭТИ).— 2011.— № 5.— С. 78–86.
7. Instruction Manual «7600 Precision LCR Meter Model В» Quadtech [Текст] / Inc. 1997.— 5 Clock Tower Place, 210 East Maynard. Massachusetts. USA.— 01754-2530.— October, 2002.

УДК 621.9.048.4

*А.С. Куприянов, А.Н. Журавлев*

### ВЫБОР ИСТОЧНИКА ПИТАНИЯ ДЛЯ ЭЛЕКТРОЛИТНО-ПЛАЗМЕННОГО ПОЛИРОВАНИЯ ЦВЕТНЫХ СПЛАВОВ В ПРОТОЧНОМ ЭЛЕКТРОЛИТЕ

В связи с развитием отрасли машиностроения возрастает потребность в оборудовании для проведения финишных и отделочных операций, полирования и т. д. Методы полирования дета-

лей, применяемые в настоящее время, обладают низкой производительностью и, кроме механического полирования, отрицательно влияют на экологию. Процесс электролитно-плазменного

полирования (ЭПП) благодаря использованию нетоксичных электролитов не несет вреда окружающей среде и обладает самой высокой производительностью по сравнению с другими методами полирования. Однако метод ЭПП обладает одним недостатком — высокой энергоемкостью, вследствие чего к источникам питания предъявляются особые требования: мощность 10–50 кВт, напряжение 250–400 В, сила тока 25–125 А.

Установки ЭПП, предназначенные для учебных и исследовательских целей, обычно не могут обрабатывать детали площадью более 30 см<sup>2</sup>. Поэтому возникла необходимость в новом источнике питания, который позволит полировать детали площадью 100 см<sup>2</sup>.

Разработан проект нового источника питания (ИП-2) на ток до 45 А, что позволит обрабатывать детали большой площади. В данной статье так же рассмотрен источник питания ИП-3.

Поскольку процесс ЭПП энергоемкий, то необходимо знать и по возможности повысить КПД,  $\cos\phi$ , а также проанализировать влияние источника питания на питающую сеть. Коэффициент мощности является основным критерием эффективности использования электроэнергии, а потому целесообразно рассмотреть способы повышения коэффициента мощности.

Кроме того, представляют интерес зависимости шероховатости и производительности от коэффициента пульсации, который характеризует форму напряжения источника питания. В этой связи в источнике питания использовались: однофазная мостовая схема, трехфазная мостовая схема и обыкновенные неуправляемые диоды. Форма выпрямленного напряжения характеризуется коэффициентом пульсации  $q$ . Коэффициент пульсации для однофазной мостовой схемы определяется выражением

$$q = U_{m1}/U_d, \quad (1)$$

где  $U_{m1}$  — амплитудное значение 1-й гармоники выпрямленного напряжения;  $U_d$  — действующее значение напряжения.

Коэффициент пульсации для трехфазного мостового выпрямителя определяется выражением

$$q = \frac{2}{m^2 - 1}, \quad (2)$$

где  $m$  — кратность частоты переменной составляющей к частоте сети, зависящая от схемы вы-

прямителя и называемая числом фаз выпрямителя, или пульсностью выпрямителя\*.

Рассмотрим спроектированный и фактический источник питания, выделим основные достоинства и недостатки предложенных вариантов. Спроектированный источник питания ИП-2 представлен на рис. 1.

Был спроектирован источник питания ИП-2, который состоит из главного рубильника  $Q1$  (1) контрольной лампы Л1 (2), трансформатора Т1 (3), выпрямителя (4), амперметра (5), вольтметра (6) и электродвигателя (9) привода системы охлаждения диодов. Трехфазное напряжение подается на главный рубильник  $Q1$ . Контрольная лампа Л1 информирует о наличии напряжения на установке. Далее к первичным обмоткам ступенчато регулируемого трансформатора Т1, преобразующего трехфазное напряжение 380 В в напряжение 170 В, обмотки которого соединены звездой. Напряжение с выходов трансформатора подается на трехфазный мостовой выпрямитель 4, состоящий из диодов  $VD1$ – $VD6$  на ток 200 А и напряжение 600 В. На выходе выпрямителя для сглаживания напряжения включен конденсатор емкостью  $C_1 = 800$  мкФ. Также к выходным клеммам подключены амперметр 5 и вольтметр 6 для контроля электрических параметров процесса. Кроме того, в установке расположен электродвигатель с вентилятором для охлаждения диодов, который включается выключателем  $Q2$  8. Далее рассмотрим фактический источник питания, он представлен на рис. 2.

Источник питания ИП-3 состоит из главного рубильника  $Q1$  1, контрольной лампы Л1 2, реостата 4, выпрямителя 3, амперметра 5, вольтметра 6 и электродвигателя 7 привода системы охлаждения диодов. Трехфазное напряжение подается на главный рубильник  $Q1$ . Контрольная лампа Л1 информирует о наличии напряжения на установке. Напряжение с главного рубильника подается на трехфазный мостовой выпрямитель 4, состоящий из диодов  $VD1$ – $VD6$  на ток 200 А и напряжение 600 В. К выходным клеммам подключены амперметр 5 и вольтметр 6 для контроля электрических параметров процесса. Кроме того, в установке расположен электродвигатель с вентилятором для охлаждения диодов,

\* Горбачев, Г.Н. Промышленная электроника: Учебник для вузов // М.: Высшая школа, 1982.— 496 с.

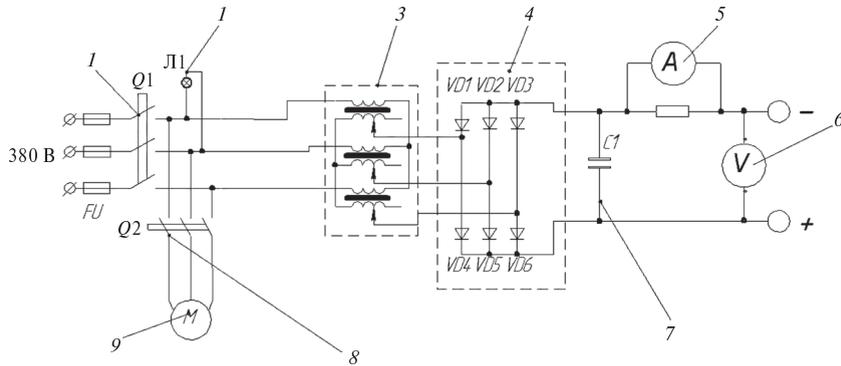


Рис. 1. Принципиальная схема спроектированного источника питания ИП-2

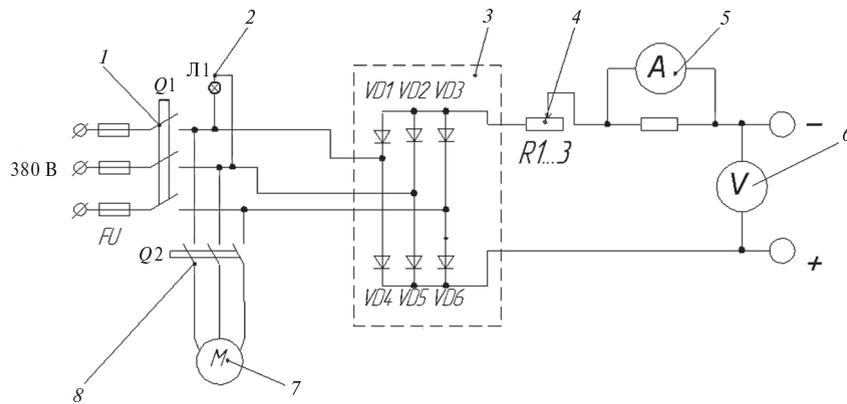


Рис. 2. Принципиальная схема фактического источника питания ИП-3

который включается выключателем  $Q2$ . Регулирование напряжение осуществляется с помощью реостата. Предложено два варианта источников питания: спроектированный источник питания ИП-2 и источник питания установки ЭПП-2 (ИП-3). Оба источника характеризуются высокими потребляемыми мощностями (40–45 кВт)

и рабочим током (50–90 А). В ИП-3 регулирование напряжения осуществляется изменением числа витков вторичной обмотки. В ИП-3 регулирование напряжения осуществляется изменением сопротивления реостатов. Технические характеристики источников питания приведены в табл. 1.

Таблица 1

Технические характеристики источника питания

Источник питания	Наименование элемента	Модель элемента	Сила тока $I$ , А	Наряжение $U$ , В	Емкость $C$ , мкФ
ИП-2	Трансформатор	Трансформатор ТС-3500/10-93У2	118	500	—
	Диод	ВЛ200Х	160	800	—
	Конденсатор	К40-17	—	1500	40
ИП-3	Диод	ВЛ200Х	160	800	—
	Реостат	—	20А	400	—

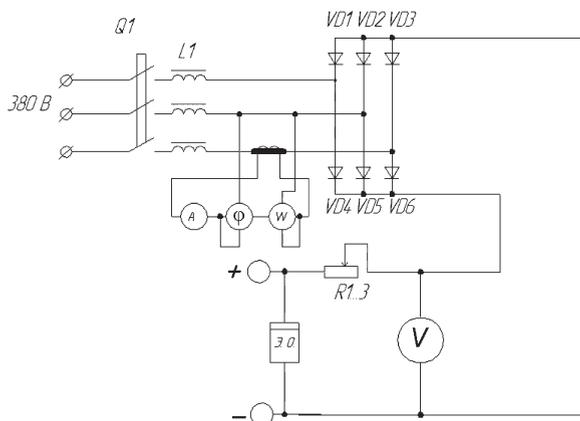


Рис. 3. Электрическая схема измерения коэффициента мощности  $\cos\phi$  и коэффициента пульсации  $q$

Спроектированный источник питания ИП-2 имеет диапазон регулирования напряжения 280–320 В за счет применения регулируемого трансформатора, что позволяет обрабатывать разные материалы. Источник питания ИП-3 более прост и технологичен в изготовлении. Поскольку в ИП-3 отсутствует блок конденсаторов и регулируемый трансформатор, то это повышает  $\cos\phi$  за счет снижения реактивной мощности, но снижает КПД. Изменение напряжения источника питания установки ЭПП-2 осуществляется с помощью реостата, что проще и быстрее, чем переключение вторичных обмоток регулируемого трансформатора на спроектированном источнике питания.

В проведенных исследованиях были получены зависимости шероховатости и производи-

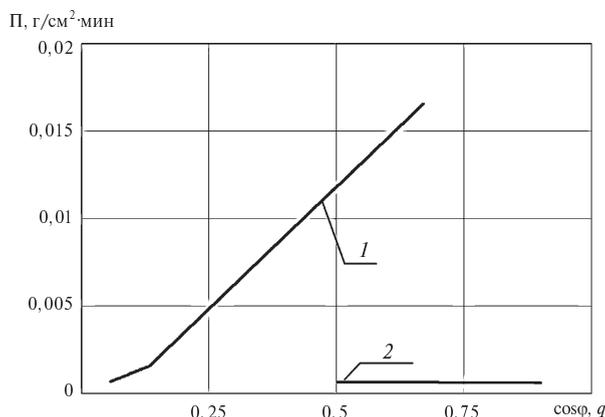


Рис. 4. Зависимость производительности  $P$  от коэффициента пульсации  $q$  (1) и коэффициента мощности  $\cos\phi$  (2)

тельности от коэффициента мощности  $\cos\phi$  и коэффициента пульсации  $q$ . Они представлены на рис. 4, 5.

*Исходные данные:* напряжение —  $U = 320$  В; раствор —  $\text{NH}_4\text{Cl}$ ; концентрация электролита —  $n = 0,6$  моль/л; начальная температура электролита —  $t = 90$  °С; материал образца — Л62; площадь обрабатываемой поверхности —  $S = 32$  см<sup>2</sup>; обрабатываемая длина —  $l = 50$  мм, ширина образца —  $b = 30$  мм, толщина образца —  $h = 2$  мм; плотность тока —  $i = 0,2 - 0,5$  А/см<sup>2</sup>; время обработки —  $\tau = 3$  мин; исходная шероховатость —  $Ra_{\text{исх}} = 1,2$  мкм; скорость перемешивания электролита —  $v = 0,15$  м/с.

Значения напряжения, скорости перемешивания электролита, времени обработки и концентрации электролита выбраны на основе данных, полученных в предварительных экспериментах.

На рис. 3 представлена электрическая схема подключения приборов для измерения коэффициента мощности  $\cos\phi$  и коэффициента пульсации  $q$ .

Результаты эксперимента по исследованию влияния коэффициента пульсации  $q$  на шероховатость и производительность ЭПП в проточном электролите представлены в табл. № 2

Результаты эксперимента по исследованию влияния коэффициента мощности  $K_M$  на шероховатость и производительность ЭПП в проточном электролите представлены в табл. 4.

Зависимости производительности и шероховатости от коэффициента пульсации и коэффициента мощности представлены на рис. 4 и 5.

Проведенные исследования показали, что снижение коэффициента пульсации до 0,0571 снижает шероховатость поверхности, получаемой при ЭПП в проточном электролите, до 0,334 мкм по параметру  $Ra$ . Если коэффициент пульсации превышает или равен 0,67, то процесс ЭПП невозможен, так как пульсация напряжения не позволяет возникнуть стабильному электрическому разряду. Повышение коэффициента пульсации до 0,67 приводит к повышению производительности процесса ЭПП в проточном электролите до 0,15698 г/см<sup>2</sup>·мин, вплоть до полного прекращения процесса ЭПП. Если коэффициент пульсации превышает или равен 0,67, то начинается процесс анодного растворения в режиме высоких напряжений (320 В), что объясняет высокую производительность (1,65879 г/см<sup>2</sup>·мин) в эксперименте № 3.

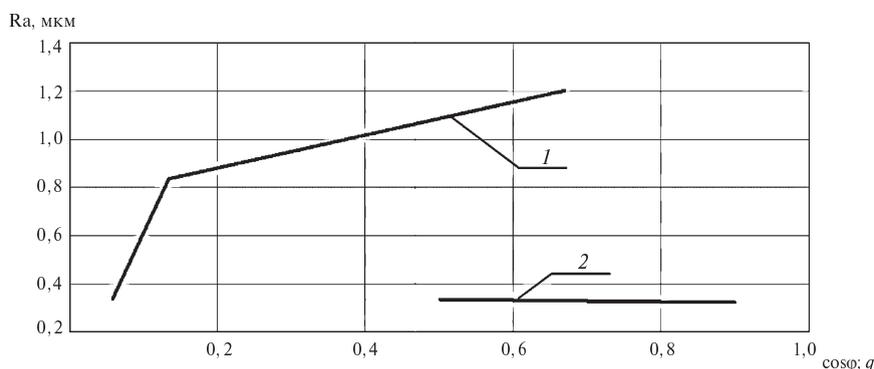


Рис. 5. Зависимость шероховатости  $Ra$ , от коэффициента пульсации  $q$  (1) и коэффициента мощности  $\cos\varphi$  (2)

Таблица 2

**Зависимости производительности и шероховатости от коэффициента пульсации  $q$**

Номер эксперимента	Шероховатость $Ra$ , мкм				Производительность $\Pi$ , г/см <sup>2</sup> мин	Напряжение $U$ , В	Коэффициент пульсации $q$
	$Ra_1$	$Ra_2$	$Ra_3$	$Ra_{cp}$			
1	0,380	0,322	0,302	0,334	0,0006745	320	0,0571
2	0,610	0,482	0,510	0,834	0,0015698	320	0,1333
3	1,348	1,080	1,180	1202	0,0165879	320	0,67

Таблица 3

**Зависимости производительности и шероховатости от коэффициента мощности  $\cos\varphi$**

Номер эксперимента	Шероховатость $Ra$ , мкм				Производительность $\Pi$ , г/см <sup>2</sup> мин	Напряжение $U$ , В	Коэффициент пульсации, $q$	$\cos\varphi$
	$Ra_1$	$Ra_2$	$Ra_3$	$Ra_{cp}$				
1	0,380	0,322	0,302	0,334	0,0006745	320	0,0571	0,5
2	0,348	0,290	0,326	0,322	0,0006125	320	0,0571	0,9

Спроектированный источник питания ИП-2 имеет диапазон регулирования напряжения 280–320 В за счет применения регулируемого трансформатора, что позволяет обрабатывать разные материалы. Источник питания ИП-3 более прост и технологичен в изготовлении. Поскольку в ИП-3 отсутствует блок конденсаторов и регулируемый трансформатор, это повышает  $\cos\varphi$  за счет снижения реактивной мощности, но снижает КПД. Изменение напряжения источника питания установки ЭПП-2 осуществляется с помощью рео-

стата, что проще и быстрее, чем переключение вторичных обмоток регулируемого трансформатора на спроектированном источнике питания. Наличие регулируемого трансформатора в ИП-2 снижает коэффициент мощности  $\cos\varphi$ . ИП-3 лишен этого недостатка за счет отсутствия регулируемого трансформатора, а реостаты потребляют активную составляющую мощности. Учитывая преимущества источника питания ИП-3, используем этот вариант ИП для сборки и применения на установке ЭПП-2.

УДК 621.311

*А.А. Лapidус, С.Н. Соловьева*

## **АНАЛИЗ ТЕРМИЧЕСКОГО ДЕЙСТВИЯ ТОКОВ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ В КАБЕЛЬНЫХ ЛИНИЯХ НАПРЯЖЕНИЕМ 0,4 КВ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ МЕСТА ПОВРЕЖДЕНИЯ**

В связи с тем, что довольно большая доля пожаров происходит по причине возгорания кабельных линий (КЛ) в системах электроснабжения напряжением 0,4 кВ, актуален вопрос об уточнении методик проверки кабелей по тепловому воздействию токов короткого замыкания (КЗ). При этом необходимо производить наиболее точный расчет конечной температуры нагрева кабелей как при условии своевременного устранения аварии, когда срабатывает ближайший аппарат защиты (автоматический выключатель — АВ), так и при затянувшемся процессе протекания токов КЗ и срабатывании вышестоящего АВ с учетом уставки селективности.

Однако в уточнении нуждаются не только сами методики проверки кабелей по допустимым температурам нагрева, но и нормативно-техническая документация, регламентирующая выбор и проверку КЛ на термическую стойкость (ТС) и невозгорание (НВ). Расчетная продолжительность КЗ для двух условий (по ТС и НВ) будет разной. При проверке кабелей на ТС необходимо учитывать время отключения основной защиты от токов КЗ, в зону которой входит проверяемый кабель (как правило, в качестве такой защиты в сетях до 1 кВ выступают электромагнитные или электронные расцепители АВ). При проверке на НВ учитывается время реализации дальнего резервирования. В этом случае поврежденный участок отключается срабатыванием теплового или электромагнитного/электронного расцепителя АВ смежного присоединения.

Основными документами, в соответствии с которыми необходимо выполнять проверку кабелей по вышеуказанным условиям, являются Правила устройства электроустановок [1], действующий государственный стандарт [2] и противопожарный циркуляр [3].

ГОСТ Р 52736-2007 [2] регламентирует: при проверке силовых кабелей на НВ при коротких замыканиях расчетную точку КЗ следует выбирать в начале кабеля независимо от того, является

ли он одиночным или частью КЛ, содержащей несколько параллельно включенных кабелей. Если одиночный кабель имеет ступенчатое сечение по длине, то для каждого участка с новым сечением кабеля необходимо принимать свою расчетную точку КЗ в начале этого участка [2, п. 6.4.1].

Противопожарный циркуляр № Ц-02-98(э) [3] предлагает проверять силовые кабели напряжением до 1 кВ по условиям НВ при коротком замыкании в начале КЛ и допускает осуществлять данную проверку при КЗ на расстоянии 20 м от начала кабеля. Следует отметить, что требования данного циркуляра не являются обязательными, а имеют рекомендательный характер в дополнение к требованиям главы 1.4 ПУЭ.

В главе 1.4 «Выбор электрических аппаратов и проводников по условиям КЗ» [1] термин «невозгорание» не упоминается вообще. ПУЭ регламентирует проверку по режиму КЗ в электроустановках до 1 кВ только распределительных щитов, токопроводов и силовых шкафов. Проверка кабелей не предусматривается ни по ТС, ни на НВ. Однако в седьмом издании ПУЭ, вероятно, будет введена рекомендация проверки кабелей напряжением до 1 кВ на НВ [4], так как эта проверка позволит достичь более высокого уровня надежности электрооборудования при эксплуатации благодаря снижению вероятности возникновения пожаров при КЗ.

При исследовании данной проблематики был создан программный модуль в рабочей среде Microsoft Office Access. Интерфейс разработанного модуля представлен на рис. 1. Программа позволяет производить расчет температур нагрева КЛ при возникновении КЗ на любом расстоянии от ее начала, используя типовую схему электроснабжения и учитывая тепловой спад тока, появляющийся вследствие увеличения активного сопротивления токоведущей жилы кабеля. Продолжительность протекания токов КЗ определяется автоматически исходя из величин

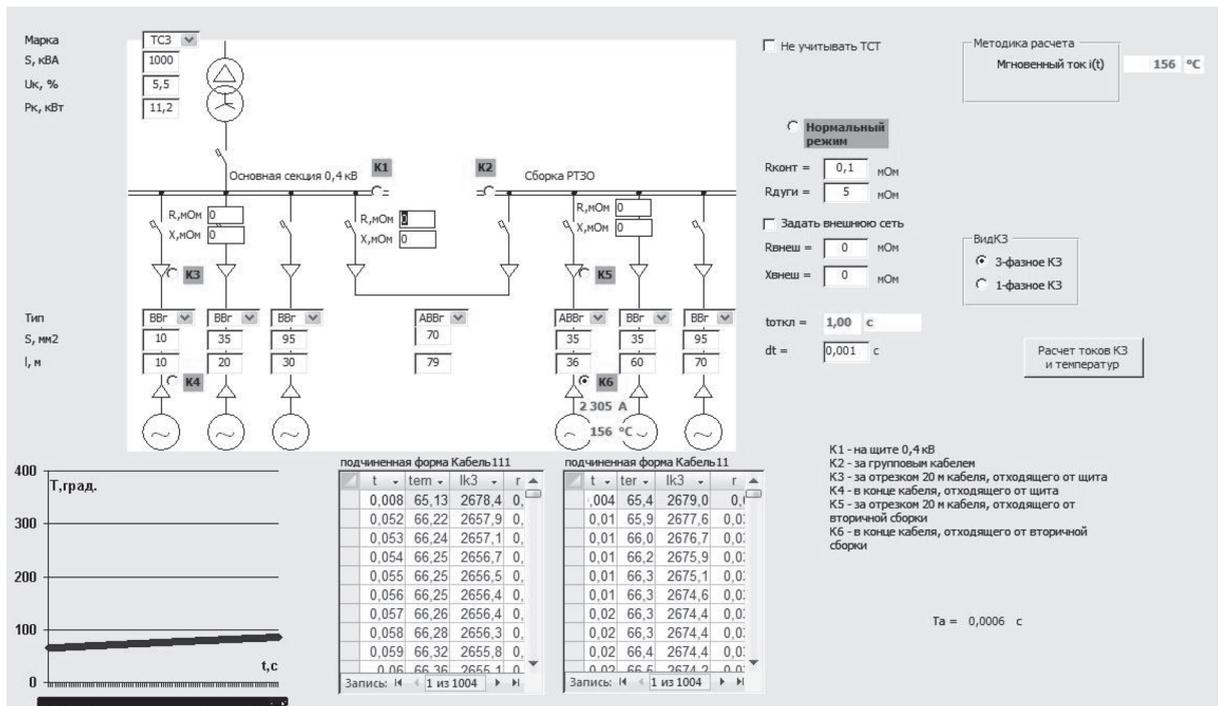


Рис. 1. Интерфейс программного модуля

ны рассчитанного тока на каждом шаге интегрирования с помощью существующих время-токовых характеристик (ВТХ) расцепителей АВ.

С помощью разработанного модуля производились расчеты для различных кабелей и параметров схемы.

Температуру нагрева КЛ можно определить по методике, основанной на расчете мгновенного значения полного тока КЗ  $i(t)$  [5, 6]:

$$\Delta\theta = \frac{i(t)^2 r_k \Delta t}{c\gamma S l},$$

где  $\Delta t$ ,  $\Delta\theta$  — приращения времени и температуры нагрева КЛ на каждом шаге интегрирования;  $i(t)$  — мгновенное значение полного тока КЗ;  $r_k$ ,  $S$ ,  $l$ ,  $c$ ,  $\gamma$  — параметры КЛ (активное сопротивление, площадь сечения, длина, удельная теплоемкость и плотность материала линии).

Как видно из предложенной формулы, нагрев проводника зависит не только от параметров кабеля, протекающего по нему тока и продолжительности КЗ, но и от места возникновения повреждения. В процессе исследования последнего фактора было получено несколько видов зависимостей температур нагрева КЛ от места возникновения КЗ. В данной статье представлены

два примера, в которых кабели проходят проверку на НВ при КЗ в расчетных точках, предлагаемых нормативно-техническими документами [1–3], но в то же время существует один или несколько участков длины КЛ (участки  $l_{НВ}$  на рис. 3), при возникновении КЗ на которых температура нагрева превышает допустимую по НВ (рис. 3).

При выборе и проверке кабелей по нагреву токами КЗ расчетным считается наиболее тяжелый режим, при котором токи КЗ имеют максимальные значения. В данном случае необходимо рассматривать трехфазные металлические короткие замыкания.

При расчетах рассматривалась типовая схема электроснабжения напряжением 0,4 кВ от трансформатора с номинальной мощностью  $S_{Тр} = 250$  кВА. От основной секции 0,4 кВ отходит групповая кабельная линия, ее сечение ( $S_1 = 50$  мм<sup>2</sup> для расчетного примера, представленного на рис. 3, а и  $S_1 = 35$  мм<sup>2</sup> — на рис. 3, б) выбрано таким образом, чтобы с помощью изменения длины кабеля можно было задать определенный ток КЗ на вторичной сборке (в рассматриваемых примерах  $I_{КЗ} = 5$  кА).

Параметры АВ, отключающего кабель при реализации дальнего резервирования, задаются

в виде ВТХ автомата [7]. Общий вид характеристики представлен на рис. 2, где  $I_{\text{ном}}$  — номинальный ток АВ,  $I_{\text{э/мр}}$  и  $t_{\text{э/мр}}$  — минимальный ток и время срабатывания электромагнитного расцепителя,  $I_{\text{ро}}$  — ток КЗ, начиная с которого отключение автоматического выключателя будет происходить за счет давления, которое создается энергией дуги при КЗ, т. е. по характеристике «рефлексного» отключения [7] (кривая 1 на рис. 2),  $t_{\text{р}}$  — минимальное время срабатывания теплового расцепителя АВ,  $t_{\text{ро}}$  — максимальное время срабатывания «рефлексного» отключения.

ВТХ автоматов задаются в программном модуле. При исследовании проблемы невозгорания характеристика АВ будет зависеть от параметров групповой КЛ, так как рассматривается случай отказа основной защиты и отключения повреждения с помощью АВ смежного присоединения. Для представленных примеров выбраны автоматические выключатели с номинальным током  $I_{\text{ном}} = 400$  А и токами электромагнитных расцепителей  $I_{\text{расц}} = 140$  А (рис. 3, а) и  $I_{\text{расц}} = 105$  А (рис. 3, б).

Для исследования нагрева кабелей в зависимости от удаленности возникновения КЗ необходимо определить возможный диапазон протяженности КЛ. ГОСТ на качество электроэнергии [8] нормирует допустимое отклонение напряжения на зажимах конечного потребителя. Анали-

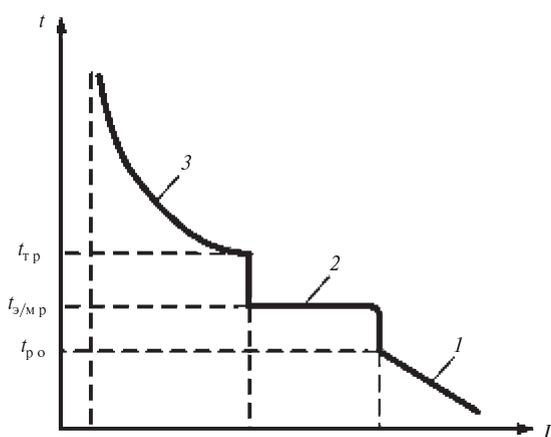


Рис. 2. Время-токовая характеристика АВ с тремя зонами отключения:  
1 — зона «рефлексного» отключения;  
2 — зона отключения электромагнитного расцепителя; 3 — зона отключения теплового расцепителя

зируя векторную диаграмму напряжений начала и конца линии и приняв отклонение конечного напряжения  $\Delta U = 5\%$  от номинального согласно [8], можно рассчитать максимальные длины групповых и индивидуальных КЛ. В рассматриваемых случаях расчет ведется для индивидуальных алюминиевых кабелей сечением  $10 \text{ мм}^2$ , для которых максимальная протяженность с точки зрения потерь напряжения  $l_{\text{max}} = 28,9$  м.

На рис. 3, а приведен график зависимости  $\theta = f(l_{\text{КЛ}})$  для кабельной линии сечением  $10 \text{ мм}^2$  при проверке на невозгорание. При малых расстояниях от начала кабельной линии до точки КЗ ( $l = 0-3,5$  м) ликвидация повреждения осуществляется по характеристике «рефлексного» отключения АВ (кривая 1 на рис. 2). В этой зоне токи КЗ максимальны, а АВ срабатывает за минимальное время (кривая 1 на рис. 3, а).

Резкий скачок температуры нагрева кабеля обусловлен переходом АВ в зону срабатывания электромагнитного расцепителя. По мере возрастания дистанции до точки КЗ ток снижается с учетом соответствующего роста сопротивления кабельной линии, время его протекания при этом остается практически постоянным, так как АВ срабатывает в зоне действия электромагнитного расцепителя. Соответственно конечная температура нагрева КЛ уменьшается по мере отдаления расчетной точки КЗ от вторичной сборки (кривая 2 на рис. 3, а). В начале КЛ (на расстоянии  $3,5-7$  м от ее начала) существует зона, для которой при возникновении КЗ расчетная температура КЛ становится выше температуры плавления металла проводника (для алюминия  $\theta_{\text{пл}} = 660$  °С). В связи с этим график в области температур выше  $660$  °С не имеет физического смысла и на рисунках обрывается.

Аналогичный характер зависимости  $\theta = f(l_{\text{КЛ}})$  на рис. 3, б имеет место в диапазоне длин  $l = 0-16$  м. Параметры схемы подобраны таким образом, что при возникновении повреждения на расстоянии  $16,5$  м от начала КЛ начинает срабатывать тепловой обратнозависимый расцепитель АВ. При этом время ликвидации КЗ вновь увеличивается, и происходит очередной скачок температуры нагрева кабеля (кривая 3 на рис. 3, б). Далее по мере удаления расчетной точки КЗ возникает эффект, связанный с увеличением интенсивности роста ВТХ теплового расцепителя при плавно уменьшающемся токе КЗ (примерно  $27$  м от начала КЛ).

Аналогичные зависимости можно получить и для других расчетных условий. Исследования проводились для различных схем с трансформаторами мощностью до 1000 кВА включительно. Более мощные трансформаторы с низким напряжением 0,4 кВ рассматривать нецелесообразно ввиду их малого практического применения. В работе рассматривались алюминиевые и медные кабели различного сечения и длины, а также множество вариаций ВТХ автоматических выключателей.

Итак, при отказе основной защиты расчетная температура нагрева кабеля не всегда будет максимальной при возникновении КЗ в начале линии или на расстоянии 20 м от ее начала, как регламентируют основные нормативно-технические документы [1–3]. При этом удаленность от начала линии точки КЗ, приводящей к наибольшему нагреву КЛ, зависит от параметров схемы и ВТХ автоматического выключателя и не может быть определена в обобщенном виде для различных схем.

Несмотря на это, в результате данных исследований можно сформулировать основной подход к нахождению наиболее опасного места повреждения проводника, короткое замыкание в котором приводит к максимальному нагреву токоведущих частей. Для этого необходимо рассчитывать температуру нагрева в начале и в конце кабельной линии, а также во всех контрольных точках ВТХ защитного аппарата, т. е. в месте ее перехода от срабатывания одного расцепителя к другому.

С развитием компьютерного моделирования стало возможным производить проверку оборудования при различных авариях по методикам, которые ранее были нецелесообразны ввиду

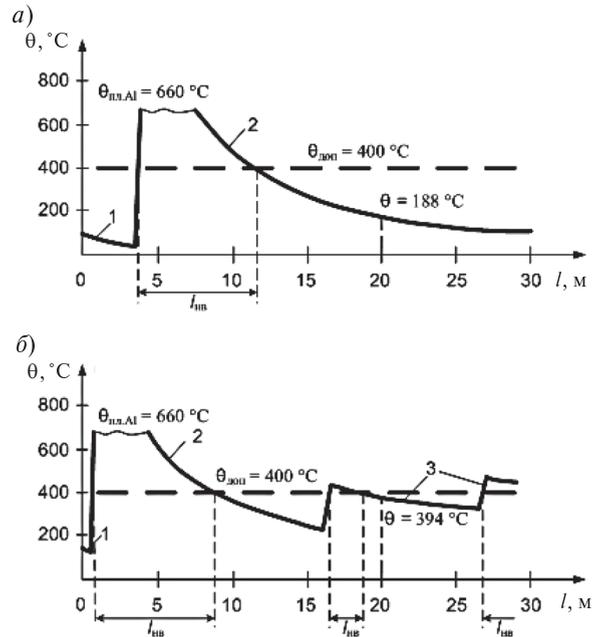


Рис. 3. Графические зависимости  $\theta = f(l_{\text{КЛ}})$  при отключении тока КЗ:  
 а — электромагнитным расцепителем АВ или с помощью «рефлексного» отключения;  
 б — по любой кривой ВТХ АВ (рис. 2)

сложности расчетов. Однако в настоящее время эта задача решается с помощью доступных вычислительных средств.

Следовательно, необходимо в существующие и вновь разрабатываемые нормативные требования и рекомендации вносить более точные условия проверки и методики расчета термических воздействий токов КЗ на кабели, что позволит избежать возгораний кабельного хозяйства в системах электроснабжения различного назначения.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Правила** устройства электроустановок [Текст].— 6-е изд., перераб. и доп., с изм.— СПб.: Изд-во ДЕАН, 2005.— 463 с.
2. **ГОСТ Р 52736-2007**. Короткие замыкания в электроустановках. Методы расчета электродинамического и термического действия тока короткого замыкания [Текст].— М.: Стандартинформ, 2007.— 40 с.
3. **Циркуляр № Ц-02-98(э)**. О проверке кабелей на невозгорание при воздействии тока короткого замыкания [Текст] / РАО «ЕЭС России».— М.: Изд-во Департамента стратегии развития и науч-

- но-технической политики РАО «ЕЭС России», СПО ОРГРЭС, 1998.— 12 с.
4. **Новости электротехники**. Приложение «Вопрос— ответ» [Текст].— 2007. № 6.— С. 27.
5. **Лapidус, А.А.** Расчет нагрева проводников, защищенных автоматическими выключателями [Текст] / А.А. Лapidус // **Новости электротехники**.— 2009. № 2.— С. 46–49.
6. **Лapidус, А.А.** Специфика расчета нагрева проводников [Текст] / А.А. Лapidус, С.Н. Соловьева // **Новости электротехники**.— 2010. № 2.— С. 44–46.

7. Автоматические выключатели типа СОМ-РАСТ NS. Технические условия [Текст].— 1996.

8. ГОСТ 13109-97. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнит-

ная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения [Текст].— М.: Международный совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 1997.— 35 с.

УДК 621.398

*И.Г.Плотников, Д.А.Устинов*

## **ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ ПУСКА ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА С СИНХРОННЫМ ДВИГАТЕЛЕМ**

К одной из наиболее энергоемких составляющих технологического процесса добычи нефти относится система поддержания пластового давления. Она представляет собой целый комплекс технологического оборудования, предназначенного для подготовки, транспортировки и закачки в пласт энергоносителя. Нефтегазодобывающие предприятия расходуют до 40 % мощности на закачку воды. Поэтому формирование заданных пусковых характеристик насосных агрегатов — одна из важнейших задач в электротехнических системах предприятий нефтяной промышленности.

Наиболее энергоемкими элементами таких систем являются центробежные насосы с приводом от синхронного электродвигателя (СД) мощностью до 6 МВт. При пуске высоковольтных синхронных двигателей кустовых насосных станций (КНС) остаточное напряжение на шинах 6 кВ составляет 70 % и менее, что недопустимо. Кроме того, становится невозможным массовый самозапуск электродвигателей после восстановления напряжения на источниках питания. Поэтому весьма актуальна разработка системы плавного пуска высоковольтных двигателей, при котором обеспечивается электромагнитная совместимость оборудования в соответствии с ГОСТ 13109-97 и СН 174-75[1,2].

В зависимости от условий эксплуатации насосов могут быть сформулированы различные ограничения как со стороны рабочего механизма, так и со стороны системы электроснабжения, приводного двигателя и насосной установки. В числе этих ограничений следующие:

потеря напряжения в системе электроснабжения не должна превышать допустимой по устойчивости технологического процесса;

ускорение в процессе разгона механизма не должно превышать значения, допустимого как для механизма, так и для самого двигателя;

нагрев обмоток двигателя в процессе пуска не должен превышать допустимой величины;

стоимость пускового оборудования должна быть минимально возможной.

Существуют различные способы пуска СД насосной установки: асинхронный пуск СД; пуск с помощью разгонного устройства (гонного двигателя); пуск при пониженном напряжении (автотрансформаторный, реакторный пуск или тиристорный пуск); частотный пуск. Во всех практических случаях процесс пуска СД можно разбить условно на два этапа. На первом этапе разгон происходит до подсинхронной частоты вращения (до скольжения  $s$ , равного 0,05 и менее) в основном под действием асинхронного момента. Второй этап представляет собой процесс вхождения в синхронизм.

Обычно наибольший интерес при анализе первого этапа процесса пуска представляют следующие величины: начальный толчок тока статора (в момент подключения двигателя к сети); длительность режима пуска; изменение токов статора и ротора в процессе разгона (для определения нагрева обмоток).

Данные величины необходимо учитывать при оценке прямого пуска (при наличии или отсутствии дополнительных сопротивлений, установок продольной емкостной компенсации в цепи статора), а также при выборе схемы и алгоритма включения обмотки возбуждения. Для известного типа двигателя воздействие на его асинхронную моментную характеристику может быть осуществлено изменением величины пускового

сопротивления, а также емкости конденсаторных установок.

Выбор способа пуска может быть осуществлен на основе сопоставительного анализа параметров электромеханического комплекса (насос, приводной двигатель, система электроснабжения) в системе указанных выше ограничений.

Для определения рационального способа пуска СД создана математическая модель электромеханического комплекса, реализующая различные способы пуска (прямой, регулирование входного напряжения, частотный), а также учитывающая влияние аварийных режимов в системе электроснабжения на работу СД. Блок-схема данной модели показана на рис. 1. Модель включает в себя блоки, реализующие работу:

системы электроснабжения (1); частотного регулирования (2); системы возбуждения СД (3); самого СД (4) ( $S = 1850$  кВА,  $I_H = 178$  А,  $U_H = 6$  кВ,  $n = 3000$  мин<sup>-1</sup>,  $\cos\varphi = 0,9$ , КПД = 96,9,  $I_B = 277$  А,  $U_B = 54$  В,  $x_d'' = 12,85\%$ ,  $x_d' = 22\%$ ,  $x_d = 165\%$ ,  $x_2 = 15,7\%$ ,  $x_0 = 4,71\%$ ,  $\tau_{d0}' = 3,05$  с,  $\tau_{d0}'' = 0,371$  с,  $\tau_a'' = 0,0454$  с,  $\tau_a = 0,0588$  с), а также трехуровневый инвертор на IGBT транзисторах (5), блок измерений (6), осциллограф (7).

Оценка полученных на данной модели характеристик (рис. 2), показала, что при частотном пуске, а также пуске при пониженном питающем напряжении имеется возможность ограничить величины пускового тока в пределах  $1,5-3 I_{НОМ}$ .

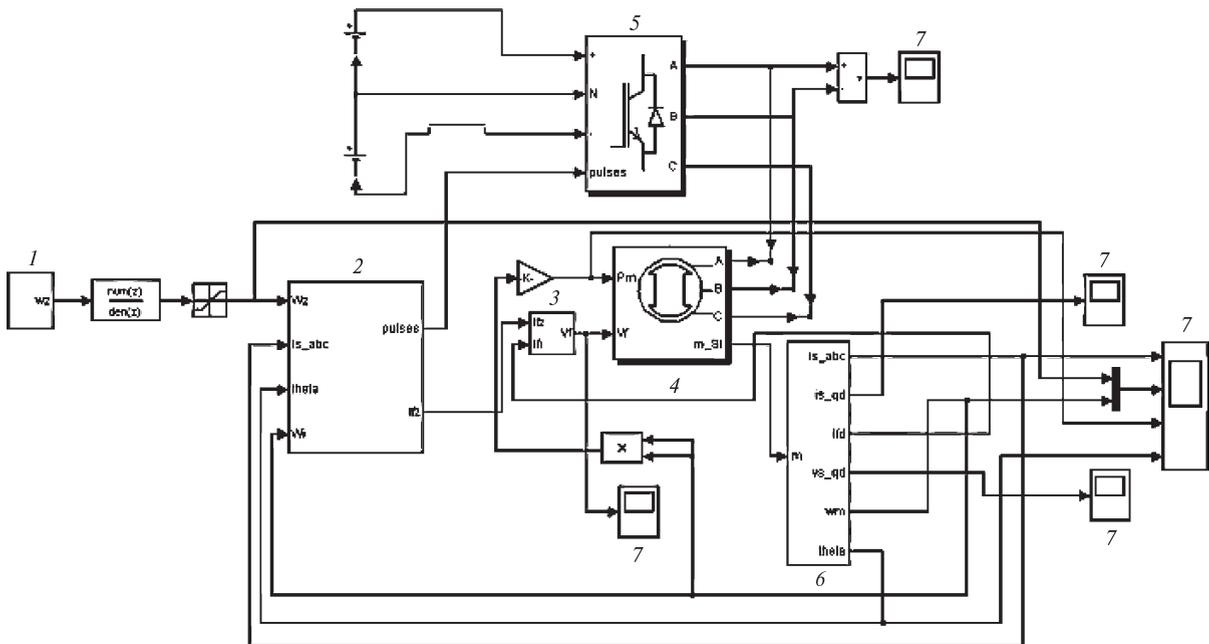


Рис. 1. Математическая модель электромеханического комплекса с СД

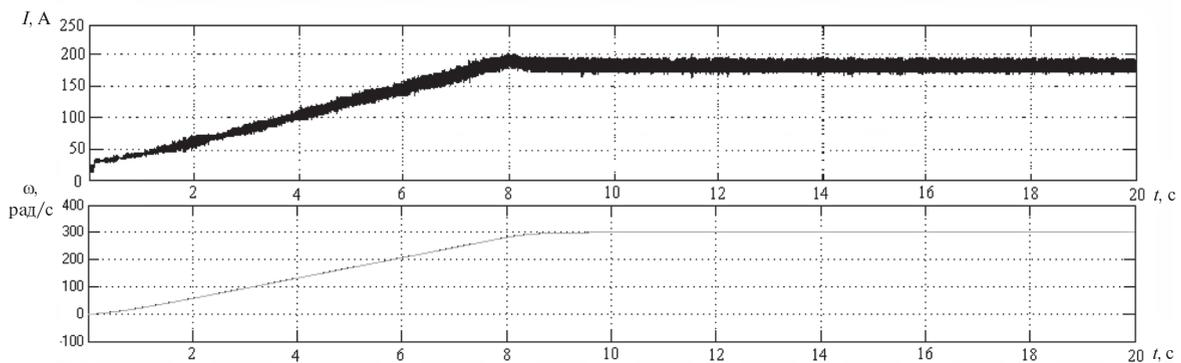


Рис. 2. Осциллограммы пускового тока, скорости вращения

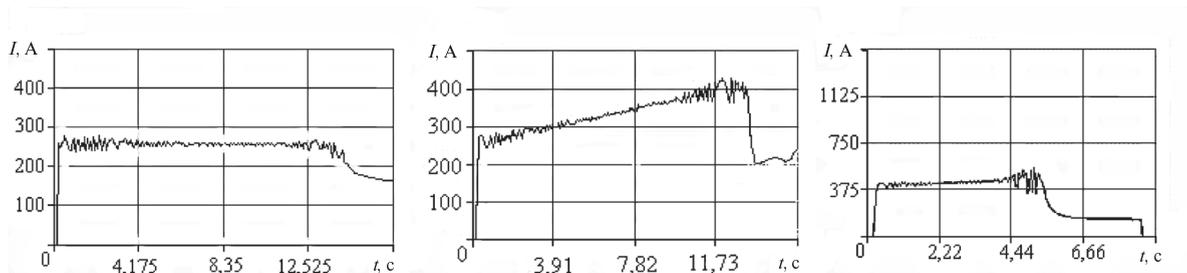


Рис. 3. Осциллограммы пусковых токов СД в условиях Рускинского месторождения

Осциллограммы пуска СД при тиристорном регулировании входного напряжения, полученные в условиях Рускинского месторождения ОАО «Сургутнефтегаз», показаны на рис. 3.

Анализ характеристик тока статора показал, что время разгона СД зависит от функции изменения пускового тока. Чем больше площадь, ограниченная кривой пускового тока и осью времени, тем быстрее разгон СД до номинальной скорости. Эта площадь пропорциональна потерям электрической энергии в роторе за время пуска. Потери энергии в роторе можно уменьшить за счет асинхронного частотного пуска, который осуществляется при плавном увеличении частоты по мере разгона агрегата. Потери при частотном пуске вхолостую могут быть найдены следующим образом:

$$W = \int_0^t s P_a dt = \int_0^t s M_{из} \omega dt. \quad (1)$$

Заменяя  $M_{из} = J d\omega / dt$  и принимая скольжение  $s$  за время пуска неизменным ( $s = s_1$ ) (такое допущение вполне приемлемо, учитывая, что пуск происходит на устойчивой части асинхронного момента), получаем

$$W = \int_0^{\omega_0} J s_1 \omega d\omega = J s_1 \int_0^{\omega_0} \omega d\omega = \frac{J \omega_0^2 s_1}{2} = \frac{\tau_j P_{ном} s_1}{2}. \quad (2)$$

Таким образом, потери энергии в двигателе при частотном пуске будут значительно меньше потерь при пуске с постоянной частотой питающего напряжения.

При выборе способа пуска особое внимание необходимо уделять влиянию обмотки возбуждения на входной момент СД. В [3] описан спо-

соб, при котором обеспечивается увеличение входного момента и повышение динамической устойчивости СД путем управления знакопеременным напряжением возбуждения. Максимальный момент электромеханического комплекса с СД в области малых скольжений может быть достигнут путем управления выходным напряжением преобразователя с двухсторонней проводимостью (ПДП), при котором обеспечивается режим, эквивалентный введению в цепь обмотки возбуждения регулируемого активно-емкостного сопротивления.

