

УДК: 621.039.566

DOI: 10.26277/SECNRS.2025.117.3.001

© 2025. Все права защищены.

## ПРЕДЛОЖЕНИЯ ПО ПОВЫШЕНИЮ ДИНАМИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ЭНЕРГОБЛОКОВ С ВВЭР-1200

Поваров В. П.\*, д-р техн. наук (PovarovVP@nvnppl.rosenergoatom.ru),  
Тучков М. Ю.\*, канд. техн. наук (TuchkovMU@nvnppl.rosenergoatom.ru),  
Поваров П. В.\* (PovarovPV@nvnppl.rosenergoatom.ru)

Статья поступила в редакцию 22 июля 2025 г.

### Аннотация

*Представлены предложения по повышению динамической устойчивости энергоблоков с ВВЭР-1200 на основе результатов пусконаладочных испытаний при вводе энергоблока № 6 Нововоронежской АЭС в эксплуатацию. Оптимизация алгоритмов управления для режимов с отключением конденсатных насосов, питательных электронасосов, циркуляционных насосов а также главных циркуляционных насосов с последующей разгрузкой энергоблока возможна за счет корректировки технологических защит и блокировок.*

*Отмечено, что при отключении основного нерезервируемого оборудования при разгрузке энергоблока на начальной стадии переходного процесса необходимо использовать ускоренную предупредительную защиту вместо регулятора ограничения мощности для более мягкого прохождения переходных процессов.*

*Сформулированы основные методы повышения динамической устойчивости энергоблока с ВВЭР-1200.*

► **Ключевые слова:** динамическая устойчивость энергоблока, технологические защиты и блокировки, ускоренная предупредительная защита, регулятор ограничения мощности, автоматический регулятор мощности.

\* Филиал АО «Концерн Росэнергоатом» «Нововоронежская атомная станция», г. Нововоронеж, Россия.

## METHODS OF INCREASING THE DYNAMIC STABILITY OF POWER UNITS WITH WWER-1200

Povarov V. P.\* , D. Sc.,  
Tuchkov M. Yu.\* , Ph. D.,  
Povarov P. V.\*

The article was received by the editors' crew on July 22<sup>th</sup>, 2025.

### *Abstract*

*Proposals are presented to improve the dynamic stability of WWER-1200 power units based on the results of commissioning tests during the commissioning of Novovoronezh NPP Unit No. 6. Optimization of control algorithms for modes with shut-off of condensate pumps, electric feed pumps, circulation pumps, as well as main circulation pumps with subsequent unloading of the power unit is possible by adjusting technological protections and interlocks.*

*It is noted that when the main standby equipment is turned off during the unloading of the power unit at the initial stage of the transition process, it is necessary to use accelerated preventive protection instead of a power limitation regulator for a softer transition.*

*The main methods of increasing the dynamic stability of the WWER-1200 power unit are formulated.*

► **Keywords:** *dynamic stability of the power unit, technological protections and interlocks, accelerated preventive protection, power limitation regulator, automatic power regulator.*

---

\* Novovoronezh Nuclear Power Plant branch of Rosenergoatom JSC, Novovoronezh, Russia.

## Введение

Безопасная и надежная выработка электроэнергии зависит от динамической устойчивости энергоблока [1] – способности поддерживать график нагрузки или переходить на пониженный уровень мощности в динамических режимах нормальной эксплуатации (НЭ) и нарушений нормальной эксплуатации (ННЭ) без дополнительных отключений оборудования и срабатывания систем безопасности (СБ). Динамическая устойчивость энергоблоков с реакторными установками (РУ) В-392М и В-491 (ВВЭР-1200) определяется как способность энергоблока поддерживать стабильную работу и оперативно возвращаться к нормальному состоянию после различных возмущений или изменений в условиях эксплуатации.

