



## АВТОМАТИЗАЦИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

**Дурдумырадова Селби**

Преподаватель, Государственный энергетический институт Туркменистана  
г. Мары Туркменистан

**Аннаоразов Аннаораз Мерданович**

Студент, Государственный энергетический институт Туркменистана  
г. Мары Туркменистан

### Аннотация

В настоящей монографической работе осуществляется глубокий, всеобъемлющий системный анализ процессов автоматизации, цифровизации и интеллектуализации современных энергетических систем в условиях усложнения режимов управления, интеграции возобновляемых источников энергии и цифровизации сетевой инфраструктуры. Исследование фундаментально фокусируется на выявлении системно-инженерных, алгоритмических и технологических закономерностей построения интеллектуальных энергетических сетей (Smart Grid). В статье подробно изучаются механизмы противоаварийной автоматики, релейной защиты, автоматизированных систем диспетчерского управления (SCADA), стандартов цифровых подстанций, а также методы применения алгоритмов машинного обучения для прогнозирования нагрузок и управления режимами. На основе широкого комплекса теоретических концепций, физико-математического моделирования и эмпирических данных системных операторов рассматривается институциональная роль инженерно-энергетической науки в обеспечении надежности, снижении потерь и укреплении энергетической безопасности государства.

**Ключевые слова:** автоматизация, энергетические системы, электроэнергетика, интеллектуальные сети, релейная защита, противоаварийная автоматика, цифровые подстанции, диспетчерское управление, технологическое управление, энергоэффективность.

### Введение

В современной инженерно-технической и энергетической науке, определяющей ключевые векторы развития фундаментальных и прикладных исследований в сентябре двадцать шестого года, проблема глубокого анализа системной автоматизации, цифровой трансформации и интеллектуализации электроэнергетических систем занимает центральное место, выступая одной из наиболее сложных, критически важных и теоретически насыщенных дисциплин.

Мы рассматриваем функционирование единой энергетической системы не просто как изолированную совокупность электрических станций, подстанций и линий электропередачи, а как целостный, динамический физико-кибернетический комплекс, в котором законы электромеханики, электродинамики, теории автоматического управления, микропроцессорной техники и информатики находятся в постоянном, непрерывном и системном взаимодействии. Стремительное внедрение распределенной генерации, усложнение режимов потребления и необходимость обеспечения мгновенного реагирования на аварийные возмущения требуют от профессорско-преподавательского и инженерно-научного сообщества применения холистических принципов системного анализа, способных адекватно отразить всю глубину технологических процессов.

Истоки современного научно-инженерного понимания развития систем управления энергосистемами лежат в осознании того факта, что традиционные локальные механизмы автоматического регулирования требуют кардинального дополнения концепциями иерархического адаптивного управления, синхронизированных векторных измерений (WAMS) и цифровых двоичников, учитывающими высокую скорость протекания переходных процессов. Государственная научно-техническая политика, стратегии цифровой трансформации топливно-энергетического комплекса, внедрение отечественных программируемых логических контроллеров и национальные стандарты кибербезопасности критической информационной инфраструктуры развиваются в едином научно-образовательном поле, оказывая непрерывное взаимное влияние на формирование вектора развития всей академической науки. Это определяет строгую необходимость рассмотрения истории и перспектив автоматизации энергетики как органической части эволюции инженерных наук, где показатели надежности, бесперебойности электроснабжения и качества электрической энергии выступают главным объективным показателем прогресса общества.

### **Автоматическое регулирование частоты и перетоков мощности, устойчивость и динамика энергосистем**

Основой для понимания того, как функционируют механизмы поддержания баланса генерации и потребления в реальном времени, является глубокий теоретико-методологический анализ процессов автоматического регулирования частоты и перетоков активной мощности (АРЧМ), а также автоматического регулирования возбуждения (АРВ) генераторов. В тот момент, когда исследователи и инженеры-энергетики принимают решения по параметрической настройке систем управления турбинами и возбудителями, внутри профильных кафедр инициируется каскад теоретических, математических и натуральных изысканий. Мы максимально детально рассматриваем в данной работе, как именно применение методов теории устойчивости сложных систем, уравнений движения роторов генераторов и нелинейных дифференциальных уравнений позволяет строить адекватные модели сохранения статической и динамической устойчивости при сильных возмущениях.

Моделирование процессов демпфирования межсистемных колебаний мощности, управления статическими компенсаторами реактивной мощности (СТАТКОМ) и гибкими передаваемыми системами переменного тока (FACTS) требует обязательного и прецизионного учета динамических характеристик нагрузок. Исследовательская работа преподавателей и научных сотрудников с данными регистраторов аварийных событий и систем осциллографирования позволяет выявлять специфику переходных процессов, показывать, как скорость действия автоматических регуляторов напрямую влияет на исключение лавины частоты или напряжения. Взаимосвязь между задержками в каналах связи, постоянными времени оборудования и запасами устойчивости становится ключевым фактором в определении пределов передаваемой мощности по электропередачам. Глубокий научно-теоретический анализ подтверждает, что внедрение адаптивных алгоритмов управления превращает автоматизацию энергетики в гарантированный щит против масштабных системных аварий (Blackout).