На рис. 4 показан алгоритм управления выходным напряжением ПДП при пуске и самозапущке электромеханического комплекса с СД и системой возбуждения, содержащей ПДП; он обеспечивает максимальное повышение входного момента СД.

Алгоритм включает:

ввод параметров сети и СД:  $U_s, I_s$  — напряжение и ток сети;  $U_f, I_f$  — напряжение и ток обмотки возбуждения;  $s$  — скольжение СД;  $\theta$  — угол нагрузки;  $\varphi_f$  — угол сдвига фаз между  $U_f$  и  $I_f$ . Если скольжение двигателя  $s$  больше заданного значения скольжения  $s_1$ , при достижении которого производится подачу возбуждения, разгон двигателя осуществляется с помощью пускового устройства. В качестве пускового устройства могут быть использованы, например, реактор, автотрансформатор, иные ограничители пускового тока и т. д. При этом ПДП работает в инверторном режиме для обеих полуволн наведенного тока;

при достижении скольжением заданного значения  $s_1$  осуществляют регулирование полярности выходного напряжения ПДП в функции угла нагрузки и переходной постоянной времени СД  $T_d'$ ;

при достижении синхронной скорости переводят ПДП в выпрямительный режим, поляр-

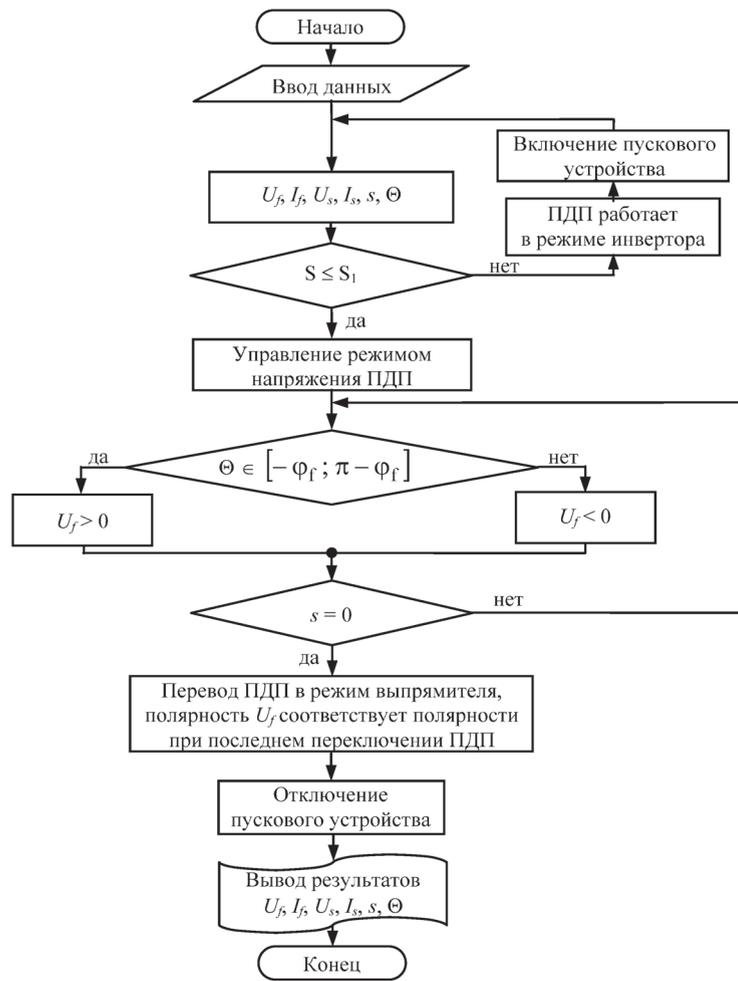


Рис. 4. Алгоритм управления выходным напряжением ТДП при пуске и самозапуске электромеханического комплекса с СД и системой возбуждения, содержащей ТДП

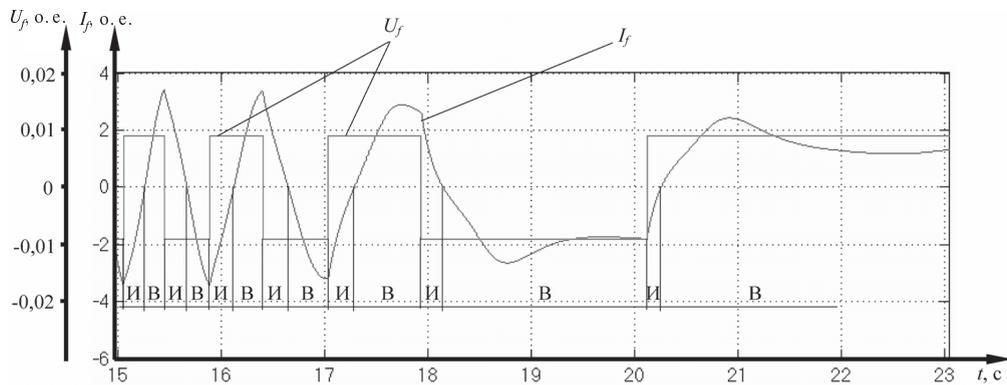


Рис. 5. Осциллограммы изменения тока возбуждения  $I_f$  и выходного напряжения ТДП  $U_f$

ность напряжения возбуждения соответствует полярности при последнем переключении ПДП; отключают пусковое устройство.

В процессе пуска электромеханического комплекса с СД производится непрерывный контроль за изменением параметров сети и двигателя.

Осциллограммы изменения тока в режиме обеспечения максимального повышения входного момента СД показаны на рис. 5. Здесь обозначения И и В соответствуют интервалам времени работы ПДП соответственно в режиме инвертора и выпрямителя. При анализе полученных осциллограмм видно, что с уменьшением скольжения увеличивается продолжительность работы ПДП в режиме выпрямителя, а также уменьшается  $\varphi_f$ .

Очевидно, что использование частотного способа пуска совместно с преобразователем

с двухсторонней проводимостью в цепи обмотки возбуждения при вентиляторной нагрузке на валу дает возможность осуществления частотного разгона до величины скольжения 0,15–0,1. После этого согласно алгоритму (рис. 4) продолжают асинхронный разгон СД до подсинхронной скорости при работе ПДП в инверторном режиме. Управление выходным напряжением ПДП в инверторном режиме эквивалентно введению в цепь обмотки возбуждения активного сопротивления. Разгон до скольжения 0,15–0,1 при вентиляторной нагрузке на валу дает возможность применять преобразователь частоты меньшей мощности.

Таким образом, полученные характеристики позволяют произвести выбор рационального способа пуска с учетом технологических особенностей нефтегазодобывающих предприятий.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **ГОСТ 13109-97.** Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения [Текст] / Госстандарт. — М.: Изд-во стандартов, 1997.

2. **СН 174-75.** Инструкция по проектированию электроснабжения промышленных предприятий [Текст]. — М.: Изд-во стандартов, 1975.

3. **Патент РФ на изобретение № 2242080.** Способ управления возбуждением синхронной машины.

2002 г. / Абрамович Б.Н., Круглый А.А., Медведев В.А., Устинов Д.А.— Приоритет изобретения 28 ноября.

4. **Овчинников, И.Е.** Способ импульсного пуска синхронных машин [Текст] / И.Е. Овчинников, Г.Н. Тер-Газарян, Ж.Д. Давидян, В.Н. Рябов // Электротехника.— М., 1987.— № 3.— С. 33–36.

5. **Сыромятников, И.А.** Режимы работы асинхронных и синхронных двигателей [Текст] / И.А. Сыромятников. — М.: Энергоатомиздат, 1984. — 240 с.

УДК 621.311:621.315

*М.Г. Попов*

### СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ ЧИСЛЕННОГО РАСЧЕТА РАССТОЯНИЯ ДО МЕСТА ПОВРЕЖДЕНИЯ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

Значительная доля аварийных режимов объединенных электроэнергетических систем обусловлена электрическими (перекрытие изоляции, перенапряжения и др.) или механическими повреждениями высоковольтных линий электропередачи (ЛЭП). В зависимости от места и продолжительности устранения аварийных повреждений воздушных ЛЭП (ВЛ) техно-

логические и экономические последствия могут иметь как локальный, так и общесистемный характер [1, 2]. При этом на оперативность выявления и ликвидации аварийных режимов электрической сети, а как следствие этого, на величину ожидаемого ущерба от перерывов электроснабжения электроприемников влияют следующие факторы:

быстродействие средств защиты и противоаварийной автоматики;

быстрота отыскания и устранения аварий силового электрооборудования.

Решение проблемы оперативного поиска места повреждения воздушных линий электропередачи осуществляется с привлечением специализированного оборудования, реализующего как локационные (зондирующие), так и дистанционные методы. Проблема повышения быстродействия и чувствительности дистанционных измерительных органов решается путем совершенствования соответствующих численных методов и функциональных алгоритмов контроля и диагностики. В некоторых случаях (см. таблицу) величина абсолютной погрешности численного расчета расстояния до места короткого замыкания (КЗ) воздушных ЛЭП может достигать нескольких километров (или более 10 % от всей длины ВЛ). В связи с этим задача снижения приведенной погрешности до приемлемых значений ( $\pm 2,5\%$ ) весьма актуальна.

В общем случае погрешность численного расчета расстояния до места КЗ (РМКЗ) имеет две составляющие — методическую (определяется в основном адекватностью (погрешностью) математической модели воздушной ЛЭП) и инструментальную, которая обусловлена свойствами и характеристиками измерительной части. Способы компенсации (снижения) инструментальной составляющей погрешности трансформаторов тока разработаны и исследованы на кафедре «Электрические станции и автоматизация энергосистем» СПбГПУ. Настоящая статья посвящена снижению методической составляющей погрешности дистанционных методов численного расчета РМКЗ ВЛ с использованием строгого математического описания переходных процессов на основе решения пространственной (трехмерной) полевой задачи. Применение полевых методов определения электрических параметров воздушных линий электропередачи это новое и перспективное направление в решении проблемы.

**Полевые методы определения электрических параметров схемы замещения воздушных линий электропередачи**

Современные численные методы расчета РМКЗ воздушных ЛЭП основаны на использовании электрических параметров режима работы электрической системы, регистрируемых цифро-

выми осциллографами. Обобщенный алгоритм процедуры расчета РМКЗ линий электропередачи изображен на рис. 1.

Как отмечалось ранее, методическая составляющая погрешности численного расчета в значительной степени обусловлена адекватностью (строгостью) математической модели электрической сети, содержащей ВЛ. Поскольку при определении продольных и поперечных параметров воздушных ЛЭП следует учитывать их геометрические особенности (провис проводов, участки непараллельного прохождения разных линий, пересечения, сближения с другими ВЛ и др.), широко известные аналитические выражения не дают точного решения в связи с множеством используемых допущений (упрощений).

В свою очередь применение численных методов исследования электромагнитного и электрического полей воздушных линий со строгим математическим описанием указанных выше геометрических особенностей, в частности неоднородности (многослойность) структуры грунта позволяет исключить методическую составляющую погрешности при аналитическом расчете параметров схемы замещения.



Рис. 1. Блок-схема обобщенного алгоритма численного метода расчета РМКЗ ВЛ

Отечественный и зарубежный опыт показывает, что для решения задачи расчета электромагнитного поля воздушной линии наиболее целесообразно использовать метод конечных элементов [3], который обладает преимуществами простоты программной реализации и приемлемой погрешностью при аппроксимации (моделировании) поля.

В работе численный расчет параметров магнитного поля ВЛ производится с использованием проекций векторного магнитного потенциала  $\vec{A}$  на оси прямоугольной системы координат, а определение параметров электрического поля осуществляется через скалярный электрический потенциал  $\phi$ . Для разбиения расчетной области на конечные элементы используются простейшие трехмерные фигуры — тетраэдры — с заданием узловых точек только в их вершинах. В соответствии с этим для аппроксимации распределения искомого потенциала внутри конечного элемента используется линейный полином.

Для формирования системы линейных алгебраических уравнений относительно узловых значений искомого потенциалов  $\vec{A}$  и  $\phi$  применяется метод Галёркина, который заключается в приравнивании нулю интеграла по объему  $V^{(e)}$  одного конечного элемента от произведения транспонированной строки функций форм данного элемента на исследуемое дифференциальное уравнение. Например, для проекции на ось  $x$  векторного магнитного потенциала в вершинах  $e$ -го конечного элемента будет справедливо линейное уравнение

$$\left( \frac{1}{\mu} \mathbf{S}^{(e)} + j\omega \mathbf{T}^{(e)} \right) \dot{A}_x^{(e)} = \mathbf{T}^{(e)} \dot{\Phi}_x^{(e)}, \quad (1)$$

а для скалярного электрического потенциала — уравнение

$$\mathbf{S}^{(e)} \phi^{(e)} = 0, \quad (2)$$

где  $\mu$  — магнитная проницаемость среды;  $\mathbf{S}^{(e)}$ ,  $\mathbf{T}^{(e)}$  — матрицы, элементы которых вычисляются исходя из координат узлов рассматриваемого  $e$ -го конечного элемента с использованием интегрирования в естественной системе координат тетраэдра;  $\dot{A}_x^{(e)}$ ,  $\dot{\Phi}_x^{(e)}$ ,  $\phi^{(e)}$  — вектора, элементы которых — соответственно узловые значения проекции векторного магнитного потенциала на ось  $x$ , производные по координате  $x$  от электри-

ческого потенциала в вершинах конечного элемента и узловые значения скалярного электрического потенциала  $e$ -го конечного элемента.

Уравнения (1), (2) каждого конечного элемента должны быть объединены в общую систему уравнений, решение которой осуществляется относительно значений потенциала во всех узловых точках расчетной области. При этом элементы матриц  $\mathbf{S}$  и  $\mathbf{T}$  рассчитываются как суммы соответствующих элементов локальных матриц  $\mathbf{S}^{(e)}$  и  $\mathbf{T}^{(e)}$  всех конечных элементов области решения.

Тогда расчет собственных и взаимных продольных сопротивлений для  $n$  проводов воздушной линии выполняется согласно алгоритму [3] (рис. 2) с учетом допущения о постоянстве модуля градиента скалярного электрического потенциала ( $\text{grad } \phi$ ) по всей длине проводника. С учетом этого процедура определения среднего по сечению значения тока каждого  $m$ -го провода предполагает следующее:

1. Расчет проекций на оси координат градиента скалярного электрического потенциала  $\text{grad } \phi$  во всех узловых точках расчетной области  $m$ -го провода при заданных падениях напряжения ( $\dot{U}_m^{(1)}, \dot{U}_m^{(2)} \dots \dot{U}_m^{(n)}$ ) каждого проводника.

2. Решение систем линейных алгебраических уравнений вида (1) относительно проекций векторного магнитного потенциала  $\vec{A}$  на все оси координат.

3. Расчет вектора плотности суммарного тока в узловых точках расчетной области поля проводов

$$\dot{\delta} = -\sigma (\text{grad } \phi + j\omega \vec{A}), \quad (3)$$

где  $\sigma$  — удельная проводимость провода.

4. Определение среднего в сечении значения тока, протекающего вдоль каждого провода системы,

$$I_{\text{ср}m} = \frac{\sum_{e=1}^N [(\dot{\delta}_i + \dot{\delta}_j + \dot{\delta}_k + \dot{\delta}_l) V^{(e)}]}{4L_m}, \quad (4)$$

где  $\dot{\delta}_i, \dot{\delta}_j, \dot{\delta}_k, \dot{\delta}_l$  — проекции вектора плотности тока на ось провода в данном сечении для узловых точек  $e$ -го конечного элемента;  $L_m$  — длина рассматриваемого  $m$ -го проводника на рассчитываемом участке.



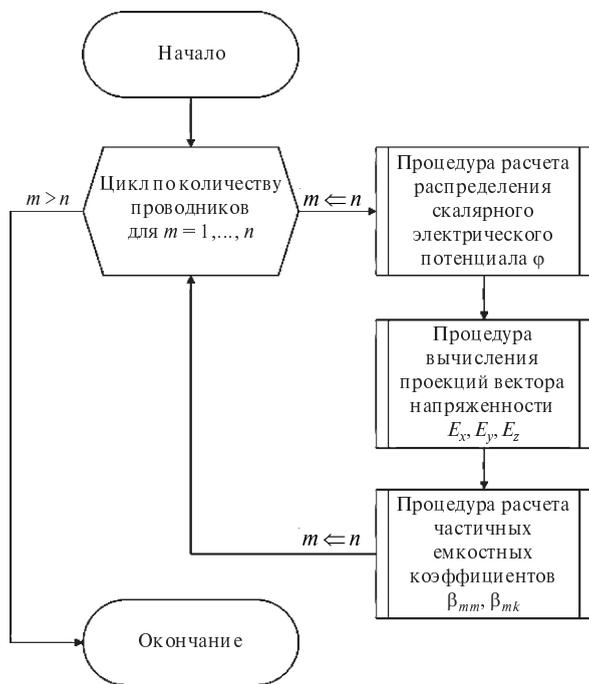


Рис. 3. Блок-схема алгоритма численного расчета собственных и взаимных частных емкостей проводов ВЛ

косоугольное сближение, реальные характеристики грунта и др.).

### Погрешность аналитического расчета параметров схемы замещения воздушных линий электропередачи

Оценка погрешности расчета электрических параметров (взаимного индуктивного сопротивления и емкости) ВЛ с использованием аналитических выражений производилась применительно к расчетной схеме, состоящей из двух проводов радиусом  $R_1 = R_2 = 9,4$  мм (габарит первого провода  $G_1 = 6,0$  м, а второго —  $G_2 = 8,0$  м), которые имеют провисание и косоугольное сближение на участке (пролете ВЛ) длиной 285 метров. При этом высота подвеса проводов в два раза больше их габарита. Минимальное расстояние  $a_1$  между проводами составляет 6,5 м.

При аналитическом расчете [5] взаимных индуктивных сопротивлений расчетной схемы с непараллельными проводниками в выражениях используются понятия эквивалентных (усредненных) значений  $h_{\text{ЭКВ}}$  высоты их подвеса и расстояния  $a_{\text{ЭКВ}}$  между ними [6]:

$$h_{\text{ЭКВ}} = G + \frac{2}{3}h_C; \quad (9)$$

$$a_{\text{ЭКВ}} = \frac{a_2 + 2a_1}{3}, \quad (10)$$

где  $G$  — габарит провода;  $h_C$  — максимальная стрела провиса провода;  $a_1, a_2$  — соответственно минимальное и максимальное расстояние между проводами.

Кроме того, эквивалентное расстояние между проводами  $a_{\text{ЭКВ}}$ , может быть найдено как среднее геометрическое значение [7]:

$$a_{\text{ЭКВ}} = \sqrt{a_1 a_2}. \quad (11)$$

Определение взаимной емкости двух проводов ВЛ, проходящих под углом друг к другу, также осуществляется при расчете усредненного расстояния между ними

$$a_{\text{ЭКВ}} = \frac{a_1 + a_2}{2}. \quad (12)$$

Анализ результатов численного и аналитического расчета комплексного сопротивления взаимного влияния двух проводов ВЛ на частотах 50 и 500 Гц (рис. 4, 5) при вариации максимального расстояния между проводами  $a_2$  выявил значительное влияние угла сближения проводов на погрешность вычисления реактивной составляющей  $X_M$  с использованием допущений (9), (10) и (11).

В рассматриваемых случаях при угле сближения около  $25^\circ$  ( $a_2 = 138,5$  м) относительная погрешность расчета реактивного сопротивления взаимной индукции составляла более 28 % ( $f = 50$  Гц) и 46 % ( $f = 500$  Гц). В то же время установлено малое влияние косоугольного сближения проводов на погрешность аналитического расчета активной составляющей  $R_M$  — максимальное значение модуля относительной погрешности составляет около 4 % (при угле сближения не более  $25^\circ$ ).

Также следует отметить значительную погрешность аналитического расчета (рис. 6) взаимной емкости  $C_M$  в рассматриваемой схеме, обусловленную допущением (12). Величина относительной погрешности вычисления  $C_M$  составляет от 10 до 50 % даже при относительно небольших ( $4-10^\circ$ ) углах сближения. Применение допущения (9) при аналитических вычислениях собственных емкостей проводов воздушной ЛЭП слабо сказывается на погрешности расчета (при стрелах провиса провода, близких к реальным, погрешность составляет не более 3 %).

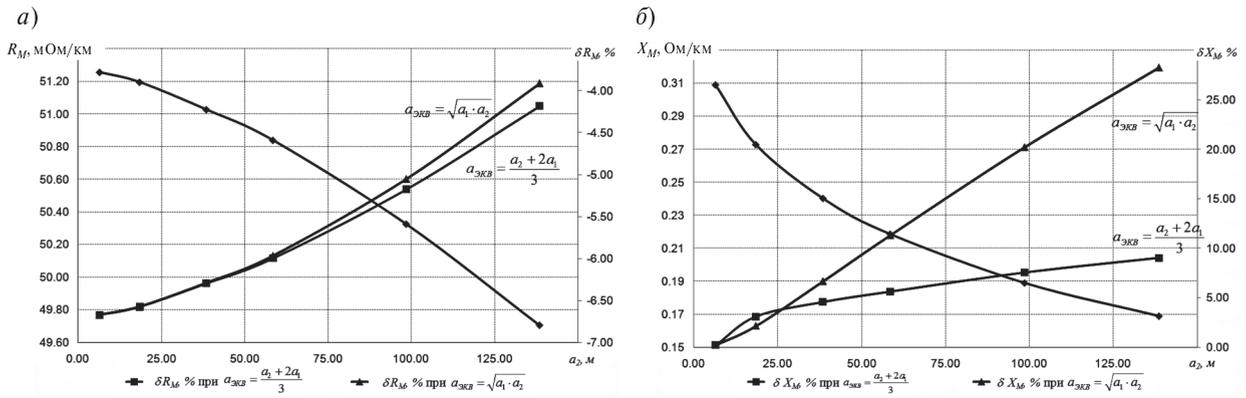


Рис. 4. Погрешность аналитического расчета активной (а) и реактивной (б) составляющих продольного взаимного сопротивления на частоте 50 Гц при вариации угла сближения проводов

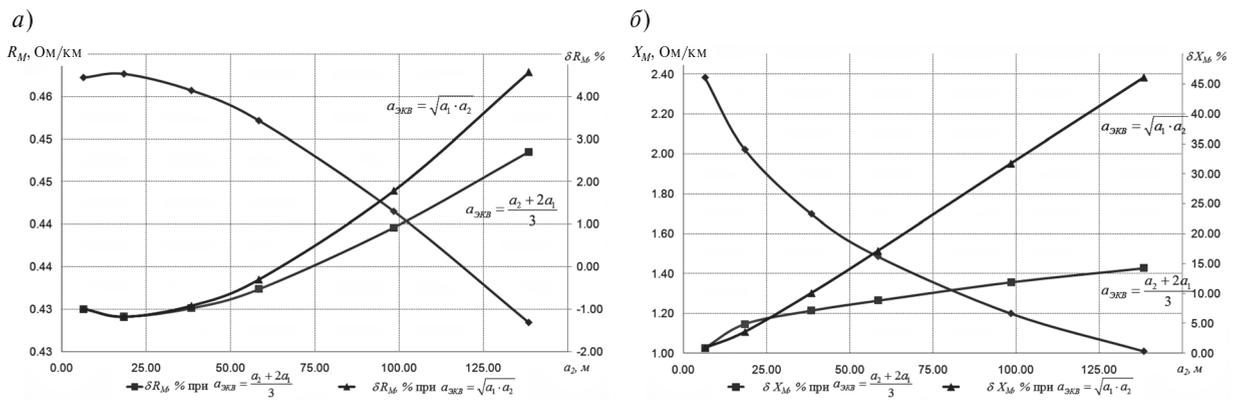


Рис. 5. Погрешность аналитического расчета активной (а) и реактивной (б) составляющих продольного взаимного сопротивления на частоте 500 Гц при вариации угла сближения проводов

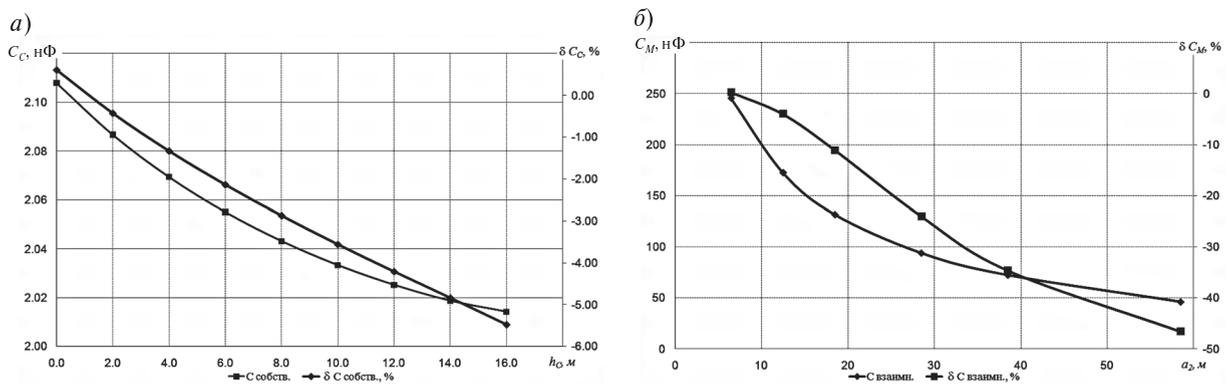


Рис. 6. Погрешность аналитического расчета собственных (а) и взаимных (б) емкостей при вариации стрелы провиса и угла сближения проводов

Выявленная погрешность аналитического расчета электрических параметров схемы замещения неизбежно сказывается на достоверности определения места повреждения многопроводных ЛЭП. При этом погрешность численного расчета РМКЗ в большей степени обусловлена погрешностью исходных данных о собственных и взаимных продольных сопротивлениях ВЛ. Вопросы снижения погрешности численного расчета РМКЗ воздушных линий ОЭС Северо-Запада при их строгом математическом описании рассмотрены в далее.

**Снижение погрешности  
численного расчета расстояния  
до места короткого замыкания с использованием  
строгого математического описания  
воздушных линий ОЭС Северо-Запада**

Анализ погрешности численного расчета РМКЗ производился применительно к воздушным линиям электропередачи 110–750 кВ ОЭС Северо-Запада (Ленинградская, Кольская, Карельская, Архангельская и Вологодская энергосистемы). Для исследования выбраны ВЛ (см. табл.), для которых абсолютная величина приведенной (к общей длине) погрешности численного расчета РМКЗ составила более 2,5 %. Также дополнительным критерием отбора аварийных осциллограмм с переходными процес-

сами, обусловленными короткими замыканиями ВЛ, было наличие полных исходных данных по трассированию ЛЭП.

Обобщенный анализ таблицы позволяет установить взаимосвязь между погрешностью численного расчета расстояния до места короткого замыкания ВЛ и погрешностью исходной информации о параметрах ее схемы замещения. В частности, согласно представленным (см. табл.) статистическим данным о состоянии проблемы расчета РМКЗ линий электропередачи 110–330 кВ ОЭС Северо-Запада приведенная и относительная погрешность имеют отрицательное значение (расчетное расстояние меньше реального). Это объясняется недостоверным учетом взаимного влияния фазных проводов (провода «сближенных» ЛЭП) и, как следствие этого, большим по сравнению с действительным удельным падением напряжения по длине ВЛ. Это наиболее характерно для результатов расчета расстояния при однофазных КЗ ВЛ, поскольку электрические параметры взаимного влияния при использовании модальных преобразований входят в схему нулевой последовательности.

Применение строгого математического описания переходных процессов воздушных линий электропередачи позволяет существенно улучшить показатели погрешности численного расчета расстояния до места короткого замыкания. Наи-

**Результаты численного расчета РМКЗ при односторонней регистрации аварийного процесса**

Энерго- объект	Название ВЛ, вид КЗ	Длина, км	Обход, км	Результаты численного расчета РМКЗ					
				по обычной мат. модели			по уточненному мат. описанию		
				$l_{расч}, км$	$\Delta, км$	$\delta_{пр}, \%$	$l_{расч}, км$	$\Delta, км$	$\delta_{пр}, \%$
ПС 90	Л-389, В	255,60	206,90	175,70	-31,20	-12,21	194,37	-12,53	-4,90
	Л-389, А+С	255,60	150,00	141,70	-8,30	-3,25	143,90	-6,10	-2,39
	Л-389, С	255,60	66,30	55,50	-10,80	-4,23	65,61	-0,69	-0,27
	Л-389, В	255,60	186,70	171,60	-15,10	-5,91	190,98	4,28	1,67
ПС Ленин- градская	Л-374, С	172,08	102,30	95,20	-7,10	-4,13	107,69	5,39	3,13
	Л-374, В	172,08	44,60	38,20	-6,40	-3,72	46,74	2,14	1,24
	Л-374, В	172,08	88,50	76,60	-11,90	-6,92	94,66	6,16	3,58
	Л-389, В	255,60	107,40	98,70	-8,70	-3,40	106,22	-1,18	-0,46
ПС Велико- рецкая	Л-389, В	255,60	94,70	104,50	9,80	3,83	90,94	-3,76	-1,47
	Л-361, В	134,30	34,70	22,00	-12,70	-9,46	34,16	-0,54	-0,40
ПС Велико- рецкая	Л-309, С	155,60	34,20	20,90	-13,30	-8,55	34,55	0,35	0,22



большее по модулю значение приведенной погрешности расчета с использованием уточненных параметров схемы замещения ВЛ составило около 5 % (при исходной величине более 12 %). В некоторых расчетных случаях (повреждения Л-389, Л-309) величина погрешности составляет менее 0,5 %.

Показано, что аналитические методы расчета параметров электрической схемы замещения реальной ВЛ обладают значительной погрешностью. Наибольшее влияние на величину погрешности численного расчета РМКЗ оказывает погрешность исходных данных о собственных и взаимных продольных сопротивлениях схемы замещения «сближенных» ВЛ.

Разработанное программное обеспечение DoACR, реализующее численное решение полевой пространственной трехмерной задачи методом конечных элементов, должно применяться для паспортизации (актуализации) электрических параметров воздушных линий электропередачи.

Выявлена взаимосвязь погрешности представления исходной информации с погрешностью численного расчета расстояния до места КЗ. Установлено, что применение уточненного математического описания переходных процессов ВЛ позволяет в значительной мере снизить величину приведенной погрешности до приемлемых значений (менее 2,5 %)

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Попов, М.Г.** Основные аспекты определения мест коротких замыканий на высоковольтных линиях электропередачи [Текст] / М.Г. Попов, М.Ю. Мякушин // Энергетик.— 2002. № 10. С. 44–45.
2. **Попов, М.Г.** Определение мест коротких замыканий на высоковольтных линиях электропередачи [Текст] / М.Г. Попов // Энергетик.— 2004. № 2.— С. 44–45.
3. **Бессолицын, А.В.** Разработка методики численного расчета продольных параметров воздушной линии на основе трехмерной краевой задачи [Текст] / А.В. Бессолицын, О.А. Новоселова, М.Г. Попов // Научно-технические ведомости СПбГПУ.— 2010. № 2.— С. 50–55.
4. **Бессолицын, А.В.** Использование численного расчета трехмерного электростатического поля для определения собственных и взаимных емкостей проводов воздушной линии [Текст] / А.В. Бессолицын, М.Г. Попов, Е.Н. Хорошина // Научно-технические ведомости СПбГПУ.— 2010. № 2.— С. 55–59.
5. **Руководящие указания** по релейной защите. Вып. 11. Расчеты токов короткого замыкания для релейной защиты и системной автоматики в сетях 110–750 кВ [Текст].— М.: Энергия, 1979.
6. **Костенко, М.В.** Взаимные сопротивления между воздушными линиями с учетом поверхностного эффекта в земле [Текст] / М.В. Костенко // Электричество.— 1955. №10.— С. 29–34.
7. **Михайлов, М.И.** Электромагнитные влияния на сооружения связи [Текст] / М.И. Михайлов [и др.].— М. Связь. 1976.

УДК 519.86

*Ф.Б. Тебубева, Е.Л. Торонцев, В.А. Перепелица*

## КРАТКОСРОЧНОЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВЕТРОГЕНЕРАЦИИ МЕТОДОМ КЛЕТОЧНЫХ АВТОМАТОВ

**Предмет исследования, его статистические свойства и характеристики**

Предметом исследования в настоящей работе является нормированный временной ряд объема ветрогенерации, зарегистрированный пятиминутными интервалами, данные которого приведены на сайте компании CAISO (California

Independent System Operator) и на рис. 1. Обозначим этот временной ряд через

$$W = \langle w_i \rangle, i = 1, \dots, 25344. \quad (1)$$

В работе решена задача прогнозирования ветрогенерации на основании данных представленного ряда, актуальная для работы диспетчер-

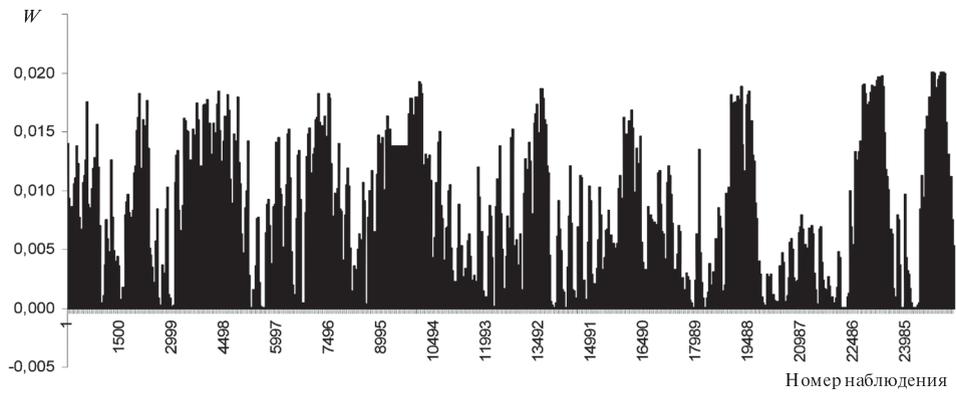


Рис. 1. График временного ряда  $W$  (ось абсцисс — порядковый номер наблюдения, ось ординат — объем выработанной электроэнергии)

ских служб электроэнергетических систем. Актуальность задачи дала повод для визита в 2008–2009 годах в Северо-Западную Национальную Тихоокеанскую лабораторию США профессора Е.Л. Торопцева — одного из авторов статьи.

Как следует из приведенного рисунка, во временном ряде  $W$  имеются весьма продолжительные циклы. Кроме того, есть все основания предполагать, что в этом ряде не выполняются базовые свойства линейных процессов: стационарность, «нормальность» распределения, независимость значений. Для проверки истинности этих предположений следует применить аппарат статистического и фрактального анализа [1, 2].

Напомним, что в стационарных процессах их основные вероятностные свойства (математическое ожидание, дисперсия) не изменяются с течением времени. Другими словами, если прирост математического ожидания и дисперсии находится в окрестности  $1 \pm 0,1$ , то временной ряд считается строго стационарным (в узком смысле) [3]. Для исследования стационарности временной ряд  $W$  предлагается разбить на последовательные отрезки, например на интервалы

$$[w_1, w_{1000}], [w_{1001}, w_{2000}], [w_{2001}, w_{3000}], \dots, [w_{25001}, w_{25344}]. \quad (2)$$

Для каждого интервала (2) необходимо вычислить его математическое ожидание  $M$  и дисперсию  $D$ . В табл. 1 приведены значения математического ожидания и дисперсии временного ряда  $W$  для каждого из интервалов (2) и их коэффициенты прироста; жирным выделены значения коэффициента прироста из интервала  $1 \pm 0,1$ . Из табл. 1 можно сделать вывод о значи-

тельном изменении вероятностных свойств рассматриваемого временного ряда, иначе говоря, временной ряд  $W$  нестационарен.

Для проверки гипотезы о «ненормальности» распределения временного ряда  $W$  достаточно вычислить такие его статистические коэффициенты:

1) вариацию  $\tilde{V} = \frac{\tilde{v}_1}{\sigma} - 3$ , где  $\tilde{v}_1 = M = \sum_{i=1}^n w_i / n$  —

начальный момент первого порядка временного ряда;  $\sigma = \sqrt{D}$  — среднее квадратическое отклонение;

2) асимметрию  $\tilde{A} = \frac{\tilde{\mu}_3}{\sigma^3}$ , где  $\tilde{\mu}_3 = \left( \sum_{i=1}^n (w_i - \tilde{v}_1)^3 \right) / n$  — центральный момент третьего порядка;

3) эксцесс  $\tilde{E} = \frac{\tilde{\mu}_4}{\sigma^4} - 3$ , где  $\tilde{\mu}_4 = \left( \sum_{i=1}^n (w_i - \tilde{v}_1)^4 \right) / n$  — центральный момент четвертого порядка.

Условием нормальности временного ряда являются нулевые их значения:  $\tilde{V} = 0, \tilde{A} = 0, \tilde{E} = 0$ . Вычисленные же значения  $\tilde{V}, \tilde{A}, \tilde{E}$  для временного ряда  $W$  оказались следующими:

вариация $\tilde{V}$	2,307900
асимметрия $\tilde{A}$	0,931214
эксцесс $\tilde{E}$	0,683188

Асимметричность и завышенные относительно нулей значения коэффициентов эксцесса

Таблица 1

Динамика основных вероятностных свойств временного ряда  $W$

Номер интервала, $k$	Значения	Математическое ожидание $M$	Дисперсия $D$	Коэффициент прироста	
				$M_{k+1} / M_k$	$D_{k+1} / D_k$
1	1-1000	0,0072542918	0,0000118391		
2	1001-2000	0,0038660334	0,0000145546	0,53	1,23
3	2001-3000	0,0047099249	0,0000276033	1,22	1,90
4	3001-4000	0,0095132234	0,0000220695	2,02	0,80
5	4001-5000	0,0107819906	0,0000175298	1,13	0,79
6	5001-6000	0,0031540133	0,0000127132	0,29	0,73
7	6001-7000	0,0052825235	0,0000189666	1,67	1,49
8	7001-8000	0,0042485189	0,0000152299	0,80	0,80
9	8001-9000	0,0042462607	0,0000152166	<b>1,00</b>	<b>1,00</b>
10	9001-10000	0,0134047900	0,0000050377	3,16	0,33
11	10001-11000	0,0076115332	0,0000227787	0,57	4,52
12	11001-12000	0,0017620751	0,0000050001	0,23	0,22
13	12001-13000	0,0032017623	0,0000121055	1,82	2,42
14	13001-14000	0,0073407267	0,0000452449	2,29	3,74
15	14001-15000	0,0027326526	0,0000080389	0,37	0,18
16	15001-16000	0,0043567934	0,0000125364	1,59	1,56
17	16001-17000	0,0063714872	0,0000196284	1,46	1,57
18	17001-18000	0,0025321572	0,0000091210	0,40	0,46
19	18001-19000	0,0027891505	0,0000116486	<b>1,10</b>	1,28
20	19001-20000	0,0091323945	0,0000384961	3,27	3,30
21	20001-21000	0,0015352943	0,0000033638	0,17	0,09
22	21001-22000	0,0021096850	0,0000047477	1,37	1,41
23	22001-23000	0,0070347513	0,0000419233	3,33	8,83
24	23001-24000	0,0086894964	0,0000586450	1,24	1,40
25	24001-25000	0,0084548193	0,0000611200	<b>0,97</b>	<b>1,04</b>
26	25001-25344	0,0114260340	0,0000319339	1,35	0,52

и вариации характеризуют временной ряд  $W$  как «временной ряд с распределением, не подчиняющимся нормальному закону».

И, наконец, для доказательства предположения о таком свойстве, как зависимость значений временного ряда  $W$ , воспользуемся алгоритмом  $R/S$ -анализа [1].

Идея алгоритма  $R/S$ -анализа состоит в следующем. Пусть имеем временной ряд  $Z$ , для которого его начальные отрезки обозначены через  $Z_\tau = z_1, z_2, \dots, z_\tau, \tau = 3, 4, \dots, n$ . Для каждого из этих начальных отрезков необходимо вычислить те-

кущее среднее  $\bar{z}_\tau = \frac{1}{\tau} \sum_{i=1}^{\tau} z_i$ . Далее для каждого

фиксированного  $Z_\tau (\tau = 3, 4, \dots, n)$  найти накопленное отклонение для его отрезков длины  $t$ :

$$X_{\tau,t} = \sum_{i=1}^t (u_i - \bar{u}_\tau), t = \overline{1, \tau}.$$

После чего следует вычислить разность между максимальным и минимальным накопленными отклонениями —

$$R = R(\tau) = \max_{1 \leq t \leq \tau} (X_{\tau,t}) - \min_{1 \leq t \leq \tau} (X_{\tau,t}),$$

которую принято называть термином «размах  $R$ ». Этот размах нормируется, т. е. представляется в виде дроби  $R/S$ , где  $S = S(\tau)$  — стандартное отклонение для отрезка временного ряда  $U_\tau, 3 \leq \tau \leq n$ . Так

называемый показатель Херста  $H = H(\tau)$  получаем из соотношения  $R/S = (a\tau)^H$ ,  $H = H(\tau)$ .

Свойство зависимости значений временного ряда (персистентность) определяется значением показателя Херста  $H$  в отрезке  $\tau = n$ :

если  $H \geq 0,6$ , то отрезок временного ряда находится в области черного шума [4] и является неслучайным (персистентным);

если  $0,4 < H < 0,6$ , то отрезок временного ряда находится в области белого шума [4], т. е. значения независимы от предыдущих;

если  $H \leq 0,4$ , то это определяют пребывание соответствующего отрезка временного ряда в области розового шума [4]; такой отрезок называется антиперсистентным (т. е. реверсирует чаще, чем случайный ряд).

Для временного ряда  $W$  показатель Херста, вычисленный согласно алгоритму  $R/S$ -анализа, имеет величину

$$H = H(25344) \approx 0,73241. \quad (3)$$

Согласно приведенной выше классификации временной ряд ветрогенерации  $W$  относится к персистентным рядам, т. е. временным рядам со свойством зависимости значений. Таким образом, доказаны все предположения о нелинейности рассматриваемого процесса генерации. Это заключение обосновывает выбор методов нелинейной динамики для моделирования рассматриваемого временного ряда.

#### Вычисление глубины памяти временного ряда ветрогенерации

В настоящей работе доказано, что временной ряд  $W$  представляет нелинейный процесс. Зависимость текущих значений временного ряда от предшествующих можно интерпретировать как наличие памяти в этом ряде, т. е. присутствие в нем фрактальных структур [4]. Представляет практический интерес получение числовой оценки памяти фрактального временного ряда.

В работе [5] для оценки глубины памяти предложен алгоритм под названием «Алгоритм последовательного  $R/S$ -анализа». Этот алгоритм является модификацией известного алгоритма Херста под названием «Алгоритм  $R/S$ -анализа», или алгоритм нормированного размаха [1]. Напомним, что результатом работы алгоритма Херста является заключение о неслучайности значений временного ряда.

Авторы работы [5] ввели понятия «долговременная память», «начало памяти», «исчерпание памяти о начальной точке», «срыв тренда», «точка потери памяти», «трендоустойчивый отрезок временного ряда».

Идея алгоритма последовательного  $R/S$ -анализа состоит в следующем. Формируется семейство временных рядов  $S(Z)$ , где каждый временной ряд получается из предыдущего путем удаления первого по счету значения. Для каждого временного ряда из этого семейства  $S(Z)$  реализуется алгоритм  $R/S$ -анализа, на выходе которого получаются две траектории:  $R/S$  и  $H$ .

Рассмотрим, к примеру, отрезок временного ряда  $W$  длины  $n = 105$  и обозначим его как

$$W^1 = \langle w_i^1 \rangle, \quad i = 25210, \dots, 25314. \quad (2)$$

Основанием для утверждения о том, что некоторый временной ряд обладает долговременной памятью, служит выполнение следующих условий:

1)  $H$ -траектория исходного временного ряда  $W^1$  через некоторое количество своих начальных точек оказывается в области черного шума;

2) для  $R/S$ -траектории временного ряда  $W^1$  точки вхождения в область черного шума (интервал  $H \in [0,6; 1]$ ) демонстрируют наличие тренда.

Глубину памяти временного ряда определяет такой первый по порядку (в области черного шума) номер  $l$ , для которого выполняется следующее условие: в точке  $l$   $H$ -траектория получает отрицательное приращение, а  $R/S$ -траектория в этой точке демонстрирует так называемый «срыв тренда», т. е. резкое изменение линейного тренда предшествующих точек  $R/S$ -траектории. На рис. 2 приведены  $R/S$ - и  $H$ -траектории

отрезка временного ряда  $W_{25}^1$  (2). Как видно из рисунка, в точке  $l = 6$  (первые 2 точки  $R/S$ - и  $H$ -траекторий на графиках отсутствуют)  $R/S$ -траектория сменила свой тренд, а  $H$ -траектория получила отрицательное приращение. Это говорит о том, что память о начальной точке  $i = 25$  временного ряда  $W^1$  (2) исчерпывается в точке  $l = 6$ , или в других обозначениях — в точке  $i = 30$ .

На основании визуализации представленных на рис. 3 траекторий можно сформулировать следующее заключение:

1) точки  $\tau = 3$ ,  $\tau = 4$ ,  $\tau = 5$  и  $\tau = 6$  находятся (см.  $H$ -траекторию) в области черного шума, за-



тем при переходе из 6-й точки в 7-ю наблюдается срыв в область серого шума ( $H(7) = 0,65$ ), что позволяет предварительно оценивать глубину памяти в этой окрестности рассматриваемого временного ряда  $W_{25}^1$  числом 6;

2) смена тренда  $R/S$ -траектории в точке  $\tau = 6$ , сопровождаемая уходом  $H$ -траектории в зону серого шума, позволяет оценить «глубину долговременной памяти о начале временного ряда  $W_{25}^1$ » числом 6;

Результаты  $R/S$ -анализа временных рядов оцениваем путем формирования нечеткого множества значений глубины памяти о начале ряда для каждого временного ряда семейства  $S(W^1)$ .

Приведем теперь описание алгоритма нахождения нечеткого множества глубины памяти временного ряда.

Пусть для каждого из временных рядов  $W_r^1 = \langle w_i^r \rangle$ ,  $i = \overline{1, n_r}$ ,  $r = \overline{1, m}$  в результате его  $R/S$ -анализа построены  $R/S$ -траектория и  $H$ -траектория, определяющие собой номер  $l_r$ -й точки, в которой произошла смена тренда, т. е.  $l_r$  — это номер первой по порядку точки, находящейся «выше» зоны белого шума, в которой  $H$ -траектория получила отрицательное приращение, а  $R/S$ -траектория сменила тренд.