Проект ВВЭР-1200 изначально разрабатывался с учетом возможности гибкой работы с суточным изменением мощности, диапазоном снижения от 100 до 50 % номинальной мощности и последующим возвратом к 100 %. На энергоблоках Нововоронежской (НВАЭС) и Ленинградской АЭС проведены испытания для экспериментального обоснования эксплуатации энергоблока ВВЭР-1200 в суточном графике нагрузки, отработка способов управления, проверка работы штатного оборудования. Испытывались два альтернативных способа управления энерговыделением реактора – офсетное регулирование с помощью управляющих групп системы управления и защиты (СУЗ) в сочетании с мягким температурным регулированием, обеспечивающим управление реактивностью в результате изменения давления пара во втором контуре. Испытывалась и отлаживалась работа системы борного регулирования, модернизированная для компенсации отравления реактора ксеноном в автоматическом режиме. Испытания подтвердили возможность эксплуатации энергоблока ВВЭР-1200 в суточном графике нагрузки как в начале, так и в конце топливной кампании. Таким образом, современные энергоблоки с ВВЭР-1200 предназначены для маневренной работы, включая первичное и вторичное регулирование частоты, суточное регулирование мощности [2], ограничения мощности и импульсную разгрузку энергоблока с последующим восстановлением нагрузки по командам противоаварийной автоматики. Выполнение этих переходных режимов без отключений оборудования является первой задачей динамической устойчивости энергоблока.

Вторая задача – обеспечение устойчивости при ННЭ, таких как отключение основного оборудования или отказ систем автоматического регулирования. В таких случаях управление направлено на перевод энергоблока на более низкий разрешенный уровень мощности. При этом динамическая устойчивость означает отсутствие срабатываний СБ (кроме предусмотренного открытия быстродействующей редуцирующей установки сброса пара в атмосферу (БРУ-А) для поддержания давления в главном паровом коллекторе с возможным превышением эксплуатационных пределов (ЭП), но без выхода за пределы безопасной эксплуатации (ПБЭ)).

Опыт эксплуатации энергоблоков НВАЭС с РУ В-392М показал, что в переходных режимах НЭ и ННЭ работа систем автоматической разгрузки, подпитки первого контура, подачи питательной воды, основного конденсата и циркуляционной воды [3, 4] не всегда обеспечивает достаточную динамическую устойчивость. Это приводит к дополнительным отказам оборудования и излишним срабатываниям СБ при реализации проектных алгоритмов управления, нарушению ЭП, отключению энергоблоков от сети и срабатыванию аварийной защиты реактора.

Алгоритмы работы оборудования энергоблоков с РУ В-392М и В-491 во многом схожи, поэтому для энергоблоков с ВВЭР-1200 актуальны работы по обоснованию изменений проектных алгоритмов систем автоматического регулирования, технологических защит и блокировок (ТЗиБ) и уставок срабатывания СБ [5–7]. Важным направлением является также изменение способов разгрузки энергоблока для повышения его устойчивости в динамических режимах.

Для анализа динамических режимов и подтверждения корректности проектных изменений важно использовать современные расчетные методы и модели энергоблоков на базе различных программно-технических средств. На основе опыта эксплуатации энергоблоков № 6 и 7 НВАЭС реализуются научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы «Комплексный анализ режимов с отключением основного оборудования первого и второго контуров и разработка рекомендаций по повышению динамической устойчивости энергоблоков с ВВЭР-1200 и ВВЭР-ТОИ», выполняемые АО «ВНИИАЭС». Исследования основываются на применении различных расчетных моделей, полученных с использованием независимых расчетных кодов, в частности «RELAP5/Mod3.2» [8]. В качестве дополнительного инструмента также

применяется программно-технический комплекс «Виртуально-цифровая АЭС» [9], позволяющий повысить точность и надежность анализа.

Для серийных энергоблоков с ВВЭР-1000 более чем за 30-летний период эксплуатации реализован целый комплекс мер, повышающих их динамическую устойчивость, чего нельзя сказать о новых энергоблоках с ВВЭР-1200. Многие режимы с отключением нерезервируемого оборудования приводят к срабатыванию аварийной защиты, переводу реактора в подкритическое состояние и глубокому расхолаживанию РУ.

### **Повышение динамической устойчивости на основе результатов пусконаладочных испытаний при вводе энергоблока № 6 Нововоронежской АЭС в эксплуатацию**

Основные подходы к повышению динамической устойчивости ВВЭР-1200 были сформулированы на основе результатов пусконаладочных испытаний при вводе энергоблока № 6 НВАЭС в эксплуатацию.

Очевидно, требуется оптимизация алгоритмов разгрузки энергоблока в условиях снижения запасов по производительности систем НЭ питательных электронасосов (ПЭН), конденсатных электронасосов (КЭН), циркуляционных насосов (ЦН), главных циркуляционных насосов (ГЦНА) и др. для повышенных уровней мощности, характерных для ВВЭР-1200, по сравнению с ВВЭР-1000.