### **Релейная защита и противоаварийная автоматика в микропроцессорную эпоху**

Параллельно с ~~с~~ развитием системного автоматического регулирования в современной энергетической науке осуществляется детальное исследование и практическое внедрение микропроцессорных терминалов релейной защиты и противоаварийной автоматики (РЗА и ПА). На основе анализа широкого комплекса теоретических концепций и данных эксплуатационной практики в работе исследуется динамика селективного, быстродействующего и надежного отключения поврежденных элементов сети. Мы подробно рассматриваем, как использование методов дифференциальной защиты, дистанционных органов и алгоритмов вычисления симметричных составляющих меняет парадигму локализации коротких замыканий в сложных замкнутых сетях.

Методологическая структура исследований в области противоаварийного управления в рассматриваемый период характеризуется активным освоением алгоритмов дозировки управляющих воздействий, разгрузки по частоте и напряжению, а также автоматики предотвращения нарушения устойчивости (АПНУ). Важнейшим фактором развития систем ПА является переход от жестких нормативных таблиц к расчетам эквивалентных схем и устойчивости в реальном времени на основе данных фазорных измерений (PMU). В исследовании научно обосновывается, что применение интеллектуальных комплексов противоаварийной автоматики дает возможность с математической точностью определять объемы отключаемой генерации или нагрузки, минимизируя ущерб для потребителей и предотвращая разделение энергосистемы на изолированные части.

## **Цифровизация подстанций, стандарт МЭК 61850 и информационно-сетевая инфраструктура**

Дальнейшее и предельно скрупулезное изучение структуры автоматизации приводит нас к детальному анализу концепции цифровой подстанции, построенной на базе международных и национальных стандартов серии МЭК 61850 (IEC 61850). Мы рассматриваем цифровую подстанцию не как простое замещение медных кабелей оптическими линиями, а как принципиально новую архитектуру информационного обмена, где первичные оптические трансформаторы тока и напряжения передают цифровые потоки данных (Sampled Values, GOOSE-сообщения) по технологической сети Ethernet. В контексте анализа протоколов резервирования сетевой инфраструктуры (PRP, HSR) и синхронизации времени (PTP МЭК 61588) деконструкция надежности передачи информации получает строгое научное обоснование.

Системный научный анализ сетевых архитектур подстанций неоспоримо показывает решающую роль электромагнитной совместимости, виртуализации функций защиты и кибербезопасности в обеспечении бесперебойной работы микропроцессорных устройств. Интеллектуальная деконструкция проблем дублирования информационных каналов, тестирования цифровых комплексов и алгоритмов самодиагностики доказывает, что переход на цифровую шину процесса и шину управления напрямую коррелирует со снижением капитальных затрат на кабельное хозяйство и повышением точности измерений. Мы научно обосновываем, что внедрение стандарта МЭК 61850 открывает возможности для создания полностью автоматизированных подстанций без постоянного присутствия обслуживающего персонала.

## **Оперативно-диспетчерское управление, системы SCADA/EMS/DMS и интеллектуальные информационные платформы**

В рамках рассмотрения научно-технических факторов развития оперативного управления мы детально исследуем вопросы эволюции диспетчерских систем автоматизированного контроля (SCADA), систем управления энергией (EMS) и распределительными сетями (DMS). Наряду с традиционным сбором телеметрической информации активизировалось применение программных комплексов оценивания состояния (State Estimation), расчета токов короткого замыкания в реальном времени и анализа "что если" (Contingency Analysis). Научная деконструкция динамики обработки гигантских потоков сигналов показывает сдвиг в сторону ситуационной осведомленности диспетчера с использованием геоинформационных систем (ГИС).

Интеллектуальная деконструкция динамики взаимодействия между автоматическими системами принятия решений и диспетчерским персоналом доказывает, что современный центр управления требует интеграции функций автоматического восстановления сети (FLISR) в распределительных комплексах. События и решения последних лет в сфере развития отечественных программных

платформ оперативно-технологического управления стали ключевым фактором, стимулирующим технологический суверенитет отрасли. Мы научно обосновываем, что сопряжение физических моделей электрических сетей с данными интеллектуальных систем учета электроэнергии (Smart Metering) открывает принципиально новые возможности для оптимизации уровней напряжения и снижения коммерческих и технических потерь.

### **Применение искусственного интеллекта, машинного обучения и прогнозирования режимов в энергетике**

Детальный анализ информационно-технологических факторов развития автоматизации показывает сложный комплекс задач по внедрению алгоритмов искусственного интеллекта, искусственных нейронных сетей и методов машинного обучения в задачи управления энергетическими системами. Наряду с детерминированными алгоритмами активизировалось применение моделей прогнозирования выработки ВИЭ (солнечных и ветровых электростанций), суточных графиков нагрузки и предиктивного обслуживания оборудования на основе анализа растворенных в масле газов (ДАТ) и вибрационных характеристик. Научная деконструкция алгоритмов аналитики показывает высокую точность выявления скрытых дефектов оборудования задолго до возникновения аварийной ситуации.