Введем следующие обозначения:  $N(l)$  — количество всех рядов  $W_r^1 = \langle w_i^r \rangle$ ,  $i = \overline{1, n_r}$  из семейства  $S(W^1)$ , у каждого из которых номер точки

Показатель Херста  $H$ , нормированный размах  $R/S$

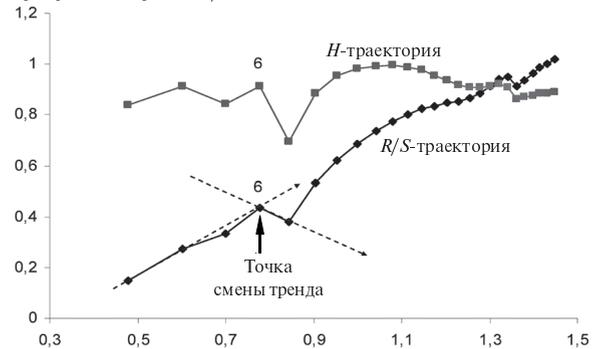


Рис. 2. Точка исчерпания памяти о начальной точке  $i = 25$  в отрезке временного ряда  $W_{25}^1$  (2)

смены тренда  $l_r$  равен числу  $l$ ;  $l = \min_{1 \leq r \leq m} l_r$ ;

$$L^0 = \max_{1 \leq r \leq m} l_r; m = \sum_{l=0}^{L^0} N(l); d(l) = \frac{N(l)}{m} \text{ — доля таких}$$

рядов в  $S(W^1)$ , у каждого из которых потеря памяти произошла на глубине  $l$ ;  $L(Z) = \{l\}$  — множество значений номеров точек смены тренда в рядах из семейства  $S(W^1)$ ;  $M(L) = \{(l, \mu(l))\}$  — нечеткое множество глубины памяти для начального временного ряда  $W^1$ , где  $\mu(l)$  — это значения функции принадлежности «глубины  $l$ » нечеткому множеству  $M(W^1)$ . Значения  $\mu(l)$  пропорциональны числам  $d(l)$ ,  $l \in L(W^1)$  и получаются путем нормирования значений долей

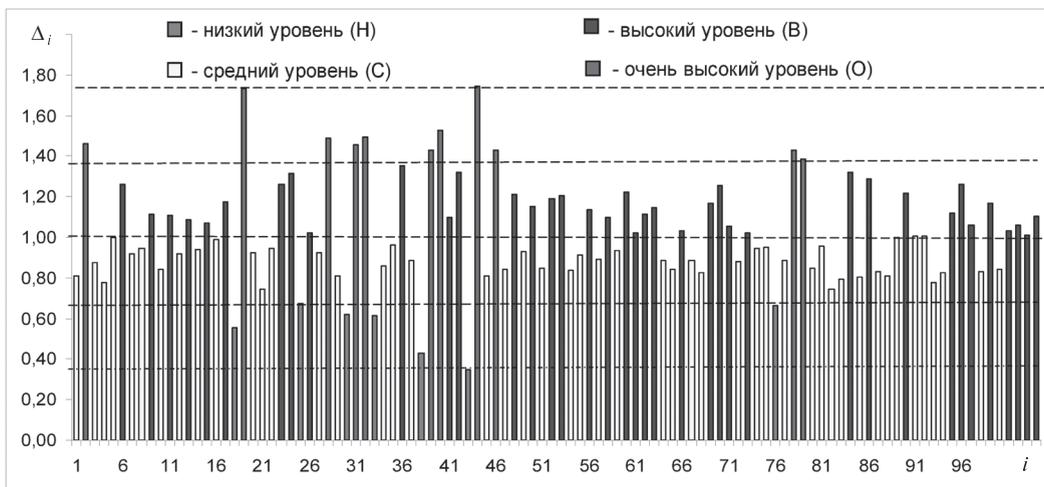


Рис. 3. Гистограмма лингвистического временного ряда  $U$

$d(l)$ , так что  $\mu(l) < 1$  для всякого  $l \in L(S)$ . Полученное в результате этих операций нечеткое множество имеет вид

$$M(W^1) = \left\{ (4; 0, 52), (5; 0, 38), (6; 0, 90), (7; 0, 66), (8; 0, 54), (9; 0, 11), (10; 0, 13), (11; 0, 06) \right\}. \quad (4)$$

Числовую оценку долговременной памяти временного ряда можно получить, воспользовавшись формулой дефазификации [6] по методу цент-

$$\text{ратяжести } l_{\text{цт}}(\tilde{W}^1) = \left( \sum_{l=4}^{11} l\mu(l) \right) / \left( \sum_{l=4}^{11} \mu(l) \right) \approx 6,44.$$

Полученное значение  $l_{\text{цт}}(\tilde{W}^1) \approx 6,44$  означает, что на отрезке  $i = 25210, \dots, 25314$  временного ряда  $W^1$  конфигурация, влияющая на получение прогноза, имеет длину 6.

#### Прогнозирование временного ряда ветрогенерации методом клеточных автоматов

В настоящей работе предлагается прогнозировать процесс ветрогенерации с помощью клеточно-автоматной модели [5], алгоритм прогнозирования которой состоит из четырех этапов.

*Этап 1.* Выбор терм-множества (множество носителей) [6] и преобразование данного временного ряда в лингвистический временной ряд.

Преобразование числового временного ряда в лингвистический временной ряд означает замену числовых элементов  $w_i^1, i = 1, 2, \dots, n$  лингвистическими переменными (термы). Совокупность этих термов принято называть терм-множеством, которое обозначаем  $\bar{U} = \{u\}$ . Для временного ряда ветрогенерации  $W^1$  принимаем (экспертным путем), что множество  $\bar{U}$  состоит из четырех элементов:  $u = \text{Н}$  — низкий уровень объема выработанной электроэнергии,  $u = \text{С}$  — средний уровень,  $u = \text{В}$  — высокий уровень,  $u = \text{О}$  — очень высокий уровень.

Для повышения эффективности прогнозирования в настоящей работе предлагается заменить временной ряд  $W^1$  (1) абсолютных значений количества выработанной электроэнергии временным рядом приращений

$$\Delta = \langle \Delta_i \rangle, \quad i = 25210, \dots, 25314. \quad (5)$$

где  $\Delta_i = w_i / w_{i-1}$ .

Заменяя элементы  $\Delta_i$  временного ряда  $\Delta$  (5) соответствующими термами из  $\bar{U}$ , получаем лингвистический временной ряд

$$U = \langle u_i \rangle, \quad i = 25210, \dots, 25314. \quad (6)$$

Преобразование числового временного ряда в лингвистический начинается с визуализации гистограммы временного ряда  $\Delta$  (рис. 5). На этой гистограмме находим наибольшее и наименьшее значения и отмечаем верхушки соответствующих столбиков. Через верхушки отмеченных столбиков проводим параллельно оси абсцисс две линии, которые назовем соответственно «верхняя граница» (ВГ) и «нижняя граница» (НГ). Далее расстояние от НГ до ВГ разделим на четыре равновеликих интервала и проведем ограничивающие их линии. Таким образом, получены четыре интервала значений временного ряда: 1) низкий уровень, 2) средний уровень, 3) высокий уровень, 4) очень высокий уровень.

Числовой временной ряд (5) преобразуем в лингвистический вида (6), осуществляя окрашивание каждого столбика гистограммы, как показано на рис. 3. Рассматривая  $i$ -й столбик этой гистограммы, элемент  $\Delta_i$  заменяем: термом Н, если верх столбика находится в первом интервале; термом С, если его верх находится во втором интервале; термом В, если верх этого столбика находится в третьем интервале и термом О, если его верх находится в четвертом интервале. Преобразование временного ряда заканчивается тогда, когда последний элемент  $\Delta_i$  заменяется соответствующим термом.

*Этап 2.* Выбор заключительной конфигурации и вычисление обобщенной эмпирической частоты ее переходов в состояния Н, С, В, О.

Заключительной конфигурацией ряда  $U$  будет отрезок длины 6:

$$l_{\text{закл}} = \text{ВСВВВВ}. \quad (7)$$

В качестве примечания отметим, что выбор длины заключительной конфигурации  $l_{\text{закл}} = 6$  обусловлен величиной  $l_{\text{цт}}(\tilde{W}^1) \approx 6,44$ , полученной в результате работы алгоритма последовательного  $R/S$ -анализа.

Для вычисления обобщенной эмпирической частоты переходов необходимо разложить эту конфигурацию  $l_{\text{закл}}$  на следующие элементарные:

$$l_{\text{закл}} = \{l_1, l_2, l_3, l_4, l_5, l_6\}, \quad (8)$$

где  $l_1 = B$ ,  $l_2 = BB$ ,  $l_3 = BVB$ ,  $l_4 = BVBV$ ,  $l_5 = CBVBV$ ,  $l_6 = BCBVBV$ .

Для каждой элементарной конфигурации (8) найдем ее локальные частоты переходов в состояния Н, С, В, О (их значения приведены в табл. 2).

Вычислим теперь обобщенные эмпирические частоты переходов в состояния Н, С, В, О. Для этого просуммируем значения табл. 2 соответственно по столбцам 2, 3, 4 и 5:

$$\begin{aligned} \tilde{\mu}(H) &= 3/37 + 2/12 + 0 + 0 + 0 + 0 \approx 0,25; \\ \tilde{\mu}(C) &= 21/37 + 4/12 + 3/5 + 1 + 1 + 1 \approx 7,90; \\ \tilde{\mu}(B) &= 13/37 + 6/12 + 2/5 + 0 + 0 + 0 \approx 1,25; \\ \tilde{\mu}(O) &= 0 + 0 + 0 + 0 + 0 + 0 = 0. \end{aligned} \quad (9)$$

Для получения искоемых степеней принадлежности лингвистического нечеткого множества необходимо произвести нормировку вычисленных  $\tilde{\mu}(H)$ ,  $\tilde{\mu}(C)$ ,  $\tilde{\mu}(B)$ ,  $\tilde{\mu}(O)$  на величину

$$\begin{aligned} \Sigma &= \tilde{\mu}(H) + \tilde{\mu}(C) + \tilde{\mu}(B) + \tilde{\mu}(O) \approx \\ &\approx 0,25 + 7,90 + 1,25 + 0 = 9,4. \end{aligned} \quad (10)$$

В результате чего имеем

$$\begin{aligned} \mu(H) &= \tilde{\mu}(H) / \Sigma \approx 0,25 / 9,4 \approx 0,03; \\ \mu(C) &= \tilde{\mu}(C) / \Sigma \approx 7,9 / 9,4 \approx 0,84; \\ \mu(B) &= \tilde{\mu}(B) / \Sigma \approx 1,25 / 9,4 \approx 0,13; \\ \mu(O) &= \tilde{\mu}(O) / \Sigma \approx 0 / 9,4 = 0. \end{aligned} \quad (11)$$

*Этап 3.* Формирование прогноза для рассматриваемых числового и лингвистического временных рядов предполагает следующее:

получение прогноза в виде нечеткого лингвистического множества;

преобразование нечеткого лингвистического множества в числовое нечеткое множество;

числовой прогноз.

Искомым лингвистическим нечетким множеством будет

$$\bar{U}_{n+1}^1 = \{(H; 0,03), (C; 0,84), (B; 0,13), (O; 0)\}. \quad (12)$$

Для преобразования прогнозного лингвистического нечеткого множества (12) в числовое нечеткое множество необходимо заменить в (12) термы Н, С, В, О их числовыми соответствиями. Для определения числовых соответствий предлагается следующий подход. Необходимо рассмотреть отрезок временного ряда  $\Delta_{25305}, \dots, \Delta_{25314}$ . На этом отрезке минимальным значением будет

$$a = \min_{25305 < r < 25314} \Delta_r = \Delta_{25308} = 0,8316029900, \text{ макси-}$$

$$\text{мальным значением } b = \max_{25305 < r < 25314} \Delta_r = \Delta_{25306} =$$

$1,2601806810$ . Тогда терму Н присвоим значение  $a + (b - a) / 4$ , терму С —  $a + (b - a) / 3$ , терму В —  $a + (b - a) / 2$ , терму О —  $b$ . Таким образом,

$$\Delta_H^0 = 0,938747413, \quad \Delta_C^0 = 0,97446222,$$

$$\Delta_B^0 = 1,045891836, \quad \Delta_O^0 = 1,2601806810. \quad (13)$$

Отсюда с учетом представленных в лингвистическом нечетком множестве (12) значений

Таблица 2

**Частоты переходов элементарных конфигураций заключительного отрезка временного ряда  $\Delta$  в различные состояния**

Обозначение частоты перехода	Частота переходов для состояния			
	Н	С	В	О
$w\{l_1\}$	3/37	21/37	13/37	0
$w\{l_2\}$	2/12	4/12	6/12	0
$w\{l_3\}$	0	3/5	2/5	0
$w\{l_4\}$	0	1	0	0
$w\{l_5\}$	0	1	0	0
$w\{l_6\}$	0	1	0	0

функции принадлежности  $\mu_H, \mu_C, \mu_B, \mu_O$ , получаем искомый прогноз в виде числового нечеткого множества

$$\hat{\Delta}_{n+1} = \left\{ (0,938747413; 0,03), (0,97446222; 0,84), (1,045891836; 0,13), (1,2601806810; 0) \right\}. \quad (13)$$

Применяя к нечеткому множеству  $\hat{\Delta}_{n+1}$  операцию дефазификации, получаем прогнозируемое приращение объема электроэнергии в обычном числовом виде, т. е.

$$\hat{\Delta}_{n+1} = 0,938747413 \cdot 0,03 + 0,97446222 \cdot 0,84 + 1,045891836 \cdot 0,13 + 1,2601806810 \cdot 0 \approx 0,982676625. \quad (14)$$

Получить искомое прогнозное значение  $\hat{w}_{n+1}^1$  можно по формуле

$$\hat{w}_{n+1}^1 = \hat{\Delta}_{n+1} w_n^1.$$

Итак, числовой прогноз временного ряда  $W^1$  составляет величину  $\hat{w}_{25215}^1 = 0,982676625 \times 0,0048249 \approx 0,004741316$ .

*Этап 4.* Валидация, т. е. оценка погрешности полученного прогноза.

Для оценки погрешности работы клеточно-автоматной модели спрогнозированы двадцатиминутные и получасовые интервалы на 25-ти участках исходного временного ряда  $W$  (1). Ошибка представляет собой относительное отклонение прогнозных величин от фактической, выраженное в процентах:

Таблица 3

Результаты валидации клеточно-автоматной прогнознй модели

Участок ВР	№ точки	Ошибка										
1	165	8%	166	8%	167	8%	168	1%	169	17%	170	3%
2	185	11%	186	15%	187	10%	188	6%	189	13%	190	2%
3	455	2%	456	3%	457	1%	458	10%	459	2%	460	7%
4	472	3%	473	8%	474	12%	475	10%	476	7%	477	10%
5	1473	19%	1474	1%	1475	7%	1476	10%	1477	8%	1478	8%
6	1777	11%	1778	9%	1779	13%	1780	2%	1781	0%	1782	21%
7	1792	3%	1793	17%	1794	0%	1795	5%	1796	5%	1797	7%
8	1835	1%	1836	5%	1837	6%	1838	15%	1839	9%	1840	15%
9	1873	7%	1874	2%	1875	6%	1876	12%	1877	11%	1878	1%
10	1893	15%	1894	9%	1895	7%	1896	9%	1897	1%	1898	5%
11	1947	7%	1948	3%	1949	0%	1950	17%	1951	7%	1952	11%
12	2103	15%	2104	15%	2105	14%	2106	19%	2107	9%	2108	6%
13	2205	1%	2206	2%	2207	3%	2208	9%	2209	13%	2210	10%
14	2414	10%	2415	6%	2416	2%	2417	14%	2418	11%	2419	15%
15	3180	5%	3181	3%	3182	10%	3183	12%	3184	5%	3185	10%
16	3211	2%	3212	0%	3213	2%	3214	14%	3215	5%	3216	6%
17	3224	4%	3225	6%	3226	8%	3227	2%	3228	11%	3228	7%
18	3295	7%	3296	1%	3297	12%	3298	1%	3299	4%	3330	6%
19	3674	5%	3675	3%	3676	5%	3677	4%	3678	3%	3679	4%
20	5164	11%	5165	9%	5166	14%	5167	21%	5168	5%	5169	7%
21	15609	5%	15610	1%	15611	5%	15612	15%	15613	7%	15614	5%
22	16309	1%	16310	13%	16311	3%	16312	15%	16313	9%	16314	7%
23	16027	2%	16028	13%	16029	5%	16030	6%	16031	15%	16032	6%
24	16309	5%	16310	1%	16311	5%	16312	15%	16313	7%	16314	5%
25	25315	16%	25316	5%	25317	0%	25318	3%	25319	6%	25320	5%

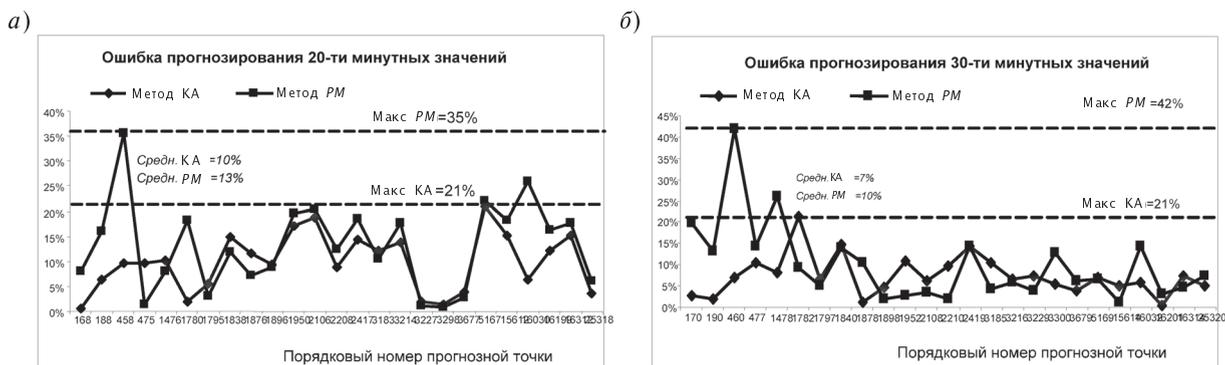


Рис. 4. Ошибки прогнозирования методов РМ и КА для различных горизонтов прогнозирования на 25-ти участках временного ряда  $W$

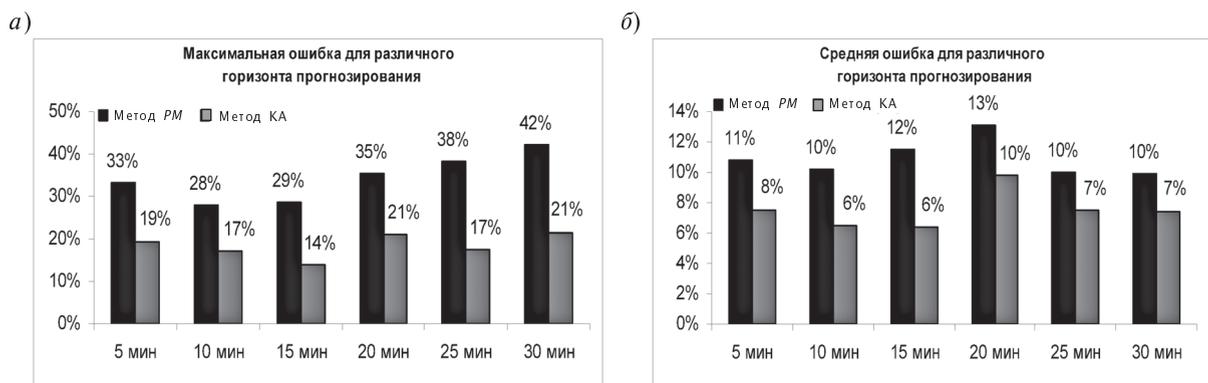


Рис. 5. Обобщенные ошибки прогнозирования методов РМ и КА

$$\text{Ошибка} = \frac{|w_i - \hat{w}_i|}{w_i} 100 \%$$

В табл. 3 приведены вычисленные ошибки для получасовых прогнозов (6 последовательных пятиминутных значений) на 25-ти участках временного ряда  $W$  (1).

В заключение предлагается пара иллюстраций (рис. 4) сравнения результатов прогнозирования методом клеточных автоматов (КА) и известным методом, называемым в США *Persistence Model* (РМ) и считающимся непревзойденным для решения нашей задачи [7]. Для сравнения обобщенных ошибок на различных горизонтах прогнозирования рассмотрены два случая: 1) максимальная ошибка, 2) средняя ошибка. На рис. 5 приведены столбчатые диаграммы этих ошибок для методов РМ и КА.

Ошибки прогнозирования, представленные на рис. 4, определены для 25-ти случайным об-

разом выбранных точек и свидетельствуют о преимуществе клеточно-автоматной прогнозной модели перед *Persistence Model*, в соответствии с которым краткосрочный прогноз ветрогенерации на шаг  $\Delta t$  может быть выполнен простым сдвигом графика ее временной зависимости на  $\Delta t$  вперед.

Предложен метод краткосрочного прогнозирования объемов ветрогенерации, превосходящий по своим характеристикам *Persistence Model* и позволяющий обоснованно конструировать такую длину горизонта прогноза, на которой ошибка прогнозирования данного показателя будет контролируемой и не выходящей за пределы заданных значений. Метод может быть рекомендован для использования службами, осуществляющими управление устойчивостью и режимами электроэнергетических систем в режиме реального времени.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Петерс, Э.** Хаос и порядок на рынках капитала. Новый аналитический взгляд на циклы, цены и изменчивость рынка [Текст] / Э. Петерс.— М.: Мир, 2000.— 333 с.
2. **Андерсон, Т.** Статистический анализ временных рядов [Текст] / Т. Андерсон.— М.: Наука, 1976.— 378 с.
3. **Кремер, Н.Ш.** Теория вероятностей и математическая статистика [Текст]: Учебник для вузов / Н.Ш. Кремер.— М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2000.— 543 с.
4. **Шредер, М.** Фракталы, хаос, степенные законы. Миниатюры из бесконечного рая [Текст] / М. Шредер.— Ижевск: Изд-во НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2001.— 528 с.
5. **Перепелица, В.А.** Структурирование данных методами нелинейной динамики для двухуровневого моделирования [Текст] / В.А. Перепелица, Ф.Б. Тебуева, Л.Г. Темирова.— Ставрополь: Ставропольское книжное издательство, 2006.— 286 с.
6. **Ярушкина, Н.Г.** Основы теории нечетких и гибридных систем [Текст]: Учеб. пособие / Н.Г. Ярушкина.— М.: Финансы и статистика, 2004.— 320 с.
7. [Электронный ресурс] <http://www.caiso.com>

УДК 621.181.29

*И.В. Самченко, А.П. Щуклинов, В.В. Бажанов*

## ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЭЛЕКТРОТЕПЛОАККУМУЛЯЦИИ НА АЭС С ВВЭР

Утвержденная в 2006 году Федеральная целевая программа «Развитие атомного энергопромышленного комплекса России...» предполагает масштабное строительство атомных энергоблоков, призванных заменить выбывающие мощности и удовлетворить рост энергетических потребностей страны.

Увеличение доли АЭС в общем производстве электроэнергии и уменьшение доли ТЭС (а они часто работают в переменной части графика нагрузок сети) ставит вопрос о привлечении АЭС к регулированию мощности электросети: увеличению производства электроэнергии в дневное время и снижению в ночное время.

Однако в настоящее время работа АЭС в переменных режимах нецелесообразна по двум причинам: во-первых, в связи с более высокой капитальной составляющей стоимости производимой электроэнергии, а во-вторых, в связи с низкими маневренными характеристиками активных зон.

Разработка специализированных высокоманевренных АЭС, допускающих изменение мощности энергоблока в широком диапазоне, хотя в принципе и возможна, но требует больших затрат на НИОКР.

С точки зрения возможности технической реализации регулирования мощности энергосисте-

мы с использованием АЭС наиболее простым представляется решение, при котором, сохраняя за АЭС постоянную часть графика нагрузок, покрытие переменной части графика возлагается на специализированные маневренные газотурбинные, парогазовые или гидроаккумулирующие станции. Однако, как показали проведенные во ВНИИАЭС исследования\* технико-экономической эффективности различных решений по обеспечению производства электроэнергии в соответствии с графиком нагрузок, наиболее экономичным решением является аккумулирование тепловой энергии на АЭС, при котором реакторная установка работает на постоянной мощности и постоянных параметрах теплоносителя, а реализация переменного графика выдаваемой в сеть мощности осуществляется только за счет изменения режима работы ее второго контура.

Сама идея аккумулирования тепловой энергии не нова и достаточно широко используется в России и за рубежом. Применительно к существующим и разрабатываемым АЭС с ВВЭР

\* **Чаховский, В.М.** Сэкономим? Энергоэффективность теплоаккумулирующих систем в атомной энергетике [Текст] / В.М. Чаховский, К. Сопленков // Росэнергоатом.— 2010. № 2.

в качестве возможных решений аккумулирования тепловой энергии рассматриваются:

системы с использованием в качестве аккумулирующей среды высокотемпературного теплоносителя, например ТВЛ-300, который нагревается за счет теплоты конденсации излишков свежего пара в часы ночного провала нагрузки и возвращает это тепло при нагреве основного конденсата и питательной воды в часы пиковой нагрузки, компенсируя отсутствие отборного пара на регенерацию, используемого в это время на увеличение мощности турбины;

системы с электротеплоаккумулятором (ЭТА), в которых в часы ночного провала нагрузки избыток генерируемой электроэнергии идет на нагрев теплоаккумулирующей среды в ЭТА с возвратом аккумулированного тепла во второй контур в часы пиковой нагрузки путем перегрева греющего пара промперегревателя СПП, в результате

чего существенно возрастает температура пара на входе в цилиндр низкого давления (ЦНД), увеличивается КПД проточной части ЦНД, а следовательно, и мощность турбины.

У каждой из указанных систем есть свои преимущества и недостатки, вследствие чего без тщательного расчетно-проектного анализа в настоящее время трудно отдать предпочтение какому-либо варианту. Для такого анализа необходимо разработанное хотя бы на уровне технического предложения основное оборудование.

В настоящей статье излагаются результаты оценки теплотехнической эффективности аккумулирования тепла на АЭС с ВВЭР с использованием ЭТА на основе имеющегося представления о возможном конструктивном исполнении такого оборудования.

Тепловая схема энергоблока АЭС с ЭТА приведена на рис. 1.

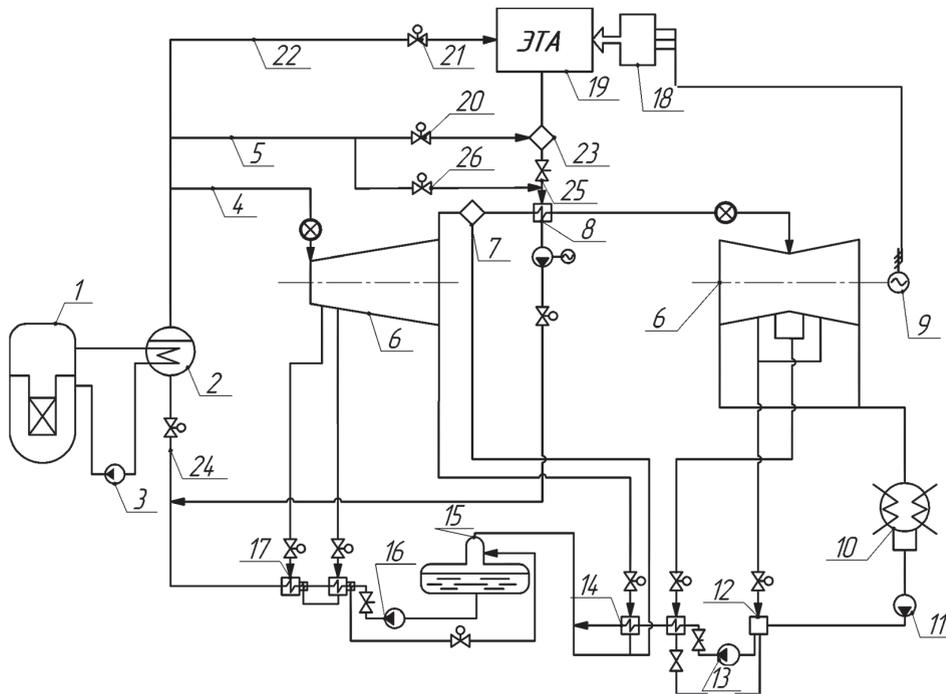


Рис. 1. Принципиальная тепловая схема энергоблока АЭС

с электротеплоаккумулятором, встроенным в тракт пароперегревателя СПП

- 1 — реактор; 2 — парогенератор; 3 — ГЦН; 4 — главный паропровод; 5 — трубопровод подачи пара на пароперегреватель (ПП); 6 — паровая турбина; 7 — сепаратор; 8 — ПП; 9 — электрогенератор; 10 — конденсатор; 11 — конденсатный насос первой ступени; 12 — ПНД смешивающего типа; 13 — конденсатный насос второй ступени; 14 — ПНД поверхностного типа; 15 — деаэрактор; 16 — питательный насос; 17 — ПВД; 18 — трансформаторный блок ЭТА; 19 — электротеплоаккумулятор; 20 — регулирующая задвижка на трубопроводе подачи пара на смеситель; 21 — задвижка на трубопроводе; 22 — подачи пара во встроенный теплообменник ЭТА; 23 — смеситель острого пара и перегретого пара из ЭТА; 24 — трубопровод питательной воды; 25 — регулирующая задвижка на трубопроводе подачи пара на ПП; 26 — регулирующая задвижка на трубопроводе подачи пара на ПП

Интерес к данной системе применительно к АЭС с ВВЭР, несмотря на имеющийся скепсис в отношении ее теплотехнической эффективности, обусловлен наличием здесь возможности изменения мощности энергоблока изменением температуры перегретого пара на входе в ЦНД.

Принцип работы АЭС с ЭТА заключается в следующем: ночью избыточная электроэнергия подводится к трансформаторному блоку 18, к которому подключены электронагреватели ЭТА 19. В ЭТА осуществляется разогрев теплоаккумулирующего материала примерно до 600 °С. По окончании ночного провала трансформаторный блок выключается, и ЭТА переходит в режим разрядки с выдачей накопленной энергии в турбоустановку в соответствии с требованиями энергосистемы. В этом режиме поток свежего пара, отбираемый в качестве греющего на пароперегреватель СПП 8, прежде чем поступит в ПП, проходит через ЭТА, где нагревается примерно до 540 °С, что позволяет поднять температуру нагреваемого в ПП основного пара в АЭС-2006 до 300 °С. От величины перегрева пара в ПП зависит прирост электрической мощности энергоблока в режиме разрядки ЭТА.

В качестве теплоаккумулирующего материала в ЭТА на первом этапе рассмотрения данного вопроса был принят ТХ — талькохлорид  $(\text{Mg Fe Al})_{12}[(\text{Si Al})_8\text{O}_{20}](\text{OH})_{16}$ , широко применяемый в каминах и печах различного назначения в связи с его хорошими теплоаккумулирующими свойствами. Однако по мере накопления и осмысления результатов исследования в качестве теплоаккумулирующих материалов стали рассматриваться и щелочные металлы, в частности натрия, применяемый в настоящее время в атомной энергетике.

Конструктивно ЭТА представляет собой ряд (в соответствии с количеством петель реакторной установки) параллельно включенных цилиндрических вертикальных теплообменников, состоящих из теплоаккумулирующего материала, пронизанного одноходовыми теплообменными трубками и электронагревателями с движением нагреваемого пара снизу вверх. Теплообменные трубки в каждом теплообменнике объединены между собой раздаточными и сборными коллекторами.

Было рассмотрено шесть конструктивных вариантов: с теплообменными трубками диаметром 16/14 и 19/17 при средней скорости движения пара в трубках 10, 20 и 30 м/с.

Расчетное исследование включало в себя:

определение для всех вышеуказанных конструктивных вариантов ЭТА требуемого количества теплообменных труб, их высоты и требуемого объема аккумулирующего материала (талькохлорида и натрия);

выбор из рассмотренных вариантов наиболее удовлетворяющего по габаритам для каждого из рассмотренных видов теплоаккумулирующего материала;

расчет трехмерного нестационарного температурного поля теплоаккумулирующего материала и нагреваемого пара в пределах одной расчетной ячейки для каждого выбранного теплообменника в режиме разгрузки ЭТА (работы энергоблока на повышенной мощности) продолжительностью 17 часов. Под расчетной ячейкой подразумевалась часть цилиндрического объема теплообменника, включающая осевую теплообменную трубку и окружающий ее в виде шестигранника аккумулирующий материал, равномерно распределенный между всеми трубками данного теплообменника;

расчет второй ступени пароперегревателя СПП с целью определения температуры нагреваемого пара на выходе СПП на протяжении всего режима разгрузки ЭТА при температуре греющего пара, достигаемой на выходе ЭТА;

определение увеличения мощности ЦНД турбины при номинальном расходе пара за счет использования тепла, аккумулированного в ЭТА, путем повышения температуры пара на входе в ЦНД.

Требуемый объем аккумулирующего материала при принятой максимально допустимой его температуре 600 °С определялся применительно к АЭС-2006 исходя из требования аккумулирования количества энергии (а следовательно, и мощности ночной разгрузки энергоблока при заданной продолжительности 7 часов), необходимого для обеспечения максимально возможного увеличения мощности турбинной установки в дневные часы (17 часов).

За начальные условия было принято равномерное температурное поле теплоаккумулирующего материала и пара в трубке при 600 °С, достигнутое в режиме зарядки аккумулятора.

Расход нагреваемого пара через одну ячейку (одну трубку) определялся исходя из значения расхода греющего пара, заданного на вторую ступень пароперегревателя СПП АЭС-2006

(79,17 кг/с) и общего количества теплообменных труб ЭТА, определяемого рассматриваемым конструктивным вариантом (диаметр труб и принятая средняя скорость движения пара). Давление пара на входе в трубки — 6,8 МПа, температура пара на входе — 283,8 °С. Требуемая температура пара на выходе ЭТА (она, в частности, и определяет требуемые габариты ЭТА) — 540 °С.

Расчет температурного поля проводился по специальной программе, моделирующей нестационарное температурное поле расчетной ячейки

ЭТА методом конечно-разностной аппроксимации. При этом ячейка представлялась состоящей из набора элементов, образованных делением ячейки по высоте на 32 одинаковых слоя, а по радиусу — на центральное отверстие, по которому движется снизу вверх нагреваемый пар, и окружающие это отверстие 45 коаксиальных цилиндрических слоев.

На рис. 2, а, б представлены графики изменения температуры в отдельных точках (элементах) расчетной ячейки при разрядке ЭТА, соот-

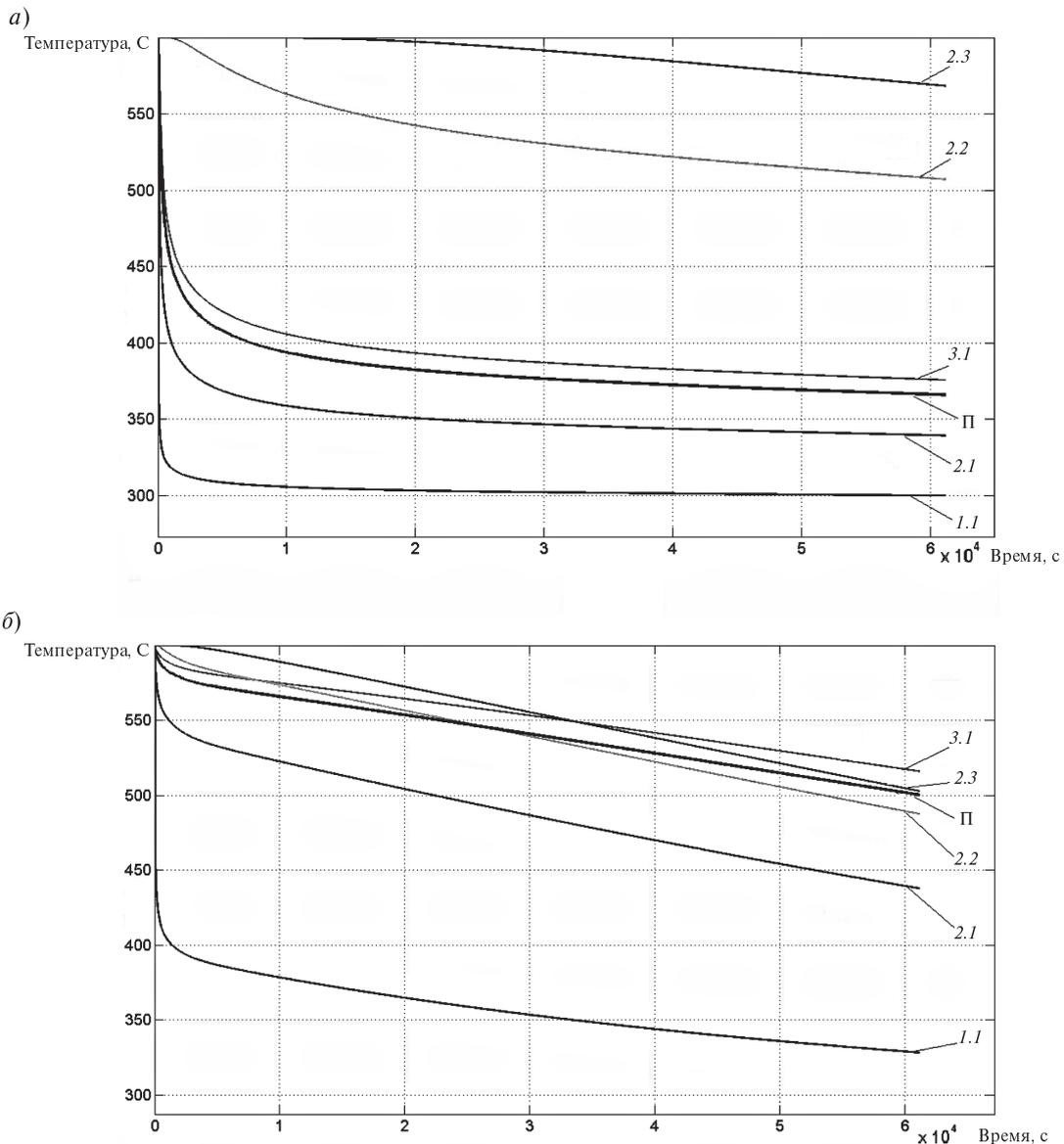


Рис. 2. Графики изменения температуры пара на выходе из ЭТА и теплоаккумулирующего материала в процессе разрядки при использовании в качестве теплоаккумулирующего материала талькохлорида (а), натрия (б)

ветствующие варианту с трубками 16/14 мм и средней скорости движения пара 20 м/с, наиболее оптимальному по температуре пара на выходе из ЭТА и габаритам аккумулятора. Это следующие элементы: пар на выходе из трубки (П); внутренний цилиндрический слой аккумулирующего материала (соприкасающегося с трубкой) на входе в ячейку 1.1, на середине высоты ячейки 2.1 и на выходе ячейки 3.1; элемент, находящийся посередине объема ячейки 2.2; элемент, наиболее удаленный от осевой трубки посередине высоты ячейки 2.3. На рис. 2, а представлены графики температур при использовании в качестве теплоаккумулирующего материала талькохлорида; на рис. 2, б — то же, но при использовании в качестве теплоаккумулирующего материала натрия.

Из графиков видно, что температура ТХ вблизи теплопередающей поверхности довольно быстро снижается, в то время как температура на некотором расстоянии от поверхности практически остается без изменения. Это приводит к тому, что при наличии нагретой до 600 °С большей массы ТХ нагреваемый пар за исключением первых секунд не достигает нужной температуры. Причина этого — низкая теплопроводность ТХ ( $\lambda_{ТХ} = 2,72 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{град})$ ) в исследуемом диапазоне температур, а следовательно, и низкий коэффициент теплопередачи, при котором скорость подвода тепла к теплообменной поверхности значительно меньше скорости теплоотвода.

В случае использования натрия температура пара после нескольких первых секунд достигает своего максимального значения, близкого к температуре натрия, после чего начинает плавно снижаться. Это объясняется высокой теплопроводностью натрия, резко увеличивающей коэффициент теплопередачи.

Из сказанного делается вывод о непригодности талькохлорида для использования в качестве теплоаккумулирующего материала в электротеплоаккумуляторах АЭС. Поэтому все дальнейшие расчетные исследования проводились только для ЭТА с натрием.

Для оценки возможного увеличения мощности турбины К1200—6,8/50 при разгрузке ЭТА были проведены расчеты температуры пара на входе в ЦНД (выходе из ПП второй ступени) в функции от температуры греющего пара после ЭТА, представленной на графике рис. 2, а, показавшие, что при температуре греющего пара

500 °С температура пара на входе в ЦНД равна 281,3 °С, а при температуре греющего пара 550 °С — 285,5 °С.

При указанных значениях температуры пара на входе в ЦНД был выполнен поверочный расчет проточной части ЦНД при известных значениях «сухого» КПД отсеков и расходов пара при номинальной мощности турбины.

Как следует из выполненных расчетов при температуре пара на входе в ЦНД 281,3 °С, мощность турбины повышается относительно номинального режима на 21,4 МВт, при температуре 285,5 °С — на 26,4 МВт, т. е. всего примерно на 2 %.

Если учесть, что суммарная продолжительность пиковой нагрузки составляет 4 часа (2 пика продолжительностью 2 часа каждый), то для обеспечения указанного повышения мощности продолжительностью 4 часа необходима ночная разгрузка блока при ее продолжительности 7 часов на 28 МВт, что при общей ночной разгрузке сети на 20–25 % является совсем незначительной величиной.

В результате проведенного расчетного исследования установлено:

1. Талькохлорид вследствие его низкой теплопроводности не может рассматриваться в качестве перспективного материала для электротеплоаккумулятора большой мощности.
2. Допустимая глубина ночной разгрузки АЭС с теплоаккумулятором при заданной продолжительности полностью определяется возможным увеличением мощности турбины и принятым графиком работы блока с увеличенной нагрузкой.
3. Рассмотренная схема энергоблока АЭС с аккумулированием тепловой энергии путем встраивания электротеплоаккумулятора в систему промперегрева представляется малоэффективной для использования в диспетчерском графике нагрузки сети из-за малых возможных значений изменения мощности. Причиной этого является в основном малое влияние величины перегрева греющего пара в пароперегревателе СПП на конечную температуру нагреваемого пара по сравнению с теплотой конденсации греющего пара.
4. Некоторое повышение эффективности использования рассмотренной схемы с электротеплоаккумулятором (примерно в два раза) мо-



жет быть получено, если аккумулированное тепло использовать в течение большего промежутка времени, чем длительность пиковых нагрузок (например, в течение 15 часов вместо двух раз по 4 часа).

5. Полученные результаты не отрицают возможности эффективного использования электротеплоаккумулирования в принципе, а только указывают на неэффективность этого в рассмотренной схеме.

УДК 621.311.22(075.8)

*В.Г. Киселёв*

## **ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПРОТЕКТОРНОЙ ЗАЩИТЫ ПОДЗЕМНЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ**

### **Постановка проблемы**

При разработке и внедрении в производство изделий, оборудования, конструкций и сооружений различного типа существенную роль играет их коррозионная стойкость. Коррозия относится главным образом к экономическим проблемам, так как связана с возможными потерями основных и оборотных фондов, а также предпринимательской прибыли. В последнее время для защиты от коррозии подземных металлических сооружений все чаще используются методы электрохимической защиты, в частности протекторная защита. Однако оценка экономической эффективности при проектировании протекторной защиты сопряжена с определенными трудностями. Попытке их преодоления и посвящена данная статья.

### **Протекторная защита от коррозии. Основные понятия**

Протекторная защита в случае подземных металлических сооружений используется в основном для защиты от почвенной коррозии. В этом случае защитный потенциал для подземных металлических сооружений (ПМС), изготовленных из низколегированной углеродистой стали, устанавливаются, как правило, в пределах от  $-0,85$  до  $-1,15$  В по медно-сульфатному электроду сравнения. Для электрохимической защиты от коррозии в общем не важно, как получают защитный ток — с использованием выпрямителя или гальванического анода, важно чтобы была достигнута необходимая защитная плот-

ность тока на ПМС. Получение защитного тока с использованием протекторов имеет ряд особенностей, которые связаны с материалом и формой протектора, свойствами электролитической среды, в которой находится защищаемое сооружение и гальванический анод, и видом ПМС (размеры, наличие защитного покрытия и его свойства, площадь контакта с грунтом и т. д.). Все эти факторы должны быть учтены при проектировании протекторной защиты. Остановимся на них несколько подробнее.

### **Основные принципы проектирования протекторной защиты**

Процесс проектирования протекторной защиты несколько различается в зависимости от вида коррозионной среды и особенностей защищаемого объекта, что, в частности, и подтверждается наличием специальных нормативных документов для разных ПМС и видов коррозионных сред. Для большей наглядности остановимся на рассмотрении протекторной защиты, регламентированной «Инструкцией по защите городских подземных трубопроводов от коррозии РД 153-39.4-091 — 01» [1]. Однако, прежде чем приступить собственно к проектированию гальванической защиты, рассмотрим кратко основные характеристики гальванических анодов и принцип их действия. Генерирование тока при протекторной защите обусловлено разностью стационарных потенциалов, которые имеют защищаемое сооружение и протектор в грунте. Чем она больше, тем больше защитный ток, протека-

ющий в системе, который может быть определен по следующей формуле:

$$J_A = \frac{E_S - E_G}{R_S + R_G + R_K + R_{SP} + R_{GP}}, \quad (1)$$

где  $E_S, E_G$  — стационарные потенциалы соответственно защищаемого сооружения и гальванического анода;  $R_S, R_G, R_K$  — омические сопротивления соответственно защищаемого сооружения, гальванического анода и соединительных проводов (кабеля);  $R_{SP}, R_{GP}$  — поляризационные сопротивления защищаемого сооружения и гальванического анода.

Отсюда видно, что повышение защитного тока достигается увеличением разницы стационарных потенциалов защищаемого сооружения и гальванического анода и снижением всех видов сопротивлений в цепи «гальванический анод — грунт — защищаемое сооружение — соединительные провода — гальванический анод». Однако нам нужно не просто повышение защитного тока, а повышение защитного тока при условии смещения потенциала ПМС от значения стационарного потенциала до значения потенциала под катодным током, которое находится в пределах от  $-0,85$  до  $-1,15$  В по медно-сульфатному электроду сравнения (мы рассматриваем случай ПМС, изготовленной из низколегированной стали). Следовательно, максимальная защищенность ПМС достигается как снижением всех видов сопротивлений за исключением поляризационного сопротивления ПМС, так и повышением величины  $R_{SP}$ , что может быть достигнуто, например, качественной изоляцией защищаемого сооружения. Таковы основные предпосылки для создания эффективной гальванической защиты. Становится понятным часто встречающееся при использовании гальванической защиты требование по ограничению максимального значения удельного сопротивле-

ния грунта. Действительно, с его ростом резко возрастают значения сопротивления растекания ПМС и, что особенно важно, сопротивления растекания гальванического анода, которое, как правило, значительно превосходит все другие виды сопротивлений в цепи протекторной защиты. Вместе с тем при создании гальванической защиты большую роль играет и вещество, из которого изготавливаются гальванические аноды, их форма, способы соединения и т. д. Остановимся на характеристике гальванических анодов несколько подробнее.