Большая часть неудачных испытаний при вводе энергоблока № 6 НВАЭС в эксплуатацию (режимы с отключением ПЭН, ГЦНА) была связана с некорректной работой регуляторов уровней в парогенераторах (ПГ). В процессе эксплуатации энергоблоков с внедрением маневренных режимов целесообразно рассмотреть возможность использования в регуляторе уровня котловой воды ПГ (измеренного расхода пара вместо вычисляемого, который рассчитывается условно, исходя из теплового баланса ПГ по температурному перепаду теплоносителя в соответствующих петлях первого контура. Такой подход успешно реализован на энергоблоках с реакторами ВВЭР-1000 на Тяньваньской АЭС в Китае, где накоплен опыт повышения эффективности регулирования уровня воды в ПГ с использованием данных о расходе пара.

Основными причинами некорректной работы регуляторов уровня теплоносителя в ПГ является нестабильность показаний расхода на линиях подачи питательной воды. Одной из причин нестабильных

показаний является неоднородное распределение слоев среды на выходе из регулирующего клапана. На Балаковской АЭС данная проблема решена установкой вихрегасителей, а на АЭС «Тяньвань» – за счет переноса расходомерных устройств до регуляторов уровней ПГ.

В результате проведения сепарационных испытаний ПГ на энергоблоке № 6 НВАЭС установлено, что расходы питательной воды могут отличаться для разных ПГ и зависят как от величины расхода, так и от степени открытия пускового регулирующего клапана. Характеристики баланса между мощностью первого контура, которая определяется по температурному перепаду теплоносителя в соответствующих горячих и холодных петлях первого контура, и мощностью второго контура приемлемы для работы энергоблоков только в базовом режиме несения нагрузки. При расчете баланса мощности можно отметить излишнюю инерционность датчиков, расположенных по периметру главного циркуляционного трубопровода (ГЦТ). При контроле температуры по периметру ГЦТ необходимо учитывать несколько ключевых факторов, влияющих на точность показаний датчиков термоконтроля:

- Распределение энерговыделения в активной зоне реактора. Неравномерность энерговыделения приводит к локальным температурным аномалиям, что отражается на показаниях датчиков, установленных по периметру ГЦТ. Это требует правильного выбора точек установки датчиков для получения репрезентативных данных.

- Влияние обратного тока теплоносителя через отключенную петлю. При частичном числе работающих ГЦНА возможно возникновение обратного тока теплоносителя через отключенные петли, что вызывает смешение потоков с разной температурой и искажает показания датчиков. Это необходимо учитывать при анализе данных и настройке системы термоконтроля.

- Правильная установка датчиков. Для минимизации ошибок измерений датчики температуры должны быть установлены с соблюдением требований по глубине погружения и месту монтажа, чтобы обеспечить хороший тепловой контакт с теплоносителем и избежать влияния локальных температурных возмущений (например, вблизи колен трубопровода с восходящим потоком).

- Использование защитных гильз и теплопроводящих паст. Для повышения точности и быстроты действия измерений рекомендуется применять защитные гильзы с минимальным зазором и теплопроводящие пасты, обеспечивающие надежный контакт датчика с трубопроводом.

Таким образом, комплексный подход к размещению и монтажу датчиков термоконтроля с учетом распределения энерговыделения и гидродинамических особенностей течения теплоносителя позволяет повысить точность контроля при частичной работе ГЦНА.

Проверка алгоритмов работы основного оборудования энергоблока № 6 НВАЭС была проведена в ходе пусконаладочных работ при вводе энергоблока в эксплуатацию. Для этого моделировались различные переходные процессы на полномасштабном тренажере [12] энергоблока. Также использовалась программная модель энергоблока в составе системы интеллектуальной поддержки оператора (СИПО) [10]. В результате проведенного анализа были выявлены ключевые режимы ННЭ энергоблока, требующие внесения корректировок в ТЗиБ.

Впоследствии по результатам расчетного анализа, выполненного ВНИИАЭС [11], подготовлены предложения и рекомендации по корректировке алгоритмов управления технологическими процессами реакторного и турбинного отделений энергоблока № 6 НВАЭС.

