



Некоммерческое партнерство
«НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ СОВЕТ
Единой энергетической системы»
111250, г. Москва, Проезд Завода Серп и Молот, дом 10
Тел. (495) 012-60-07
E-mail: dtv@nts-ees.ru, <http://www.nts-ees.ru/>

УТВЕРЖДАЮ

Председатель Научно-технической
коллегии НИ «НТС ЕЭС», д.т.н.
профессор

 Н.Д. Рогалев

«10» июня 2025 г.

ПРОТОКОЛ

совместного заседания

Научно-технического совета НИ «НТС ЕЭС» секции «АСУ ТП» НИ «НТС ЕЭС» и
Центра интеллектуальной цифровой электроэнергетики ИПУ РАН «Интеллектуаль-
ные системы управления в энергетике»

на тему

**«Особенности применения скользящего регулирования давления пара
на АЭС типа ВВЭР»**

26 мая 2025 года

№2/25

г. Москва

Присутствовали члены НТС очно в Институте проблем управления им.
В.А. Трапезникова РАН, ауд. 369, посредством видеосвязи и в заочной форме:

МЕЗИН

Сергей Витальевич

- Председатель секции АСУ ТП
НИ «НТС ЕЭС», заведующий ка-
федрой АСУТП НИУ «МЭИ»

АРАКЕЛЯН

Эдик Койрунович

- Профессор кафедры АСУТП НИУ
«МЭИ»

АНДРЮШИН

Александр Васильевич

- Профессор кафедры АСУТП НИУ
«МЭИ»

РАДИН

Юрин Анатольевич

Главный специалист службы виб-
роналадки и диагностики Инже-
нерного управления ПАО «Мос-
энерго»

БОГДАНОВ

Павел Владимирович

- Начальник отдела АСУ ОАО «Ин-
ститут Теплоэлектропроект»

ЛОПАТИН

Валерий Викторович

- Технический директор ООО
"Энергоавтоматика"

ЧЕРНОМЗАВ

Игорь Зейликович

Главный эксперт по автоматизации
паро- и газотурбинных установок и
противоаварийной автоматике
ООО «ИНКОНТРОЛЬ»

КОСОЙ

Анатолий Александрович

- Ученый секретарь секции АСУ
ТП НП «НТС ЕЭС», доцент ка-
федры АСУТП НИУ «МЭИ»

В дискуссии и докладах приняли участие:

Пашенко

Александр Фёдорович

- старший научный сотрудник, за-
ведующий лабораторией «Интел-
лектуальных систем управления и
моделирования»

Тордия

Марк Джамбулович

- младший научный сотрудник ла-
боратории №40 ИПУ РАН

Красненко

Дарья Михайловна

- Аспирант кафедры АСУТП НИУ
«МЭИ»

Левинский

Матвей Сергеевич

- Студент кафедры АСУТП НИУ
«МЭИ»

Искаков

Алексей Борисович

- заведующий лабораторией «Мо-
делирования и управления боль-
шими системами» ИПУ РАН

Рассадин

Юрий Михайлович

- Научный сотрудник лаборатории
№37 ИПУ РАН

Шушко

Никита

- Математик ИПУ РАН

Заседание подготовлено секцией «Автоматизированные системы управ-
ления технологическими процессами» НП «НТС ЕЭС» (председатель Секции
кандидат технических наук **Мезин С.В.**).

В ходе заседания был заслушан доклад члена секции АСУ ТП НП «НТС
ЕЭС» **Аракеляна Э.К.**, профессора кафедры АСУТП НИУ «МЭИ» на тему:
«Особенности применения скользящего регулирования давления пара на АЭС
типа ВВЭР». В своем докладе Эдик Койрунович подробно осветил ключевые
аспекты перехода на режим работы энергоблока со скользящим давлением све-
жего пара перед стопорными клапанами турбины. Было отмечено, что традици-
онный режим работы с постоянным давлением в парогенераторах на номиналь-
ном уровне во всем диапазоне нагрузок от 0 до 100% обладает рядом недостат-
ков, в первую очередь связанных с дроссельными потерями в регулирующих
клапанах турбины на частичных нагрузках.

Докладчик представил сравнительный анализ двух режимов регулирования. Применение скользящего давления позволяет существенно повысить экономичность энергоблока при работе на пониженных мощностях (в диапазоне 50–90% от номинальной). Это достигается за счет поддержания регулирующих клапанов турбины в полностью открытом состоянии, что минимизирует потери энергии пара на дросселирование. Давление пара в этом случае изменяется практически пропорционально тепловой мощности реакторной установки.

Особое внимание было уделено влиянию скользящего давления на ресурс основного оборудования. Поддержание более стабильной температуры пара на входе в Цилиндр высокого давления (ЦВД) турбины при изменении нагрузки снижает термические напряжения в металле ротора и корпуса, что положительно сказывается на его усталостной прочности и общем сроке службы. Кроме того, данный режим работы способствует поддержанию практически постоянной средней температуры теплоносителя в первом контуре, что улучшает условия эксплуатации реактора и снижает амплитуду изменений параметров, влияющих на реактивность.