### Гальванические аноды

В принципе, для создания катодной защиты может быть использовано любое вещество, стационарный потенциал которого отрицательней стационарного потенциала ПМС. Однако на практике для протекторной защиты в естественных коррозионных средах применяют почти исключительно сплавы на основе магния и алюминия или чистый цинк. Протекторы, которые изготовлены из сплавов на основе магния, имеют, как правило, минимальный стационарный потенциал. Их используют в основном для защиты от почвенной коррозии. Алюминиевые и цинковые гальванические аноды, обладающие несколько более высоким стационарным потенциалом по сравнению со стационарным потенциалом магниевых анодов, применяют в основном для защиты от морской коррозии.

Приведем основные характеристики анодных материалов (см. табл.) [2].

Одна из важнейших характеристик протекторов — практическое токосодержание  $Q_{pr}$ , отвечающее реальному количеству электричества, которое способен выработать один килограмм данного протектора в электрохимической системе. Наряду с ним используют и величину  $Q$  (теоретическое токосодержание), отвечающую мак-

Основные характеристики анодных материалов

Тип анода	Средний стационарный потенциал анода в грунте по медно-сульфатному электроду сравнения, В	$\alpha_1$	$\alpha_2$	$\alpha = \alpha_1 \alpha_2$	$Q_{pr}$ , А·час/кг
Mg	1,55	0,99	0,52	0,51	1100
Al	1,15	0,98	0,87	0,85	2500
Zn	1,05	1,0	0,97	0,97	800



симально возможному значению количества электричества, которое может быть получено из одного килограмма чистого протекторного вещества в электрохимической системе. Эта величина определяется формулой, следующей из закона Фарадея:

$$Q = \frac{It}{m} = \frac{zF}{A}, \quad (2)$$

где  $I$  — защитный ток, получаемый от протектора;  $t$  — время работы протектора;  $z$  — валентность металла, из которого изготовлен протектор;  $F$  — постоянная Фарадея;  $A$  — атомная масса вещества протектора, выраженная в граммах.

Практическая величина токосодержания  $Q_{pr}$  отличается от теоретической величины токосодержания  $Q$  множителем  $\alpha$ . Таким образом,

$$Q_{pr} = \alpha Q. \quad (3)$$

В свою очередь, как следует из таблицы,

$$\alpha = \alpha_1 \alpha_2,$$

где

$$\alpha_1 = \frac{\sum x_i Q_i}{100Q}, \quad (4)$$

$\alpha_1$  — коэффициент, отражающий изменение токосодержания протекторного вещества в результате легирования;  $x_i$  — процентное содержание  $i$ -го легирующего компонента протекторного сплава;  $Q_i$  — теоретическая величина токосодержания всех компонентов протекторного сплава, включающая и токосодержание основного компонента сплава  $Q$ .

В отечественной технической документации, как правило, коэффициент  $\alpha_1$  не используется, а теоретической величиной токосодержания считают величину токосодержания протекторного сплава. Это тем более справедливо, что погрешности, возникающие при таком подходе (в соответствии с таблицей), крайне незначительны, особенно в отношении протекторов на основе цинка и магния. В дальнейшем мы будем придерживаться именно такой позиции.

В то же время изменением токосодержания протекторного вещества в связи с наличием коэффициента  $\alpha_2$  пренебрегать ни в коем случае не следует. Наличие коэффициента  $\alpha_2$  (в отечественной технической документации аналогом этой величины служит коэффициент полезного действия анода, который обозначают  $\eta_{II}$ ) обусловлено прежде всего собственной коррозией

протектора, т. е. протеканием на его поверхности катодных процессов, которые естественно снижают величину защитного тока. Значительную роль (особенно для магниевых сплавов) играет и растворение металлов с пониженной валентностью, которая потом принимает «нормальные» значения в результате химического взаимодействия с компонентами раствора.

На величину токосодержания, наряду с приведенными факторами, оказывает влияние и степень равномерности коррозии протекторного сплава. Действительно, любой протекторный сплав крепится на металлическом, чаще всего железном, держателе. Поэтому с течением времени при наличии неравномерного износа протектора между протекторным сплавом и металлом держателя возникает интенсивный коррозионный ток, обусловленный возникновением коррозионного элемента, который значительно снижает величину защитного тока протектора. По аналогии с предыдущими факторами снижения величины токосодержания по отношению к теоретической величине назовем соответствующую величину коэффициентом использования протектора и обозначим как  $\alpha_3$  (в отечественной технической документации аналогом этой величины служит коэффициент использования материала анода, который обозначают  $\eta_{II}$  и обычно считают равным 0,9). Рост этой величины обычно достигается соответствующим легированием протекторного сплава с целью получения равномерной тонкодисперсной структуры, а также оптимальным сочетанием как формы протектора и держателя, так и методов их крепления. Значительную роль в этом процессе играет и использование специальных активаторов, в которые помещают протектор при погружении его в коррозионную среду. Наряду с уменьшением сопротивления растекания протектора их действие способствует и более равномерному его износу. После ознакомления с основными свойствами протектора целесообразно рассмотреть основные этапы проектирования гальванической защиты.

#### Основные этапы проектирования гальванической защиты

Первым этапом проектирования любой электрохимической защиты является определение необходимой величины защитного тока  $J_3$ . Оценить значение этой величины можно либо экс-

периментально (при наличии уже построенного ПМС) либо теоретически (при проектировании нового подземного металлического сооружения) с использованием соответствующих нормативных документов. При этом очевидно, что затраты на гальваническую защиту будут снижаться с уменьшением величины защитного тока. Снижения этой величины добиваются прежде всего качественной изоляцией ПМС и устранением контактов ПМС с другими металлическими сооружениями, соприкасающимися с грунтом. Протекторная защита характеризуется малыми (по сравнению с защитой наложенным током) защитными токами и напряжениями, поэтому ее целесообразно использовать для защиты от коррозии небольших по размеру подземных металлических сооружений, расположенных в грунте с низким удельным сопротивлением.

Вторым этапом проектирования является оценка величины защитного тока одного протектора  $J_A$ . На практике вместо теоретической формулы (1) в этом случае для магниевых протекторов часто пользуются следующим выражением:

$$J_A = 0,6/R, \quad (5)$$

где величина 0,6 характеризует движущее напряжение, т. е. напряжение между защищаемым сооружением с поляризационным потенциалом  $-0,85$  В и поляризационным потенциалом гальванического анода, которые измерены относительно медно-сульфатного электрода сравнения. Для цинкового анода эта величина обычно составляет 0,2 В, а для алюминиевого — 0,3 В. Под обозначением  $R$  понимают омическое сопротивление в цепи протекторной защиты, которое, в свою очередь, определяется следующей формулой:

$$R = R_S + R_G + R_K. \quad (6)$$

Анализ последних двух формул показывает, что величина движущего напряжения для данных ПМС, данной коррозионной среды и данного типа протектора практически постоянна. Поэтому повышение величины защитного тока, получаемой от применения одного протектора  $J_A$ , может быть достигнуто только путем сокращения величины общего омического сопротивления  $R$  в защитной цепи. Проанализируем возможные способы этого сокращения. Относительно просто выбрать омическое сопро-

тивление соединительных проводов (кабеля). Обычно на практике оно определяется условием  $R_K \ll R_G$ , по которому определить сечение кабеля не представляет никакого труда. Омическое сопротивление защищаемого сооружения в данной коррозионной среде определяется почти исключительно сопротивлением изоляции ПМС. Поэтому при использовании гальванической защиты стремятся к повышению качества диэлектрического изоляционного покрытия с целью сокращения защитного тока. В реальности в силу практически всегда наблюдающегося значительного превосходства геометрических размеров ПМС над геометрическими размерами протектора, как правило,  $R_S \ll R_G$ . Следовательно, мы можем переписать формулу (5) в виде

$$J_A \approx 0,6/R_G. \quad (7)$$

Сокращение омического сопротивления гальванического анода может быть достигнуто как выбором участка для заложения протектора с минимальным значением удельного электрического сопротивления грунта, так и выбором оптимальной формы протектора. Не последнюю роль играет и использование активатора. В то же время установлено, что сопротивление растекания протектора относительно мало зависит от большинства приведенных факторов и в основном определяется следующей эмпирической формулой:

$$R_G = 0,5\rho \text{ [Ом}\cdot\text{м]}, \quad (8)$$

где  $\rho$  — удельное сопротивление грунта (размерность Ом·м).

В случае, когда все указанные мероприятия не позволяют обеспечить требуемый защитный ток, необходимо использовать несколько протекторов. При использовании  $n$  одиночных протекторов очевидно, что защитный ток, получаемый от них, увеличивается в  $n$  раз. Однако на практике с целью сокращения объема земляных работ используют «групповое» размещение протекторов, при котором наблюдается некоторый рост омического сопротивления растекания по сравнению с одиночным заложением протекторов, что учитывается коэффициентом экранирования  $\eta$ . При обычных методах закладки гальванических анодов его величина мало отличается от 0,85. Количество протекторов, установленных

групповым способом  $n_{гр}$ , в таком случае можно определить по формуле

$$n_{гр} = J_3 / \eta J_A. \quad (9)$$

Таким образом, используя некоторые оптимизирующие процедуры, нам удалось получить необходимое для защиты ПМС количество гальванических анодов. При этом важно отметить, что при достаточно близком расположении протекторов к защищаемой поверхности существует некоторая опасность «перезащиты» этой части поверхности и, соответственно, «недозащиты» наиболее удаленной ее части. Проблема эта легко разрешается при помощи ряда эмпирических формул, имеющих в отечественной технической документации. Подробнее на этом вопросе мы останавливаться не будем. Проектирование протекторной защиты предполагает и определение срока ее службы по формуле

$$T = mg\eta_{п}\eta_{и} / J_{ср} 8760, \quad (10)$$

где  $T$  — срок службы протектора (годы);  $m$  — масса протектора;  $g$  — теоретическая токоотдача материала протектора;  $J_{ср}$  — среднее значение силы тока в цепи «протектор — ПМС» за весь период эксплуатации протектора  $T$ .

В случае, если проектировщик при расчете по формуле (10) получает значение  $T$  меньше необходимого, то, как правило, у него есть две возможности для исправления ситуации:

увеличение массы применяемых протекторов при сохранении их количества;

увеличение количества применяемых протекторов при сохранении массы каждого из применяемых протекторов.

Конкретный выбор варианта при технической возможности использования как первого, так и второго способа производится сравнением годовых приведенных затрат за весь период эксплуатации протекторной защиты.

#### Определение экономической эффективности протекторной защиты

Оценка экономической эффективности антикоррозионных мероприятий сопряжена с целым рядом методологических трудностей. Действительно, наиболее часто используемый метод годовых приведенных затрат молчаливо предполагает, что степень защищенности ПМС при любом виде применяемых антикоррозионных мероприятий остается практически постоянной. В действительности

это конечно не так. Следовательно, учет изменения скорости коррозионного процесса на ПМС при использовании различных методов антикоррозионной защиты требует развития соответствующих модельных представлений и соответствующих прогнозов коррозионного состояния ПМС, что резко снижает точность расчетов экономической эффективности антикоррозионной защиты.

Счастливым исключением из этого общего правила является сравнительная оценка технико-экономической эффективности протекторной защиты и катодной защиты наложенным током. В этом случае эффективность антикоррозионных мероприятий определяется одним и тем же параметром — достижением защитного потенциала, равного  $-0,85$  В по медно-сульфатному электроду сравнения, и, следовательно, может не учитываться при сравнении обоих методов защиты. В этом случае можно ограничиться рассмотрением приведенных затрат по вариантам электрохимической защиты, осуществленной для одного и того же подземного металлического сооружения. Практически это означает сравнение следующих величин:

$$З_{гк} = K_k / T + \Theta_k \quad (11)$$

и

$$З_{гп} = K_{п} / T + \Theta_{п}, \quad (12)$$

где  $З_{гк}$  — годовые приведенные затраты катодной защиты наложенным током;  $K_k$  — капитальные затраты на катодную защиту наложенным током;  $T$  — расчетный срок службы ПМС с электрохимической защитой;  $\Theta_k$  — усредненные годовые эксплуатационные расходы на катодную защиту наложенным током за весь период ее эксплуатации ( $T$ , лет);  $З_{гп}$  — годовые приведенные затраты протекторной защиты;  $K_{п}$  — капитальные затраты на протекторную защиту;  $\Theta_{п}$  — усредненные годовые эксплуатационные расходы на протекторную защиту за весь период ее эксплуатации ( $T$ , лет);

В случае, если  $З_{гк} > З_{гп}$ , выгоднее применять протекторную защиту, и наоборот. Практическое использование электрохимической защиты показывает, что, как правило, с ростом защитной плотности тока все более выгодным становится применение катодной защиты наложенным током и, следовательно, все менее выгодно применение протекторной защиты.

Предложена ускоренная методика расчета протекторной защиты подземных металлических сооружений с использованием практических формул, выработанных в процессе развития методов электрохимической защиты, которая позволяет:

оценить влияние отдельных параметров протекторной защиты на ее стоимость и таким об-

разом выбрать оптимальный вариант протекторной защиты;

выбрать вариант электрохимической защиты с минимальной стоимостью путем сравнения годовых приведенных затрат протекторной защиты и годовых приведенных затрат катодной защиты наложенным током.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. РД 153-39.4-091-01. Инструкция по защите городских подземных трубопроводов от коррозии [Текст].— СПб.: Изд-во ДЕАН, 2002.

2. Baeckmann, W. Handbuch des katodischen Korrosionsschutzes [Текст] / W. Baeckmann, W. Schwenk.— Verlag Chemie.— 1980.— S. 159–182.

УДК621.311

*А.В. Севастьянова, С.В. Смоловик*

### РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ВЫЯВЛЕНИЯ ВОЗМОЖНОСТИ КАСКАДНОГО РАЗВИТИЯ АВАРИЙНЫХ ПРОЦЕССОВ В ЭНЕРГОСИСТЕМЕ И МЕРОПРИЯТИЙ ПО ПРЕДОТВРАЩЕНИЮ ЭТОГО

В связи с ростом нагрузок происходит интенсивное развитие энергосистем, ежегодно вводится новое оборудование, растет взаимное влияние элементов электроэнергетических систем друг на друга. Одновременно с этим растет опасность возникновения каскадных аварий. Особенно это актуально для энергосистем крупных городов, где развитие электрических сетей происходит наиболее интенсивно.

В предлагаемой статье предложен алгоритм выявления слабых звеньев системы, произведена оценка вероятности возникновения каскадных аварий и предложены мероприятия по их устранению.

Для предотвращения каскадных аварий было предложено резервировать питание подстанций с помощью традиционных воздушных линий (ВЛ) переменного тока либо высокотемпературных сверхпроводящих кабельных линий (ВТСП КЛ) постоянного тока в распределительной сети 110 кВ.

Было произведено сравнение этих вариантов, имевшее целью определить перспективы применения ВТСП КЛ постоянного тока в распределительных сетях 110 кВ крупных городов.

В качестве объекта исследования была выбрана математическая модель ОЭС Северо-Запада с учетом ее перспективной схемы развития на 2014 год. Рассматривался режим зимнего максимума нагрузок в схеме города Санкт-Петербурга и Ленинградской области.

Как известно, под надежностью распределительной сети понимают ее способность поддерживать бесперебойное питание узлов нагрузки. В нашей работе подробно рассматривался такой аспект надежности распределительной сети, как свойство системы не допускать каскадного развития аварии с нарушением питания потребителей.

Для выявления слабых мест в распределительной сети Санкт-Петербурга был разработан алгоритм определения тех линий электропередачи, относящихся к городской распределительной сети напряжения 110 кВ, отключение которых приводит к развитию каскадной аварии или отключению узлов нагрузки. Упрощенная блок-схема этого алгоритма представлена на рис. 1.

В первую очередь выбирались линии, аварийное отключение которых необходимо моделировать. На первом этапе исследования это были все

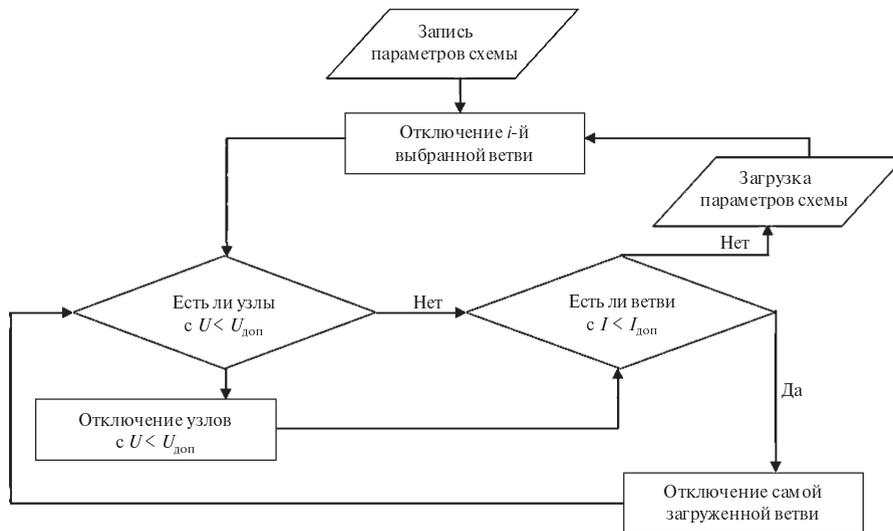


Рис. 1. Упрощенная блок-схема алгоритма «Каскадное отключение линий»

линии 110 кВ, относящиеся к энергорайону Санкт-Петербурга и Ленинградской области.

В момент запуска алгоритма происходит запись параметров режима в файл. Для узлов и ветвей к ним относится информация о пользовательской отметке (отмечен или не отмечен) и состоянии элемента (включен или выключен). Для узлов записывается информация о потреблении и генерации в узле, о номинальном напряжении и о районе, к которому относится узел. Для ветвей записывается информация о сопротивлении, коэффициентах трансформации и расчетный максимально допустимый ток проводника.

После отключения линии и изъятия ее из списка отмеченных ветвей (моделирование аварийного отключения) происходит проверка наличия узлов с недопустимой величиной напряжения. Если в схеме обнаруживаются такие узлы, то они отключаются. Далее идет проверка наличия перегруженных ветвей (в данном исследовании был поставлен порог 105 %). Если такие ветви имеются, то отключается наиболее загруженная. Анализ результатов показал, что наиболее загруженная линия почти всегда перегружена значительно больше других и находится электрически ближе всех к месту аварии. После отключения самой загруженной линии вновь происходит проверка напряжений в узлах, а далее — проверка допустимости загрузки линий. Цикл повторяется, пока напряжения во всех узлах не окажутся в допустимых пределах, а токо-

вая нагрузка линий не станет менее 105 %. После того как режимные параметры оказываются в допустимых пределах, происходит сравнение потреблений по району Санкт-Петербурга и Ленинградской области. Разница между начальной и конечной величиной потребления говорит о потерянной в результате аварии нагрузке. Далее происходит загрузка информации из ранее сохраненного файла и переход к отключению следующей линии из списка выбранных ветвей.

Результаты работы алгоритма представлены в файле MS Excel. Для каждой отключаемой линии выделен отдельный лист. На листе имеется информация о том, какая линия отключается, какие линии при этом загружены более чем на 100 %, какая из них отключается на следующей ступени каскадной аварии (и так далее для всех ступеней этого каскада), указаны отключаемые на каждой ступени узлы и отклонения напряжения в них, а также приведено потребление в районах до аварии, после аварии и объем отключенной нагрузки. На последнем листе файла выведены окончательные результаты — названия отключенных в результате аварии линий и объем потерянной нагрузки.

В результате выполнения алгоритма были выявлены 13 ветвей, отключение которых приводит к каскадным авариям и к отключению нагрузки. Однако к этим результатам следует относиться критично. Согласно схеме в трех случаях из 13 возможно включение резервных

линий и восстановление питания потребителей. Таким образом, остается 10 ветвей, аварийное отключение которых приводит к каскадным авариям.

В исследуемой схеме имеется большое количество двухцепных линий. Для них был проведен отдельный расчет. Предварительно одна из цепей двухцепной линии была отключена, а вторая отключалась аварийно с помощью алгоритма. Ни одно из таких отключений в исходной схеме города Санкт-Петербурга не привело к развитию каскадной аварии (за исключением тех случаев, когда было возможно включение резерва).

Для поиска слабых мест в энергосистеме Санкт-Петербурга проведенного анализа недостаточно, так как понятие надежности распределительной сети тесно связано и с частотой отключения линий. В связи с этим для каждой линии была произведена примерная оценка частоты ее отключений. Для двухцепных линий оценивалась вероятность отключения как одной цепи линии, так и двух одновременно.

В качестве конечного результата анализа энергосистемы Санкт-Петербурга была получена таблица, содержащая названия отключаемых линий, объем потерянной нагрузки и вероятность данного события (табл. 1).

Итак, на первом этапе исследования были выявлены слабые места энергосистемы Санкт-Петербурга, были найдены 10 линий, отключение которых в режиме зимнего максимума нагрузок приводит к развитию каскадной аварии с потерей питания потребителей.

На втором тапе исследования были рассмотрены разные варианты усиления схемы, предотвращающие каскадное развитие аварий (с целью поиска оптимального). Такое усиление выполнялось с помощью традиционных воздушных линий переменного тока, затем проводился расчет аналогично первому этапу. Далее исследовался вариант усиления сети с помощью вставок постоянного тока на основе кабельной линии из высокотемпературного сверхпроводника мощностью 100 МВт. В большинстве рассмотренных случаев традиционная ВЛ переменного тока и ВТСП КЛ постоянного тока одинаково эффективны. В табл. 2 приведены два случая, когда усиление сети с помощью ВЛ переменного тока оказывается неэффективным, в отличие от применения ВТСП КЛ.

Это связано с тем, что вставка постоянного тока, выполненная с использованием ВТСП КЛ, передает фиксированную мощность (в данном случае — 100 МВт) и происходит перераспределение потоков мощностей. Данное явление проиллюстрировано рис. 2 и 3. Здесь показан случай отключения ВЛ 110 кВ «Западная — Кораблестроительный институт-2». В случае усиления сети с помощью ВЛ 110 кВ «Западная — Сосновая поляна» после отключения ВЛ 110 кВ «Западная — Кораблестроительный институт-2» мощность передается по ВЛ 110 кВ «Западная — Сосновая поляна», вследствие чего она перегружается по току (на рис. 2 перегруженная линия выделена толстой линией). В случае усиления с помощью ВТСП КЛ подстанции «Корабле-

Таблица 1

Линии, отключение которых приводит к каскадным авариям

Аварийная линия	Тип	$\Delta P$ , МВт	Частота отключений раз/10 лет
ПС Гатчина — ПС Промзона-2	ВЛ	-160	1,5
ПС Гражданская — ПС ТЭЦ-21	ВЛ	-105	1,3
ПС Гатчина — ПС Институт	ВЛ	-160	1
ПС 3-д Ильич — ПС Сосновская	ВЛ	-212	0,9
ПС 65 — ПС Кораб-стр. инст.-1	ВЛ	0	0,9
ПС ЮЗОС — ПС 65	ВЛ	0	0,9
ПС Западная — ПС Кораб-стр. инст.-1	ВЛ	-189	0,2
ПС Западная — ПС Кораб-стр. инст.-2	ВЛ	-109	0,2
ПС Сосновская — ПС Гражданская	ВЛ	-105	0,2
ПС Октябрьская — ПС ТЭЦ-5	ВЛ	0	0,2

Таблица 2

Сравнение эффективности применения ВЛ переменного тока и ВТСП КЛ

Усиление с помощью ВЛ переменного тока				ВТСП КЛ	
Аварийная линия	Первая ступень каскадного отключения	Вторая ступень каскадного отключения	$\Delta P$ , МВт	Первая ступень каскадного отключения	$\Delta P$ , МВт
ПС Гатчина — ПС Институт	ПС Гатчина — ПС Промзона-2	ПС Ломоносовская — ПС Университет	-160	—	0
ПС Западная — ПС Кораб-стр. инст. 2	ПС Сосновая поляна — ПС Западная	ПС Сосновая поляна — ПС ЮЗОС	-109	—	0

строительный институт-2» и «Сосновая поляна» питаются через подстанции «ЮЗОС» и «ПС 65» (см. рис. 3). Отметим, что в обоих случаях принимается во внимание уже усиленный участок «Западная — Кораблестроительный институт 1» (здесь традиционная ВЛ и ВТСП КЛ одинаково эффективны, а к установке принята ВЛ как более дешевая).

Итак, предложенный алгоритм позволяет выявить слабые звенья энергосистемы, отключение которых приводит к каскадному развитию аварии. Также с помощью данного алгоритма можно произвести оценку эффективности мер по предотвращению подобных аварий.

Исходя из рассмотренного можно предположить, что ВТСП КЛ в будущем найдут свое при-

менение в распределительных сетях мегаполисов, так как в некоторых случаях благодаря свойству передачи фиксированной величины мощности подобная вставка позволяет избежать возникновения каскадной аварии и нарушения электроснабжения потребителей. Принимая во внимание такие свойства ВТСП КЛ, как отсутствие потерь электроэнергии при ее передаче, ограничение токов короткого замыкания, малые габариты, пожаробезопасность и экологичность, можно ожидать широкого применения этих устройств в сетях мегаполисов. Однако ввиду высокой стоимости ВТСП КЛ могут применяться только в исключительных случаях, когда применение традиционных устройств передачи электроэнергии не обеспечивает требуемого уровня надежности.

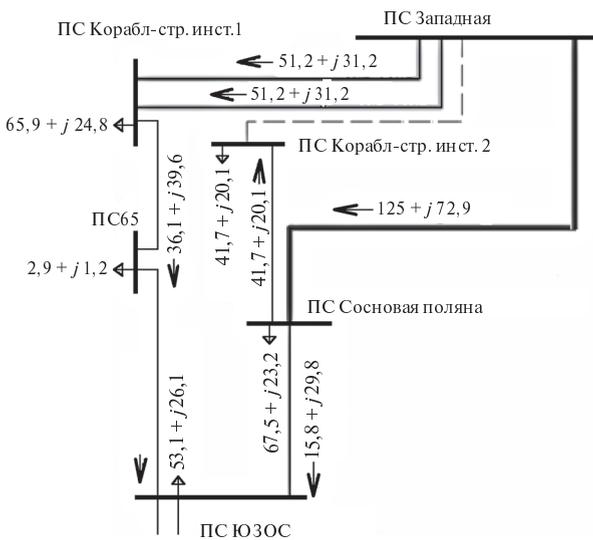


Рис. 2. Усиление сети с помощью ВЛ 110 кВ «Западная — Сосновая поляна»

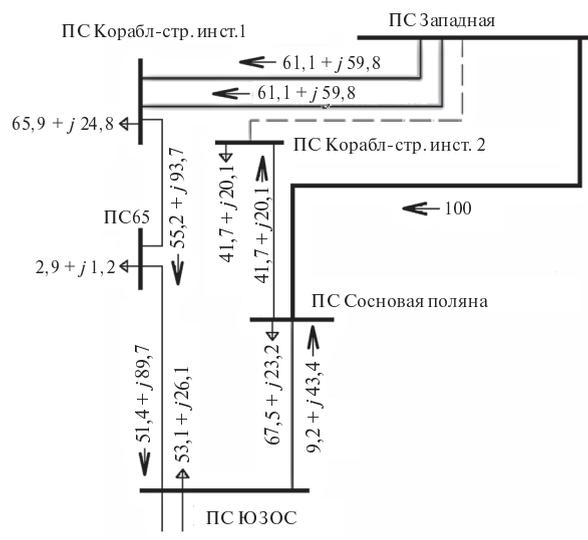


Рис. 3. Усиление сети с помощью ВТСП КЛ «Западная — Сосновая поляна»

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Создание силовой электрической линии для распределительных сетей на базе ВТСП технологий [Текст] / ВНИИКП.— Презентация доклада на рабочей встрече на тему «Состояние работ по применению ВТСП технологий в электроэнергетике» 22 января 2010 года под пред. гендиректора

ГК «РОСНАНОТЕХ» А.Б. Чубайса.

2. **Розанов, М.Н.** Надежность электроэнергетических систем [Текст]: справочник.— Том 2.— М.: Энергоатомиздат, 2000.— С. 215–245, 352.

3. **Правила** технической эксплуатации электроустановок потребителей [Текст].— М., 2003.

УДК 621.311.22:621.438

*М.А. Молодкина*

## ВОЗМОЖНОСТИ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ НА ПАРОГАЗОВЫХ ТЕПЛОВЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЯХ БОЛЬШОЙ МОЩНОСТИ ЗА СЧЕТ УТИЛИЗАЦИИ ВЫБРОСОВ НИЗКОПОТЕНЦИАЛЬНОЙ ТЕПЛОТЫ ПРОДУВКИ ГРАДИРНИ

На фоне кризисных явлений последних лет в топливных отраслях большинства стран мира проблема энергосбережения стала особенно актуальной для развития мировой экономики. Одно из наиболее перспективных направлений в энергосберегающих технологиях — это переход к энергоснабжению с использованием нетрадиционных источников энергии, в частности к теплоснабжению на базе тепловых насосов как одному из способов повышения энергетической эффективности предприятия при минимальных затратах.

Несмотря на то, что тепловые насосы традиционно принято относить скорее к малой энергетике, значительный исследовательский интерес на данный момент представляет перспектива их внедрения в тепловые схемы ТЭС больших мощностей, что обусловлено следующими факторами:

значительными выбросами низкопотенциальной теплоты, возникающими при охлаждении конденсатора паровой турбины (ПТ) и в иных системах охлаждения со сбросными водами, а также в системах теплоснабжения с повышением температуры обратной сетевой воды;

наличием на ТЭС систем, потребляющих высокопотенциальное тепло на подогрев сырой воды перед химводоочисткой, системы отопления и ГВС;

дешевой электроэнергией.

Выбор в качестве объекта для проведения нашего исследования Северо-Западной ТЭС (теплоэлектростанции на базе парогазовых установок (ПГУ) с котлами-утилизаторами) обусловлен следующими соображениями:

1. Строящиеся и проектируемые в настоящее время крупные тепловые электростанции в большинстве базируются на парогазовых технологиях как наиболее перспективном направлении развития отечественной энергетики.

2. Несмотря на высокую эффективность ТЭС на базе ПГУ по сравнению с традиционными паросиловыми установками, вопрос экономии органического топлива не теряет своей актуальности. Ограниченность и невосполнимость ископаемых видов топлива, а также тенденция к их удорожанию как в среднесрочной, так и в долгосрочной перспективе заставляют изыскивать любые способы экономии топлива даже на наиболее эффективных установках.

3. Опыт эксплуатации ПГУ ТЭС в нашей стране значительно меньше, чем в странах Европы и США, и «первопроходцем» в области парогазовых установок в России является Северо-Западная ТЭС — первая теплоэлектростанция на базе парогазовых установок с котлами-утилизаторами, запущенная в эксплуатацию в 2000 году, а также первая ПГУ ТЭС, начавшая работать по теплофикационному циклу в 2006 году. Прак-



тический опыт, нарабатываемый на Северо-Западной ТЭЦ, широко используется при эксплуатации подобных энергетических установок в нашей стране, в научных исследованиях, технических разработках, инновационном проектировании и при подготовке кадров.

Таким образом, в проводимом исследовании предполагается осуществить комбинирование наиболее эффективных на данный момент парогазовых технологий с нетрадиционными источниками энергии.

Один из источников значительных выбросов низкопотенциальной теплоты на тепловых электростанциях большой мощности, в частности на ТЭЦ, работающих по парогазовому циклу, — продувочная вода градирни. В работе предложен возможный вариант частичной утилизации выбросов за счет внедрения теплового насоса в тепловую схему системы оборотного водоснабжения ТЭЦ.

Существующая схема оборотного водоснабжения предполагает подвод охлаждающей циркуляционной воды к конденсатору паровой турбины по напорному распределительному магистральному циркуляционному водоводу с подачей на половины конденсатора по двум циркуляционным водоводам меньшего диаметра.

Для охлаждения вспомогательного оборудования ТЭС техническая вода из водоприемной камеры центральной насосной станции водоснабжения (ЦНС) подается напорным циркуляционным водоводом в здание главного корпуса.

После прохождения конденсатора, теплообменников и механизмов вода поступает в сливные циркуляционные водоводы и далее на градирню, в которой предусмотрена ее подача либо под уровень чаши градирни, либо на брызгательные устройства в зависимости от температуры воды в чаше градирни.

Чаша градирни и водоприемная камера ЦНС соединены самотечным каналом.

Подпитка циркуляционных водоводов конденсатора паровой турбины и охлаждения вспомогательного оборудования блока осуществляется непосредственно в водоприемную камеру ЦНС по подземным коммуникациям от береговой насосной станции (БНС), расположенной на берегу р. Большая Невка.

Для организации водообмена в чаше градирни и поддержания соответствующего воднохимического режима охлаждающей воды циркуля-

ционного водоснабжения осуществляется слив технической воды для охлаждения вспомогательного оборудования ТЭС с напорного циркуляционного водовода через линию продувки непосредственно в канализацию.

В существующую схему предлагается внести следующие изменения (см. рисунок): перенаправить в испаритель ТН продувку градирни, при этом продувочная вода, охлаждаясь, будет отдавать тепло хладагенту, после чего сливаться непосредственно в канализацию. Хладагент же после испарителя подается в приводимый в действие двигателем компрессор ТН, где его параметры повышаются, затем — в конденсатор ТН, здесь он отдает тепло потребителю, после чего поступает в дроссель для проведения параметров к первоначальным.

К достоинствам предложенной схемы можно отнести:

универсальность (схема применима как для парогазовых, так и для паросиловых тепловых электростанций);

простоту (предложенные изменения, ограничивающиеся включением ТН в систему оборотного водоснабжения, почти не усложняют существующую тепловую схему станции);

относительную автономность от незначительных колебаний электрической и тепловой нагрузки и вместе с тем полное отсутствие влияния на режимы работы основного оборудования ТЭС, что в свою очередь придает значительную маневренность ТН.

Недостатки схемы:

необходимость подачи электроэнергии на привод компрессора ТН, а следовательно, снижение отпуска с шин теплоэлектростанции.

существенное влияние на работу ТН качества технической воды.

Потери низкопотенциальной теплоты с продувкой градирни в годовом разрезе (табл. 1), рассчитанные на основании статистических данных за несколько предыдущих лет, незначительно варьируются в зависимости как от качества воды и режима работы оборудования, так и от температуры наружного воздуха и в целом составляют от 0,8 до 2 МВт, или, переводя в условное топливо, — от 100 до 250 кг у.т./ч.

В то же время внедрение теплового насоса в схему оборотного водоснабжения (с понижением температуры продувочной воды до 5 °С) позволит утилизировать от 0,5 до 1,7 МВт низкопо-



Окончание табл. 1

Название параметра, единицы измерения	Значение параметра по месяцам года											
	январь	февраль	март	апрель	май	июнь	июль	август	сентябрь	октябрь	ноябрь	декабрь
Утилизируемая низкопотенциальная теплота, МВт	0,56	0,59	0,69	0,58	0,88	1,04	1,17	1,68	1,48	1,17	1,00	0,67
Утилизируемая низкопотенциальная теплота, переведенная в условное топливо, кг. у.т./ч	69	72	84	71	109	128	143	206	182	144	122	82

тениальной теплоты, что при переводе в условное топливо составит от 70 до 200 кг у.т./ч.

На основании данных, приведенных в табл. 1, были рассчитаны характеристики теплового насоса, способного утилизировать часть низкопотенциальной теплоты, для трех различных режимов работы конденсатора теплонасосной

установки (ТНУ), характеризующихся следующими температурами теплоприемника на входе и выходе из конденсатора ТН:

1)  $T_{\text{ВХ}}^{\text{к}} = 60^{\circ}\text{C}$  и  $T_{\text{ВЫХ}}^{\text{к}} = 80^{\circ}\text{C}$  (предполагается дальнейшее использование теплоприемника для отопления);

Таблица 2

Расчет характеристик теплового насоса, внедряемого в схему оборотного водоснабжения

Режим работы конденсатора ТН $(T_{\text{ВХ}}^{\text{к}} / T_{\text{ВЫХ}}^{\text{к}})$	Название параметра, единицы измерения	Значения параметра при температуре источника низкопотенциальной теплоты на входе в испаритель ТН, °С							
		16	18	20	22	24	26	28	30
60/80	Расход рабочего агента, кг/с	5,6	6,6	7,7	8,7	9,7	10,7	11,7	12,8
	Расход нагреваемой воды, кг/с	11,8	13,9	16,0	18,2	20,3	22,4	24,5	26,7
	Нагрузка конденсатора ТН, кВт	984	1163	1341	1520	1698	1877	2055	2234
	Нагрузка испарителя ТН, кВт	641	757	873	990	1106	1222	1338	1454
	Электрическая мощность компрессора, кВт	429	507	585	663	741	819	897	974
	Коэффициент преобразования энергии	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3
50/70	Расход рабочего агента, кг/с	5,2	6,2	7,1	8,0	9,0	9,9	10,9	11,8
	Расход нагреваемой воды, кг/с	11,1	13,1	15,1	17,1	19,1	21,2	23,2	25,2
	Нагрузка конденсатора ТН, кВт	927,9	1096	1265	1433	1601	1769	1937	2106
	Нагрузка испарителя ТН, кВт	641	757	873	990	1106	1222	1338	1454
	Электрическая мощность компрессора, кВт	359	424	489	554	619	684	749	814
	Коэффициент преобразования энергии	2,6	2,6	2,6	2,6	2,6	2,6	2,6	2,6
15/30	Расход рабочего агента, кг/с	4,0	4,8	5,5	6,2	7,0	7,7	8,4	9,2
	Расход нагреваемой воды, кг/с	12,0	14,2	16,4	18,6	20,8	22,9	25,1	27,3
	Нагрузка конденсатора ТН, кВт	755	892	1029	1166	1303	1440	1577	1713
	Нагрузка испарителя ТН, кВт	641	757	873	990	1106	1222	1338	1454
	Электрическая мощность компрессора, кВт	143	169	195	221	246	272	298	324
	Коэффициент преобразования энергии	5,3	5,3	5,3	5,3	5,3	5,3	5,3	5,3

2)  $T_{\text{вх}}^{\text{к}} = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$  и  $T_{\text{вых}}^{\text{к}} = 70\text{ }^{\circ}\text{C}$  (предполагается возможность использования теплоприемника для горячего  $^{\circ}\text{C}$  — нагрев сырой воды для химводоочистки).

В расчете теплового насоса принимались следующие параметры:

1) изменение температуры источника низкопотенциальной теплоты на входе в испаритель ТН  $T_{\text{вход}}^{\text{и}}$  от 15 до 30  $^{\circ}\text{C}$  в зависимости от температуры наружного воздуха;

2) температура источника низкопотенциальной теплоты на выходе из испарителя ТН  $T_{\text{выход}}^{\text{и}} = 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;

3) расход источника низкопотенциальной теплоты (принят на основании статистических данных)  $G^{\text{инт}} = 50\text{ м}^3/\text{ч} = 13,9\text{ кг/с}$ ;

4) рабочий агент — фреон R11 (выбран исходя из его термодинамических свойств);

5) минимальные разности температур между греющей и нагреваемой средами в испарителе и конденсаторе  $\Delta T^{\text{и}} = \Delta T^{\text{к}} = 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;

6) внутренний относительный КПД компрессора  $\eta_i = 0,8$ .

В табл. 2 приведены результаты расчета характеристик теплового насоса для различных направлений использования теплоприемника.

На основании проведенного исследования сделаны следующие выводы:

1. Одним из способов повышения энергосберегающего потенциала тепловой электростанции является внедрение теплового насоса в схему оборотного водоснабжения с целью утилизации выбросов низкопотенциальной теплоты продувки градирни.

2. Наиболее эффективен с точки зрения коэффициента преобразования энергии и расхода приемника низкопотенциальной теплоты режим работы конденсатора теплового насоса 15/30 — нагрев сырой воды для химводоочистки.

3. Небольшие затраты электроэнергии на привод компрессора теплонасосной установки, косвенная взаимосвязь режима работы теплового насоса с режимами работы основного оборудования и незначительность требуемых изменений в тепловой схеме относятся к преимуществам данной схемы по сравнению с утилизацией в обход градирни низкопотенциальной теплоты обратной сетевой воды и технической воды, охлаждающей конденсатор паровой турбины.

4. Единообразие систем оборотного водоснабжения для тепловых электростанций определяет возможность применения исследуемой схемы не только на теплоэлектростанциях, оборудованных парогазовыми установками, но и на существующих станциях, работающих по традиционному паросиловому циклу.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Боровков, В.М.** Эффективность применения тепловых насосов на тепловых электростанциях с парогазовыми установками [Текст]: учебное пособие / В.М. Боровков, А. Аль-Алавин.— СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2008.— 264 с.

2. **Пономаренко, В.С.** Градирни промышленных и энергетических предприятий [Текст]: справочное пособие / В.С. Пономаренко, Ю.И. Арефьев.— М.: Энергоатомиздат, 1998.— 376 с.: ил.

3. **Соколов, Е.Я.** Энергетические основы трансформации тепла и процессов охлаждения [Текст]: учебное пособие / Е.Я. Соколов, В.М. Бродянский.— 2-е изд., перераб. и доп.— М.: Энергоиздат, 1981.— 320 с.

4. **Томановская, В.Ф.** Фреоны. Свойства и применение [Текст] / В.Ф. Томановская, Б.Е. Колотова.— Л.: Химия, 1970.— 182 с.

## МИНИ- И МИКРОРОБОТОТЕХНИКА

Мини- и микроробототехника — сравнительно новый раздел робототехники, который сформировался в русле общей для техники тенденции миниатюризации и уже получил свои безальтернативные сферы применения от военного дела и силовых структур до медицины.

В ходе миниатюризации робототехнических систем по мере освоения новых массогабаритных размерностей происходит модификация их структур и соответственно методов проектирования. Этот процесс иллюстрирует рис. 1.

Для миниразмерностей основным методом построения систем продолжает оставаться модульный принцип. На его основе реализуются системы переменной структуры — реконфигурируемые. Это новое перспективное направление

применения модульного принципа построения для реализации высшей формы адаптации — структурной. Она может осуществляться автоматически по сенсорной информации в виде самоорганизующихся систем или человеком-оператором. Реконфигурация может относиться ко всей системе или к отдельным частям робота — к манипулятору, транспортной или сенсорной системам и т. д. Помимо расширения функциональных возможностей реконфигурация повышает надежность функционирования систем.

Типовые примеры реконфигурации манипуляторов — это смена рабочих органов, подключение прецизионного позиционера или других новых звеньев. Пример реконфигурируемой транспортной системы — цепочка транспортных

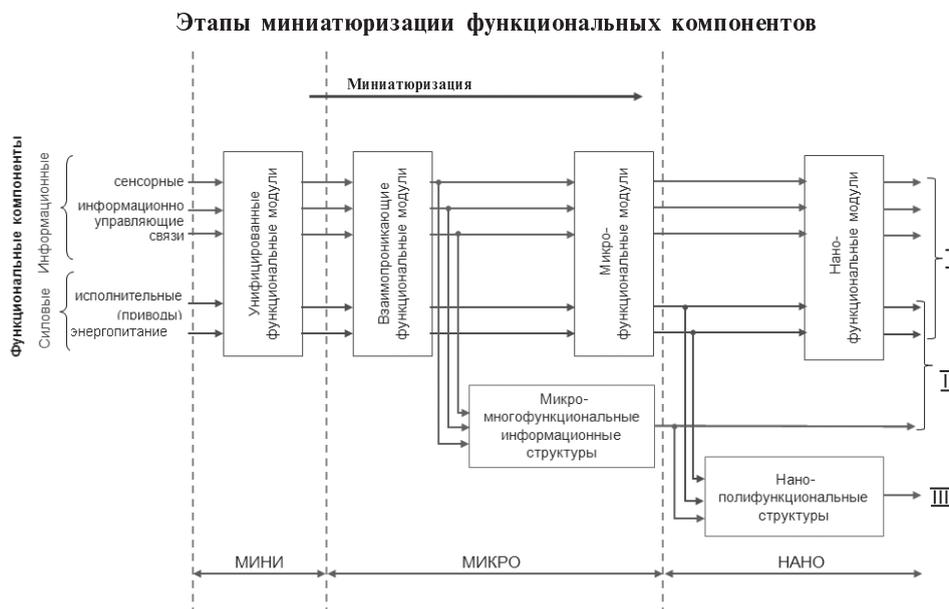


Рис. 1. Этапы миниатюризации функциональных компонентов робототехнических систем

ячеек-модулей или двухмерная решетка из них. Это резко повышает проходимость робота, а возможность компоновать эти транспортные ячейки различными функциональными модулями дает общее решение полной функциональной реконфигурируемости. На рис. 2 показана такая обобщенная компоновка реконфигурируемой мобильной миниробототехнической системы широкого назначения для использования в чрезвычайных ситуациях техногенных и природных катастроф. Приведенная компоновка из четырех двухколесных транспортных модулей может быть дополнена гусеницами, колеса могут быть заменены педипуляторами из типоразмерного ряда тех же шарниров, которые используются для манипуляционных систем.

Характерная особенность чрезвычайных ситуаций — предельная априорная неопределенность как условий работы, так и подлежащих выполнению операций. Более того, как правило, эти обстоятельства могут существенно меняться непосредственно в ходе работы. Типовая последовательность выполняемых при этом операций: вначале оперативное обследование территории и отдельных объектов, включая поиск возможных жертв и т. п.; затем уже в основном с помощью роботов большей размерности локализация последствий возникшей чрезвычайной ситуации (ликвидация пожара, заражений, разбор завалов и т. д.). Все подобные операции требуют различного состава робототехнических систем, требования к которым определяются и уточняются уже в ходе работы.

Как показано на рис. 1, дальнейшее уменьшение размеров приводит к постепенному конструктивному слиянию отдельных функциональных компонентов и соответственно к переходу от модульного построения к миниатюризации об-

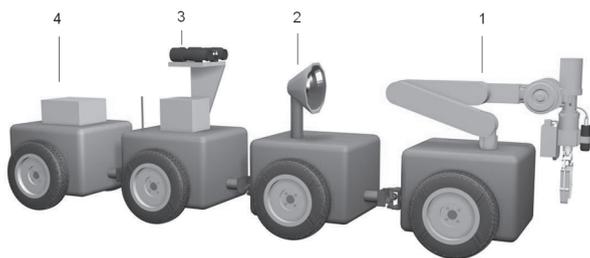


Рис. 2. Универсальная реконфигурируемая робототехническая система типа «Робопоезд»: 1, 2, 3, 4 — соответственно модули манипуляционный, сенсорный, связи, энергопитания

щих массо-габаритных параметров. Процесс этот начался с создания многофункциональных информационных структур и развивается в двух направлениях — процессорных однородных структур и технических нейронных сетей.