Для формирования сигналов разгрузки и ограничения мощности (РОМ), а также ускоренной предупредительной защиты (УПЗ) в проекте НВАЭС используются сигналы от ПЭН, КЭН, ЦН. Для повышения динамической устойчивости в режиме с отключением работающего КЭН при мощности, близкой к номинальной (например, более 90 %  $N_{ном}$ ), логично применять на начальной стадии УПЗ вместо РОМ. При применении УПЗ небаланс между мощностью реактора и мощностью второго контура устраняется практически сразу, а основные регуляторы энергоблока, включая питательный узел ПГ, дорабатывают вторичные возмущения от отключения оборудования и срабатывания УПЗ. Такие управляющие воздействия обладают значительно большей возможностью в обеспечении динамической устойчивости энергоблока.

Режим с отключением работающего КЭН второй ступени характеризуется малыми запасами до уставки срабатывания защит по уровню в деаэраторе и до уставки отключения оставшегося в работе КЭН при работе регулятора уровня в «стерегущем» режиме поддержания давления на его напоре. Динамическое испытание с отключением КЭН было зачтено с учетом вмешательства персонала на заключительной стадии режима, далее, при проверке РОМ, зафиксирована устойчивая работа энергоблока на мощности до 53 %  $N_{ном}$ .

Для повышения динамической устойчивости энергоблока рекомендуется рассмотреть применение УПЗ в режимах с отключением ПЭН на номинальном уровне мощности. Это позволит исключить временную задержку при разгрузке турбогенератора через работу электрической части системы регулирования и обеспечить более быструю стабилизацию процесса. Следует реализовать разгрузку энергоблока с помощью группы УПЗ (алгоритм АС23 системы управления и защиты управляющей системы безопасности технологической (СУЗ-УСБТ) с задержкой порядка 5 с – времени реакции оператора, достаточном для идентификации неуспешного автоматического ввода резерва в случаях отключения двух из четырех ПЭН.

При этом разгрузка энергоблока будет происходить до уровня мощности, соответствующего нижней границе устойчивой работы турбогенератора. Такой подход предпочтительнее традиционной разгрузки энергоблока регулятором ограничения мощности, так как за счет более оперативного действия УПЗ устраняется небаланс между мощностью реактора и турбоагрегата. Это способствует быстрому переходу системы в равновесное состояние и повышает динамическую устойчивость энергоблока. В итоге применение УПЗ для разгрузки при отключении ПЭН обеспечивает более эффективное управление переходными процессами и повышает безопасность эксплуатации энергоблока.

Разгрузка энергоблока при мощности более 75 %  $N_{ном}$  с помощью сброса группы УПЗ в режиме отключения одного из четырех ГЦНА или двух из четырех ПЭН без включения резервного характеризуется тем, что допустимый уровень мощности, задаваемый алгоритмом РОМ, достигается без его дополнительной работы. В проекте НВАЭС предусмотрено, что через 6 с после срабатывания УПЗ вступает в работу автоматический регулятор мощности (АРМ) в режиме «Н», и формируется соответствующее задание для аппаратуры контроля нейтронного потока, соответствующее текущему значению мощности.

После сброса группы УПЗ на реактивность активной зоны оказывают влияние захлаживание теплоносителя в области опускного участка между шахтой и корпусом реактора, а также обратные связи по температуре топлива в течение примерно 15 с. В результате, после срабатывания УПЗ возникает дополнительное возмущение по мощности, которое отрабатывает АРМ при опускании группы № 12 органов регулирования системы управления и защиты, а затем при подъеме группы № 7 УПЗ.

Включение АРМ после работы УПЗ может привести к нарушению ограничений на величину относительного энерговыделения в нижней половине активной зоны (поддержание офсета в пределах рекомендуемой области офсет-мощностной диаграммы). Данная проблема успешно устраняется изменением алгоритма работы АРМ, в котором прежде чем извлекать группу № 7 УПЗ, АРМ извлекает регулирующие группы до верхних концевых выключателей (ВКВ), а группу № 12 до – 90 %. Кроме того, оправданным является увеличение времени включения АРМ в режим «Н» до 15 с.

Для режимов сброса нагрузки турбогенератора при закрытии стопорных клапанов турбоагрегата без работы быстродействующей редукционной установки сброса пара в конденсатор (БРУ-К) на мощности более 50 %  $N_{\text{ном}}$  с целью предотвращения срабатывания аварийной защиты реактора по давлению в ПГ рекомендуется:

- реализовать опережающее открытие БРУ-А по сигналу срыва вакуума в конденсаторе турбины;
- применять УПЗ не только для мощности выше 75 %  $N_{\text{ном}}$ , но и при более низких уровнях мощности, вплоть до 50 %  $N_{\text{ном}}$ ;
- увеличить длительность команды УПЗ от 6 до 15 с в алгоритме СУЗ-УСБТ АС23.