В докладе были также затронуты и проблемные аспекты. В частности, отмечалось, что режим скользящего давления характеризуется несколько пониженной маневренностью энергоблока при быстрых изменениях нагрузки, требуемых энергосистемой. Это связано с большей инерционностью процесса изменения мощности за счет изменения параметров первого контура по сравнению с быстрым действием регулирующих клапанов турбины. Были предложены варианты гибридных режимов регулирования, сочетающих преимущества обоих подходов: работа на постоянном давлении в верхнем диапазоне мощностей (90-100%) для обеспечения высокой маневренности и переход на скользящее давление при более глубокой разгрузке.

В заключение докладчик сделал вывод, что для современных проектов АЭС, таких как ВВЭР-1200 и ВВЭР-ТОИ, внедрение режима скользящего давления является перспективным направлением, позволяющим повысить экономическую эффективность и надежность эксплуатации, особенно в условиях работы энергосистемы с высокой долей возобновляемых источников энергии, требующей от базовой генерации частой работы на частичных нагрузках.

ВОПРОСЫ К ДОКЛАДЧИКУ:

Пашенко А.Ф.: «Эдик Койрунович, насколько существенны изменения, которые необходимо внести в алгоритмы систем автоматического регулирования мощности реактора и турбины для реализации такого режима? Потребуется ли замена аппаратных средств или достаточно будет доработки программного обеспечения на действующих блоках ВВЭР-1200?»

Ответ Аракеяна Э.К.: «Спасибо за вопрос. Для современных цифровых АСУ ТП, применяемых на блоках ВВЭР-1200, переход на скользящее давление в основном является вопросом доработки математического и программного обеспечения. Аппаратная часть в целом готова к реализации таких алгоритмов. Однако потребуется проведение полного цикла верификации и валидации нового ПО, а также проведение детального моделирования динамических процессов для подтверждения безопасности и устойчивости регулирования во всех переходных и аварийных режимах».

Богданов П.В.: «Рассматривалось ли влияние перехода на скользящее давление на влажность пара на последних ступенях Цилиндра низкого давления (ЦНД) и, как следствие, на эрозионный износ лопаток?»

Ответ Аракеяна Э.К.: «Да, этот вопрос был детально проанализирован. Расчеты показывают, что при работе на скользящем давлении влажность на выходе из ЦНД действительно может незначительно возрастать на частичных нагрузках по сравнению с режимом постоянного давления. Однако это увеличение не выходит за пределы проектных значений, установленных для турбоустановки. Современные методы сепарации влаги и защита кромок лопаток позволяют нивелировать этот эффект. Тем не менее, для каждого конкретного проекта требуется отдельный расчет и обоснование».

ВЫСТУПИЛИ:

Андрюшин А.В.: Поддержал выводы докладчика, отметив, что с точки зрения динамики и устойчивости системы «реактор-турбина» режим скользящего давления представляет собой интересную и решаемую задачу. Подчеркнул необходимость создания комплексной математической модели энергоблока для отработки алгоритмов управления перед их внедрением на реальном объекте.

Рассадин Ю.М.: Поблагодарил докладчика за глубокий и всесторонний анализ темы. Отметил, что повышение эффективности на частичных нагрузках становится все более актуальной задачей. Подчеркнул важность комплексного подхода, который должен включать не только технико-экономическое обоснование, но и детальный анализ влияния на безопасность АЭС.

С замечаниями по докладу выступил д.т.н., Главный специалист службы виброналадки и диагностики Инженерного управления ПАО «Мосэнерго» **Радин Ю.А.**, член секции АСУ ТП НП «НТС ЕЭС».

1. «Хотелось бы получить более развернутое обоснование исходных предпосылок доклада. В частности, вызывает вопрос тезис о необходимости и неизбежности активного привлечения энергоблоков АЭС с реакторами ВВЭР-1000 и ВВЭР-1200 к системному регулированию мощности. В настоящее время данные энергоблоки эксплуатируются преимущественно в базовом режиме с поддержанием номинальной нагрузки. Скорость изменения их мощности лимитируется регламентными ограничениями реакторной установки и ядерной безопасности, что делает их малоприспособленными для покрытия быстрых и глубоких изменений в графике нагрузки энергосистемы. В связи с этим, просьба к докладчику уточнить, на основании каких прогнозов развития ЕЭС России или изменений в оперативно-диспетчерском управлении предполагается существенное изменение режима эксплуатации атомных станций в среднесрочной и долгосрочной перспективе, которое бы оправдывало внедрение режима скользящего давления в качестве массовой технологии».