Первый путь уже хорошо отработан. Второй путь создания многофункциональных нейронных сетей находится еще в стадии поисковых исследований. Эту задачу иллюстрирует рис. 3. Слева выделены сплошными линиями функциональные компоненты, уже успешно реализуемые на нейронных сетях, а справа — подлежащая реализации структура единой многофункциональной нейронной сети.

Нейронные сети показали свою эффективность для обеспечения отдельных функций роботов и, что не менее важно, являются перспективной основой после освоения методов искусственного интеллекта для создания «искусственного разума», имитирующего наряду с интеллектом и человеческую интуицию, т. е. творческие способности.

Такая распределенная многофункциональная нейронная сеть, в которой отдельные функции реализуются в виде программных агентов с общей иерархической ассоциативной памятью, станет основой разумных роботов — роботов нового поколения, самообучающихся и самосовершенствующихся подобно живым организмам.

Процесс миниатюризации силовых компонентов, сопровождающийся их слиянием с другими функциональными компонентами, происходит с большим запаздыванием по отношению к информационным компонентам, поскольку это требует поиска новых физических принципов и путей их технической реализации. Для приводов нужно прежде всего создать искусственные мышцы, в частности на базе электроактивных полимеров. Для бортовых источников электроэнергии необходим поиск новых способов аккумуляции электроэнергии, основанных на нанотехнологиях и беспроводной передачи электроэнергии.

В целом, как показано на рис. 1, развитие структур мини- и микробототехнических систем вылилось в следующие три линии:

I — продолжение автономной минимизации отдельных функциональных компонентов, включая микро- и наноразмерности;

II — указанное выше объединение информационных модулей в общую однородную сеть.



Рис. 3. Перспективы создания многофункциональных нейронных сетей

Такая интеграция функций подобна головному мозгу человека и должна дать аналогичный эмергентный эффект;

линия III находится еще в стадии поисковых исследований, как и сама наносистемная техника в целом. Ее идея близка клеточному строению живых организмов и навеяна именно этой бионической ассоциацией.

Отдельным направлением развития мини- и микроробототехники является групповое функционирование роботов. К таким группам роботов также может быть применена, в частности, концепция многоагентных систем, но не программных, а материальных агентов-роботов. Групповое применение можно рассматривать как один из способов миниатюризации за счет со-

кращения функций отдельных роботов, совместно выполняющих общую задачу, и совместного обеспечения связи с центром, энергообеспечения, преодоления препятствий, выполнения других общих задач.

Обобщая изложенное, важно опять подчеркнуть, что в рамках мини- и микроробототехники происходит смена принципов построения робототехнических систем — от декомпозиции к системному подходу. Поэтому именно в этом диапазоне размерностей формируются и отрабатываются общие принципы и методы оптимизации систем робототехники и обосновываются тенденции их дальнейшего развития, что определяет особое значение этого раздела для робототехники в целом.

УДК 621.86.87

*И.А. Будько, А.Н. Волков, И.Б. Челпанов*

## ЗАДАЧИ МЕХАНИКИ ЗМЕЕПОДОБНЫХ РОБОТОВ

Сообщения об автоматических технических устройствах с более или менее сложной механикой, которые предназначены не для выполнения конкретных работ, а только для демонстрации,

занимают все большее место в средствах информации; большинство их называется роботами. Понятие «демонстрационные роботы» было введено коллективом авторов кафедры «Автоматы»

СПбГПУ в серии публикаций, появившихся в последнее десятилетие в самом конце девяностых годов [1]. Сейчас признано, что демонстрационные роботы представляют собой самостоятельный класс роботов со своими отличительными особенностями и типажом. К демонстрационным роботам относятся машины подвижные или с подвижными составными частями, с автоматически управляемыми приводами, которые не выполняют никаких производственных функций, а демонстрируют сами себя или другие объекты. Демонстрационные роботы широко используются в рекламе, для привлечения внимания на выставках, в сфере развлечений, в парках и аттракционах, на сценах театров [2], во время празднеств и шествий. Для некоторых видов демонстрационных роботов устраиваются соревнования (например, для роботов-гладиаторов, ведущих бои друг с другом). Большую популярность получили матчи колесных, управляемых вручную минироботов-футболистов. В демонстрационных роботах в первую очередь привлекает элемент изобретательства, однако многие демонстрационные роботы, их механизмы, приводы, системы управления заслуживают серьезного научного рассмотрения.

Мелкими демонстрационными роботами можно считать игрушки с достаточно сложными системами управления. Это демонстрационные роботы для игр (play robots). В настоящее время большинство сообщений в сети Интернет относится именно к таким роботам. По геометрии механизмов, кинематике и внешнему виду они бывают антропоморфными, андроидными либо просто андроидами (имитируют человека) или зооморфными (имитируют животных, например собаку). Известны и уникальные разработки. К числу очень сложных и совершенных демонстрационных роботов относится двуногий антропоморфный робот Azimo фирмы Honda, способный не только ходить по полу, но подниматься по лестнице, осмысленно жестикулировать, общаться с людьми.

В оснащении театральной сцены, в кинематографии и на телевидении обычно используются специально спроектированные демонстрационные роботы для имитации живых существ.

Для сцен театров, для участия в празднествах и пр. требуются демонстрационные роботы больших размеров (до десяти метров и даже десятков

метров). В этой области уже накоплен опыт [2]. К числу наиболее востребованных крупномасштабных демонстрационных роботов относятся такие, основу которых представляют многосвязные цепи или длинные изгибающиеся оболочки. К числу гибких длинных частей тела с подобными свойствами относятся хоботы и длинные шеи некоторых животных, а также, возможно, большие крылья. Применительно к театральной сцене А.Н. Волковым была проработана и реализована [3] трансформируемая фигура десятиметрового великана, конструкция которого включала многосвязный механизм изгибаемого позвоночного столба, а совместно с А.В. Смородовым — конструкции дракона и др. Интересны техногенные фантазии, изображающие стилизованные технические объекты и даже подвижные композиции на основе трансформирующихся геометрических фигур. Развитие этого направления позволило наметить некоторые пути дальнейшего развития подобной идеи с перспективами технической реализации.

В статье рассматриваются змеевидные или змееподобные демонстрационные роботы, роботы-змеи изменяемой геометрии, для которых характерно наличие длинного основного изгибающегося туловища. Голова может иметь самостоятельные степени свободы, но может представлять собой последнее звено туловища; у китайских драконов имеются также лапы. Известно, что змееподобный дракон — неперенный участник празднеств в ряде стран юго-восточной Азии. Была высказана заинтересованность в создании управляемого (на тросах) летающего дракона для Вьетнама длиной порядка 100—200 метров. Нет сомнения в том, что движущиеся змеи и драконы меньших, но достаточно больших размеров найдут место в постановках (в первую очередь со сказочными сюжетами) многих больших театров всего мира.

Рассмотрим сначала общую проблематику создания механической системы туловища, учитывая большие размеры. Предлагаемая авторами классификация по нескольким признакам вариантов конструкций подобных демонстрационных роботов с изменяемой геометрией, а также их составных частей представлена на рис. 1.

Конструкции демонстрационных роботов изменяемой геометрии и их составных частей



Рис. 1. Классификация конструкций демонстрационных роботов с изменяемой геометрией

могут строиться как многозвенные механизмы последовательной структуры с жесткими звеньями или как деформируемые по всей длине протяженные упругие несущие элементы. Возможно также комбинирование обоих принципов.

В подавляющем большинстве случаев большие демонстрационные роботы строятся на несущих конструкциях, как на внутренних каркасах-скелетах, с легкой декоративной наружной оболочкой, обшивкой. Если оболочка, которая формирует внешний облик, — жесткая, то ее крепление к стержневому или ферменному каркасу обычно осуществляется во многих точках; при изгибах необходимо обеспечивать подвижность, отсутствие касания смежных фрагментов или проскальзывание без заклинивания. Но не исключено, что гибкая (в частности, гофрированная) обшивка может быть использована не

только как формирующая внешний облик, но и как несущая. Пока несущие пластиковые обшивки бескаркасных конструкций используются исключительно в малых по размерам роботах.

Объяснению и расшифровке механизмов движения змей, разработке их математических моделей и созданию подвижных макетов, в которых копируются именно принципы, заложенные живой природой, посвящено большое число публикаций (например, [4, 5]). Признано, что сам принцип движения только за счет изгибания туловища без конечностей основан на использовании различий между коэффициентами трения в продольном и поперечном движениях.

В соответствии с общей идеологией демонстрационной робототехники в данной статье речь идет о разных, возможно, совершенно иных, но приспособленных для технической ре-

ализации способа построения механизмов и воспроизведения типичных для змей геометрических форм в движении. Имеется в виду разделение задач движения на следование определенной траектории и на задание самого движения. Предполагается, что движение может задаваться колесами с приводами, которые могут быть неуправляемыми ни по скорости, ни по углам поворота.

Желаемые законы переменной геометрии и кинематики змееподобных роботов независимо от конструкций определяются следующими основными требованиями:

точки средней линии сечений при извивании должны перемещаться по одной и той же неподвижной волнообразной траектории;

движение в движущейся вместе со змеей системе координат представляется волной, бегущей от головы к хвосту;

должны быть предусмотрены возможности изменения боковых отклонений от прямой линии в широких пределах;

налагаются ограничения сверху на кривизну средней линии сечений, которые вытекают из конструктивных ограничений; при этом непрерывность кривизны не требуется;

должна обеспечиваться приспособленность для программирования и воспроизведения с помощью системы приводов.

Для начала не будем учитывать естественную конструктивную дискретизацию тела змеи по длине. Важнейший исходный момент — выбор формы волнообразной траектории движения; бегущая волна в движущейся системе координат по этой форме должна быть использована как программа управления автоматической системой приводов. Задание формы в виде синусоиды применительно к данной задаче представляется непригодным, так как явный недостаток синусоиды — непрерывное изменение кривизны и большая кривизна в вершинах при больших амплитудах.

При перечисленных требованиях может быть использована только параметрическая форма задания траектории в виде  $x(s)$  и  $y(s)$ . В качестве аргумента  $s$  целесообразно принять длину дуги  $s$  участка траектории от выбранной начальной точки. Тогда для движения змеи со скоростью  $V$  определение координат точек его средней линии сечений по длине осуществляется непосредственно заменой аргумента  $s$  на  $(l + Vt - l_0)$ .

Важно, что в программном движении вектор скорости каждой точки змеи по длине направлен по касательной к траектории. Это значительно облегчает возможности разнообразных принципиальных, схемных и конструктивных решений, а также реализации подобных движений на управляемых приводах. Например, вдоль по длине тела можно расположить опоры качения с осями, перпендикулярными средней линии сечений. Для сценического демонстрационного робота не исключена прокладка по всей длине рельсового пути, и тогда движение по нему будет происходить без проскальзывания.

Авторы предлагают образовывать форму траектории в неподвижной системе координат (или бегущей волны в движущейся системе координат) сопряжением дуг окружностей радиуса  $R$  со смещенными центрами. На рис. 2 изображен только один период такой волны —  $i$ -й участок длиной  $\Delta l$ , начинающийся от средней линии.

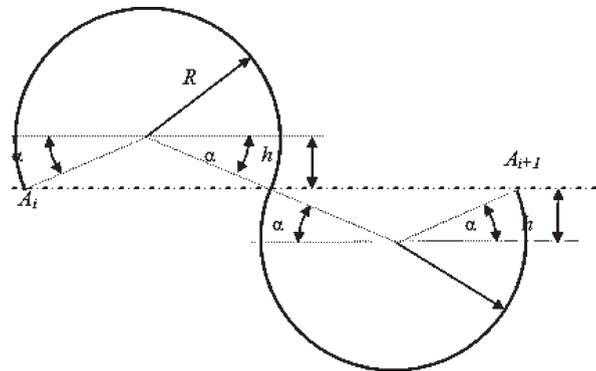


Рис. 2. Формирование траектории сопряжением окружности

Как форма, так и длина дуги на периоде определяются двумя параметрами: радиусом  $R$  и углом  $\alpha$ . Аналитическое представление такой формы по половинам периода: при  $0 < s < R(\pi + 2\alpha)$ , т. е. для первой половины периода,

$$\begin{aligned} x(\Delta s_1) &= R[\cos\alpha - \cos(\Delta s_1/R - \alpha)]; \\ y(\Delta s_1) &= R[\sin\alpha + \sin(\Delta s_1/R - \alpha)]; \end{aligned} \quad (1)$$

при  $R(\pi + 2\alpha) < s < 2R(\pi + 2\alpha)$ , т. е. для второй половины периода,

$$\begin{aligned} x(\Delta s_2) &= R[\cos\alpha - \cos(\Delta s_2/R - \alpha)]; \\ y(\Delta s_2) &= -R[\sin\alpha + \sin(\Delta s_2/R - \alpha)]. \end{aligned} \quad (2)$$



В этих выражениях приращение длины дуги  $\Delta s_1$  отсчитывается от начала периода (от точки  $A_i$ ), а приращение длины дуги  $\Delta s_2$  — от середины периода (от точки  $B_i$ ).

При этом получаются следующие соотношения связи между длиной  $S_0$  дуги на периоде, радиусом  $R$ , углом  $\alpha$ , длиной дуги  $L$  по средней линии сечений, поперечным размахом  $B$  (т. е. габаритным размером) и смещением  $h$  центров круговых участков:

$$S_0 = 2R(\pi + 2\alpha); \quad L = 4R \cos\alpha;$$

$$h = R \sin\alpha; \quad B = 2R(1 + \sin\alpha). \quad (3)$$

Простота этих соотношений определяет хорошую приспособленность предлагаемой формы для программирования движений. Характерные формы трех вариантов кривых при принятом аналитическом способе представления для одного и того же значения радиуса  $R$  представлена на рис. 3, *a*, *б*, *в*. Здесь значения параметра  $\alpha$  соответственно имеют значения  $\alpha = 0$ ,  $\alpha = -30^\circ$ ,  $\alpha = +30^\circ$ . Отрицательным значениям угла  $\alpha$  соответствует более плавная и при том же значении радиуса  $R$  более короткая волна, при этом форма напоминает синусоиду.

Три последовательные фазы такого движения, при котором все точки змеи перемещаются по одной и той же периодической траектории (пунктир), изображены на рис. 4.

Применительно к задачам управления формой важно, что при данном представлении кривизна и радиус кривизны кусочно-постоянны и изменяют знак два раза на периоде волны. Как будет показано далее, это позволяет создавать бегущую волну релейным управлением приводами по участкам.

Рассмотрим сначала способ построения конструкций змееподобных роботов на цепных механизмах, жесткие звенья (модули) которых, представляющие собой тележки на колесных шасси, соединены шарнирно последовательно. Не обсуждая вопросы исключения опрокидывания, примем, что модули одноколесные. Корпус модуля представляет собой жесткий барабан. Шарниры с вертикальными осями, в которых последовательные модули соединяются друг с другом, выносятся на одинаковые расстояния вперед и назад по продольной оси. На рис. 5 изображен такой одноколесный модуль.

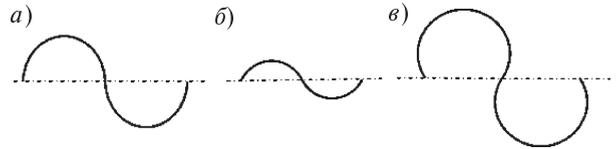


Рис. 3. Варианты траекторий движения на основе сопряжения дуг окружностей одного радиуса

Предполагается, что цепочка таких барабанов имеет единую гибкую (например, гофрированную) обшивку (тканевую или пластиковую). Эта обшивка, которая должна иметь подходящую фактуру, формирует общий облик туловища змеи. Естественно, самостоятельный одноколесный или двухколесный модуль не способен удерживать вертикальное положение, только соединение модулей одноподвижными шарнирами может дать устойчивую конфигурацию змеи в целом при достаточной жесткости шарнирных соединений. Двухколесный модуль при достаточном разнесении колес по бокам не позволит лишь опрокидываться на бок. Конструкция модуля с тремя независимо вращающимися колесами, образующими опорный треугольник платформы, вообще придает устойчивость на горизонтальной плоскости. Однако для трехколесного шасси возможности перемещения с качением колес без бокового проскальзывания зависят от подвижности осей колес относительно платформы. Предположим сначала, что треугольная платформа жестко соединена с барабаном модуля. Тогда, если два колеса свободно вращаются вокруг одной и той же оси, а третье колесо — самоустанавливающееся, имеющее самостоятельную вертикальную ось, свойства по отно-

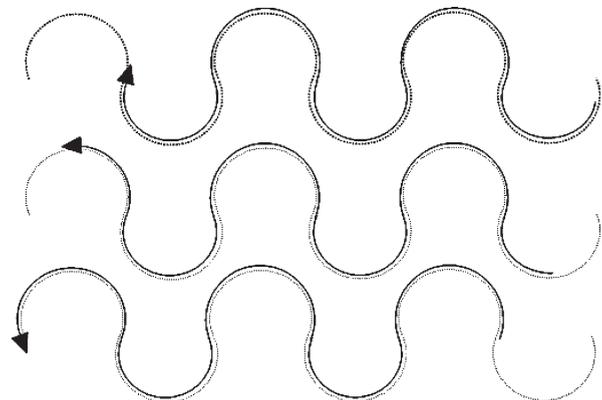


Рис. 4. Фазы движения по периодической траектории

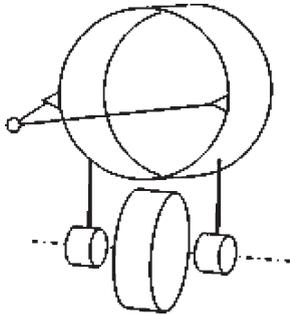


Рис. 5. Одноколесный модуль змееподобного робота при шарнирном соединении с вертикальными осями

шению к движению по траектории такие же, как у одноколесного и двухколесного.

Если же все три колеса являются самоустанавливающимися, то свойства совсем иные: возможно перемещение качения в любом направлении без бокового проскальзывания колес. Модули с различным числом колес (приводных и неприводных, управляемых по углам разворота или неуправляемых) имеют право на существование и практическое использование. В частности, приводы колес могут быть на всех или только на некоторых модулях.

В дальнейшем при рассмотрении задач движения по заданной траектории модули изображаются одноколесными, но выводы справедливы и для других, более сложных вариантов. Голономные (геометрические) связи отображают постоянство расстояний между шарнирами каждого из модулей, а неголономные — отсутствие бокового проскальзывания в каждом из одноколесных модулей. В невозмущенном движении цепочка модулей воспроизводит бегущую волну. Плоскости колес почти везде близки к касательным к программной волнообразной

траектории, что означает возможность вращения колес почти без бокового проскальзывания. При этом центры шарниров значительно смещены от указанной траектории в сторону, противоположную центру кривизны. Цепочка шарнирно соединенных модулей, следующих по волнообразной траектории, изображена на рис. 6. Предполагается, что центры пятен контакта колес с опорной плоскостью находятся на программной кривой.

Оказывается, очень важен выбор безразмерного параметра — отношения  $\eta = l_2 / l_1$  расстояний  $l_1$  и  $l_2$  от шарниров (считая от головы) до и после точки касания колеса с плоскостью. Представляется естественным, что расстояния обоих шарниров от вертикальной оси колеса одинаковы, т. е.  $\eta = 1$ . На рис. 7, а показано, что в этом случае при точно заданном угловом положении пара смежных или любое число последовательно шарнирно соединенных модулей могут перемещаться по круговой траектории любого радиуса без проскальзывания, поскольку плоскости колес будут касательными к одной и той же круговой траектории. Получается, что при движении достаточно задать правильное начальное положение всех модулей по круговой траектории заданного (любого) радиуса, использовать любой модуль как ведущий и нет необходимости в управлении поворотами колес модулей; движение будет по кругу без всяких направляющих.

Из этого, как будто, следует, что если программные траектории формировать из участков окружностей, как на рис. 2, то на большей части каждого из этих участков постоянство кривизны будет полностью соответствовать кинематике соединения модулей.

Однако нужно иметь в виду, что при  $\eta = 1$  угловое отклонение одного модуля (его можно считать ведущим) приводит к незатухающей волне

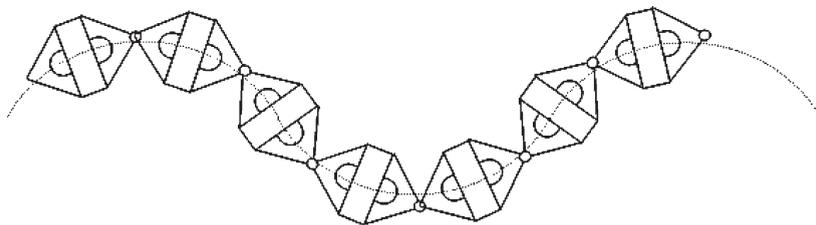


Рис. 6. Движение шарнирно соединенных модулей по волнообразной траектории

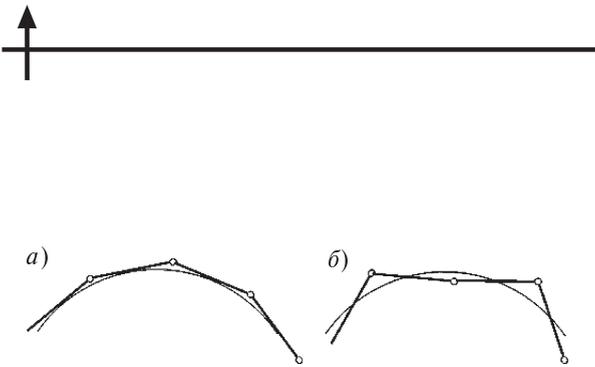


Рис. 7. Влияние задания углового положения пары смежных шарнирно соединенных модулей на перемещение по круговой траектории

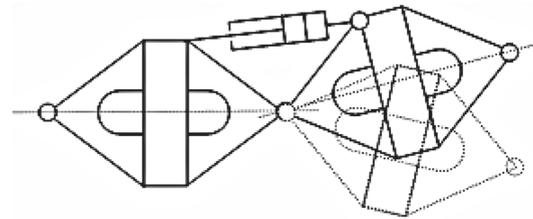


Рис. 8. Задание углового положения смежных модулей с помощью линейного двигателя

(рис. 7, б) и к последующему искажению формы траектории. Можно показать: при  $\eta < 1$  отклонения по цепочке модулей будут уменьшаться (что может быть квалифицировано как кинематическая устойчивость), а при  $\eta > 1$  будут возрастать. Поэтому рассмотренный ранее случай  $\eta = 1$  можно рассматривать как соответствующий границе кинематической устойчивости.

При движении по кусочно-круговой траектории нужно учитывать, что имеют место локальные изменения геометрии в зонах, близких к прямолинейной осевой линии, где кривизна должна изменять знак, и этот эффект с учетом бокового проскальзывания подлежит отдельному исследованию математическим моделированием.

Рассмотрим способ задания относительного углового положения двух смежных модулей с помощью линейного двигателя (рис. 8).

Если в предлагаемом программном движении кривизна участков принимает только одно из двух значений (положительное и отрицательное), то каждый линейный привод может быть двухпозиционным и работать от упора до упора, что упрощает реализацию. В частности, если привод пневматический, то двигатели

могут представлять собой пневмомускулы, если привод электромеханический, то двигатели могут быть соленоидального типа. При движении система управления должна осуществлять переключение на противоположное положение, когда пара модулей проходит осевую линию. Таким образом, при движении змеи по траектории команды переключения приводов будут следовать параллельно по нескольким цепочкам.

При использовании релейного закона управления кривизной именно для этих зон нужно проводить исследование отклонений от программных законов, оценивать силы сопротивления и пр.

Модули не обязательно имеют одинаковые размеры, например: на хвосте они могут иметь меньшие поперечные сечения и иные расстояния между соединительными шарнирами. Для такой цепочки реализуемо такое движение, при котором касательные к траектории лежат в плоскостях колес или достаточно близки к ним.

В этих случаях необходимо отдельно рассматривать вопросы выбора программных траекторий.

Поступила в редакцию 28.04.2010

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Челпанов, И.Б.** Устройство промышленных роботов [Текст] / И.Б. Челпанов. — 2-е изд. — СПб.: Политехника, 2001.
2. **Волков, А.Н.** Демонстрационная робототехника театральной сцены [Текст]: дисс. ... докт. техн. наук. — СПбГПУ. — СПб., 2007.
3. **Волков, А.Н.** Демонстрационные роботы на сцене театра: фигуры великанов в тетралогии Вагнера «Кольцо Нибелунга» [Текст] / А.Н. Волков, П.В. Смородов, И.Б. Челпанов // Теория механизмов и машин. — 2005. Том 3, № 1. — С. 70–76.
4. **Черноусько, Ф.Л.** Динамика змееподобных роботов [Текст] / Ф.Л. Черноусько // Матер. Всерос. научно-техн. фестиваля. — М., 2005.
5. **Черноусько Ф.Л.** Управление движением многозвенников на шероховатой плоскости. Труды ИММ УрО РАН [Текст] / Ф.Л. Черноусько // 2000. Т. 6, № 1.

## **К ВОПРОСУ ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ ОЦЕНКИ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ШАССИ ТРАНСПОРТНЫХ ГУСЕНИЧНЫХ МАШИН**

Эксплуатационными свойствами транспортной машины в общем случае называют свойства, характеризующие выполнение ею работ, для которых она предназначена (перевозка груза и пассажиров, обеспечение условий для работы установленного на шасси оборудования и др.). Эти свойства определяют приспособленность машины к условиям эксплуатации и эффективность ее использования. В первую очередь эффективность применения ТГМ оценивалась по параметру подвижности (например, по скорости, с которой ТГМ перемещается между двумя заданными точками на местности). В современных условиях, когда увеличивается перечень выпускаемых типов ТГМ народно-хозяйственного назначения, становится необходимым оценивать также экономичность, экологичность, управляемость, маневренность и другие эксплуатационные свойства.

Целесообразно использовать методику, позволяющую произвести сравнительную количественную оценку образцов или проектов шасси ТГМ. Это даст возможность упростить и обосновать принятие решений по конструкции узлов и агрегатов в составе шасси, уменьшить затраты на изготовление макетных образцов и испытания. Кроме того, сравнительная оценка вариантов конструкции позволит решить, насколько значимы предлагаемые изменения узлов и агрегатов с точки зрения эффективности работы шасси в целом.

Шасси ТГМ включает в себя силовую установку, трансмиссию и ходовую часть. Очевидно, что отдельные системы, составляющие шасси, могут работать в различных режимах. Для некоторых режимов можно выделить процессы, определяющие в данных конкретных условиях эффективность работы агрегатов и систем. При изменении условий движения машины выделенный процесс перестает быть определяющим, сопровождающие его эффекты «теряются» на фоне текущего энергетического баланса системы.

Например, качение шасси при действии малых удельных сил тяги ( $f_d < 0,12$ ) сопровождается интенсивными колебаниями траков под опорным катком, что связано со значительными потерями энергии и другими негативными последствиями. Такой режим движения достаточно типичен для быстроходной ТГМ, что не позволяет пренебречь им. Однако при буксовании движителя эффект неустойчивости траков перестает быть значимым. В пределе наступает потеря подвижности машины, и можно говорить о том, что КПД шасси стремится к нулю.

Из этого следует, что для сравнительной оценки энергозатрат в шасси различных машин недостаточно сложить относительные потери мощности (или перемножить значения КПД) агрегатов, выбрав некоторые «среднестатистические» условия движения ТГМ. Следует учесть специфику работы узлов, агрегатов и систем на различных режимах и выбрать методику, позволяющую получить количественную и объективную оценку энергозатрат в шасси. Такая методика, которая должна опираться на систему показателей эффективности подсистем, позволяющую в комплексе оценить уровень потерь мощности в шасси и (в частности) рациональность конструкции ходовой системы с точки зрения условий формирования тягового усилия и уровня воздействия на опорное основание, не предложена.

Сейчас возможности по форсированию силовой установки практически исчерпаны, а серийное производство новых, более мощных двигателей для военно-транспортных машин не начато. Поэтому обостряется проблема минимизации потерь мощности в узлах шасси ТГМ и выявления наиболее рациональных путей реализации тягового усилия. Кроме того, все более существенную роль начинают играть легкие быстроходные ТГМ гражданского назначения, для которых вопросы экономичности и экологичности принципиально важны.

Таким образом, исследования, связанные с разработкой системы объективной количественной комплексной оценки эксплуатационных свойств ТГМ, — актуальны в теоретическом и практическом плане.

Разработанная методика оценки эксплуатационных и технических характеристик шасси ТГМ комплексно учитывает количественные технические (конструктивные) параметры шасси, определяющие потери мощности, эффективность формирования тяговых сил на опорной поверхности машины, экологические показатели и т. д. С помощью предлагаемой методики проводился анализ типичных конструкций базовых шасси современных ТГМ и выявлялись перспективные пути комплексной модернизации конкретных образцов шасси с целью снижения потерь мощности и улучшения других технических и эксплуатационных характеристик.

Применительно к транспортным машинам в настоящее время предложены три основных подхода к построению обобщенного показателя, характеризующего уровень эксплуатационных свойств.

Традиционно для транспортной техники эффективность работы и уровень эксплуатационных свойств определяется спецификой маршрутов и расчетными объемами перевозок [1] или величиной удельной условной грузоподъемности [2].

Постановка и решение прямой задачи оптимизации [3, 4] не представляются неразрешимыми, но сопряжены с преодолением весьма сложных проблем. Главная из них — предложить целевую функцию (или функционал). Кроме того, потребуется: доказать, что минимума (максимума) целевой функции можно достигнуть, оставаясь в реальных пределах изменения эксплуатационных и технических параметров; преодолеть проблему взаимозависимости отдельных параметров; учесть дискретность изменения параметров; выбрать метод решения задачи. Решение задачи оптимизации требует рассмотрения изменений состояния изучаемого объекта при варьировании значений параметров. В идеале для проверки принятых решений требуется провести серии дорогостоящих экспериментов. Остается проблематичным распространение результатов решения задачи на другие образцы шасси. В связи с перечисленными трудностями практического распространения такой подход не получил.

Более распространены методы экспертных оценок (МЭО) [5, 6]. Методы этой группы не свободны от субъективности, так как вклад каждого частного параметра в значение общего показателя существенно зависит от величины весового коэффициента. Кроме того, метод требует привлечения большого количества независимых друг от друга высококвалифицированных специалистов, на что трудно рассчитывать при проектировании и эксплуатации шасси ТГМ. Предлагаемый в работе [7] метод получения интегрального показателя подвижности транспортной машины, в сущности, является разновидностью МЭО. В этом случае итоговый показатель формируется как интегральное среднее частных показателей.

Математическую основу разработанного метода оценки составляет аппарат использования обобщенной функции желательности [5, 8]. Режимы работы сравниваемых шасси выбраны на основании статистики ОАО «ВНИИ транспортного машиностроения»: прямолинейное движение в транспортном режиме (коэффициент сопротивления качению  $f = 0,08$ , скорость движения  $V = 6,5$  м/с); поворот (коэффициент сопротивления повороту  $\mu_{\max} = 0,7$ , относительный радиус поворота  $\rho = 10$ , скорость  $V = 7$  м/с); тест на положительное смещение траков проводится на бетонной плите.

Введена система частных показателей (рис. 1) узлов и агрегатов шасси.

*Комплексный показатель подвижности* шасси определяет эффективность работы агрегатов на различных нагрузочных режимах (введен А.П. Софьяном, А.И. Мазуром). Показатель подвижности представляет собой соотношение скоростей движения ТГМ на грунте (в рассматриваемых условиях) и на бетонной трассе. Таким образом, его значение позволяет расчетным путем оценить возможную в заданных условиях скорость движения ТГМ. Показатель подвижности разбивается [9] на более простые безразмерные компоненты:  $P_V = P_\eta P_N P_\psi$ . Здесь  $P_\eta$  — показатель потерь мощности в узлах шасси;  $P_N$  — показатель полноты использования мощностного диапазона двигателя;  $P_\psi$  — показатель уровня сопротивления прямолинейному движению.

*Показатель потерь мощности в узлах шасси* представляет собой отношение КПД шасси при качении по грунту и по бетону:  $P_N = \eta_{гр} / \eta_0$ .



*Показатель интенсивности колееобразования.* За показатель интенсивности колееобразования предлагается принять отношение  $\Pi_H = q_{cp} / [q]$ , где  $q_{cp} = G_T / (2L_{оп} b_T)$  — удельное давление под траками, Па ( $G_T$  — вес машины, Н;  $b_T$  — ширина гусеницы, м),  $[q]$  — величина допускаемого нормального давления). Допускаемое удельное давление можно выбрать исходя из характерных для шасси данной категории по массе или из специальных требований. Если военно-транспортные машины целесообразно сравнивать, используя «коридоры» допускаемых удельных давлений, определенные практикой для различных по назначению машин, то для гражданских транспортеров-болотоходов предлагается выбрать значение  $[q] = 0,005$  МПа, поскольку при этом удельном давлении не происходит разрушения поверхностного слоя слабых грунтов тундры и лесотундры.

*Показатель интенсивности воздействия на деформируемое основание.* Эффект юза траков сильно выражен на сыпучих грунтах, снеге, недеформируемом основании. Величина юза определяется не только геометрическими, кинематическими и силовыми особенностями движителя, но и характеристиками грунта. Поскольку затруднительно оценить потери энергии (и, соответственно, наносимый основанию ущерб [11]), связанные с юзом траков в различных условиях, за безразмерный показатель целесообразно принять отношение положительного смещения трака  $\Delta L$  к длине опорной поверхности  $L_{оп}$  при движении шасси по недеформируемому основанию:  $\Pi_L = \Delta L / L_{оп}$ .

*Показатель интенсивности воздействия на твердое основание* определяется отношением пиковых нагрузок  $q_{max}$  под траками машины к среднему удельному давлению и может быть определен, как  $\Pi_q = q_{max}^* / q_{cp}^* = P_i(\varphi_{i max}) / G_T$ , где  $q_{cp}^* = G_T / 2b_T$  и  $q_{max}^* = P_i(\varphi_i^{max}) / 2b_T$ , Н/м — удельная нагрузка по ширине гусеницы ( $P_i(\varphi_{i max})$  — нормальная нагрузка на трак при наибольшем угле его поворота).

*Показатель эффективности работы системы подпрессоривания* представляет собой отношение средней скорости движения на местности к мак-

симальной скорости движения по асфальтобетонному покрытию:  $\Pi_{эсп} = \bar{V}_{местн} / V_{ш}$ . Значения скоростей для различных трасс могут быть определены как расчетным путем, так и по результатам испытаний. Для первичной оценки достаточно принять данные, приведенные в перечне технических характеристик рассматриваемых ТГМ.

*Эффективность работы трансмиссии в режиме поворота* [12] в первую очередь характеризуется двумя безразмерными показателями. Относительное увеличение потребной мощности двигателя при повороте —  $\Pi_{\mu} = N_{\mu} / N_{\mu пр}$ . Относительная мощность, рассеиваемая при буксовании элемента управления —  $\Pi_{\varepsilon} = N_{\varepsilon} / N_{\mu}$ . Использовать для сравнительной оценки число расчетных (фиксированных) радиусов поворота  $n_p$  в составе модели комплексной оценки энергозатрат в агрегатах шасси ТГМ в принципе возможно, но не рационально. Например, в случае применения многопоточного МП с гидрообъемной передачей можно считать, что  $n_p \rightarrow \infty$ . Поэтому предлагается использовать безразмерный показатель, учитывающий число фиксированных радиусов поворота:  $\Pi_p = 1 - 1/n_p$ .

Проведена расчетная оценка эффективности работы шасси серийных машин (рис. 2) и рассмотрено применение метода комплексной оценки для случая модификации гусеничной цепи ходового макета (рис. 3). Проект модернизации основан на предложении заменить штатные траки машины на более легкие сборные траки с неметаллическими вставками (выигрыш по массе 8–10 %), связанные шарниром параллельного типа [13]. За счет разнесения грунтозацепов траки обладают повышенной устойчивостью против колебаний и положительного смещения при качении опорного катка по беговой дорожке гусеницы.

Меньшие значения показателя  $D$  для шасси ТГМ №2 (см. рис. 2) объясняется несовершенством конструкции узлов шасси данного образца. Гусеничный движитель дает большие потери мощности при работе машины при малых удельных силах тяги, а также под нагрузкой. Относительно велики потери мощности в вальной трансмиссии. Силовая установка развивает достаточно малую мощность.

Наилучшим оказалось сочетание характеристик шасси ТГМ6, несмотря на малую по со-

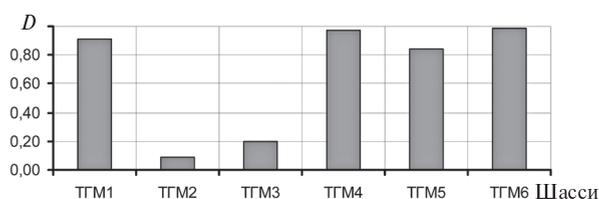


Рис. 2. Расчетные значения комплексного показателя  $D$  для серийных шасси (ТГМ Т-72, МТ-ЛБ, БМП-1, Т-80, Т-90, Т-64Б)

временным меркам удельную мощность двигателя. Результат объясняется рациональным сочетанием конструкторских решений, не устаревших и на сегодняшний момент. В принципе шасси № 6 является прототипом для шасси № 1, 4, 5. Предпринятые конструкторами изменения не позволили достигнуть уровня прототипа, хотя шасси ТГМ4 весьма близко к нему по уровню показателя комплексной оценки. Однако это в значительной степени обусловлено установкой мощного, дорогого в эксплуатации и производстве газотурбинного двигателя.

Шасси №5 в рассмотренном («базовом») варианте уступает по уровню потерь мощности шасси №6. Уменьшить потери мощности можно, в частности, установкой на машину движителя с резинометаллическим шарниром (РМШ) параллельного типа. В настоящее время такая гусеница разработана для опытного шасси БМПТ.

Расчеты, проведенные для учебно-ходового макета при серийном исполнении ходовой системы, дают значение комплексного показателя эффективности шасси  $D = 0,097$ . Это ставит машину в один ряд, например, с шасси тягача МТ-ЛБ ( $D = 0,086$ ). Учитывая, что для некоторых серийно выпускаемых шасси  $D > 0,95$ , можно говорить о весьма высоком уровне энергозатрат при движении макета. Такая оценка не является

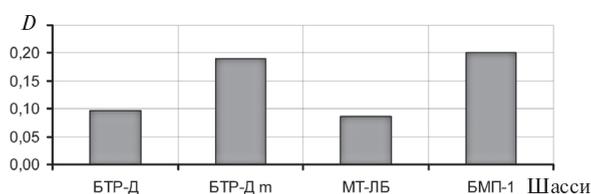


Рис. 3. Значения показателя эффективности для сравниваемых шасси: БТР-Д m — шасси с модернизированной гусеницей

случайной — шасси создавалось максимально облегченным (машина предназначена для авиадесантирования), срок эксплуатации может ограничиваться одной боевой высадкой.

Предлагаемая модернизация траков повысила значение показателя комплексной оценки энергозатрат в шасси макета до  $D = 0,190$ , что приближается к результатам оценки для серийной машины БМП-1 ( $D = 0,200$ ). Таким образом, методика оценки оказывается весьма чувствительной к изменению параметров работы ходовой системы, а влияние предлагаемой модернизации на снижение энергозатрат шасси следует признать значительным.

### Выводы

1. На различных нагрузочных режимах работы гусеничного движителя определяющими являются затраты мощности, вызванные протеканием различных процессов. При движении шасси в области малых удельных сил тяги ( $f_d < 0,12-0,15$ ) важную роль играют затраты, связанные с наличием специфического режима работы движителя — «юза», составляющего до 50 % времени движения транспортной гусеничной машины. В работе предложена методика оценки уровня энергозатрат в шасси, позволяющая дать обобщенную оценку эффективности работы шасси на основе объединения показателей эффективности работы составляющих его систем на различных характерных режимах.

2. Определение энергозатрат в движителе обычно требует сугубо стендовых испытаний, связанных с необходимостью вычленения движителя из систем шасси машины. Это затрудняет использование данных, полученных при полевых испытаниях. Предложенная методика оценки позволяет объединить результаты стендовых и натуральных испытаний.

3. На основе проведенного анализа методов комплексной оценки параметров работы шасси машин сформулирована система частных показателей, характеризующих энергозатраты при работе систем шасси. Система показателей лежит в основе разработанной методики оценки эксплуатационных показателей шасси.

4. Проведенные расчеты позволяют выявить шасси с наименьшим уровнем относительных потерь мощности (среди образцов серийных машин — шасси № 6, соответствующее машине



Т-64Б), что дает основание рассматривать отрабатанные при ее создании базовые решения как весьма перспективные.

5. Расчеты показывают, что шасси современного танка Т-90 (№5) может быть значительно усовершенствовано за счет применения новой гусеницы с РМШ параллельного типа и разнесенными грунтозацепами.

6. Легкая машина БМП-1 (№3) по уровню относительных потерь мощности может рассматриваться как более перспективная по сравнению с базовым шасси Т-72.

7. Предлагаемая модернизация шасси БТР-Д позволит существенно повысить эффективность работы ходовой системы и улучшить «рейтинг» машины с точки зрения оценки энергозатрат в агрегатах шасси.

8. Перспективным путем снижения воздействия гусеничного движителя на почву без уширения гусеницы является увеличение протяженности «активных» участков опорной поверхности (в частности, за счет предложенных в работе мер по стабилизации траков при прохождении опорного катка, использования пневматических гусениц и др.).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Платонов, В.Ф.** Гусеничные и колесные транспортно-тяговые машины [Текст] / В.Ф. Платонов, Г.Р. Леиашвили. — М.: Машиностроение, 1986. — 296 с.

2. **Фаробин, Я.Е.** Оценка эксплуатационных свойств автопоездов для международных перевозок [Текст] / Я.Е. Фаробин, В.С. Щупляков. — М.: Транспорт, 1983. — 200 с.

3. **Носов, С.В.** Мобильные энергетические средства: выбор параметров и режимов работы через реологические свойства опорного основания [Текст]: монография / С.В. Носов — Липецк: ЛГТУ, 2006. — 228 с.

4. **Яскевич, Л.Ф.** Расчет полужесткой подвески с наилучшей плавностью хода [Текст] / Л.Ф. Яскевич // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Сер.: Наука и образование. — 2009. № 4. Том. 2. — С. 81–85.

5. **Орлов, А.И.** Теория принятия решений [Текст]: учебное пособие / А.И. Орлов. — М.: Изд-во «Март», 2004. — 656 с.

6. **Куляшов, А.П.** Экологичность движителей транспортно-технологических машин [Текст] / А.П. Куляшов, В.Е. Колотилин. — М.: Машиностроение, 1993. — 288 с.

7. **Котляренко, В.И.** Основные направления повышения проходимости колесных машин [Текст] / В.И. Котляренко. — М.: Изд-во МГИУ, 2008. — 285 с.

8. **Адлер, Ю.П.** Планирование эксперимента при

поиске оптимальных условий [Текст] / Ю.П. Адлер, Е.В. Маркова, Ю.В. Грановский. — М.: Наука, 1976.

9. **Добрецов, Р.Ю.** Комплексная оценка потерь мощности в шасси гусеничной машины на этапе проектирования [Текст] / Р.Ю. Добрецов // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Сер.: Наука и образование. — 2009. № 3. — С. 163–168.

10. **Добрецов, Р.Ю.** Особенности работы гусеничного движителя в области малых удельных сил тяги [Текст] / Р.Ю. Добрецов // Тракторы и сельскохозяйственные машины — 2009. № 6. — С. 25–31.

11. **Добрецов, Р.Ю.** Пути снижения ущерба, наносимого опорному основанию движителями с металлической гусеницей [Текст] / Р.Ю. Добрецов // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Серия «Наука и образование». — 2009. № 2(78). — С. 192–199.

12. **Добрецов, Р.Ю.** Учет энергетических параметров механизмов поворота при комплексной оценке потерь мощности в шасси транспортных гусеничных машин [Текст] / Р.Ю. Добрецов // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Серия «Наука и образование». — 2011. № 1. — С. 122–128.

13. **Патент 2385815 РФ.** МПК В62D 55/20. Гусеничная цепь ходовой части транспортного средства / Добрецов Р.Ю., Семенов А.Г. — №2009109923/11 (013428); заявл. 18.03.2009; опублик. 10.04.2010. — Бюл. №10.

УДК 629.1.032.001

*Е.В. Авотин, Р.Ю. Добрецов*

## МЕТОДИКА РАСЧЕТА НОРМАЛЬНЫХ ДАВЛЕНИЙ НА ОПОРНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ГУСЕНИЦЫ ТРАНСПОРТНОЙ МАШИНЫ

В теории движения транспортных гусеничных машин обычно принимается, что нормальные реакции на опорной поверхности гусеницы распределены по какому-либо упрощенному за-

кону. Чаще других встречаются варианты эпюры нормальных давлений в виде прямоугольника, треугольника, трапеции. Вместе с тем известно, что форма эпюры радикально отличается от

принятых типовых вариантов [1, 2]. На распределение нормальных нагрузок основное влияние оказывают развесовка машины, силы натяжения, действующие в гусеничном обводе и характеристики грунта и другие факторы. На недеформируемом основании (бетон, асфальт) имеют место локальные максимумы нормального давления в области опорных катков. Пролеты между опорными катками практически не участвуют в передаче вертикальной нагрузки (рис. 1, а). При заглублении движителя в грунт картина меняется. Однако и в этом случае локальные максимумы под катками имеют заметно выраженный характер (рис. 1, б) [1, 3].

Несмотря на то, что вопрос о моделировании распределения нормальных реакций на опорной поверхности гусеничной машины рассматривался многими учеными (известны работы В.П. Аврамова, А.П. Софияна, М.Г. Беккера и др.), проблема остается неразрешенной и «традиционной» методики построения эпюры нормальных давлений применительно к транспортной машине не существует. Между тем оценка распределения нормальных давлений на опорной поверхности машины весьма важна при исследовании вопросов подвижности машин. К некоторым из них могут быть отнесены, например, определение затрат мощности при качении движителя или расчет сил и моментов, действующих на шасси при повороте. В результате вопрос о распределении нормальных реакций по длине опор-

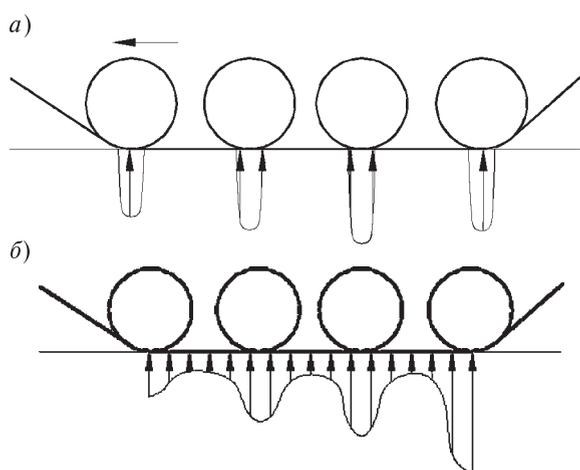


Рис. 1. Вид эпюры нормальных реакций под опорной ветвью гусеницы при качении (стрелкой указано направление движения машины):  
 а — по твердому основанию;  
 б — по деформируемому грунту

ной поверхности машины решается, но в основном экспериментально.