Для анализа динамической устойчивости энергоблока с ВВЭР-1200 при НЭ в период освоения мощности 75 и 100 %  $N_{\text{ном}}$  были выбраны переходные процессы в первом и втором контурах в режимах с частичным изменением нагрузки энергоблока № 6 НВАЭС на 600, 360 и 240 МВт. В этих разгрузках отсутствовал автоматический переход АРМ из режима «Н» в режим «Т» по повышению давления в главном паровом коллекторе вследствие недостижения уставки более 0,25 МПа от номинального.

При исходном состоянии АРМ в режиме «Н», давлении для регулятора БРУ-К (7,00 МПа) и уставке по превышению давления для перехода АРМ в режим «Т» (7,05 МПа) быстродействие БРУ-К с временем открытия/закрытия  $1 \div 2$  с при частичном изменении нагрузки ограничивало рост давления. Уставка перехода АРМ в режим «Т» не достигалась, т. к. дебаланс паровой нагрузки при снижении мощности ТГ полностью был скомпенсирован работой БРУ-К. Рекомендовано изменить уставку автоматического перехода АРМ из режима «Н» в режим «Т» с проектной величины отклонения давления пара в главном паровом коллекторе 0,25 МПа на 0,15 МПа с учетом быстродействия БРУ-К.

## Методы повышения динамической устойчивости ВВЭР-1200

Ниже представлено обобщение методов повышения динамической устойчивости энергоблоков ВВЭР-1200.

### *Оптимизация алгоритмов управления*

Совершенствование алгоритмов управления при отключении основного оборудования энергоблока, а также корректировка технологических защит и блокировок на основе опыта пусконаладочных испытаний и опыта эксплуатации.

### *Использование ускоренной предупредительной защиты*

При отключении нерезервируемого оборудования энергоблока с ВВЭР-1200 (КЭН, ПЭН) необходимо применять на начальной стадии переходного процесса УПЗ вместо регулятора ограничения мощности (РОМ). Использование ускоренной разгрузки энергоблока (УПЗ) вместо РОМ позволит обеспечить быстрое устранение небаланса между мощностью первого и второго контура после разгрузки энергоблока.

### *Применение в регуляторе уровня параметра «расход пара» для расчета баланса мощности первого и второго контура*

Для исключения некорректной работы узла питания ПГ необходимо рассмотреть возможность применения в регуляторе уровня питательной воды в ПГ расхода пара в паропроводе соответствующего ПГ вместо температурного перепада теплоносителя в петлях первого контура.

### *Модернизация оборудования и систем*

Повышение быстродействия запорной арматуры на узле питания ПГ позволяет поддерживать стабильный уровень теплоносителя. Модернизация оборудования контрольно-измерительных приборов и автоматики (КИПиА) повышает точность измерения параметров и снижает вероятность достижения уставок на отключение оборудования в переходном процессе.

### *Использование отечественных программно-технических средств*

Полный переход на отечественные системы управления и безопасности (отказ от программных средств “TELEPERM XS” фирмы AREVA в иницирующей части СУЗ-УСБТ) упрощает корректировку алгоритмов и повышает надежность эксплуатации без необходимости согласований с зарубежными разработчиками.

### **Обучение и подготовка персонала**

Формирование навыков оперативного персонала при обучении на полномасштабном тренажере [12] позволяет эффективно реагировать на нарушения и предотвращать развитие аварийных ситуаций.

### **Обеспечение запасов достижения эксплуатационных пределов**

Для своевременного вмешательства персонала необходимо обеспечить запасы до эксплуатационных пределов параметров, при которых происходит отключение оборудования или срабатывание защит [7].

### **Использование современных расчетных моделей и кодов**

Для анализа переходных процессов и подтверждения корректности изменений в алгоритмах управления применяются верифицированный и дополнительный расчетные комплексы, что обеспечивает надежность прогнозов и безопасность эксплуатации [8, 9].

### **Использование системы интеллектуальной поддержки оператора**

Избежать избыточного срабатывания СБ можно используя функцию СИПО для построения прогноза состояния энергоблока после отключения оборудования и принятия упреждающих управленческих воздействий оператором блочного пульта управления [10].