2. «Благодарю за интересный доклад. В нем рассматривается классический пароводяной цикл АЭС с насыщенным паром. Однако в контексте развития атомной энергетики следует учитывать и перспективные проекты, такие как реактор на быстрых нейтронах БРЕСТ-ОД-300 со свинцовым теплоносителем. Для данного проекта параметры острого пара достигают значений порядка 500 °С, что требует разработки принципиально новых турбоустановок, рассчитанных на работу в области перегретого пара. Кроме того, хотелось бы отметить, что даже серийные турбины типа К-1000-60/3000 в своей конструкции

уже предусматривают работу со слабоперегретым паром, который поступает в цилиндры низкого давления после сепараторов-пароперегревателей. Вопрос заключается в следующем: рассматривалась ли применимость и эффективность предложенного режима скользящего давления в контексте этих более высокотемпературных циклов, и как именно его преимущества или недостатки проявляются для цилиндра высокого давления, работающего на насыщенном паре, в сравнении с остальной проточной частью турбины?»

3. «С точки зрения термодинамики, предложенный подход требует дополнительного анализа эффективности. При эксплуатации турбоустановок на насыщенном паре с параметрами 6,5 МПа и 280,9 °С, переход в режим скользящего давления сопровождается снижением начальных параметров. Снижение начального давления насыщенного пара неизбежно ведет к уменьшению его начальной энтальпии. При условно постоянном давлении в конденсаторе это приводит к сокращению располагаемого теплоперепада цикла Ренкина, что теоретически должно снижать его термический КПД. В то же время, при классическом регулировании мощности путем прикрытия регулирующих клапанов, начальные параметры пара перед клапанами остаются номинальными. В связи с этим возникает ключевой вопрос: проводилось ли количественное сравнение эффективности? Просьба представить сравнительный анализ, в котором бы сопоставлялись, с одной стороны, необратимые потери энергии при дросселировании пара в регулирующих клапанах при работе с постоянным давлением, и, с другой стороны, снижение термического КПД цикла из-за уменьшения начальной энтальпии в режиме скользящего давления. Именно такое сравнение может однозначно подтвердить или опровергнуть экономическую целесообразность предложения для различных уровней частичной нагрузки».

СОВМЕСТНОЕ ЗАСЕДАНИЕ РЕШИЛО:

1. Принять к сведению доклад профессора кафедры АСУТП НИУ МЭИ Аракеяна Э.К. и признать представленные результаты анализа актуальными и имеющими высокую практическую значимость.

2. Считать применение режима скользящего регулирования давления пара перспективным направлением повышения технико-экономических показателей и ресурса оборудования энергоблоков АЭС с ВВЭР.

3. Рекомендовать руководству АО «Атомэнергопроект» создать междисциплинарную рабочую группу для детальной проработки вопросов, связанных с внесением изменений в проектную и эксплуатационную документацию при внедрении режима скользящего давления.

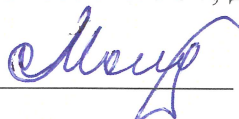
С заключительным словом выступил к.т.н., заведующий кафедрой АСУТП С.В.Мезин, Председатель секции АСУ ТП НП «НТС ЕЭС».

С.В. Мезин отметил, что дальнейшее наращивание доли генерации на основе возобновляемых источников энергии в составе ЕЭС России без соответствующей адаптации базовой генерации может привести к крайне негативным экономическим и системным последствиям. Анализ международного опыта показывает, что активное вовлечение атомных электростанций в процессы регулирования нагрузки является нарастающим трендом в энергосистемах разных стран, что позволяет обеспечить их устойчивость при высокой доле ВИЭ, а не является отдельным редким явлением. Для недопущения возникновения системных дисбалансов и обеспечения экономической эффективности ЕЭС России в новых условиях необходима разработка соответствующих требований к

маневренности АЭС, а также проработка и реализация технических решений, повышающих эффективность их работы на частичных нагрузках.

«Представленный сегодня доклад как раз и является важным шагом в этом направлении. Игнорирование вопросов эффективности эксплуатации АЭС в переменных режимах, в частности, продолжение использования исключительно дроссельного регулирования, которое было оправдано в эпоху чисто базовой работы, в перспективе обернется для системы значительными потерями топлива и недовыработкой электроэнергии. Поэтому работа по внедрению таких технологий, как применение скользящего регулирования, должна быть переведена из плоскости теоретических исследований в плоскость подготовки к практической реализации на действующих и строящихся энергоблоках типа ВВЭР».

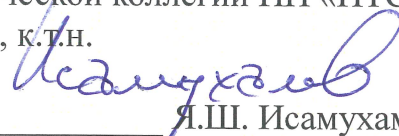
Первый заместитель Председателя
Научно-технической коллегии
НП «НТС ЕЭС», д.т.н., профессор


_____ В.В. Молодюк

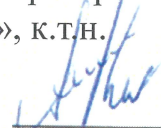
Председатель секции «АСУ ТП»,
к.т.н.


_____ С.В. Мезин

Ученый секретарь Научно-
технической коллегии НП «НТС
ЕЭС», к.т.н.


_____ Я.И. Исамухамедов

Ученый секретарь секции
«АСУ ТП», к.т.н.


_____ А.А. Косой