При разработке методики расчета нормальных давлений приняты следующие допущения:

1. Несущая способность грунта  $q_S$  достаточна, чтобы избежать посадки машины на днище, то есть  $q_S \geq Z/S$ , где  $Z$  — нормальная реакция под гусеницами,  $S$  — площадь опорной поверхности машины.

2. Используются эмпирические зависимости между нагрузкой и осадкой грунтов, применяемые в теории движения гусеничных машин.

3. Не учитывается влияние на характеристики грунта эффекта повторных нагружений.

Основой при создании методики расчетов нормальных давлений послужили модели деформации пролета опорной ветви движителя, опубликованные Н.А. Забавниковым [1] и М.Г. Беккером [3]. Определение нормальных давлений под гусеницей предлагается производить в первом приближении в следующей последовательности:

1. Определить с учетом условий движения машины, конструктивных особенностей движителя и режима его работы нагрузки на опорные катки.

2. Оценить, начиная с заднего опорного катка максимальное нормальное давление под катком и сравнить его с несущей способностью грунта  $q_S$ .

3. Если предел несущей способности грунта не превышен, аппроксимировать эпюру нормальных давлений под катком параболой (см. рис. 1, а).

4. Если предел несущей способности превышен, «избыточная» нагрузка передается на смежный с опорным катком пролет.

5. Оценить максимальное нормальное давление под пролетом ветви. Если оно превышает несущую способность грунта, «избыточная» нагрузка передается на смежный пролет.

6. Произвести расчет нормальных давлений для рассматриваемого пролета.

7. Повторить расчеты п.п. 2–6 для других катков.

Выполнение перечисленных операций позволит аналитическим образом построить эпюру нормальных давлений под опорной поверхностью гусеницы, схематически показанной на рис. 1, б.

При расчете максимальных нормальных давлений будем различать «активный» и «пас-

сивный», расположенные под опорной поверхностью гусеницы.

Под «активным» участком опорной поверхности будем понимать участок гусеницы, передающий на грунт вертикальную нагрузку от опорного катка. Под «пассивным» участком будем подразумевать тот участок опорной поверхности, который включается в работу по передаче нормальных нагрузок только при погружении машины в грунт.

Обозначим длину «активного» участка опорной поверхности гусеницы  $2\delta$ . В общем случае для гусеницы с шагом звена  $t_{зв}$  в процесс передачи вертикальных нагрузок от опорного катка вовлекается  $N$  траков. В рассматриваемом случае принято допущение, что передача основных вертикальных нагрузок осуществляется через пару смежных траков [5] и  $2\delta = 2Nt_{зв}$ . В некоторых источниках оговаривается, что длина «активного» участка достигает 3–4 звеньев.

Введем обозначения:

$i = \overline{1, n}$  — номер «пассивного» участка опорной поверхности гусеницы (пролет между катками);

$j = \overline{1, m}$  — номер опорного катка ( $m = n + 1$ );

$l_{1j}$  — расстояние от оси первого до оси  $j$ -го опорного катка;

$b_r$  — ширина гусеницы;

$f_{\max i}$  — максимальный прогиб пролета под воздействием нагрузки  $W_i$ ;

$W_i$  — эквивалентная сосредоточенная сила (нормальная реакция) на пролет;

$Z_j$  — вертикальная нагрузка на  $j$ -й опорный каток,

Отметим, что определение нормальных нагрузок на опорные катки  $Z_j$  может быть проведено по методике, опубликованной в работе [4].

Предполагая, что вся вертикальная нагрузка от опорного катка распределена по длине «активного» участка опорной поверхности гусеницы и вводя по аналогии с [5] параболический закон распределения нормальных давлений, имеем условие  $Z_j = 2b_r \int_0^\delta (ax^2 + bx + c) dx$ , которому

удовлетворяет функция  $q(x) = \frac{3Z_j}{4b_r \delta} (1 - [x/\delta]^2)$ .

Этот закон распределения нормальных давлений может быть реализован, если не превышена его

несущая способность, то есть  $q_S \geq q(x)$  (см. рис. 1, а).

В противном случае опорный каток и «активный» участок гусеницы начинает погружаться в грунт, а часть вертикальной нагрузки — восприниматься пролетами гусеницы.

В работе [3] предлагается расчетная схема (рис. 2) и зависимость, позволяющая оценить осадку грунта  $z(x)$  под гусеницей машины:

$$z(x) = \left[ \frac{W_{\Pi}}{2l(k_c + bk_\phi)} \right]^{1/n} - 0,41l\sqrt{l_0/l-1} + \frac{1,23x}{l}\sqrt{l_0/l-1}. \quad (1)$$

Вывод подобной зависимости приводится и в работе [1].

В этой зависимости сохранены обозначения, использованные в первоисточнике:  $W_{\Pi}$  — эквивалентная сосредоточенная вертикальная нагрузка на пролет;  $2l$  — расстояние между центрами опорных катков;  $2l_0$  — длина гусеницы в пролете между катками;  $k_c, k_\phi, n$  — эмпирические коэффициенты, характеризующие осадку грунта при приложении вертикальной нагрузки на штамп шириной  $b$ .

Данная зависимость предлагается для сравнительной оценки гусеничных шасси (в частности — систем поддрессоривания). Упоминается, что зависимость получена для случая малого диаметра опорных катков (и использовать ее в исходном виде для ходовой системы современной транспортной гусеничной машины невозможно). Поэтому в общем случае использование ее для оценки подвижности современных гусеничных машин может привести к недопустимым погрешностям. Кроме того, смоделированная по фор-

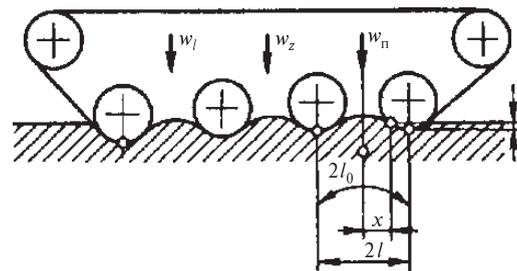


Рис. 2. Расчетная схема к определению реакций грунта на пролете между смежными катками

муле (1) кривая не повторит форму огибающей эпюры нормальных давлений.

Поскольку  $q(x) = (k_c + bk_\phi)[z(x)]^n$ , промежуточную проверку результатов расчетов можно провести по зависимости  $2b_\Gamma \int_0^l q(x) dx \approx W_\Pi$ .

Следует отметить, что точность расчета осадки по формуле (1) уменьшается с уменьшением нормальных реакций. Действительно, если первый член в выражении (1) близок к нулю, то при  $x \leq 0,577l$  осадка будет иметь отрицательные значения. Таким образом, выражение (1) целесообразно использовать только для оценки максимального прогиба пролета.

Нагрузку на пролет будем определять как сумму из двух составляющих, передаваемых от ограничивающих пролет опорных катков:

$$W_i = \alpha_i \Delta Z_i + \alpha_{i+1} \Delta Z_{i+1}, \quad i = \overline{1, n},$$

где  $\Delta Z_i$  — «избыток» нагрузки на опорный каток  $i$ , то есть та часть нормальной нагрузки, которая не может быть воспринята основанием в пределах упругой деформации.

Коэффициенты перераспределения нагрузки  $\alpha_i$  предлагается принять (при отсутствии экспериментальных данных) для крайних катков —  $\alpha_1 = \alpha_n = 1$ , для прочих катков —  $\alpha_j = 0,5, j = \overline{2, n}$ .

Максимальный прогиб пролета определяется с учетом характеристик грунта по формуле, предложенной в [3]:

$$f_{\max i} = \left[ \frac{W_i}{2l_i (k_c + b_\Gamma k_\phi)} \right]^{1/n} + l_i \left( 1,23 \sqrt{l_{0i}/l_i - 1} - 0,41 \sqrt{l_{0i}/l_i - 1} \right).$$

«Пассивный» участок опорной поверхности можно аппроксимировать параболой  $z(x) = ax^2 + c$ , проходящей через три известные точки:  $z(0) = f_{\max}$  и  $z(\pm l) = 0$ . Получим  $a = f_{\max}/l^2$  и  $c = -f_{\max}$ .

Длина участка ветви  $[x_1; x_2]$  параболы  $z(x) = f_{\max} (x^2/l^2 - 1)$  составит

$$l_0(x, z(x)) = \int_{x_1}^{x_2} dl = \int_{x_1}^{x_2} \sqrt{dx^2 + dz^2} =$$

$$= \frac{1}{4a} \left[ \ln \left( t + \sqrt{1+t^2} \right) + t \sqrt{1+t^2} \right]_{t_1}^{t_2},$$

где  $t_{1(2)} = 2ax_{1(2)}, a = f_{\max}/l^2$ .

Таким образом, если ввести прямоугольную систему координат  $XOQ$  с началом в точке  $O$  (проекция центра первого опорного катка на ось беговой дорожки гусеницы, причем  $Q \uparrow \uparrow G$  и  $X \downarrow \uparrow V$ , где  $G$  и  $V$  — вес и линейная скорость движения машины), то при  $x \in [0 - \delta; L + \delta]$  имеем

$$q(x) =$$

$$= \begin{cases} \frac{3Z_j}{4b_\Gamma \delta} (1 - [x/\delta]^2) & x \in (l_{1j} - \delta; l_{1j} + \delta); \\ (k_c + b_\Gamma k_\phi) \left[ f_{\max i} \left( [x/l_i]^2 - 1 \right) \right]^n & x \notin (l_{1j} - \delta; l_{1j} + \delta). \end{cases}$$

Очевидно, что должно выполняться равенство

$$2b_\Gamma \int_{-\delta}^{L+\delta} q(x) dx = G.$$

Приведем результаты расчетов для двух грунтов с различной несущей способностью. Усредненные характеристики грунтов приняты на основании данных [3, 6]. Грунт 1: песчаный,  $p_0 \approx 120$  кПа;  $k_c \approx 2,3$  кг/см $^{1+n}$ ;  $k_\phi \approx 0,2$  кг/см $^{2+n}$ ;  $n \approx 0,42$ . Грунт 2: глинистый  $p_0 \approx 220$  кПа;  $k_c \approx 1,6$  кг/см $^{1+n}$ ;  $k_\phi \approx 0,6$  кг/см $^{2+n}$ ;  $n \approx 0,41$ . Результаты расчетов для шасси-аналога транспортной гусеничной машины БМП-1 занесены в табл. 1 и 2, а расчетное распределение нормальных давлений по длине опорной поверхности показано на рис. 3. Эпюра давлений построена как огибающая расчетных точек зависимости  $q(x)$ .

Следует ожидать, что эпюра  $q(x)$  под опорными катками имеет не такую идеальную параболическую форму, как получается по результатам моделирования. Парабола должна несколько деформироваться по аналогии с деформацией эпюры нормальных нагрузок под катящимся колесом [6].

В пролетах между опорными катками наблюдаемая при опытах деформация эпюры в первую очередь обуславливается тем, что нагрузка  $W_i$  в принципе не является сосредоточенной, а представляет собой некоторую функцию  $W_i(x)$ . Кроме того, в общем случае  $\alpha_j \neq 0,5, j = \overline{2, n}$ .

Таблица 1

**Нагрузки под опорными катками шасси-аналога БМП-1**

Характеристики нагрузки	Величина нагрузки под опорным катком ( $j = \overline{1,6}$ )					
	1	2	3	4	5	6
Недеформируемое основание						
$Z_j$ , кН	5,9	12,5	12,9	13,5	14,0	6,2
$q_{\max j}$ , кПа	105,4	223,2	230,4	241,1	250,0	110,7
Песчаный грунт ( $p_0 \approx 120$ кПа) с учетом перераспределения нагрузок на пролеты						
$Z_j$ , кН	5,9	6,7	6,7	6,7	6,7	6,2
$q_{\max j}$ , кПа	105,4	120,0	120,0	120,0	120,0	110,7
Глинистый грунт ( $p_0 \approx 220$ кПа) с учетом перераспределения нагрузок на пролеты						
$Z_j$ , кН	5,9	12,3	12,3	12,3	12,3	6,2
$q_{\max j}$ , кПа	105,4	220,0	220,0	220,0	220,0	110,7

\* Предварительное натяжение 18 кН; тяговое усилие 6,8 кН; натяжение в наклонной рабочей ветви 20,9 кН; в свободной ветви 14,5 кН; движение по горизонтальной поверхности; ширина и шаг гусеницы — 0,3 и 0,14 м

Таблица 2

**Эквивалентная сосредоточенная нагрузка  $W$ , кН, на пролет между опорными катками шасси-аналога БМП-1**

Сосредоточенная нагрузка $W_i$ пролета $i$ катка ( $i = \overline{1,5}$ )				
1	2	3	4	5
Песчаный грунт ( $p_0 \approx 120$ кПа)				
2,89	5,98	6,48	7,28	3,64
Глинистый грунт ( $p_0 \approx 220$ кПа)				
0,09	0,38	0,88	1,68	0,84

\*Условия расчета указаны в табл. 1

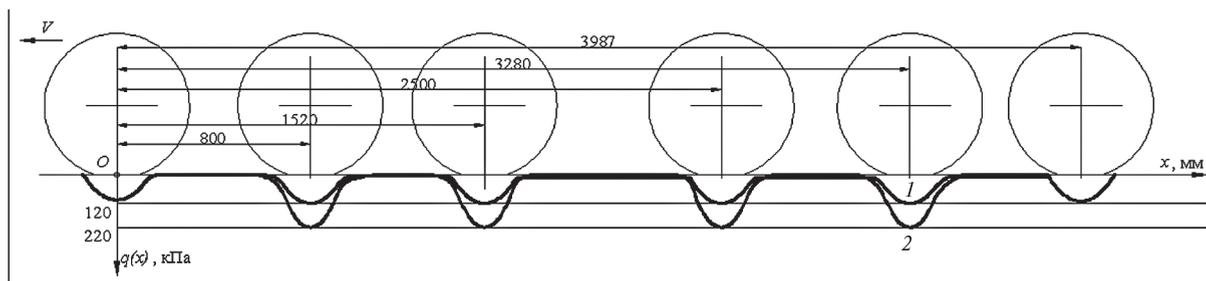


Рис. 3. Расчетное распределение нормального давления по длине опорной поверхности шасси-аналога БМП-1 (условия движения приведены в табл. 1):

1 — на песчаном грунте; 2 — на глинистом грунте

Однако предлагаемая методика (вне зависимости от указанных погрешностей) может быть использована при сравнении распределения нормальных давлений для различных машин, сравнительной оценки проходимости и подвижности, в модели оценки эффективности работы агрегатов шасси.

Предложена и проиллюстрирована примером методика построения эпюры нормальных давлений на опорной поверхности гусеничной машины с учетом геометрических, кинематических и силовых особенностей многоопорной ходовой системы и реологических свойств основания.

Областями применения методики могут быть задачи сравнительной оценки подвижности гу-

сеничных машин, эффективности работы узлов и агрегатов шасси, интенсивности воздействия ходовых систем на опорную поверхность окружающей среды.

Расчетно подтверждено, что эффективным путем уменьшения перепадов нормальных давлений по длине опорной поверхности гусеницы является увеличение протяженности ее «активных» участков. В частности, увеличение протяженности указанных участков может быть обеспечено за счет модификации траков.

Практическая реализация полученных результатов приведет к снижению уровня сопротивления движению гусеничных машин, нагрузок на элементы движителя, интенсивности разрушения грунта и образования глубины колеи.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Забавников, Н.А.** Основы теории транспортных гусеничных машин [Текст] / Н.А. Забавников.— М.: «Машиностроение», 1975.— 448 с.

2. **Сергеев, Л.В.** Теория танка [Текст] / Л.В. Сергеев.— М: Изд-во Академии бронетанковых войск, 1973.— 492 с.

3. **Беккер, М.Г.** Введение в теорию систем местность — машина [Текст] / М.Г. Беккер. Пер. с англ.— М.: Машиностроение, 1973.— 520 с.

4. **Платонов, В.Ф.** Гусеничные и колесные

транспортно-тяговые машины [Текст] / В.Ф. Платонов, Г.Р. Леиашвили.— М.: Машиностроение, 1986.— 296 с.

5. **Мазур, А.И.** Механизм взаимодействия гусениц с грунтом [Текст] / А.И. Мазур, В.В. Крюков, И.Ф. Фадеев // Вестник бронетанковой техники.— 1983. № 3.

6. **Агейкин, Я.С.** Вездеходные колесные и комбинированные движители [Текст] / Я.С. Агейкин.— М.: Машиностроение, 1972.— 184 с.

УДК 621.9

*Ю.А. Леонов, Ю.М. Казаков*

### МНОГОКРИТЕРИАЛЬНЫЙ ВЫБОР РАЦИОНАЛЬНЫХ СХЕМ БАЗИРОВАНИЯ ЗАГОТОВКИ ПРИ РЕШЕНИИ ЗАДАЧИ СИНТЕЗА ЕДИНИЧНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Одна из подзадач проектирования технологического процесса (ТП) — подбор схем базирования для каждой технологической операции. Такой подход, когда на операцию подбирается схема базирования, используется в классических методах автоматизированного (методы адресации и проектирование унифицированных ТП) и ручного проектирования ТП. Анализ доступных информационных источников показал,

что данная задача решается на основе типовых вариантов либо с использованием диалогового режима, когда технологу предлагается самому выбрать схемы базирования. В публикациях [1, 2] представлена следующая методика выбора рациональных схем базирования:

если точность размеров, достигаемых на операции, обеспечивается только одной схемой базирования, то она выбирается в качестве окон-

чательной; погрешность базирования должна удовлетворять следующему неравенству:  $1/3 \cdot ITN \geq \varepsilon_6$ , где  $ITN$  — допуск на размер;  $\varepsilon_6$  — погрешность базирования;

при обеспечении заданной точности несколькими схемами их следует анализировать по минимуму  $t_{всп}$  (время на установку и снятие заготовки). Если  $t_{всп}$  одинаково, то критерием для выбора является часть стоимости  $C_{пр}$  одноместного приспособления, определяющего схему базирования; при равенстве стоимости окончательный выбор выполняется по минимуму  $\varepsilon_6$ , ибо такая схема базирования обеспечивает большой межремонтный период приспособления [2].

В результате анализа существующих методов выбора рациональных схем базирования были выявлены следующие недостатки:

отсутствие четкой формализации методов и алгоритмов для автоматизированного решения данной задачи;

недостаточное количество учитываемых факторов, влияющих на выбор схем;

невозможность получить количественные оценки качества схем базирования существующими методами, в силу чего их нельзя использовать при синтезе единичных ТП;

невозможность учитывать производственные условия предприятия.

В случае автоматизированного проектирования ТП методом синтеза, в котором проектирование строится начиная от обработки отдельных поверхностей с последующим объединением обработок в операции, целесообразнее использовать современные математические методы. В теории игр и области искусственного интеллекта известны методы, где строится дерево решений, представляющее собой описание всех возможных ситуаций. В реальных задачах построение такого дерева требует огромных вычислительных мощностей. Для сокращения вариантов используют различные эвристические алгоритмы, например «Алгоритм А\*».

Для проектирования единичных технологических процессов предлагается метод, в котором необходимо построить дерево решений. Дерево решений представляет собой описание возможных вариантов обработки заготовки (рис. 1), т. е. содержит информацию обо всех ТП, которые только можно применить к конкретной заготовке.

С целью оптимизации вычислительного процесса большое множество вариантов ТП можно

сократить за счет введения некоторых ограничений. Такими ограничениями могут быть: конфигурирование баз данных станочного оборудования и технологической оснастки под конкретное предприятие; добавление в дерево возможных вариантов обработки заготовки небольшого количества рациональных схем базирования; добавление в дерево операций с максимальным количеством обрабатываемых поверхностей; использование алгоритмов поиска кратчайших путей для отсекаания заведомо проигрышных вариантов.

Дерево возможных вариантов обработки заготовки (см. рис. 1) содержит узлы двух типов: операция и схема базирования. Исходными данными для построения дерева служит информация о геометрии, размерах, допусках формы и расположении заготовки и детали. Приведем кратко алгоритм построения дерева:

1. Подбираем различные сочетания технологических баз (формирование схем базирования), способных лишить заготовку необходимых степеней свободы.

2. При помощи многокритериальной системы принятия решений ранжируем все найденные схемы в порядке предпочтительности выбора.

3. Выбираем несколько рациональных схем базирования и заносим их в дерево возможных вариантов обработки заготовки таким образом, что в дерево добавляются узлы «схемы базирования».

4. Для каждого узла «схема базирования» подбираем станочное оборудование, технологическую оснастку, определяем обрабатываемые поверхности и устанавливаем режимы резания (формирование узлов «операции»).

5. После прохождения узла «операция» заготовка получает новое (текущее) состояние качества. Далее алгоритм повторяется для каждого текущего состояния заготовки до получения качества детали в каждом из путей дерева.

На схеме формирования дерева (см. рис. 1) используется понятие конструкторско-технологического элемента (КТЭ), означающее совокупность поверхностей, получаемых одним инструментом на одном технологическом переходе, например пазы, резьбы, шлицы и т. п. Далее для упрощения будем использовать понятие «поверхность» вместо КТЭ.

После формирования дерева возможных вариантов обработки заготовки (рис. 1) необходимо найти оптимальный технологический про-

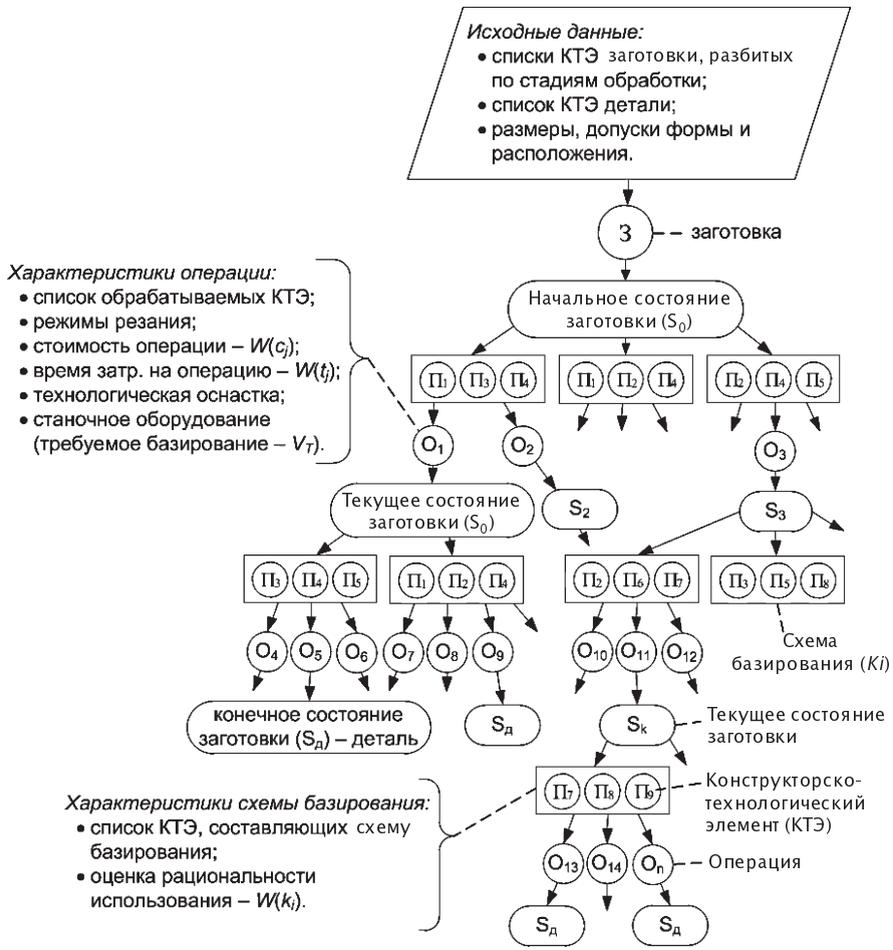


Рис. 1. Формирование дерева возможных вариантов обработки заготовки

цесс, который выражен в «кратчайшем» пути от состояния заготовки до состояния детали. Для этого используются следующие критерии выбора: стоимость обработки заготовки; время, затрачиваемое на обработку заготовки; качество схем базирования.

Для нахождения оптимального пути в дереве используется функция полезности

$$J(k, t, c) = \left\{ \max_{i=1}^n \sum W(k_i), \min_{j=1}^m \sum W(t_j) \sum_{j=1}^m W(c_j) \right\}, \quad (1)$$

где  $W(k_i)$  — оценка качества  $i$ -й схемы базирования;  $W(t_j)$  — оценка времени обработки  $j$ -й операции;  $W(c_j)$  — оценка стоимости обработки  $j$ -й операции.

После нахождения оптимального пути в дереве формируется маршрутный и операционный ТП. При классическом проектировании, когда

строится маршрутный, затем операционный ТП, невозможно полноценно провести структурную оптимизацию, так как на стадии проектирования маршрутного ТП не разработаны операции. В предлагаемом подходе нам доступна вся необходимая информация для проведения сравнительного анализа.

Одна из ключевых задач, решаемых в предлагаемом подходе, — выбор рациональных схем базирования. Она решается в условиях отсутствия реальных приспособлений, и, следовательно, должна производиться оценка схем базирования, а не приспособлений. Для оценки рациональности использования схем базирования требуется выстроить систему правил, которые будут определять предпочтительность выбора той или иной схемы. В качестве такой системы правил было предложено использовать многокритериальную систему принятия решений.

Были проанализированы следующие методы принятия решений: многокритериальная теория полезности; метод SMART; метод анализа иерархий; методы ранжирования многокритериальных альтернатив ELECTRE. Для решения задачи выбора рациональных схем базирования был принят метод анализа иерархий, который отличается своей простотой и наглядностью, а также полностью подходит для поставленной задачи.

Исходными данными задачи выбора рациональных схем служат схемы базирования, которые генерируются для каждого текущего состояния заготовки (рис. 1). Это достигается перебором возможных комбинаций базовых поверхностей при условии, что найденные схемы удовлетворяют требуемому базированию. После того как схемы найдены, необходимо оценить их качество. На качество схем влияют различные факторы, выраженные через критерии выбора.

Определены следующие критерии выбора рациональных схем базирования: погрешность схемы базирования заготовки; относительные затраты на реализацию схемы установки; относительное вспомогательное время, необходимое на установку и снятие заготовки; площадь главной базы; устойчивость заготовки при базировании по главной базе; доступность обрабатываемых поверхностей; доступность использования базовых поверхностей; компактность расположения базовых поверхностей.

Приведем обоснование выбора каждого из критериев, а также расчеты оценок схем по представленным критериям.

**Критерий «Погрешность схемы базирования заготовки».** Погрешность схемы базирования заготовки — основной критерий, т. к. схемы с большой погрешностью могут отправить деталь в брак. В технологии машиностроения известна следующая зависимость:  $1/3 \cdot ITH \geq \varepsilon_6$ . Если погрешность схемы не удовлетворяет такому условию, то схема не участвует в дальнейшем выборе. Для расчета погрешности базирования  $i$ -й схемы входными данными служат текущая схема и список обрабатываемых поверхностей. Результатом работы алгоритма является погрешность  $i$ -й схемы базирования. При расчете погрешности используется один из модулей: «плоскость — плоскость», «цилиндр — призма», «цилиндр — цилиндр», «комбинированный модуль» [2]. Алгоритм расчета погрешности  $\varepsilon_{сх\ b\ i}$  базирования  $i$ -й схемы следующий:

- 1) находим размерные цепи между базирующими и обрабатываемыми поверхностями;
- 2) выбираем расчетные модули и формулы для всех размерных цепей;
- 3) рассчитываем погрешности базирования  $\varepsilon_{6k}$  размерных цепей;
- 4) выбираем максимальную погрешность базирования  $\varepsilon_{сх\ b\ i} = \varepsilon_{6\max}$ .

При нахождении размерных цепей используется рекурсивный алгоритм, в котором выполняется обход размеров, связывающих базирующие и обрабатываемые поверхности. Выбор расчетных модулей производится на основании геометрических форм базирующих и возможных элементов приспособления.

**Критерии «Относительные затраты на реализацию схемы установки» и «Относительное вспомогательное время».** Так как на этапе выбора схем базирования еще не разработаны приспособления, то оценки вспомогательного времени и стоимости приспособления невозможно подсчитать. Однако, имея информацию о геометрических формах и размерах базовых поверхностей, можно подобрать конструктивные элементы для установки заготовки в приспособление. Для подсчета данных критериев используется не реальная стоимость установочных элементов, а относительные оценки (ранги), которые отражают предпочтительность выбора того или иного варианта. Например, базирование на плоскую поверхность дешевле и быстрее, чем базирование по зубчатой поверхности, соответственно ранги стоимости и вспомогательного времени при базировании на плоскую поверхность будут ниже, чем при базировании по зубчатой поверхности. Для каждой из поверхностей, согласно классификации В.Д. Цветкова [3], были составлены таблицы рангов стоимостей базирования и вспомогательных времен. В примере можно увидеть небольшие части таблиц рангов (табл. 1–4). Такие таблицы могут редактироваться экспертом-технологом для учета производственных условий предприятия.

Для нахождения рангов стоимости и вспомогательного времени схемы базирования необходимо воспользоваться формулами

$$R_{C_{np}} = \sum_{i=1}^n r_{C_{np}i}; \quad R_{t_{всп}} = \sum_{i=1}^n r_{t_{всп}i}, \quad (2)$$

где  $n$  — количество поверхностей, входящих в состав схемы базирования;  $r_{C_{np}i}$  — текущий

Таблица 1

Ранги плоских поверхностей

№ п/п	Код	$r_{\text{Спр}}$	$r_{\text{Спр}}$	Вид устанавливаемого элемента
1	1111	1	1	Ш
2	1122	1	1	Ш
...	...	...	...	...

Таблица 2

Ранги поверхностей вращения

№ п/п	Код	$r_{\text{Спр}}$	$r_{\text{всп}}$	Вид устанавливаемого элемента
1	2111н	1	1	П, Пу, Пп, Вд, Вк
2	2112н	2	1	П, Пу, Пп, Вд, Вк
...	...	...	...	...

Таблица 3

Ранги винтовых поверхностей

№ п/п	Код	$r_{\text{Спр}}$	$r_{\text{всп}}$	Вид устанавливаемого элемента
1	3111н	6	5	Вд, Вк
2	3112н	6	5	Вд, Вк
...	...	...	...	...

Таблица 4

Ранги зубчатых поверхностей

№ п/п	Код	$r_{\text{Спр}}$	$r_{\text{Спр}}$	Вид устанавливаемого элемента
1	4111н	7	6	Р, Зс
2	4112н	7	6	Р, Зс
...	...	...	...	...

ранг стоимости  $i$ -й поверхности;  $r_{\text{всп}i}$  — текущий ранг вспомогательного времени  $i$ -й поверхности.

**Критерий «Площадь главной базы».** В теории базирования выделяют два типа баз: главные и дополнительные. При ориентации заготовки в приспособлении сначала ее устанавливают на главную базу, а затем используют дополнительные базы для лишения оставшихся степеней свободы. За главную базу предпочтительно брать поверхность, которая обеспечивает заготовке устойчивое положение в приспособлении даже при базировании только одной этой базой [2]. Исходя из этого были предложены критерии «площадь главной базы» и «устойчивость заготовки при базировании по главной базе». Чем больше площадь главной базы, тем устойчивее будет заготовка в приспособлении, а также время на установку будет меньше. Расчет оценки по данному критерию не приводится, так как площадь главной базы подсчитывается автоматически с помощью встроенных средств системы автоматизированного проектирования (САПР).

**Критерий «Устойчивость заготовки при базировании по главной базе».** Под устойчивостью заготовки понимается ее способность сохранять устойчивое положение при действии только силы тяжести. При этом заготовка должна быть устойчива при ее базировании только по главной базе. Это связано с особенностями крепления заготов-

ки в приспособлении, когда рабочий сначала устанавливает заготовку на главную базу, а затем доводит ее до вспомогательных баз и закрепляет предусмотренными зажимами. Если заготовка неустойчива, то возможны трудности с установкой заготовки в приспособление, а также появление дополнительных погрешностей установки.

Так как на этапе разработки схемы базирования заготовки неизвестна вся силовая схема (точки контакта опорных элементов приспособления; точки контакта зажимных элементов; значения и направления сил резания), то производится предварительный расчет оценки, характеризующей степень устойчивости.

Для определения оценки устойчивости заготовки предлагается использовать следующую формулу:

$$O_{\text{уст}} = \frac{S_{\text{пр}}}{h} + k_{\text{уст}}, \quad (3)$$

где  $S_{\text{пр}}$  — площадь проекции главной базы на плоскость, перпендикулярную вектору силы тяжести;  $h$  — расстояние от нижней точки главной базы до верхней точки заготовки в направлении вектора силы тяжести (например, при базировании заготовки на поверхность 2 (рис. 2) расстояние  $h$  будет равным диаметру этой поверхности);  $k_{\text{уст}}$  — коэффициент характеризующий попадание вектора силы тяжести в проекцию главной базы.

На рис. 2 изображена заготовка «Вал ступенчатый». Если выбрать за главную базу поверхности 1 или 3, то заготовка будет стремиться опрокинуться за счет действия на нее силы тяжести ( $F_T$ ), т. е. при базировании заготовки на поверхности 1 или 3 заготовка будет неустойчивой. При базировании заготовки на поверхность 2 заготовка будет устойчивой, так как центр тяжести попадает в параллелепипед, образованный этой поверхностью. На рис. 3 изображен параллелепипед, образованный габаритами рассматриваемой поверхности и задаваемый двумя пространственными точками с координатами  $\{x_1, y_1, z_1\}$  и  $\{x_2, y_2, z_2\}$ .

Приведем алгоритм определения коэффициента устойчивости  $k_{уст}$  заготовки, в котором исходными данными служат геометрические положения  $g_i$  поверхностей заготовки, входящих в состав главной базы.

1. Находим общий параллелепипед  $G_{г\text{лб}} = \{x_1, y_1, z_1, x_2, y_2, z_2\}$ , который является объединением всех поверхностей  $g_i = \{x_1, y_1, z_1, x_2, y_2, z_2\}$ , входящих в состав главной базы.

2. Упорядочиваем координаты параллелепипеда главной базы:

$$G_{\text{min\_max}} = \{x_{\text{min}}, y_{\text{min}}, z_{\text{min}}, x_{\text{max}}, y_{\text{max}}, z_{\text{max}}\}.$$

3. Находим центр тяжести заготовки  $C_T$  с помощью встроенных средств САПР.

4. Проверяем параллельность вектора силы тяжести  $\overline{F_T}$  и векторов координатных осей  $\overline{x}$ ,  $\overline{y}$ ,  $\overline{z}$ . В зависимости от условия параллельности  $\overline{F_T} // \overline{x}$ ,  $\overline{F_T} // \overline{y}$ ,  $\overline{F_T} // \overline{z}$  инициализируем переменные  $P_{1\text{min}}$ ,  $P_{1\text{max}}$ ,  $P_{2\text{min}}$ ,  $P_{2\text{max}}$ , которые представляют плоскость, перпендикулярную вектору силы тяжести:

$$\begin{aligned} \overline{F_T} // \overline{x}: P_{1\text{min}} = y_{\text{min}}; P_{1\text{max}} = y_{\text{max}}; \\ P_{2\text{min}} = z_{\text{min}}; P_{2\text{max}} = z_{\text{max}}; \\ \overline{F_T} // \overline{y}: P_{1\text{min}} = x_{\text{min}}; P_{1\text{max}} = x_{\text{max}}; \\ P_{2\text{min}} = z_{\text{min}}; P_{2\text{max}} = z_{\text{max}}; \\ \overline{F_T} // \overline{z}: P_{1\text{min}} = x_{\text{min}}; P_{1\text{max}} = x_{\text{max}}; \\ P_{2\text{min}} = y_{\text{min}}; P_{2\text{max}} = y_{\text{max}}. \end{aligned} \quad (4)$$

Также инициализируем переменные  $P_{1c}$ ,  $P_{2c}$ , которые характеризуют точку пересечения вектора силы тяжести с полученной плоскостью:

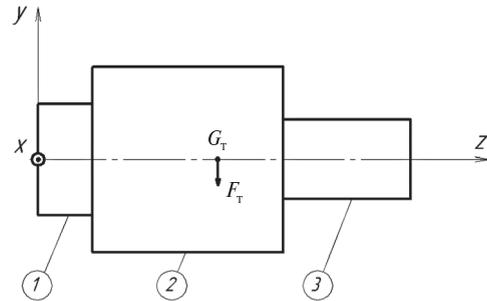


Рис. 2. Определение устойчивости заготовки

$$\overline{F_T} // \overline{x}: P_{1c} = y_c, P_{2c} = z_c;$$

$$\overline{F_T} // \overline{y}: P_{1c} = x_c, P_{2c} = z_c;$$

$$\overline{F_T} // \overline{z}: P_{1c} = x_c, P_{2c} = y_c.$$

5. Проверяем попадание проекции вектора силы тяжести на перпендикулярную ему плоскость при помощи условия  $P_{1\text{min}} < P_{1c} < P_{1\text{max}} \wedge P_{2\text{min}} < P_{2c} < P_{2\text{max}}$ . Если условие верно, то заготовка устойчива, иначе — заготовка неустойчива.

Выходной характеристикой представленного алгоритма является число, которое устанавливает эксперт. Число характеризует степень различия между двумя состояниями заготовки: устойчивым и неустойчивым. Например, если заготовка устойчива, то принимаем значение  $k_{уст} = 7$ , иначе  $k_{уст} = 1$ .

**Критерий «Доступность обрабатываемых поверхностей».** Если базы располагаются близко к обрабатываемым поверхностям, то возможны ситуации, когда элементы приспособления будут ограничивать доступ режущего инструмента в зону резания. Поскольку на этапе подбора схем базирования отсутствует информация о геометрии режущего инструмента, держателе инструмента, а также элементах приспособления, то невозможно точно определить доступность той или иной поверхности для обработки. Используя доступную информацию на данном этапе —

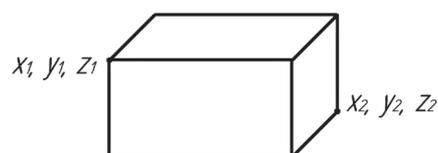


Рис. 3. Параллелепипед поверхности

геометрические параметры, пространственное положение обрабатываемых и базовых поверхностей, габариты заготовки, необходимо определить степень пригодности использования поверхностей в качестве базы. Чем ближе база к обрабатываемой поверхности, тем выше вероятность того, что база помешает обработке, однако свыше определенного расстояния разница в выборе по данному критерию отсутствует. Исходя из этих рассуждений была предложена методика определения доступности обработки с использованием логарифмической шкалы. Функция логарифма позволяет сделать выбор баз чувствительным возле обрабатываемой поверхности и менее чувствительным на удаленном расстоянии. Предлагается использовать следующую функцию определения доступности обработки  $i$ -й поверхности при базировании на  $j$ -й базе:

$$D_{\text{обр}ij} = \begin{cases} \ln(U+1), U \leq R_S; \\ \ln(R_S+1), U > R_S, \end{cases} \quad (5)$$

где  $U$  — удаленность между двумя поверхностями в трехмерном пространстве;  $R_S$  — максимальное расстояние, определяющее зону чувствительности по критерию доступности обработки.

Удаленность  $U$  определяется по следующей формуле:

$$U = \sqrt{U_x^2 + U_y^2 + U_z^2}, \quad (6)$$

где  $U_x$ ,  $U_y$ ,  $U_z$  — удаленность между двумя поверхностями соответственно по осям  $x$ ,  $y$ ,  $z$  с учетом габаритов заготовки.

Удаленность по осям вычисляется следующим образом:

$$U_x = \frac{100 \cdot R_{x\min}}{G_x}; \quad U_y = \frac{100 \cdot R_{y\min}}{G_y};$$

$$U_z = \frac{100 \cdot R_{z\min}}{G_z}, \quad (7)$$

где  $R_{x\min}$  — расстояние между ближайшими точками двух поверхностей соответственно по осям  $x$ ,  $y$ ,  $z$ ;  $G_x$ ,  $G_y$ ,  $G_z$  — габариты заготовки по осям  $x$ ,  $y$ ,  $z$ .

Параметр  $R_S$  рассчитывается по формуле

$$R_S = \frac{G p_S}{100}, \quad (8)$$

где  $p_S$  — максимальное расстояние, определяющее зону чувствительности по степени доступности обработки (в процентах от габаритов заго-

товки), которое устанавливается экспертом;  $G$  — длина диагонали параллелепипеда заготовки,

$$G = \sqrt{G_x^2 + G_y^2 + G_z^2}. \quad (9)$$

Доступность обработки для всей схемы базирования вычисляется по следующему алгоритму: в цикле находятся оценки доступности обработки для всех сочетаний баз и обрабатываемых поверхностей; выбирается минимальная оценка, которая и будет считаться доступностью обработки для всей схемы базирования.

**Критерий «Доступность использования базовых поверхностей».** По степени доступности все поверхности можно разделить на три подвида: открытые, полуоткрытые и закрытые [3]. Такое разделение поверхностей характеризует сложность подвода базирующего элемента приспособления к базе заготовки. Чем недоступнее поверхность для базирования, тем более возрастает конструкционная сложность приспособления, следовательно, и его стоимость. На этапе сбора (кодирования) конструкторско-технологической информации о заготовке пользователь автоматизированной системы устанавливает характеристику подвида для каждой поверхности заготовки.

Оценка по данному критерию определяется суммой двух показателей:

$$D_{\text{баз}} = d_{\text{глб}} + d_{\text{допб}}, \quad (10)$$

где  $d_{\text{глб}}$  — показатель доступности главной базы;  $d_{\text{допб}}$  — показатель доступности дополнительных баз.

Показатели доступности вычисляются по формуле

$$d_{\text{глб}} = \prod_{i=1}^n k_i / n; \quad (11)$$

где  $k_i$  — коэффициент доступности использования  $i$ -й поверхности главной базы;  $k_j$  — коэффициент доступности использования дополнительных баз;  $n$  — количество поверхностей, входящих в главную базу;  $m$  — количество поверхностей, входящих в состав дополнительных баз.

Коэффициенты  $k_i$  и  $k_j$  устанавливаются экспертом при настройке системы. Они характеризуют степень отличия в выборе открытых, полуоткрытых и закрытых поверхностей. В формулах (11) находится среднеарифметическое произведение коэффициентов для того, чтобы убрать влияние количества поверхностей, входящих в базу.

**Критерий «Компактность расположения базовых поверхностей».** Известно: чем ближе друг к другу располагаются базовые поверхности, тем меньше размеры приспособления, следовательно, стоимость приспособления будет меньше. Для подсчета оценки компактности расположения базовых поверхностей используется следующая формула:

$$C_{\text{баз}} = \sum_{i=1, j=1}^{n, m} C_{\text{баз}ij} / c, \quad (12)$$

где  $C_{\text{баз}ij}$  — оценка компактности расположения  $i$ -й и  $j$ -й поверхностей;  $c$  — количество различных переборов базовых поверхностей;

$$C_{\text{баз}ij} = \ln(U + 1); \quad (13)$$

здесь  $U$  — удаленность двух базовых поверхностей, вычисляемая по формуле (6).

При определении качества анализируемых схем базирования устанавливается степень важности каждого из критериев. Таким образом эксперт-технолог может учитывать индивидуальные предпочтения и производственные условия предприятия. Чем больше вес критерия, тем важнее его роль в суммарной оценке схемы базирования.

На основе приведенной методики была создана автоматизированная система (рис. 4),

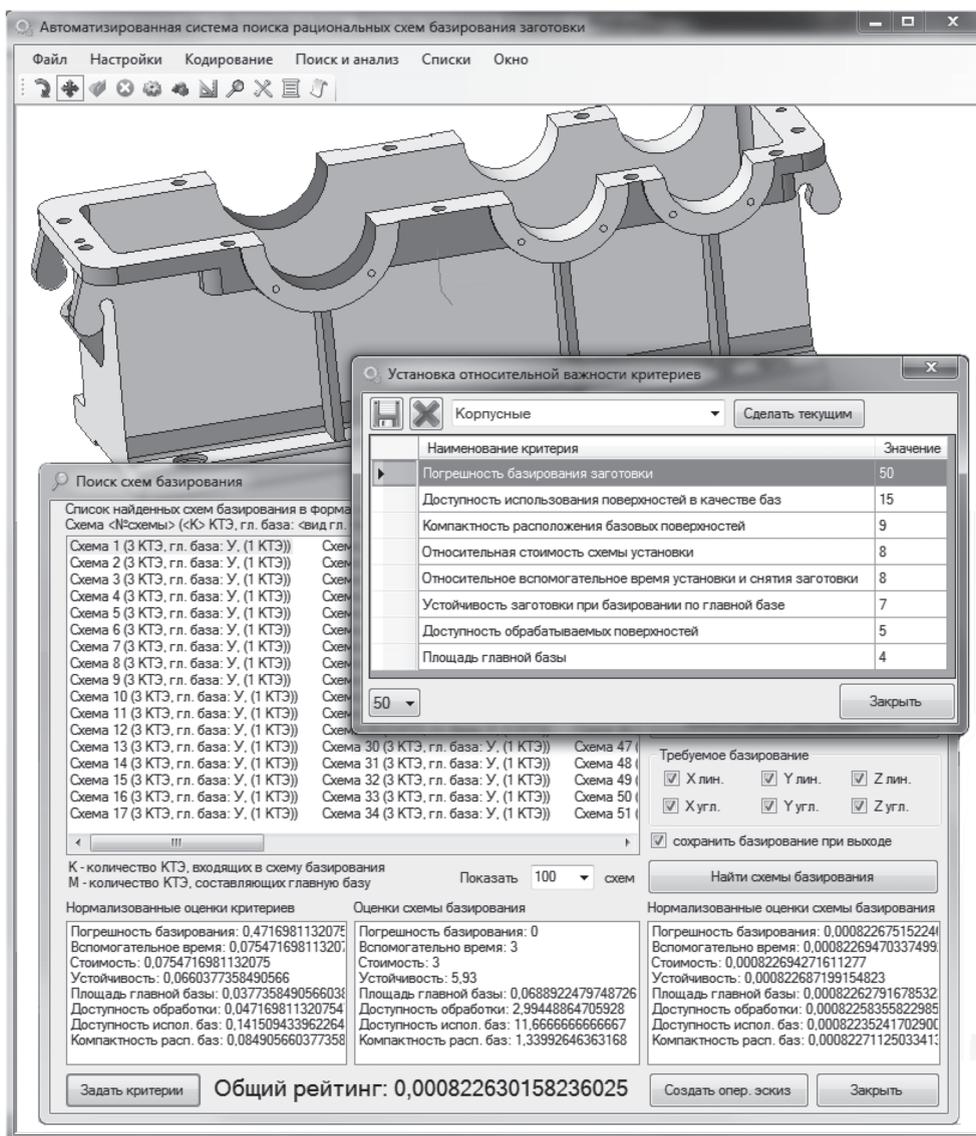


Рис. 4. Иллюстрация работы автоматизированной системы многокритериального выбора рациональных схем базирования заготовки

которая позволяет: внести конструкторско-технологическую информацию о заготовке, построенной в САПР Компас-3D; найти рациональные схемы базирования заготовки; для выбранной схемы базирования построить карту эскизов.