### **Предложения по изменению проектных алгоритмов энергоблока с ВВЭР-1200**

Расчетный анализ, выполняемый с использованием расчетного кода «RELAP5/Mod3.2» и программно-технического комплекса «Виртуально-цифровая АЭС с ВВЭР», проводился по реалистической методике, при задании исходного состояния систем и оборудования основные технологические параметры принимались без учета консервативных отклонений на величину погрешности измерения. Результаты моделирования технологических процессов и предложения по их оптимизации до реализации на действующих или проектируемых АЭС должны пройти стадии обоснования с использованием аттестованных программных кодов и получения разрешения в соответствии с действующим законодательством Российской Федерации.

Ниже представлены предложения по изменению основных проектных алгоритмов энергоблока с ВВЭР-1200 [1], являющиеся результатом НИОКР, направленные на повышение динамической устойчивости, на основе опыта пусконаладочных испытаний и эксплуатации энергоблока № 6 НВАЭС:

1. Автоматическое закрытие задвижки на линии рециркуляции отключаемого насоса при отключении одного из двух работающих подпиточных насосов для предотвращения отключения насосов системы подпитки и борного регулирования при кратковременном понижении давления на всасе ниже 0,02 МПа – предлагается установить время выдержки защиты 6 с.

2. С целью исключения условий отключения ПЭН по давлению на напоре насоса при кратковременном снижении давления менее 7,7 МПа рекомендовано увеличить выдержку времени данной защиты с 3 до 5 с.

Итоговые ТЗиБ по снижению давления на напоре ПЭН: давление на напоре ПЭН <8,0 МПа в течение 300 с; давление на напоре ПЭН <7,7 МПа в течение 120 с; давление на напоре ПЭН <7,0 МПа в течение 5 с, обеспечивают запас по динамической устойчивости энергоблока.

3. В режимах с отключением одного из двух работающих конденсатных электронасосов первой ступени или одного КЭН второй ступени с невключением резервного насоса реализовать алгоритм разгрузки реактора действием УПЗ при мощности реактора более 75 %  $N_{\text{ном}}$  с выдержкой времени 2 с. Исключить блокировку перевода регуляторов подпитки конденсатора в дистанционный режим в закрытом положении по сигналу повышения уровня в конденсаторах турбины. Исключить из защиты алгоритм отключения всех КЭН первой ступени по повышению уровня в подогревателе низкого давления ПНД-2.

4. В случае отключения одного ЦН из четырех работающих реализовать алгоритм разгрузки реактора действием РОМ до 60 %  $N_{\text{ном}}$  при температуре циркуляционной воды более 30 °С. Предусмотреть разгрузку реактора действием УПЗ (при мощности реактора более 75 %  $N_{\text{ном}}$ ) и РОМ до уровня мощности 7 %  $N_{\text{ном}}$  с выдержкой времени 2 с по сигналу отключения двух ЦН из одной конденсаторной группы. Реализовать автоматическое отключение турбины закрытием стопорных клапанов турбины при совпадении условий:

- наличие сигнала «отключение двух ЦН из одной конденсаторной группы» (с выдержкой времени 60 с);
- уровень мощности реактора меньше или равен 50 %  $N_{\text{ном}}$ .

Модернизировать функцию безопасности «АС24 Предупредительная защита: «Снижение и ограничение мощности реактора» [9] путем корректировки алгоритма разгрузки реактора до 60 % от номи-

нальной мощности как в случае отключения двух ЦН, питающих различные конденсаторные группы, так и при отключении одного ЦН из четырех работающих.

5. По сигналу срыва вакуума в конденсаторе турбоагрегата (снижение уставки открытия БРУ-А с 7,7 до 7,3 МПа) реализовать:

- опережающее открытие БРУ-А;
- применение УПЗ на мощности менее 75 %

$N_{\text{ном}}$ ;

▪ применение группы УПЗ увеличенной эффективности.

6. При повышении давления в конденсаторах выше 12 кПа реализовать автоматическую разгрузку энергоблока.

7. Изменить уставку автоматического перехода АРМ из режима «Н» в режим «Т» с проектной величины отклонения давления пара в Главном паровом коллекторе) 0,25 на 0,15 МПа от номинального с учетом быстродействия БРУ-К. С целью исключения избыточной работы АРМ с воздействием на органы регулирования системы управления и защиты реализовать увеличение времени включения АРМ в режим «Н» до 15 с в режимах с разгрузкой энергоблока УПЗ.