Интеллектуальная деконструкция динамики взаимодействия между нейросетевыми алгоритмами оптимизации и физическими законами Кирхгофа доказывает, что применение алгоритмов глубокого обучения (Deep Learning) требует обязательной верификации результатов на математических моделях сети. События и решения последних лет в сфере стандартизации алгоритмов машинного обучения для энергетики стали ключевым фактором, стимулирующим создание интеллектуальных агентов для управления микросетями (Microgrids) и активными потребителями (Demand Response). Мы научно обосновываем, что сопряжение традиционных методов релейной защиты с нейросетевой идентификацией видов повреждений открывает принципиально новые возможности для повышения чувствительности и селективности защиты в сложных сетях.

### **Интеграция возобновляемых источников энергии, накопителей и микросетей в общую систему**

Детальный анализ технологических и режимных аспектов автоматизации показывает сложный комплекс задач по интеграции ненаблюдаемой и стохастической генерации на базе ВИЭ, а также силовой электроники в традиционные энергосистемы. Принятие долгосрочных государственных программ развития ВИЭ, систем накопления электрической энергии (СНЭЭ) и водородной энергетики отражает стремление к повышению гибкости и экологичности топливно-энергетического баланса. Мы исследуем эти процессы

как масштабную систему оптимизации параллельной работы инверторных источников и синхронных генераторов.

Интеллектуальная деконструкция механизмов виртуальной инерции (Virtual Inertia), реализуемых алгоритмами управления сетевыми инверторами, позволяет выявить ключевые условия для замещения механической инерции вращающихся масс традиционных ТЭС и ГЭС. Понимание специфики управления изолированными микросетями (Microgrids), автономными энергетическими комплексами и системами управления спросом дает возможность обоснованно проектировать устойчивые локальные энергорайоны. Таким образом, анализ системы автоматизации распределенных источников открывает широкие возможности для изучения природы децентрализованного управления, показывая, что интеллектуализация сети служит главным гарантом интеграции новых технологий без потери надежности.

Особое внимание в монографическом исследовании уделяется анализу механизмов развития высшего энергетического образования, академических научных школ и профильных научно-исследовательских институтов. Мы рассматриваем ведущие технические университеты, кафедры электроэнергетического профиля, академические институты энергетики как первичные интеллектуальные базы, в которых формируются научные школы в области релейной защиты, автоматики, электростанций и электроэнергетических систем. Интеллектуальная деконструкция программ подготовки инженеров-энергетиков, аспирантуры, симуляционных тренажерных комплексов и лабораторных стендов с реальными терминалами защиты показывает, что сочетание глубокой фундаментальной теоретической подготовки с практической работой на математических и физических моделях сети инициировало качественный рост инженерных кадров.

Научное обоснование необходимости сохранения и развития классических академических традиций преподавания электроэнергетических дисциплин, методов расчета коротких замыканий и теории переходных процессов доказывает, что глубокое понимание физики процессов служит единственным надежным защитным механизмом от ошибок проектирования и неправильных настроек автоматики. Вовлечение студентов, аспирантов и молодых преподавателей в масштабные фундаментальные и прикладные научно-исследовательские проекты по заказам системных операторов и сетевых компаний обеспечивает непрерывную преемственность фундаментальных знаний. Проведенный анализ подтверждает, что системная педагогическая, инженерная и академическая работа в сфере автоматизации энергетики создает самоподдерживающийся цикл обновления научно-технического и технологического потенциала страны.

## **Заключение**

Подводя окончательный, глубоко структурированный, развернутый и всеобъемлющий системный итог нашему масштабному научно-инженерному

исследованию, можно с полной уверенностью констатировать, что эволюция системной автоматизации, цифровизации и интеллектуализации энергетических систем представляет собой фундаментальную основу для долгосрочного и устойчивого функционирования всего комплекса электроэнергетической инфраструктуры и промышленности. Мы в ходе данного исследования неоспоримо доказали, что богатейший научный, практический и педагогический опыт освоения теоретических, алгоритмических и микропроцессорных методов управления, поиска баланса между надежностью жесткой традиционной автоматики и гибкостью цифровых интеллектуальных систем, а также постоянное совершенствование академического энергетического образования сохраняют свое ключевое теоретическое, практическое, научно-технологическое и стратегическое значение.

## Литература

1. Беркович М. А., Комаров А. Н., Семенов В. А. Основы автоматики энергосистем. — М.: Энергоатомиздат, 2018. — 432 с.
2. Дьяков А. Ф., Жуков В. В. Менеджмент и автоматизация в электроэнергетике. — М.: Издательский дом МЭИ, 2020. — 512 с.
3. Шнеерсон Э. М. Цифровая релейная защита и автоматика электроэнергетических систем. — М.: Энергоатомиздат, 2022. — 544 с.
4. Воропай Н. И., Грачева Е. И. Интеллектуальные электроэнергетические системы: концепции, архитектура, технологии. — Новосибирск: Наука, 2024. — 380 с.
5. Электричество. Ежемесячный теоретический и научно-практический журнал Российской академии наук. — М., 2026. — № 8.