Представленная методика многокритериального выбора рациональных схем базирования заготовки создает возможности:

формализовать методы и алгоритмы автоматизированного выбора рациональных схем базирования;

каждому из критериев выбора задавать коэффициент важности и, таким образом, учитывать индивидуальные предпочтения технолога, а также производственные условия предприятия;

для каждой из схем вычислять количественный индикатор качества, который может быть применен в синтезе ТП обработки заготовки;

выбирать рациональные схемы базирования для любого вида заготовки, а следовательно, использовать их при формировании единичных технологических процессов обработки заготовки;

технологу проводить анализ возможных схем базирования заготовки на основе подсчитанных количественных показателей.

Разработанный метод многокритериального выбора рациональных схем базирования заготовки, а также созданная на базе этого метода автоматизированная система позволяют решить одну из подзадач синтеза единичных технологических процессов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Рыжов, Э.В.** Оптимизация технологических процессов механической обработки [Текст] / Э.В. Рыжов, В.И. Аверченков.— Киев: Наук. думка, 1989.— 192с.

2. **Ильицкий, В.Б.** Проектирование технологи-

ческой оснастки [Текст]: учеб. пособие / В.Б. Ильицкий, В.В. Ерохин.— Брянск: БГТУ, 2001.— 104 с.

3. **Цветков, В.Д.** Система автоматизации проектирования технологических процессов [Текст] / В.Д. Цветков. — М.: Машиностроение, 1972. — 240 с.

УДК 621.867.212.3

*Ю.Н. Кожубаев, О.В. Прокофьев, И.М. Семёнов*

### ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ЛЕНТОЧНОГО КОНВЕЙЕРА

Ленточные конвейеры предназначены для транспортирования породы при производстве открытых и подземных горных работ. В последние годы конвейерный транспорт получает все более широкое распространение вследствие существенных преимуществ его перед другими видами транспорта. Вместе с тем возникает необходимость обеспечения надежности ленточных конвейеров.

При включении привода ленточного конвейера движение удаленных участков ленты начинается лишь спустя некоторое время, за которое фронт волны от приводного барабана дойдет до данного сечения ленты. Для длинных конвейеров время прохождения волны деформации по всей длине конвейера может составить несколько секунд. Таким образом, не вся масса ленты и груза

на ней приводится в движение одновременно. При пуске эти изменения могут привести к неустойчивой работе приводного барабана, например частичной или полной пробуксовке, что вызывает интенсивное изнашивание футеровки барабана и нижней обкладки ленты, нагрев барабана, резкое снижение коэффициента сцепления ленты с приводным барабаном. В итоге снижается надежность работы ленточного конвейера.

Аналогично, если остановить приводной барабан конвейера, вся лента сразу не остановится. Вследствие этого движущиеся участки набегают на остановившиеся, и натяжение ленты может оказаться столь малым, что она потеряет устойчивость и произойдет образование складки. При торможении перераспределение натяжений может вызвать потерю продольной

устойчивости ленты (образование значительных провесов или гофр, просыпей груза), ее пробуксовку на барабане.

В связи с этим возникает задача обеспечения устойчивой работы конвейера. Она может быть решена путем непрерывного управления работой приводных и натяжных устройств. В связи со сложностью проведения эксперимента на реальных объектах для разработки системы автоматического управления необходимо создать имитационную модель, учитывающую основные свойства ленточного конвейера.

Наиболее часто свойства лент представляют в виде модели Фохта, учитывающей ее упруго-вязкие свойства и состоящей из параллельно соединенных упругого и вязкого элементов. Напряжение и деформация для данной модели в случае простого растяжения связаны зависимостью

$$\sigma(t) = E\varepsilon + \eta \frac{d\varepsilon}{dt}, \quad (1)$$

где  $\sigma$  — напряжение,  $E$  — модуль упругости,  $\varepsilon$  — относительная деформация,  $\eta$  — коэффициент внутреннего трения.

Динамические процессы при построении математической модели ленточного конвейера обычно рассматриваются с точки зрения распространения волн напряжения и деформации. В большинстве работ [1–7] при разработке модели ленточного конвейера приняты следующие допущения:

верхняя (загруженная) и нижняя (незагруженная) ветви конвейера представлены в виде сосредоточенных масс;

сила сопротивления движению ленты одинакова по всей длине конвейера и не зависит от конструктивных параметров и режимов работы конвейера;

масса груза считается равномерно распределенной по всей длине конвейера и не зависящей от изменения поступающего грузопотока;

натяжение ленты по всей длине конвейера одинаково и не зависит от режимов работы конвейера;

внутреннее трение в ленте не учитывается.

При таких допущениях построенные модели не могут отражать реальные физические процессы, происходящие при работе ленточного конвейера. Поэтому необходимо построить модель ленточного конвейера, наиболее полно отражающую реальные физические процессы. Однако

модель, учитывающая все инерционные элементы, все связи между ними и все действующие силы, весьма сложна. Математическое описание такой модели весьма затруднительно. Поэтому при разработке модели следует учесть только те элементы, которые отражают основные процессы, свойства и характеристики ленточного конвейера. С этой целью приняты следующие допущения, которые общеприняты и подтверждены экспериментально:

отсутствует влияние провеса ленты между роликотопорами на ее упругие свойства;

вся нагрузка в продольном направлении воспринимается каркасом ленты;

упруго-вязкие свойства ленты и сопротивления ее движению учитываются в соответствии с моделью Фохта.

Для вывода уравнения движения ленты рассматривается представленный на рис. 1 элемент ленты длиной  $dx$ . Этот элемент характеризуется линейной плотностью  $\rho$ , модулем упругости  $E$ , коэффициентом внутреннего трения  $\eta$ , сопротивлением  $W$ . К поперечным сечениям элемента приложена сила  $F$ . Скорость перемещения сечений элемента —  $v$ .

Если  $u(t)$  — величина смещения левой части элемента за время  $\Delta t$ , то к моменту времени  $t + \Delta t$  правая сторона элемента  $dx$  переместится на величину  $u + \Delta_x u$ . Приращение  $\Delta_x u$  равно

$$\Delta_x u = \frac{\partial u}{\partial x} dx. \quad (2)$$

Отсюда находится относительное удлинение

$$\varepsilon = \frac{\Delta_x u}{dx} = \frac{\partial u}{\partial x}. \quad (3)$$

Аналогично находится  $\Delta_x F$ :

$$\Delta_x F = \frac{\partial F}{\partial x} dx. \quad (4)$$

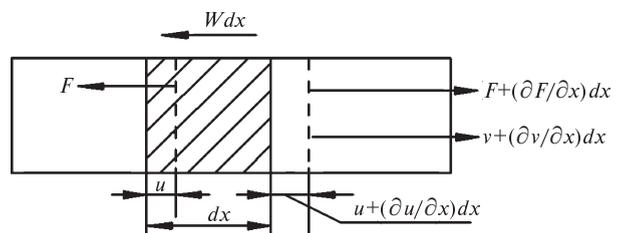


Рис. 1. Модель элемента с распределенными параметрами

С учетом (1) получается уравнение

$$F = iBE \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{iB\eta}{\omega} \frac{\partial^2 u}{\partial x \partial t}, \quad (5)$$

где  $i$  — толщина рабочего слоя ленты;  $B$  — ширина ленты.

Из (5) находится

$$\frac{\partial F}{\partial x} = iBE \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{iB\eta}{\omega} \frac{\partial^3 u}{\partial x^2 \partial t}. \quad (6)$$

В соответствии с рис. 1 получается

$$-F + \left( F + \frac{\partial F}{\partial x} dx \right) = \rho dx \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + W dx. \quad (7)$$

Откуда следует

$$\frac{\partial F}{\partial x} = \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + W. \quad (8)$$

Из (6) и (8) получается уравнение

$$\frac{iBE}{\rho} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{iB\eta}{\rho\omega} \frac{\partial^3 u}{\partial x^2 \partial t} = \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + \frac{W}{\rho}. \quad (9)$$

Исследования динамических процессов в ленточных конвейерах могут быть выполнены путем замены распределенной массы ленты, груза и вращающихся частей роlikоопор определенным числом сосредоточенных масс, связанных невесомыми упругими и демпфирующими звеньями.

Разбив контур конвейера на  $n$  участков одинаковой длины  $l$ , пренебрегая проскальзыванием ленты на барабанах и роlikоопорах, приводя действующую на ленту силу сопротивления к выбранным сосредоточенным массам, путем аппроксимации частных производных по координате получим систему нелинейных дифференциальных уравнений второго порядка:

$$\frac{d^2 u_i}{dt^2} = \frac{1}{m_i} \left( -C(2u_i - u_{i+1} - u_{i-1}) - B(2\dot{u}_i - \dot{u}_{i+1} - \dot{u}_{i-1}) - W_i + F_i \right), \quad i = \overline{2, n-1}, \quad (10)$$

где  $C = \frac{iBE}{l}$  — коэффициент жесткости ленты;

$B = \frac{\eta Bi}{l}$  — коэффициент вязкости ленты; где  $u_i$ ,

$\dot{u}_i$ ,  $m_i$ ,  $F_i$ ,  $W_i$  — соответственно перемещение, скорость, масса, действующая сила и нелинейно зависящая от искомым переменных сила сопротивления на  $i$ -м участке ленты.

Необходимо отметить, что представление модели ленточного конвейера в виде ограниченно-го числа сосредоточенных масс, соединенных упругими звеньями, снижает точность решения по сравнению с моделью с распределенной массой. Однако этот метод обладает тем преимуществом, что позволяет исследовать процессы при неравномерной загрузке конвейера, разных скоростях и натяжениях по длине ленты конвейера. Очевидно, что повышение точности решения может быть достигнуто путем увеличения числа моделируемых масс.

В большинстве работ [8, 9 и др.] для участка длиной  $l$  сопротивление движению ленты определяют по следующим формулам:

для участка верхней (загруженной) ветви

$$W_B = k_l g l \times$$

$$\times [(\rho_r + \rho_l + q'_p) \omega'_r \cos \beta \pm (\rho_r + \rho_l) \sin \beta]; \quad (11)$$

для участка нижней (незагруженной) ветви

$$W_H = k_l g l [(\rho_l + q''_p) \omega'_n \cos \beta \mp \rho_l \sin \beta], \quad (12)$$

где  $g$  — ускорение свободного падения;  $\rho_l$  — линейная плотность ленты (масса одного метра ленты);  $\rho_r$  — линейная плотность груза (масса груза на одном метре ленты);  $q'_p$  и  $q''_p$  — масса вращающихся частей роlikоопор, приведенная к одному метру длины ленты, соответственно верхней и нижней ветвей;  $\beta$  — угол наклона конвейера;  $k_l$  — коэффициент, учитывающий длину конвейера;  $\omega'_r$  и  $\omega'_n$  — коэффициенты сопротивления соответственно для верхней и нижней ветвей конвейера;  $l$  — длина участка ленты.

При расчете по формулам (11), (12) в функциях  $\cos \beta$  и  $\sin \beta$  перед  $\beta$  ставится знак «+» при движении вверх и «-» при движении ветви вниз.

Однако такой расчет недостаточно точен, не учитывает всех составляющих сил сопротивления движению ленты. Поэтому силу сопротивления движению ленты на участке длиной  $l$  найдем путем суммирования всех сил сопротивления движению, как распределенных, так и сосредоточенных, возникающих на данном участке ленты. Такой метод расчета позволяет учесть все факторы, от которых зависит сила сопротивления: натяжение ленты, ее тип, скорость, конструкцию роlikоопор, диаметр роlikов, температуру окружающей среды, угол установки конвейера и др.

Для участка длиной  $l$  верхней (загруженной) ветви сопротивление движению ленты

$$W = W_{\text{в}} + W_{\text{пб}} + W_{\text{нб}} + W_{\text{деф}} + W_{\text{вд}} + W_{\text{вр}}, \quad (13)$$

а для участка нижней (незагруженной) ветви

$$W = W_{\text{н}} + W_{\text{пб}} + W_{\text{нб}} + W_{\text{деф}} + W_{\text{вд}} + W_{\text{вр}}, \quad (14)$$

где  $W_{\text{нб}}$  — сила сопротивления движению ленты на направляющем (отклоняющем) барабане;  $W_{\text{пб}}$  — сила сопротивления движению ленты на приводном барабане;  $W_{\text{вр}}$  — сила сопротивления вращения роликов;  $W_{\text{деф}}$  — силы сопротивления от деформации ленты;  $W_{\text{вд}}$  — силы сопротивления от вдавливания роликов.

Сила сопротивления движению ленты на приводном барабане —  $W_{\text{пб}}$  — определяется по формуле

$$W_{\text{пб}} = k_{\text{пб}}(S_{\text{нб}} + S_{\text{сб}}), \quad (15)$$

где  $k_{\text{пб}}$  — коэффициент сопротивления на приводном барабане;  $S_{\text{нб}}$  и  $S_{\text{сб}}$  — натяжения соответственно в точках набегания и сбегания ленты с приводного барабана.

Сила сопротивления движению ленты на направляющем барабане —  $W_{\text{нб}}$  — определяется по формуле

$$W_{\text{нб}} = k_{\text{нб}}S_{\text{нб}}, \quad (16)$$

где  $k_{\text{нб}}$  — коэффициент сопротивления на отклоняющем барабане.

Сила сопротивления движению ленты от вращению роликов —  $W_{\text{вр}}$  — выражается так:

$$W_{\text{вр}} = (a + bv)k_{\theta} + C_o F_o + C_p F_p, \quad (17)$$

где  $F_p$  и  $F_o$  — радиальная и осевая нагрузки;  $C_o$  и  $C_p$  — коэффициенты осевой и радиальной нагрузок;  $a$ ,  $b$  — константы, зависящие от конструктивных особенностей роликов.

Сила сопротивления движению ленты от деформации ленты —  $W_{\text{деф}}$  — описывается формулой

$$W_{\text{деф}} = A \exp(-S / \delta), \quad (18)$$

где  $A$ ,  $\delta$  — константы, зависящие от конструктивных особенностей ленты и роликов;  $S$  — натяжения участка ленты.

Сила сопротивления движению ленты от вдавливания роликов —  $W_{\text{вд}}$  — определяется выражением

$$W_{\text{вд}} = k_{\text{вд}} C_{\text{вд}} (\rho_{\Gamma} + \rho_{\text{л}})'_p, \quad (19)$$

где  $k_{\text{вд}}$  — константа, зависящая от конструктивной особенности ленты;  $C_{\text{вд}}$  — константа вдавливания, зависящая от эксплуатационного режима работы конвейера;  $'_p$  — расстояние между роликоопорами конвейера.

Наряду с перечисленными, возникают силы сопротивления в местах загрузки, на криволинейных участках, на очистных, центрирующих, разгрузочных и других устройствах.

Таким образом, сила сопротивления движению ленты зависит от многих конструктивных и эксплуатационных параметров конвейера, в том числе и от линейной плотности груза на конвейере. Вследствие чего необходим учет распределения массы груза по длине конвейера в зависимости от поступающего на конвейер грузопотока и скорости движения ленты при различных режимах работы ленточного конвейера.

Под грузопотоком понимают количество груза, перемещаемого в единицу времени. Грузопоток, поступающий на конвейер, находится по формуле

$$Q_{\text{вх}}(t) = \frac{dm_{\text{вх}}(t)}{dt}, \quad (20)$$

где  $m_{\text{вх}}(t)$  — масса груза.

На участке загрузки, скорость которого  $v(t)$ , грузопоток формирует линейную плотность  $\rho(t)$ , определяемую по формуле

$$\rho(t)|_{x=0} = \frac{dm_{\text{вх}}(t)}{dt} \frac{1}{v(t)}, \quad (21)$$

где  $v(t)$  — скорость движения участка ленты конвейера.

Массоперенос по конвейеру описывается следующей системой уравнений:

$$\frac{dm_{\text{вх } i+1}(t)}{dt} = \frac{dm_{\text{вых } i}(t)}{dt} \quad \text{при } i = 2, 3, \dots, n-1; \quad (22)$$

$$\rho_{\text{вх } i+1}(t) = \frac{dm_{\text{вх } i+1}(t)}{dt} \frac{1}{v_{i+1}(t)} \quad \text{при } i = 1, 2, \dots, n; \quad (23)$$

$$\frac{dm_{\text{вых } i}(t)}{dt} = \rho_{\text{вых } i}(t)v_i(t) \quad \text{при } i = 1, 2, \dots, n. \quad (24)$$

Для  $(i + 1)$ -го участка  $\rho_{\text{вх } i+1}(t)$  — входная и  $\rho_{\text{вых } i+1}(t)$  — выходная плотности; они связаны следующими соотношениями:

$$\rho_{\text{вых } i+1}(t) = \rho_{\text{вх } i+1}(t - \tau(t)); \quad (25)$$

$$\int_{t-\tau(t)}^t v_{i+1}(t) dt = l, \quad (26)$$

где  $\tau(t)$  — переменное запаздывание;  $l$  — длина участка конвейера;  $v_{i+1}(t)$  — скорость на этом участке.

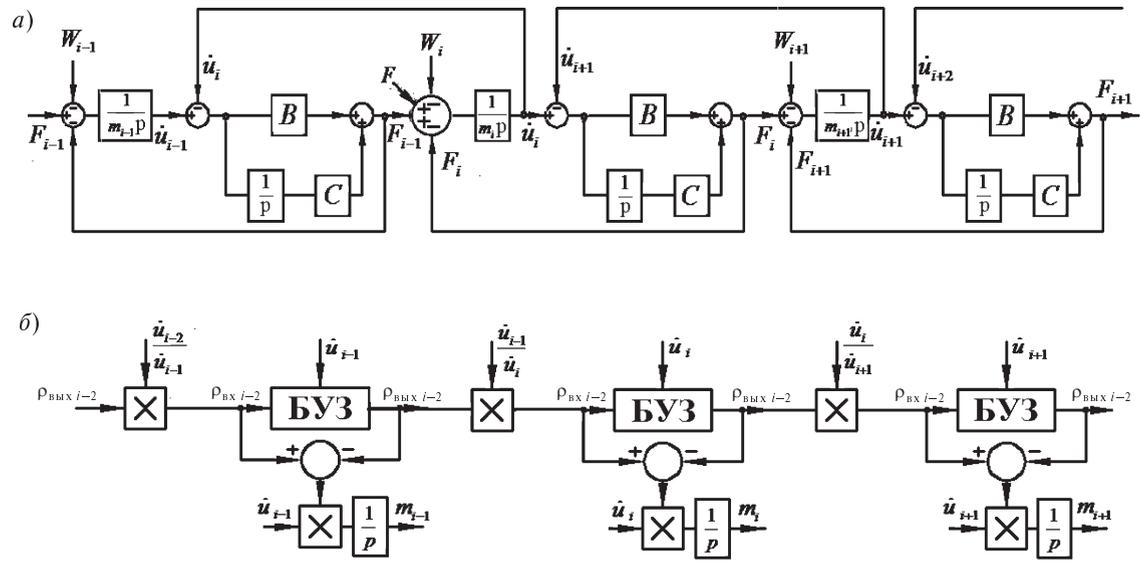


Рис. 2. Фрагмент имитационной модели ленточного конвейера:

а — структурная схема модели ленточного конвейера; б — структурная схема модели переноса груза

Масса груза на участке ленты определяются следующим образом:

$$\begin{aligned}
 m_i(t) &= \int_0^t v_i(t) [\rho_{вхi}(t) - \rho_{выхi}(t)] dt = \\
 &= \int_0^t v_i(t) [\rho_{вхi}(t) - \rho_{выхi}(t - \tau)] dt, \quad (27)
 \end{aligned}$$

С учетом этого получим структурную схему модели ленточного конвейера, фрагмент которой представлен на рис. 2.

На рис. 2, а изображена структурная схема модели ленточного конвейера, учитывающая упруго-вязкие свойства ленты. Сила сопротивления движению ленты на участке находится путем суммирования всех сил сопротивления

движению, как распределенных, так и сосредоточенных, возникающих на данном участке при движении ленты.

На рис. 2, б представлена структурная схема модели переноса груза, где БУЗ — блок управляемого транспортного запаздывания, на управляющий вход которого подается переменная скорость ленты  $v(t)$ , а на информационный вход подается плотность груза  $\rho(t)$ . Формируемые переменные массы учитываются в структурной схеме модели ленточного конвейера [10].

При моделировании процесса пуска ленточного конвейера с помощью имитационной модели, построенной в программной среде Matlab/Simulink, были получены графики загрузки участков ленточного конвейера — от  $m_1$  до  $m_5$ ,

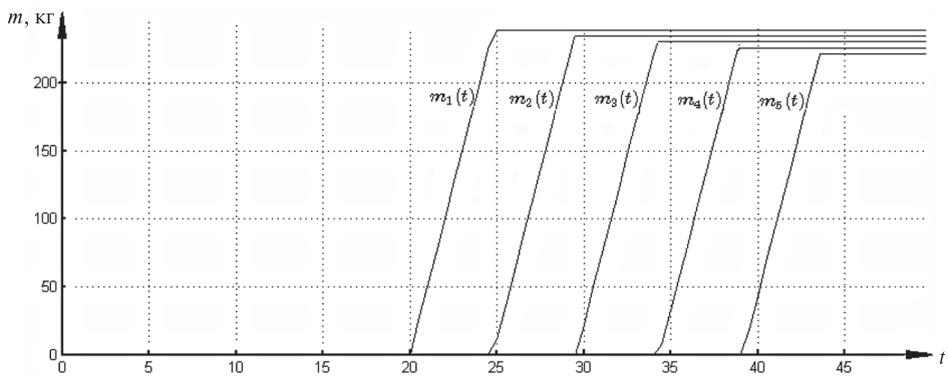


Рис. 3. График загрузки участков ленточного конвейера

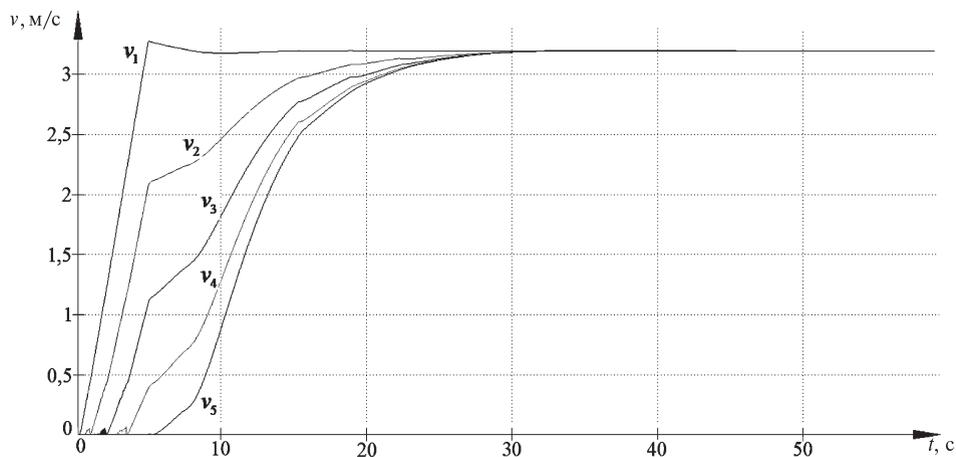


Рис. 4. График скоростей участков ленточного конвейера при пуске

а также скоростей участков ленточного конвейера при пуске — от  $v_1$  до  $v_5$ , представленные соответственно на рис. 3 и 4.

Из рис. 3. видно, что масса груза, поступающая на ленточный конвейер, перемещается вдоль конвейера, что доказывает соответствие полученных результатов реальным физическим процессам.

Из рис. 4 видно, что при включении привода ленточного конвейера движение удаленных участков ленты начинается лишь спустя некоторое время, что объясняется временем прохождения волны

деформации по всей длине конвейера. Данная имитационная модель позволяет моделировать процесс пуска, торможения конвейера, вычислять распределения натяжения по всей длине ленты при различных режимах работы конвейера.

Предложенная имитационная модель ленточного конвейера отражает все основные его свойства и может быть использована при разработке и наладке системы автоматического управления.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Черемушкина, М.С. Синтез алгоритмов управления многодвигательными электроприводом конвейерного транспорта с использованием полупроводниковых преобразователей [Текст]: Дисс. ... канд. техн. наук / М.С. Черемушкина.— СПб., 2009.
2. Рыжикова, А.Г. Обоснование способов обеспечения устойчивой работы двухбарабанного привода мощных ленточных конвейеров для горной промышленности [Текст]: Дисс. ... канд. техн. наук / А.Г. Рыжикова.— М., 1985.
3. Дмитриева, В.В. Разработка и исследование системы автоматической стабилизации погонной нагрузки магистрального конвейера [Текст]: Дисс. ... канд. техн. наук / В.В. Дмитриева.— М., 2005.
4. Чуквумаоби, О.Ф. Моделирование конвейерной подъемной установки и системы управления процессом транспортирования [Текст]: Дисс. ... канд. техн. наук / О.Ф. Чуквумаоби.— Харьков, 1984.
5. Биличенко Н.Я. Эксплуатационные режимы ленточных конвейеров [Текст] / Н.Я. Биличенко.— Киев: Государственное издательство технической литературы УССР, 1964.— 261 с.
6. Панкратов, С.А. Динамика машин для открытых горных и земляных работ [Текст] / С.А. Панкратов.— М.: Машиностроение, 1967.— 447 с.
7. Подпорин, Т.Ф. Моделирование переходных режимов ленточных конвейеров [Текст]: Учеб. пособие / Т.Ф. Подпорин / Кузбас. гос. техн. ун-т.— Кемерово, 2002.— ч. 1: Моделирование процессов изменения натяжения ленты при загрузке и разгрузке конвейеров.— 164 с.
8. Галкин, В.И. Современная теория ленточных конвейеров горных предприятий [Текст] / В.И. Галкин, В.Г. Дмитриев, В.П. Дьяченко [и др.].— М.: Изд-во МГГУ, 2005.— 543 с.
9. Ромакин, Н.Е. Машины непрерывного транспорта [Текст]: Учеб. пособие для вузов / Н.Е. Ромакин.— М.: Издат. центр «Академия», 2008.— 432 с.
10. Кожубаев, Ю.Н. Моделирование поточно-транспортной системы ленточных конвейеров [Текст] / Ю.Н. Кожубаев, О.В. Прокофьев, В.И. Филимонов // Научно-технические ведомости СПбГПУ.— 2010. № 3(106).— 296 с.

УДК 624.078.45

А.Ю. Шлепетинский, К.П. Манжула

## КОЭФФИЦИЕНТЫ ИНТЕНСИВНОСТИ НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ РОСТЕ ТРЕЩИНЫ ОТ НЕПРОВАРА В ТАВРОВОМ СВАРНОМ СОЕДИНЕНИИ, НАГРУЖЕННОМ ПОПЕРЕЧНОЙ СИЛОЙ

Большинство сварных элементов металлоконструкций машин и сооружений, имеющих конструктивно-технологические непровары, например проушины с неполным проплавлением корня шва, нагружены силой и моментом, что вызывает сложное напряженно-деформированное состояние (НДС) в вершине непровара. Такое нагружение можно представлять в виде разложения на растягивающие, сдвигающие силы и изгибающий момент. Известны по публикациям [1, 2 и др.] расчетные зависимости и численные исследования для оценки НДС в вершине острого непровара при растяжении и изгибе крестового или таврового сварного соединения, чего нельзя сказать о сдвиге. В предлагаемой статье рассматривается тавровое соединение с острым непроваром, нагруженное поперечной силой.

Для определения коэффициента интенсивности напряжений (КИН) в вершине растущей трещины от трещиноподобного непровара строилась плоская модель в среде конечно-элементного моделирования ANSYS®. Сдвигающая сила прикладывалась в узлах элементов по линии I—I (рис. 1) таким образом, чтобы касательное напряжение в сечении равнялось  $\tau_{xy} = 100$  МПа. Предварительные расчеты показали: влияние изгибаю-

щего момента на линии непровара на плече  $K_B$  (рис. 1, а) незначительно. Трещиноподобный непровар моделировался математическим разрезом, т. е. расстояние между берегами непровара равнялось нулю. Взаимодействие берегов учитывалось введением особых контактных элементов CONTACT12 с коэффициентом трения, равным 0,15. В вершине трещины строились сингулярные элементы размером 0,01 мм. На нижней линии горизонтального листа задавались ограничения по перемещениям во всех направлениях.

Развитие трещины от непровара моделировалось дискретными шагами, размером 0,1–2,0 мм. Длина шага ограничивалась размером пластической зоны в направлении роста трещины от вершины. При этом задача ставилась в упругой постановке ( $E = 2,1 \cdot 10^5$  МПа,  $\mu = 0,3$ ), а размер пластической зоны контролировался достижением предела текучести для стали 09Г2С  $\sigma_T = 350$  МПа.

На каждом шаге определялись коэффициенты интенсивности напряжений  $K_I$  и  $K_{II}$  и угол в направлении дальнейшего роста трещины исходя из условия нормали к максимальным растягивающим напряжениям в полярных координатах [3]. Затем модель перестраивалась с учетом

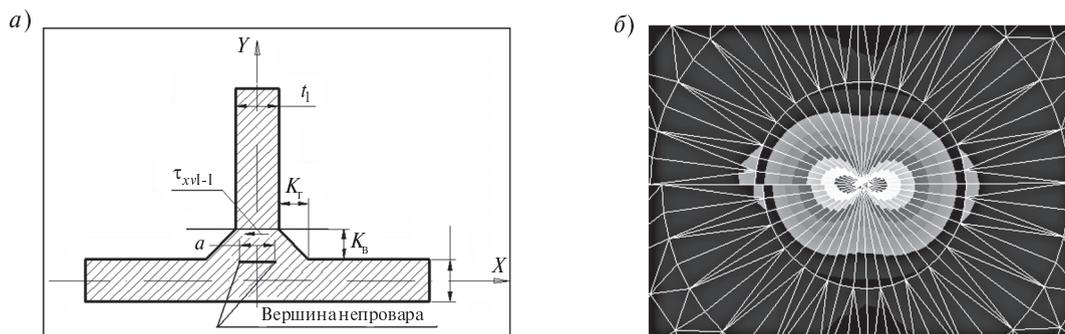


Рис. 1. Расчетная схема таврового соединения (а);  
вершина непровара в деформированном состоянии под действием сдвигающей нагрузки (б)

приращения длины трещины. Во всех опытах на первом шаге нагружения (от исходного непровара)  $K_I \ll K_{II}$ , но на последующих шагах при повороте трещины (см. рис. 4) скорость изменения  $K_I$  больше, чем  $K_{II}$ , и в определенный момент  $K_I$  может достигать значений  $K_{II}$ . Таким образом, для описания напряженно-деформированного состояния в вершине трещины необходимо использовать характеристику  $K_{eq}$ , учитывающую совместное действие  $K_I$  и  $K_{II}$ . В работе [4] для описания совместного действия  $K_I$  и  $K_{II}$  используется зависимость Ричарда (Н.А. Richard) со значениями коэффициентов  $\alpha_1 = 1,155$  и  $\alpha_2 = 0$ :

$$\Delta K_{eq} = \frac{\Delta K_I}{2} + \frac{1}{2} \sqrt{\Delta K_I^2 + 4(\alpha_1 \Delta K_{II})^2 + 4(\alpha_2 \Delta K_{III})^2}. \quad (1)$$

В работе [5] при описании опытов изгиба стальных образцов с начальной трещиной и преобладающей нагрузкой по  $K_I$  (начальное отношение  $K_{II}/K_I = 0,262$ ) до преобладающей нагрузки по  $K_{II}$  (начальное отношение  $K_{II}/K_I = 16,725$ ) для  $\Delta K_{eq}$  используется зависимость Танаки

$$\Delta K_{eq} = (K_I^4 + 8K_{II}^4)^{0,25}. \quad (2)$$

Обобщенная формула для  $\Delta K_{eq}$  предложена в работе Радаи и др. [6] для сварных соединений при многоосном нагружении:

$$K_{eq} = \sqrt{K_I^2 + \beta K_{II}^2 + \gamma K_{III}^2}, \quad (3)$$

где коэффициенты по разным источникам представлены в табл. 1

Для сравнения в табл. 4 приведены значения  $K_{eq}$ , рассчитанные по формулам (1), (2), (3). Для оценки  $K_{eq}$  в качестве базовой зависимости от влияния геометрических параметров в работе принята зависимость (3) с коэффициентом по Ирвину (Irwin)), учитывающая равное влияние  $K_I$  и  $K_{II}$ .

В результате пошагового продвижения трещины до критического значения, равного 0,6–0,7 от максимальной длины трещины [7], в каждом опыте определялась функция зависимости коэффициента интенсивности напряжений  $K_{eq}$  от относительной длины трещины при определенных геометрических параметрах и значении нагрузки, принятых в данном численном моделировании

$$K_{eq} = f(a'/w), \quad (4)$$

где  $a'$  — длина приращения трещины;

$w = \frac{K_I + (t_1 - a)/2}{\sqrt{2}}$  — перпендикуляр, опущенный из вершины непровара к границе (гипотенузе) шва.

Для оценки влияния геометрии соединения с непроваром на изменение КИН были выделены наиболее существенные геометрические параметры соединения с диапазоном варьирования, типичным для металлоконструкций транспортных машин, судов, строительных конструкций (табл. 2). Каждому параметру присваивалось кодированное значение  $x$  таким образом, чтобы оно принимало значения  $-1$  и  $+1$  в нижнем и верхнем пределе значений параметра относительно базового (нулевого) значения параметра (второй столбец табл. 2).

Принятое обозначение геометрических параметров представлено на рис. 1, а. Отношения  $K_I/K_{II} = 1$  и  $t_1/t_2 = 1$  постоянны.

По методике планирования многофакторного эксперимента [8] был составлен план (табл. 3), предусматривающий проведение серии из 15 опытов. Общее число опытов  $N = N_c + N_6 + 1 = 2^k + 2k + 1$ , где  $N_c$  — число опытов полного факторного эксперимента,  $N_6$  — число опытов по средним значениям каждого фактора («звездные точки»), 1 — один опыт с базовыми значениями факторов,  $k = 3$  — число параметров.

Таблица 1

Значения коэффициентов уравнения (3) по разным источникам

Источник	Коэффициент $\beta$	Коэффициент $\gamma$
Irwin	1,0	1,39
Tanaka	1,45	1,74
Radaj et al.	1,82	1,16 (1,34)

Таблица 2

Рассматриваемые значения геометрических параметров сварного соединения

Параметр	Кодированное значение	Рассматриваемые значения			
		Базовое значение параметра (0)	Интервал варьирования	Нижний предел (-1)	Верхний предел (+1)
$K_i/t_1$	$x_1 = 3,33 \frac{K_r}{t_1} - 2,33$	0,7	0,3	0,4	1,0
$a/t_1$	$x_2 = 3,33 \frac{a}{t_1} - 2,33$	0,7	0,3	0,4	1,0
$t_1, \text{ мм}$	$x_3 = 0,067t_1 - 1,67$	25	15	10	40

Таблица 3

Матрица планирования многофакторного эксперимента

Номер опыта	Матрица планирования										Расположение точек
	$z_0$	$z_1$	$z_2$	$z_3$	$z_{12}$	$z_{13}$	$z_{23}$	$z_{11}$	$z_{22}$	$z_{33}$	
	$x_0$	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_1x_2$	$x_1x_3$	$x_2x_3$	$x_1^2-a$	$x_2^2-a$	$x_3^2-a$	
1	+1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	$1-a$	$1-a$	$1-a$	Точки полного факторного эксперимента $N_c = 2^k$
2	+1	+1	-1	-1	-1	-1	+1	$1-a$	$1-a$	$1-a$	
3	+1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	$1-a$	$1-a$	$1-a$	
4	+1	+1	+1	-1	+1	-1	-1	$1-a$	$1-a$	$1-a$	
5	+1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	$1-a$	$1-a$	$1-a$	
6	+1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	$1-a$	$1-a$	$1-a$	
7	+1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	$1-a$	$1-a$	$1-a$	
8	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	$1-a$	$1-a$	$1-a$	
9	+1	$+\alpha$	0	0	0	0	0	$\alpha^2-a$	$-a$	$-a$	«Звездные точки» $N_s = 2k$
10	+1	$-\alpha$	0	0	0	0	0	$\alpha^2-a$	$-a$	$-a$	
11	+1	0	$+\alpha$	0	0	0	0	$-a$	$\alpha^2-a$	$-a$	
12	+1	0	$-\alpha$	0	0	0	0	$-a$	$\alpha^2-a$	$-a$	
13	+1	0	0	$+\alpha$	0	0	0	$-a$	$-a$	$\alpha^2-a$	
14	+1	0	0	$-\alpha$	0	0	0	$-a$	$-a$	$\alpha^2-a$	
15	+1	0	0	0	0	0	0	$-a$	$-a$	$-a$	Точка в центре плана

В табл. 2 и 3 знаки — и + обозначают принимаемые в каждом опыте соответственно нижний или верхний пределы рассматриваемых значений параметров, 0 — базовое значение. Например, кодированное значение  $x_2 = -1$  означает, что в этом опыте параметр  $a/t_1 = 0,4$ . Для учета влияния нелинейности между верхним и нижним пределами значений параметров был построен композици-

онный план с так называемыми «звездными» точками (модель второго порядка в терминологии [8]) и расстоянием  $\pm\alpha$  по каждому параметру от центра плана (9–14 опыты, табл. 2). В качестве «звездных» точек приняты средние (базовые) значения  $\alpha = 1$  в сочетании с верхним и нижним пределами. В центре плана (опыт 15, табл. 2) берутся базовые значения по трем параметрам.

В качестве примера в табл. 4 приведены результаты моделирования 12-го опыта из плана многофакторного эксперимента, представленного в табл. 3.

Аналогично таблице 4 были рассчитаны все 15 уравнений для  $K_{eq}$ , описывающих развитие трещины при определенных вариантах геометрии соединения. С учетом варьирования геометрических параметров соединения функция для  $K_{eq}$  приобретает вид

$$K_{eq} = \varphi \left( \frac{K_r}{t_1}, \frac{a}{t_1}, t_1 \right) f \left( \frac{a'}{w} \right). \quad (5)$$

Данная функция позволяет учитывать влияние наиболее существенных геометрических характеристик таврового сварного соединения на развитие трещины от непровара.

В соответствии с используемой методикой планирования второго порядка уравнение (5) представляется в виде регрессии

$$K_{eq} = b_0 + \sum_{j=1}^k b_j x_j + \sum_{\substack{j,u=1 \\ j < u}}^k b_{ju} x_j x_u + \sum_{j=1}^k b_{jj} (x_j^2 - a), \quad (6)$$

где  $b_0, b_j, b_{ju}, b_{jj}$  — коэффициенты уравнения регрессии, определяемые ниже;  $x$  — кодированное значение параметра;  $j, u$  — индексы, определяющие, какой именно параметр учитывается;  $j, ju, jj$  — индекс, указывающий на соответствующий параметр или группу параметров;  $a = \frac{1}{N} (2^k + 2\alpha^2) = 0,6667$  ( $N = 15$  — число опытов;  $k = 3$  — число параметров;  $\alpha = 1$  — значение «звездной» точки).

Коэффициенты уравнения (6) представляют собой полиномы от относительной величины приращения трещины, и в общем виде их можно записать так:

$$b_q = \beta_{0q} + \beta_{1q} \left( \frac{a'}{w} \right) + \beta_{2q} \left( \frac{a'}{w} \right)^2 + \beta_{3q} \left( \frac{a'}{w} \right)^3 + \beta_{4q} \left( \frac{a'}{w} \right)^4, \quad (7)$$

где  $\beta_{pq}$  ( $p = 0, 1, \dots, 4$ ) — коэффициент перед соответствующей степенью множителя  $(a'/w)$ . Коэффициенты определялись по формулам

$$b_0 = \frac{\sum_{i=1}^N f_i(a'/w)}{N}, \quad b_q = \frac{\sum_{i=1}^N z_{iq} f_i(a'/w)}{\sum_{i=1}^N z_{iq}^2}, \quad \text{где } z_{iq} —$$

обозначение функции в  $q$ -м столбце матрицы (см. табл. 3).

Для получения искомого вида функции (5) коэффициенты  $b_q$  и раскодированные в соответствии с табл. 2 факторы  $x_i$  подставляли в уравнение (6). После преобразования слагаемых (сложение коэффициентов  $b_q$  перед одинаковыми параметрами) для упрощения формулы целесообразно перейти на другие обозначения:  $c_m$  — коэффициент перед слагаемым при  $m = 0, \dots, 4$ , определяемый по уравнению (8) и табл. 5:

$$c_m = \beta'_{0m} + \beta'_{1m} \left( \frac{a'}{w} \right) + \beta'_{2m} \left( \frac{a'}{w} \right)^2 + \beta'_{3m} \left( \frac{a'}{w} \right)^3 + \beta'_{4m} \left( \frac{a'}{w} \right)^4. \quad (8)$$

Например,

$$c_{k2} = 8,326 + 6,432(a'/w) + 185,519(a'/w)^2 - 636,065(a'/w)^3 + 559,884(a'/w)^4.$$

Таким образом, уравнение, описывающее влияние геометрических параметров на значение  $K_{eq}$  по мере роста трещины от трещиноподобного непровара в тавровом соединении, выглядит следующим образом:

$$K_{eq} = c_0 + \frac{K_r}{t_1} c_k + \frac{a}{t_1} c_a + t_1 c_t + \left( \frac{K_r}{t_1} \right)^2 c_{k2} + \left( \frac{a}{t_1} \right)^2 c_{a2} + (t_1)^2 c_{t2} + \frac{K_r}{t_1} \frac{a}{t_1} c_{ka} + \frac{K_r}{t_1} t_1 c_{kt} + \frac{a}{t_1} t_1 c_{at}. \quad (9)$$

Коэффициенты табл. 5 получены для рассматриваемого в табл. 2 диапазона параметров при нагрузке в сечении I—I  $\tau_{xyI-I} = 100$  МПа. Значение КИН, получаемое по формуле (9) и табл. 5, расходится со значением КИН, полученным при численном моделировании, не более 5%. В единичных случаях наблюдалось отклонение до 10%. Как правило, расхождения вызваны округлениями.

При анализе графиков на рис. 2, построенных по зависимости (9) для случая  $a'/w = 0$ , видно влияние размера исходного непровара на значение эквивалентного КИН, превалирующее по сравнению с влиянием размера катета шва (поверхности по оси  $a/t_1$  возрастают более стреми-

Таблица 4

Результаты моделирования развития трещины с геометрией соединения, соответствующей опыту №12 по табл. 3, при поперечной нагрузке  $\tau_{xy1} = 100$  МПа

Шаг трещины/длина трещины $a'$ , мм	Угол $\theta$ прираще-ния трещины от оси $x$ , град	Координаты вершины трещины, мм		$K_I$ , МПа $\sqrt{м}$	$K_{II}$ , МПа $\sqrt{м}$	$K_{eq}$ по формулам					Относи-тельная длина трещины $a'/w$	
		$x$	$y$			(1)	(2)	<Irwin>	<Tanaka>	<Radaj и др.>		$K_{II}/K_I$
Исходный неупруг	75,09	5	12,5	1,029	4,993	6,304	8,398	5,098	6,100	6,814	4,851	0
1	59,68	5,284	13,563	2,517	5,987	8,287	10,079	6,495	7,636	8,460	2,379	0,06
2	58,00	5,840	14,512	3,620	5,930	8,894	10,016	6,948	8,006	8,781	1,638	0,12
3	53,26	6,423	15,445	4,351	6,176	9,633	10,466	7,555	8,616	9,400	1,419	0,19
4	54,77	7,081	16,326	5,197	6,566	10,615	11,176	8,374	9,462	10,270	1,263	0,25
5	46,37	7,716	17,224	5,952	7,144	11,748	12,192	9,299	10,461	11,328	1,200	0,31
6	51,60	8,476	18,020	6,963	7,744	13,080	13,282	10,414	11,638	12,555	1,112	0,37
7	48,50	9,159	18,882	7,720	8,693	14,617	14,896	11,626	13,007	14,040	1,126	0,44
8	42,95	9,889	19,705	8,852	9,563	16,325	16,440	13,031	14,525	15,646	1,080	0,50
9	51,28	10,694	20,454	10,107	10,521	18,214	18,147	14,589	16,207	17,424	1,041	0,56
10	42,36	11,383	21,312	11,099	12,080	20,565	20,754	16,405	18,297	19,717	1,088	0,62
11	—	12,196	22,053	13,125	13,177	23,137	22,813	18,598	20,592	22,097	1,004	0,68

№ опыта — 12, шифр опыта — 0—0:  $K_I/t_1 = 0,7$ ;  $a'/t_1 = 0,4$ ;  $w = 17,68$  мм.

Зависимость  $K_{eq} = f(a'/w)$  с коэффициентами по формуле (3) получена в виде  $K_{eq} = 5,24 + 18(a'/w) - 41,36(a'/w)^2 + 97,97(a'/w)^3 - 49,4(a'/w)^4$ . Стандартное отклонение равно 0,139.

Таблица 5

Значения коэффициентов уравнения (8)

$c_m$	$\beta'_0$	$\beta'_1$	$\beta'_2$	$\beta'_3$	$\beta'_4$
$c_0$	5,537	-61,617	455,32	-1079,41	861,75
$c_k$	-11,59	40,245	-433,350	1225,833	-1047,666
$c_a$	3,885	154,898	-841,457	1706,238	-1234,795
$c_i$	0,213	2,181	-13,333	30,776	-22,184
$c_{k2}$	8,326	6,432	185,519	-636,065	559,884
$c_{a2}$	1,939	-40,475	367,6	-860,839	651,257
$c_{i2}$	-0,00041	-0,01683	0,13149	-0,3209	0,24651
$c_{ka}$	-5,42	-101,908	336,662	-539,48	369,707
$c_{ki}$	-0,216	-1,764	9,62	-19,878	13,605
$c_{ai}$	0,196	1,097	-5,229	10,296	-6,926

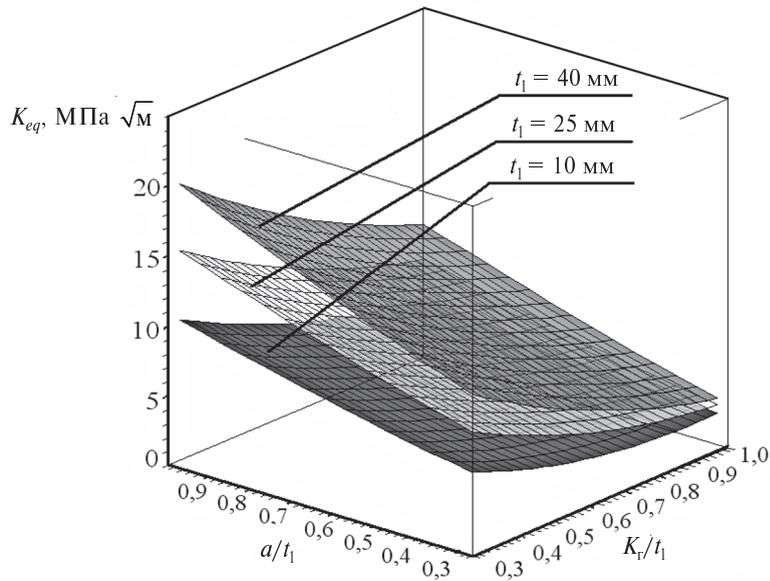


Рис. 2. Зависимости  $K_{eq}$  от рассматриваемых геометрических параметров при нагружения исходного непровара нагрузкой  $\tau_{xyI-I} = 100$  МПа

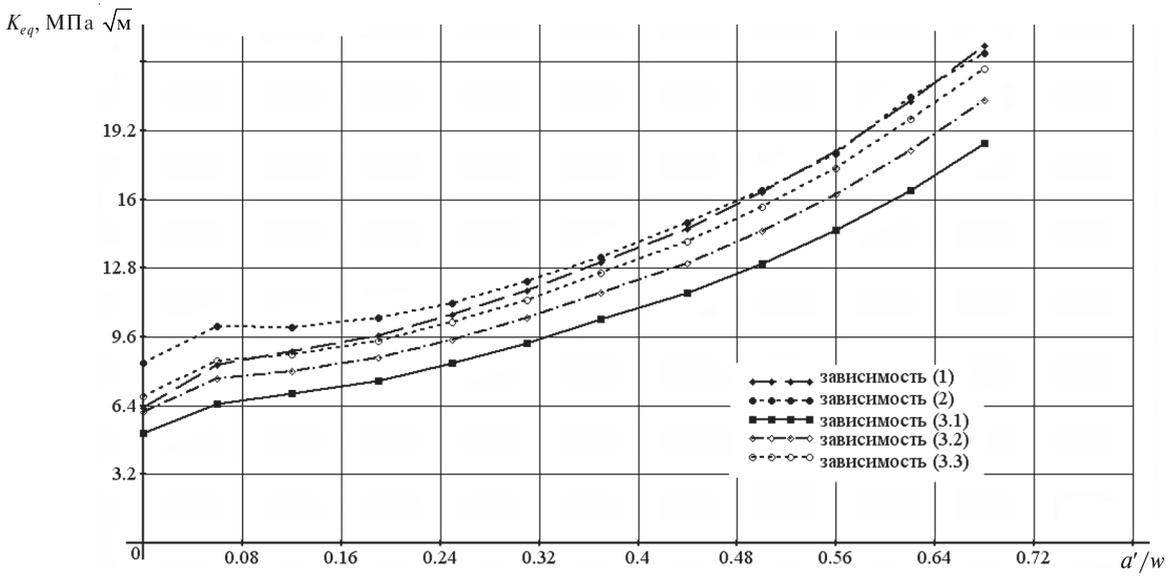


Рис. 3. Графики зависимости  $K_{eq} = f(a'/w)$  по различным формулам для геометрии опыта №12

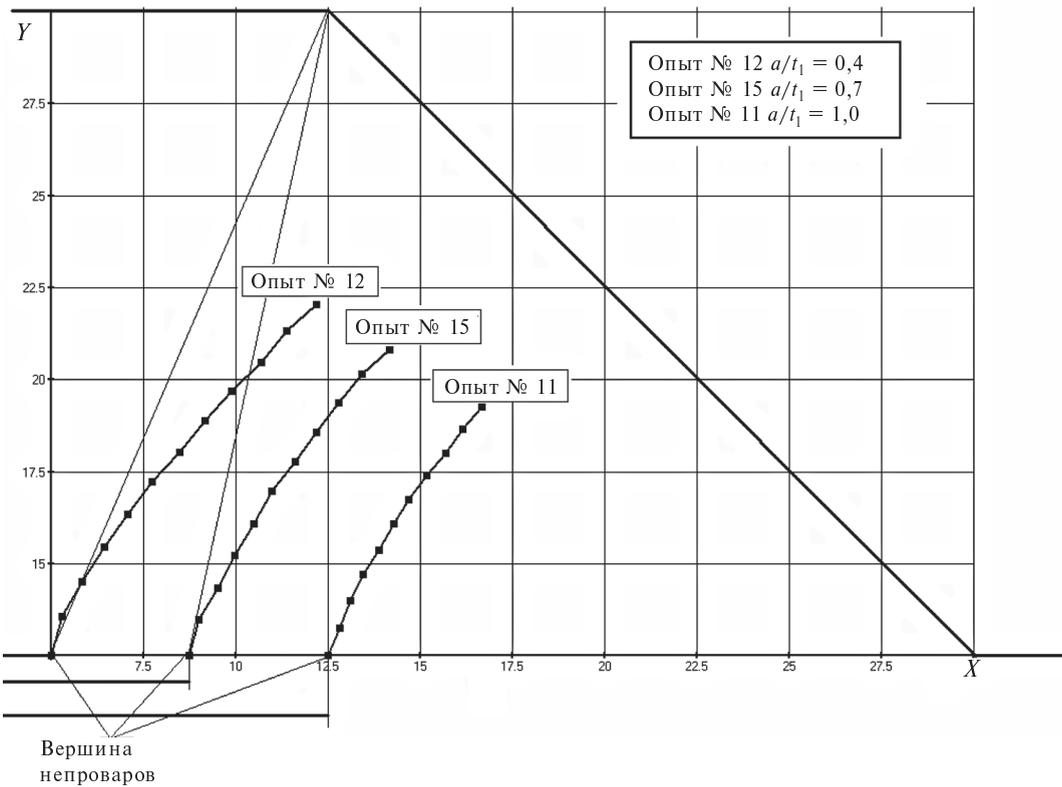


Рис. 4. Траектории смоделированных трещин при разных исходных размерах непроваров и одинаковой геометрии соединения



тельно, чем по оси  $K_T/t_1$  в одинаковых относительных диапазонах).

Оценивая выражения (1), (2), а также (3) с разными значениями коэффициентов для определения эквивалентного КИН на примере опыта №12 (табл. 4 и рис. 3), можно говорить о примерно одинаковом характере выражений по мере роста трещины. Значения  $K_{eq}$ , получаемые по используемой в исследовании зависимости (3), меньше значений  $K_{eq}$ , полученных по другим зависимостям, в среднем на 3–4 МПа  $\sqrt{м}$ .

На рис. 4 представлены траектории трещин при одинаковых толщинах листов и размерах швов, но при разных начальных несплошностях

( $a/t_1 = 0,4; 0,7; 1,0$ ). При действии поперечной силы на первых шагах трещина значительно разворачивается от исходного несплошности (на угол 70–80°), но при дальнейшем росте угол плавно уменьшается.

Таким образом, полученную зависимость (9) и рассчитанные значения коэффициентов (табл. 5) рекомендуется использовать для оценки долговечности соединений при действии поперечной силы в рассмотренном диапазоне варьирования параметров. По результатам исследования можно сделать вывод, что относительный размер исходного несплошности более существенно влияет на КИН, чем относительный размер катета шва.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Мураками, Ю.** Справочник по коэффициентам интенсивности напряжений: В 2-х томах [Текст] / Под ред. Ю. Мураками.—М.: Мир, 1990.— 1016 с.
2. **Шлепетинский, А.Ю.** Коэффициенты интенсивности напряжений в крестовом сварном соединении с несплошностью [Текст] / А.Ю. Шлепетинский, К.П. Манжула // Научно-технические ведомости СПбГПУ.— 2010. № 4(110).— С. 137–146.
3. **Пестриков, В.М.** Механика разрушения твердых тел: курс лекций [Текст] / В.М. Пестриков, Е.М. Морозов.— СПб.: Профессия, 2002.— 320 с.
4. **Martinsson, J.** Automatic 3D crack propagation in complex welded structures [Текст] / J. Martinsson / The 15th European Conference of Fracture.— 2004
5. **Qiun, J.** Fatigue crack growth under mixed-mode I and II loading [Текст] / J. Qiun, A. Fatemi // Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures.— 1996. Vol. 19, № 10.— С. 1277–1284.
6. **Radaj, D.** Local fatigue strength parameters for welded joints based on strain energy density with inclusion of small-size notches [Текст] / D. Radaj, F. Berto, P. Lazzarin // Engineering Fracture Mechanics.— 2009. Vol. 76.— С. 1109–1130.
7. Механика разрушения и прочность металлов [Текст]: Справочное пособие / Под общ. ред. Панасюка В.В.— Киев: Наук. думка, 1988–1990. Т. 4.: Усталость и циклическая трещиностойкость конструкционных материалов / Романив О.Н., Ярема С.Я., Никифорчин Г.Н. и др.— 1990.— 680 с.
8. **Плескунин, В.И.** Теоретические основы организации и анализа выборочных данных в эксперименте [Текст] / В.И. Плескунин, Е.Д. Вороница.— Л.: Изд-во Ленинградского университета, 1979.— 232 с.

УДК 631.3.004.4

*М.Б. Латышенко А.В. Шемякин,  
С.П. Соловьёва, Н.М. Морозова*

## ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООВОГО БАЛАНСА СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ТЕХНИКИ ПРИ ЕЕ ХРАНЕНИИ

Анализ условий хранения сельскохозяйственной техники показал, что в нерабочий период она должна быть защищена от атмосферных осадков в виде дождя, снега, конденсата, стимулирующих интенсивное развитие коррозионных процессов, и воздействия солнечных лучей,

под действием которых проходит старение полимерных материалов.

Защита от атмосферных осадков и прямых солнечных лучей возможна за счет применения специальных чехлов, а исключение конденсации влаги на поверхности машины — за счет прида-

ния чехлам специальных свойств, которые уравняли бы скорость охлаждения поверхности машины и окружающего воздуха, т. е. чехлы выполняли бы роль теплового экрана.

Сельскохозяйственная машина, находящаяся на открытой площадке, поглощает из окружающей среды или отдает ей некоторое количество тепла.

При использовании в качестве укрытия для машины теплового экрана он будет также поглощать или отдавать некоторое количество теплоты.

Количество тепла  $Q$ , поглощенное поверхностью машины или теплового экрана, складывается из тепла  $Q_E$ , поступившего от солнечной радиации, тепла  $Q_S$ , полученного при лучисто-конвективном теплообмене от окружающей среды, с которой соприкасается поверхность, а также тепла  $Q_K$ , поступившего вследствие конденсации влаги на поверхность машины, и может быть определено выражением [1]

$$Q = Q_E + Q_S + Q_K. \quad (1)$$

Для исключения конденсации влаги на поверхности машины скорость изменения температуры машины должна быть близка к скорости изменения температуры воздуха, т. е. сохранять установившееся тепловое состояние.

Теплообмен машины с окружающей средой должен быть ограничен до величины, не допускающей возникновения предельных перепадов температур.

Количество теплоты, поглощаемое поверхностью машины или теплового экрана и расходуемое на изменение температуры, является переменной величиной, и поэтому для отрезка времени  $dt$  условие теплового баланса определяется выражением

$$q_E dt + q_S dt + q_K dt - \gamma G d\Delta T = 0, \quad (2)$$

где  $q_E$ ,  $q_S$ ,  $q_K$  — количества теплоты, Вт, поступившей за единицу времени к машине или теплового экрану соответственно от действия солнечной радиации, при теплообмене с окружающей средой, при конденсации влаги на ее поверхность;  $\gamma$  — коэффициент теплопроводности машины или теплового экрана, Вт/кг·град;  $G$  — масса машины или теплового экрана, кг;  $d\Delta T$  — изменение температуры машины или теплового экрана за время  $dt$ , град.

Количество тепла, полученного поверхностью машины или поверхностью теплового экрана от действия солнечной радиации за единицу времени, может быть определено по формуле

$$q_E = A_E S_E F_E, \quad (3)$$

где  $A_E$  — способность поверхности машины или теплового экрана поглощать тепло под действием солнечной радиации;  $S_E$  — облучающая способность солнца, Вт/м<sup>2</sup>;  $F_E$  — площадь поверхности машины или теплового экрана, облучаемой солнцем, м<sup>2</sup>.

Количество тепла, полученное машиной или тепловым экраном при лучисто-конвективном теплообмене с окружающей средой за единицу времени, определяется уравнением

$$q_S = \beta \varepsilon c_0 \Delta T F, \quad (4)$$

где  $\beta$  — коэффициент, характеризующий изменение лучисто-конвективного теплообмена машины или теплового экрана с окружающей средой за счет действия ветра;  $\varepsilon$  — степень черноты поверхности машины или теплового экрана;  $c_0$  — коэффициент поглощения (излучения) тепла абсолютно черным телом, Вт/м<sup>2</sup>·град;  $\Delta T$  — разница температуры машины или теплового экрана и окружающего воздуха, К;  $F$  — общая площадь машины, участвующей в лучисто-конвективном обмене, м<sup>2</sup>.

Количество тепла, полученного машиной или тепловым экраном во время конденсации на ее поверхности влаги за единицу времени, можно определить по формуле

$$q_K = \alpha_K \Delta T F_K, \quad (5)$$

где  $\alpha_K$  — средний коэффициент теплоотдачи конденсата за единицу времени, Вт/м<sup>2</sup>·град;  $F_K$  — площадь поверхности машины или теплового экрана, на которой сконденсировались влага, м<sup>2</sup>.

Подсчитав в уравнении теплового баланса (2) значение выражений (3)–(5), получаем

$$A_E S_E F_E dt + \beta \varepsilon c_0 \Delta T F dt + \alpha_K \Delta T F_K dt - \gamma G d\Delta T = 0. \quad (6)$$

Тепловой экран ограничивает теплообмен между машиной и окружающей средой. Благодаря тому, что тепловому экрану можно придать нужные защитные свойства (отражающая способность, теплопроводность, ограничение конвективного теплообмена), есть возможность ограничить скорость теплообмена и тем самым

избежать предельных температур, при которых возможна конденсация влаги на поверхности сельскохозяйственной техники.

В качестве теплового экрана можно использовать современные теплоизолирующие материалы, имеющие трехслойную структуру (алюминиевая фольга, вспененный полиэтилен, алюминиевая фольга).

Рассмотрим теплопроводность через многослойную стенку теплового экрана, полагая, что все слои стенки плотно прилегают друг к другу.

Расчетную формулу теплопроводности сложной стенки при стационарном состоянии можно вывести из уравнения теплопроводности для отдельных слоев, считая, что тепловой поток, проходящий через любую изотермическую поверхность неоднородной стенки, один и тот же.

Для решения этой задачи рассмотрим технологическую стенку, в которой толщина отдельных слоев равна  $\delta_1, \delta_2, \delta_3$ , а их теплопроводности — соответственно  $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$  (см. рис.).

Формулы тепловых потоков для каждого из трех слоев:

$$q_1 = \frac{\lambda_1}{\delta_1} F_{\text{Э}} (T'_{\text{ст}} - T'_{\text{сл}}), \quad (7)$$

где  $\lambda_1$  — теплопроводность алюминиевой фольги, Вт/мкм;  $\delta_1$  — толщина слоя фольги, м;  $F_{\text{Э}}$  — площадь экрана, м<sup>2</sup>;  $T'_{\text{ст}}$  — температура наружной поверхности алюминиевой фольги, град;  $T'_{\text{сл}}$  — температура между слоями, град;

$$q_2 = \frac{\lambda_2}{\delta_2} F_{\text{Э}} (T'_{\text{сл}} - T''_{\text{сл}}), \quad (8)$$

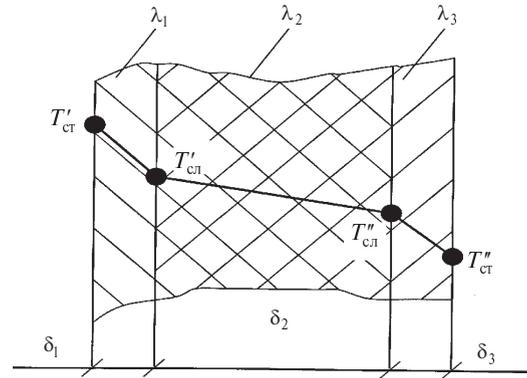
где  $\lambda_2$  — теплопроводность вспененного полиэтилена, Вт/мкм;  $\delta_2$  — толщина слоя вспененного полиэтилена, м;  $F_{\text{Э}}$  — площадь экрана, м<sup>2</sup>;  $T'_{\text{сл}}, T''_{\text{сл}}$  — температура между слоями, град;

$$q_3 = \frac{\lambda_3}{\delta_3} F_{\text{Э}} (T''_{\text{сл}} - T''_{\text{ст}}), \quad (9)$$

где  $\lambda_3$  — теплопроводность алюминиевой фольги, Вт/мкм;  $\delta_3$  — толщина алюминиевой фольги, м;  $F_{\text{Э}}$  — площадь экрана, м<sup>2</sup>;  $T''_{\text{сл}}$  — температура между слоями, град;  $T''_{\text{ст}}$  — температура наружной поверхности алюминиевой фольги, град.

Окончательно получаем:

$$q = \frac{F_{\text{Э}} (T'_{\text{ст}} - T''_{\text{ст}})}{\left( \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3} \right)} =$$



Расчетная схема к обоснованию теплопередачи тепловым экраном: температуры наружных поверхностей  $T'_{\text{ст}}$  и  $T''_{\text{ст}}$ ; температуры между слоями  $T'_{\text{сл}}$  и  $T''_{\text{сл}}$  [2]

$$= \frac{F_{\text{Э}} \Delta T}{\left( \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3} \right)}, \quad (10)$$

где  $q$  — тепловой поток, проходящий через экран, Вт.

Таким образом, тепловой поток, проходящий через тепловой экран, будет снижаться пропорционально количеству слоев, их толщине и обратно пропорционально их теплопроводности.

Соотношение тепловых потоков, прошедших через тепловой экран и поступивших к нему, будет характеризоваться коэффициентом ослабления  $n$ :

$$n = \frac{F_{\text{Э}} \Delta T}{(A_E S_E + \beta \varepsilon c_0 \Delta T F + \alpha_K \Delta T F_K) \left( \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3} \right)}. \quad (11)$$

После соответствующих математических преобразований была получена математическая модель, описывающая тепловой режим машины (или теплового экрана), находящейся на открытой площадке.

$$\Delta T = \Delta T_0 \exp \left[ \varphi \left( \alpha_K \frac{F_K}{F} + \beta \varepsilon c_0 \right) t \right] + \frac{A_E S_E F_E}{\left( \alpha_K \frac{F_K}{F} + \beta \varepsilon c_0 \right) F} \times \exp \left[ \varphi \left( \alpha_K \frac{F_K}{F} + \beta \varepsilon c_0 \right) t - 1 \right] n, \quad (12)$$

где  $\Delta T_0$  — начальная разница температуры поверхности машины и окружающего воздуха, К;

$\phi$  — коэффициент, характеризующий способность конкретной марки сельскохозяйственной машины к теплоотдаче, который определяется по

$$\phi = \frac{F}{yG}.$$

Формула (12) показывает, как изменится температура поверхности машины, находящейся под тепловым экраном, по сравнению с температурой воздуха под действием внешних климатических факторов через время  $t$  от момента, когда разница температуры машины и воздуха была равна  $\Delta T_0$ .

Ослабление теплового потока тепловым экраном должно быть таким, чтобы в процессе его охлаждения на внутренних стенках экрана не образовался конденсат влаги.

Применение более эффективных тепловых экранов позволит исключить воздействие на сельскохозяйственную машину во время хранения солнечной радиации и атмосферных осадков, ограничить конвективный теплообмен и существенно увеличить время нагрева и остывания сельскохозяйственной машины, что уменьшит вероятность конденсации влаги на ее поверхностях.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Кох, П.И.** Климат и надежность машин [Текст] / П.И. Кох. — М.: Машиностроение, 1981.
2. **Нащокин, В.В.** Техническая термодинамика и теплопередача [Текст] / В.В. Нащокин. — АЗ-Book, 2009.

УДК 621.7:658.12

*А.Н. Волков, Ю.В. Гичев,  
В.А. Двяченко, А.П. Петкова*

### ПРОБЛЕМЫ РАЗРАБОТКИ И ИССЛЕДОВАНИЯ ВАРИАНТОВ КОНСТРУКЦИИ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ НАМОТКИ АМОРФНОЙ ЛЕНТЫ

Ресурс силовых трансформаторов с сердечниками из традиционных электротехнических материалов составляет 30–40 лет. Применение аморфной ленты для их изготовления увеличивает срок до 80–85 лет и обеспечивает существенную экономию электроэнергии. Так, потери в сердечнике из аморфной стали трансформатора мощностью 100 кВА в 4–5 раз меньше по сравнению с сердечником из электротехнической стали. Например, компания Hitachi — Metglas [1], один из лидеров по производству аморфной ленты, выпускает такой продукции до 52 000 тонн в год, а в Российской Федерации годовой объем производства этого стратегического материала составляет всего 600 тонн. Поэтому развитие такого производства — весьма актуальная задача. Представленные ниже результаты исследований получены в процессе выполнения поисковой на-

учно-исследовательской работы, осуществляемой в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы.

Выпускаемые ВНИИМЕТМАШ им. академички А.И. Целикова [2] комплексы и их зарубежные аналоги позволяют производить ленту из аморфных материалов толщиной 18–32 мкм и шириной до 150 мм с технологической производительностью до 40 м/с. Отсутствие в них модулей для улавливания и намотки ленты ведет к большим потерям из-за брака и трудозатратам, что существенно ограничивает рост объемов производства.

В большинстве современных машин аморфная лента изготавливается методом спиннингования расплава на полированную поверхность охлаждаемого водой валка (диска-холодильник),

движущегося с линейной скоростью 30–40 м/с (рис. 1) [2, 3]. Скорость охлаждения расплава на поверхности валка составляет примерно  $10^6$  °С в секунду.

Технологический процесс получения аморфной ленты осуществляется в два этапа. На первом этапе в вакуумных индукционных печах выплавляется заготовка — исходный аморфизирующий сплав необходимого состава, а на втором — производится плавление порции заготовки и получение аморфной ленты на машинах разливки. Исходный сплав массой 50–200 кг из тигля через калиброванную щель разливочного сопла, изготавливаемого из аморфного кремнезема, подается на водоохлаждаемый барабан. Длина щели разливочного сопла определяется шириной ленты, которую надо получить. Ширина щели составляет 0,45–0,65 мм и является одним из важнейших регулируемых параметров разливки, который связан со многими другими — линейной скоростью движения поверхности разливочного валка, зазором между соплом и поверхностью валка, составом сплава, температурой расплава, давлением газа и другими. Зазор между соплом и поверхностью валка изменяется в пределах 0,15–0,30 мм с шагом 0,05 мм в зависимости от других параметров разливки.

Попадая на поверхность валка, расплав движется вместе с ней, формируя на ней аморфную ленту. От поверхности валка лента отделяется потоком воздуха, подаваемого на съемник ленты. Съемник устанавливается с зазором 100–300 мкм от поверхности валка.

Регулируя расход расплава через щель сопла путем изменения температуры расплава, ширины щели сопла и величины давления, а также скорость вращения валка, можно управлять процессами формирования ленты. Толщина получаемой ленты зависит от совокупности технологических факторов — температуры расплава, ширины щели сопла, скорости вращения валка, давления газа, физико-химических свойств расплава (вязкость, поверхностное натяжение), материала диска, а также величины зазора между соплом и поверхностью валка, которая составляет  $25 \pm 5$  мкм.

Однако значительному увеличению объемов производства аморфной ленты и удовлетворению ежегодно растущего на нее спроса препятствует ряд проблем технологического характера. Так, например, высокие скорости литья, малая пло-

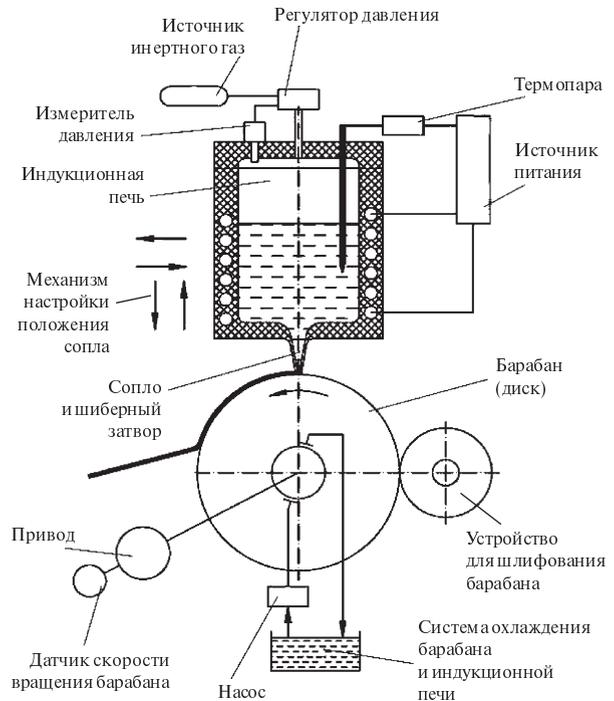


Рис. 1. Схема получения аморфной ленты

щадь поперечного сечения ленты, явное отсутствие зон разливки и съема ленты с диска-холодильника, большая (как правило, более 5000 м) длина ленты затрудняют смотку ленты во время процесса литья на намоточное устройство. В связи с тем, что при отсутствии моталки смотка ленты в рулон после литья осуществляется вручную, значительно возрастают трудоемкость процесса и себестоимость продукции, часто происходит разрыв ленты.

В настоящее время проблема улавливания аморфной ленты на больших и сверхбольших скоростях и формирования из них катушек в РФ до сих пор не решена. Результаты исследований зарубежных ученых и сведения о принципах работы и устройстве захвата и намотки таких лент представляют собой коммерческую и промышленную тайну.

По косвенным показателям (годовой объем производства и стоимость аморфной ленты) можно предположить, что такая задача удовлетворительно решена только в США.

В Японии смотка производится не сразу после схода аморфной ленты с литейной машины. Захват ленты осуществляется со специально подготовленного пола. Большие размеры отполированного пола, позволяют накопить необходимый

роликов, причем ось поворота совпадает с осью самого переднего прижимного ролика или расположена вблизи нее. Данный намоточный модуль обеспечивает возможность легкой и надежной намотки тонких лент, в том числе при высокой скорости.

Основное достоинство данной схемы — возможность смотки в плотные рулоны без дополнительной перемотки (за счет пары натяжных роликов перед намоточным барабаном и установочных элементов). Намоточные устройства такого типа используются на листовых станах холодной прокатки.

Главные недостатки устройства — громоздкость и сложность конструкции, а также большая инерционность системы валков при низкой относительной прочности ленты в зоне ее формирования, что исключает возможность создания автоматической заправки ленты на скоростях до 40 м/с.

Намоточное устройство, реализованное в патенте РФ № 2256519 [5], представлено на рис. 2, б. В этом устройстве реализован способ намотки тонкой ленты 1 посредством намоточного барабана 3 и системы проводок 4, включающий подачу переднего конца ленты в намоточный барабан и захват его на стенке намоточного барабана с помощью захватывающего средства. Ленту посредством системы проводок перед входом в намоточный барабан поворачивают примерно на 90° вокруг ее продольной оси, затем передний конец ленты разворачивают и выпускают внутри намоточного барабана в его центральной части таким образом, чтобы кромки ленты были параллельны дну намоточного барабана, а плоскость ленты примерно параллельна его стенке. Передний конец ленты захватывают на внутренней поверхности стенки намоточного барабана посредством захватывающего устройства и продолжают намотку ленты в рулон в направлении от стенки намоточного барабана к его центру до получения рулона требуемого размера.

Данное устройство позволяет поддерживать скорость вращения намоточного барабана в пределах  $\pm 5\%$  от заданной скорости и, таким образом, обеспечивает получение рулона тонкой ленты при сохранении технологических свойств аморфной структуры ее материала.

Основные недостатки данной схемы — ограниченность ширины ленты (при изменении ширины необходимо менять проводки) и необходи-

мость дальнейшей перемотки в плотный рулон. Кроме того, предложенное решение не обеспечивает надежного улавливания и захвата начала ленты. При этом следует обратить внимание на особенности прохождения начала ленты толщиной 20–30 мкм со скоростью 30–40 м/с по винтовой проводке при наличии сил трения.

В патенте РФ № 2021075 [6] предложена конструкция намоточного устройства, представленная на рис. 2, в. Устройство содержит намоточный барабан 3 с захлестывателем 4, подающую проводку 1 и криволинейную проводку 2. Последняя установлена с возможностью поворота вокруг центра ее кривизны. Передняя кромка криволинейной проводки 2, прилегающая в начальный момент к подающей проводке 1, выполнена заостренной.

В исходном положении криволинейная проводка 2 находится в крайнем верхнем положении, примыкая к подающей проводке 1. Намоточный барабан 3 с захлестывателем 4 разгоняется до скорости на 0,2–0,8 м/с меньше скорости подачи отливаемой ленты и находится в состоянии готовности к намотке. Передний дефектный конец подаваемой с разливки ленты движется по криволинейной проводке 2 в короб (не показан). После стабилизации процесса разливки и установившегося движения ленты подается команда на смещение криволинейной проводки. В процессе опускания криволинейной проводки между ее верхней кромкой и подающей проводкой 1 образуется зазор, в который направляется вдвое сложенная подаваемая лента к намоточному барабану 3 с захлестывателем 4. При захлестывании ленты ее нижний конец, движущийся по криволинейной проводке 2 в короб (не показан), резко меняет направление движения на противоположное, в результате чего лента натягивается, прижимаясь к острой кромке 5 криволинейной проводки 2, и происходит ее обрыв. На этом процесс захлестывания ленты завершается.

Способ реализован на экспериментальной установке для скоростной намотки тонких лент на скорости до 25 м/с при толщине наматываемых лент 0,02–0,025 мм.

К недостаткам способа относятся сложность синхронизации вращения барабанов и наличие петли при смотке. Кроме того, в этой конструкции, аналогично рассмотренной выше, имеют место проблемы с непредсказуемостью поведения ленты на участке передачи и захвата ленты.

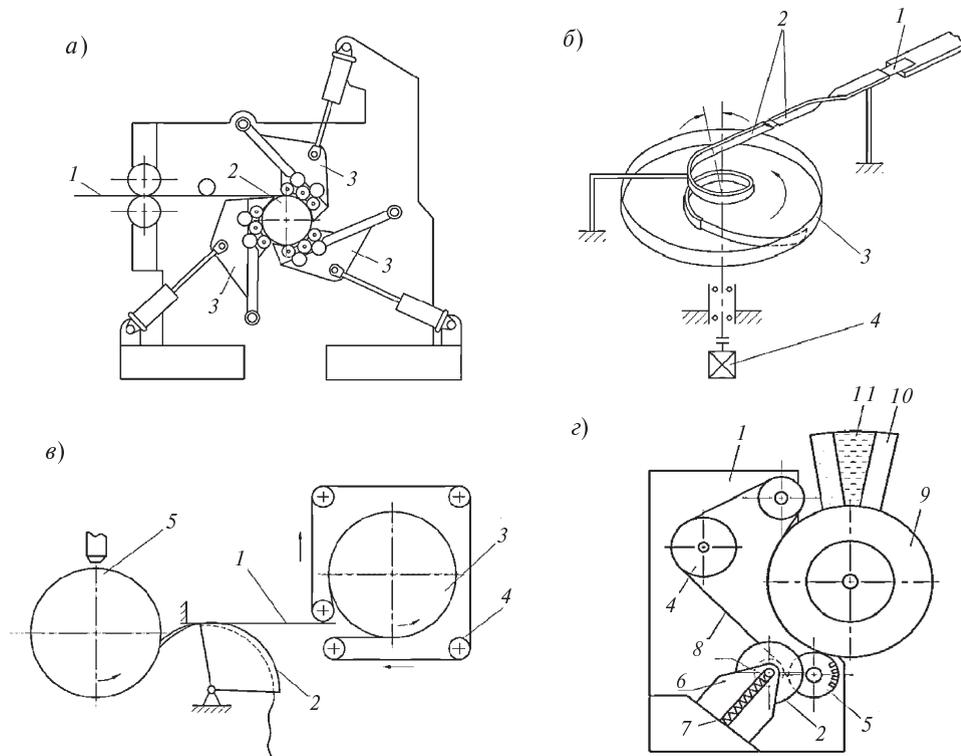


Рис. 2. Схемные решения намоточных устройств

В патенте РФ № 2116159 [7] описано устройство для смотки полосы, изображенное на рис. 2, з. Общий вид описанного устройства для смотки полосы представлен на рис. 3. Устройство включает: корпус 1, в котором размещены наматывающий барабан 2 с магнитным основанием, бесконечная лента 3 на роликах 4, выходной ролик 5 с магнитной поверхностью, стойка 6, в пазу которой расположена пружина 7, поджимающая опору 8 оси наматывающего барабана 2, рабочий валок 9. На рисунке также показаны: печь 10, расплавленный металл 11, полоса 12.

Наличие магнитного захватного основания на барабане бесконечной ленты, контактирующей с натягом по дугам рабочего валка и наматывающего барабана, натяжного ролика с магнитной поверхностью, позволяет синхронизировать скорости поверхностей рабочего валка и наматывающего барабана и произвести надежный магнитный захват переднего конца тонкой аморфной полосы, обладающей ферромагнитными свойствами.

В принципе данная конструкция работоспособна. Однако поведение начала ленты при движении по участку, расположенному на дуге траектории по поверхности барабана 5 и в зоне ее

захвата барабаном 2 непредсказуемо. Дело в том, что на этом участке траектория ленты имеет перегибы, и на нее действуют два магнитных поля, значительные ускорения и аэродинамическое трение воздуха. Таким образом, предложенная концепция перед реализацией требует всестороннего исследования с применением современных методов моделирования и макетирования.

Результаты сравнительного анализа рассмотренных конструкций намоточных устройств представлены в таблице. На основании анализа основных характеристик процесса намотки аморфной ленты в устройствах, приведенных в таблице, за прототип разрабатываемого устройства выбран намоточный модуль, описанный в пат. № 2116159.

Таким образом, основными проблемами создания оборудования для высокоскоростного улавливания и намотки аморфных лент являются:

подача ленты с технологического барабана в зону намотки с высокой скоростью, непредсказуемая траектория движения ленты, большое аэродинамическое трение поверхности ленты о воздух, низкая жесткость ленты;

необходимость автоматического захвата (улавливания) ленты в зоне формирования пер-

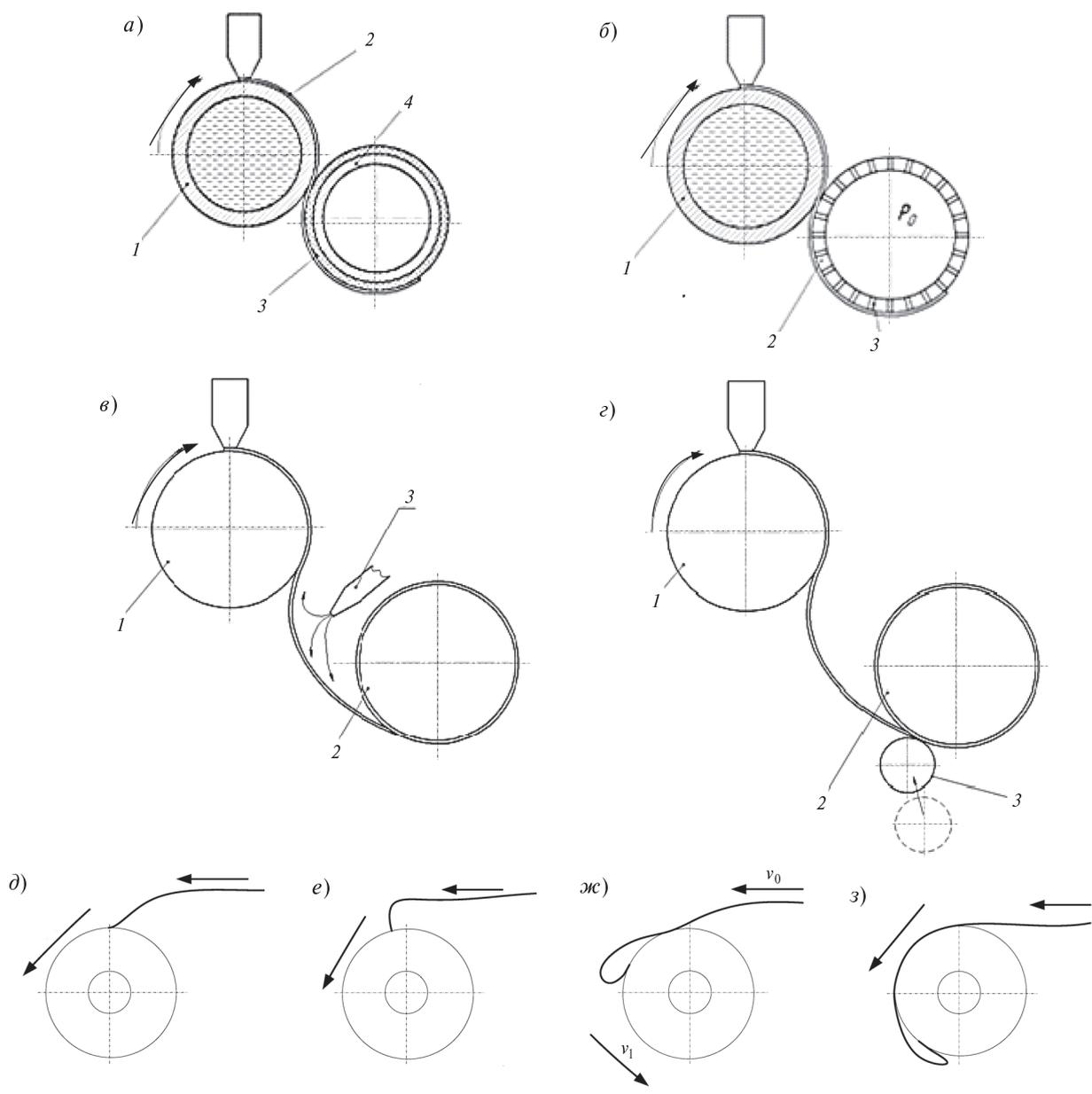


Рис. 3. Схемы процесса намотки аморфной ленты

Сравнение вариантов намоточных устройств

№ п/п	Критерий оценки						
	Компактность конструкции	Простота синхронизации барабанов	Простота конструкции	Смотка без петли	Плотность смотки	Универсальность захвата	Смотка ленты разных размеров
1	-	-	-	-	+	+	+
2	+	+	-	+	+	-	+
3	+	-	+	-	+	+	+
4	+	-	+	+	-	+	-

вого витка катушки на высокой скорости и при низкой жесткости ленты;

требуемая жесткая синхронизация скорости вращения технологического барабана и скорости намотки (большие инерционные массы и низкая прочность ленты в зоне формирования);  
определение и обеспечение требуемого натяжения ленты и плотности намотки катушки (низкие прочность и жесткость ленты).

**Экспериментальный модуль улавливания и намотки тонких лент из аморфных материалов**

В основу модуля для улавливания и намотки ленты из аморфного материала на скоростях 30–40 м/с положена следующая концепция.

Центральной проблемой при создании модуля является улавливание начала ленты и подача ее на намоточный барабан. После остывания на барабане лента удерживается на нем силами молекулярного притяжения, благодаря плотному прилеганию взаимодействующих поверхностей. С целью отделения ленты в машинах для ее производства применяют воздушную струю с плоским сечением, направленную по касательной к поверхности барабана навстречу движению ленты. Оптимальный вариант улавливания ленты — ее захват намоточным барабаном непосредственно с поверхности технологического барабана за зоной разливки на угловой дистанции 120–150°. По мере намотки ленты на намоточный барабан увеличивается его диаметр, поэтому после захвата ленты он должен отводиться от технологического барабана на расстояние 70–100 мм или с небольшой скоростью (порядка 0,52–0,75 мм/с).

Вторая проблема разрабатываемой технологии, связанная с захватом ленты намоточным барабаном, решается двумя способами: путем использования магнитных сил (рис. 3, а) или вакуума (рис. 3, б).

Магнитная система захвата ленты, представленная на рис. 3, а, работает следующим образом. Технологический барабан 1 и лента 2 взаимодействуют благодаря высокой адгезии, которая превосходит центробежные силы. В намоточном барабане 3 установлен постоянный магнит 4, предназначенный для улавливания, отрыва и захвата начала ленты.

Вакуумная система, представленная на рис. 3, б, работает следующим образом. В намоточном барабане 3 выполнены отверстия, а внутренняя полость соединена с источником разреже-

ния ( $p_0 \ll 100$  кПа). Улавливание, отрыв и захват начала ленты обеспечивается разрежением.

Применение описанных выше способов намотки предполагает наличие быстросъемного каркаса намоточного барабана, в противном случае возникнут значительные временные потери на смотку ленты на транспортные шпули.

Третья проблема заключается в обеспечении жесткой синхронизации вращения технологического и намоточного барабанов. Она решается путем применения современных сервоприводов для вращения барабанов в сочетании с организацией петли между ними посредством воздушного потока или магнитного поля.

Четвертая проблема, связанная с обеспечением заданного натяжения ленты, также решается путем применения воздушной струи (рис. 3, в) или фрикционного ролика (рис. 3, г). В соответствии с рис. 3, в лента с технологического барабана 1 перематывается на отведенный после захвата намоточный барабан 2, а натяжение обеспечивается воздушной струей, истекающей из сопла 3.

В соответствии с рис. 3, г лента с технологического барабана 1 перематывается на отведен-

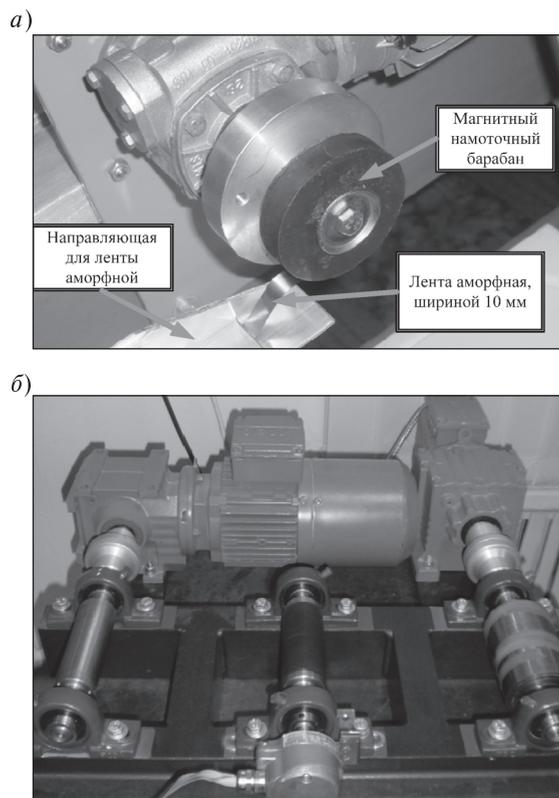


Рис. 4. Стенды для исследования процессов намотки ленты

ный после захвата намоточный барабан 2, а натяжение обеспечивается фрикционным роликом 3, который имеет регулируемое сопротивление вращению  $M_c$ .

Рис. 3, д и 3, е иллюстрируют взаимодействие ленты с магнитным барабаном в процессе их соприкосновения при различных соотношениях скоростей технологического и намоточного барабана.

На рис. 3, ж и 3, з показан процесс залама ленты при условии, когда окружная скорость технологического барабана больше окружной скорости намоточного барабана. На рис. 4, а представлена фотография начального периода этого процесса, смоделированного на специальном испытательном стенде.

На рис. 4, б — стенд для исследования процессов синхронизации скоростей технологического и намоточного барабанов. В результате экспериментов установлено, что современные приводы SEWEURODRIVE обеспечивают достаточную для предложенного процесса смотки степень синхронизации скоростей барабанов.

Анализ вариантов захвата ленты показал, что применение магнитного поля для улавливания

и захвата начала ленты предпочтителен с конструктивной точки зрения. При применении магнитного захвата в модуле улавливания и намотки аморфной ленты шириной 150 мм и толщиной 20–30 мкм на скоростях 30–40 м/с необходимо решить следующие задачи. Во-первых, намоточный барабан должен улавливать ленту непосредственно на поверхности технологического барабана посредством магнитного захвата. Во-вторых, с целью увеличения производительности намоточный барабан должен выполняться быстросъемным. В-третьих, момент появления начала ленты в зоне соприкосновения барабанов следует фиксировать, используя датчик, и по его сигналу с заданным регулируемым запаздыванием включать привод отведения намоточного барабана. Суммарное время запаздывания на включение привода отведения не должно превышать  $10^{-2}$  с. В-четвертых, в момент захвата ленты окружная скорость технологического барабана должна превосходить на 0,05–0,10 % окружную скорость намоточного барабана. Синхронизацию работы барабанов следует осуществлять с учетом величины петли ленты между барабанами.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. [Электрон. ресурс] <http://hitachi-metglas.com/> Hitachi Industrial Equipment Systems Co., Ltd./Tokyo, Japan

2. Всероссийский научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт металлургического машиностроения ВНИИМЕТМАШ им. акад. А.И. Целикова [Электрон. ресурс]. — <http://www.vniimetmash.ru/>

3. Liquidmetal technologies [Электрон. ресурс]. — <http://www.liquidmetal.com/>

4. Патент 2181312 РФ: МПК7 В21В1/22. Способ альтернативной работы моталок и устройство для намотки лент / Кнеппе Г., Браун М.; заявитель и патентообладатель — СМС ШЛЕМАНН ЗИ-МАГ АГ. — №97102192/02; заявл. 13.02.1997; опубл. 20.04.2002.

5. Патент 2256519 РФ: МПК7 В21В47/00. Способ намотки тонкой ленты в рулон и устройство

для его осуществления / Некипелов В.С.; заявитель и патентообладатель — Некипелов Владимир Станиславович. — №2004103270/02, заявл. 05.02.2004 ; опубл. 20.07.2005.

6. Патент 2021075 РФ: МПК5 В22Д11/06. Способ подачи тонкой ленты к намоточному барабану и устройство для его осуществления В21С47/00 / Дунаевский В.И., Запара Б.М., Смычков А.С., Некраш Э.Б., Гридневский В.И.; заявитель — Украинский науч.-исслед. Институт металлургического машиностроения — №4844223/02; патентообладатель — Филиал ВНИИМЕТМАШ им. А.И. Целикова; заявл. 29.06.1990; опубл. 15.10.1994.

7. Патент 2116159 РФ: МПК7 В22Д11/06. Устройство для смотки полосы / Дикалов Б.А.; заявитель и патентообладатель — Новгородский государственный университет. — № 96100194/02; заявл. 04.01.1996 ; опубл. 27.07.1998.