8. Установить номинальный уровень в ПГ 2 600 мм, уставки: на отключение ГЦНА – 2 900 мм, закрытие быстродействующего запорного отсежного клапана – 3 000 мм, закрытие регуляторов и задвижек перед узлом питания – 2 750 мм.

9. Установить выдержку времени на останов турбины 60 с, что позволит избежать срабатывания защиты в переходном процессе, связанном с разгрузкой энергоблока и повышением уровня в сепараторосборнике.

10. Для предотвращения избыточного срабатывания защит необходимо изменить логику их инициализации. Запуск защит (включение насосов САОЗ, локализация ПГ, работа системы пассивного отвода тепла от парогенераторов и перевод БРУ-А в режим расхолаживания) необходимо выполнять только при наличии сигнала « $\Delta T_s < 8 \text{ }^\circ\text{C}$ » в двух из четырех циркуляционных петлях (вместо проектного условия – сигнал в одной из петель).

11. Исключить возможность отключения технической воды ответственных потребителей на потребителей реакторного отделения после срабатывания системы аварийного расхолаживания ПГ.

### Выводы

1. Для инновационных проектов с реактором ВВЭР-1200 необходимо повышать динамическую устойчивость энергоблоков, опираясь на опыт пусконаладочных измерений при вводе в эксплуатацию и данные эксплуатации.

2. Повышение динамической устойчивости достигается за счет корректировки ТЗиБ, а также оптимизации способов разгрузки энергоблока посредством более широкого применения УПЗ.

3. Методы повышения динамической устойчивости включают как технические, так и организационные меры. Их реализация позволит существенно повысить надежность и устойчивость работы энергоблока с ВВЭР-1200.

4. Реализация мер по обеспечению динамической устойчивости должна выполняться на основании решений эксплуатирующей организации после обоснования влияния на безопасность модернизированных схемных решений и алгоритмов, а также получения соответствующих разрешений Ростехнадзора.

### Литература

1. Гусев И. Н., Смородинов Д. С., Казаков К. В., Жуденков В. В., Мамонтов Г. А. К вопросу о динамической устойчивости энергоблоков с ВВЭР-1200 // Известия вузов. Ядерная энергетика. 2024. № 1. С. 18–25. DOI: 10.26583/npe.2024.1.02.
2. Филимонов П. Е., Семченков Ю. М., Малышев В. В., Долгополов Н. Ю., Поваров В. П., Гусев И. Н. Испытания ВВЭР-1200 при эксплуатации в режиме суточного графика нагрузки на 6-м энергоблоке Нововоронежской АЭС // Атомная энергия. 2020. Том 129. № 3. С. 123–129.
3. Гусев И. Н., Казанский В. Р., Витковский И. Л. Динамическая устойчивость энергоблока с ВВЭР-1200 // Известия вузов. Ядерная энергетика. 2017. № 3. С. 22–32. DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2017.3.02>.
4. Гусев И. Н., Воробьев А. П., Козловский М. Н., Падун С. П. Моделирование режима с отключением двух питательных электронасосов без включения резервного на энергоблоках Нововоронежской АЭС-2 // Известия вузов. Ядерная энергетика. 2021. № 2. С. 16–26. DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2021.2.02>.
5. Нововоронежская АЭС. Проект АЭС-2006. – URL: <http://www.rosenergoatom.ru/upload/iblock/f01/f01b5ca309dbda1917c112d6897c0959.pdf> (дата обращения: 28.07.2025).

6. АЭС-2006. Нововоронежская АЭС-2. Технический проект АСУ ТП. Ведомость проекта. NW2O.B.133.&&&&&.01.&&&.070.BA.01.
7. Поваров В. П., Украинцев В. Ф. и др. Системы безопасности АЭС-2006. – Тула: ООО «Всрок», 2020. – 540 с.
8. Программа RELAP5\Mod3.2 для теплогидравлического расчета переходных и аварийных режимов РУ ВВЭР. Рег. № 180 от 28.10.2004.
9. Виртуально-цифровая АЭС с ВВЭР. – АО «Концерн Росэнергоатом». – URL: <https://www.rosenergoatom.ru/about/programmnye-produkty/virtualno-tsifrovaya-aes-s-vver> (дата обращения: 28.07.2025).
10. Гусев И. Н., Поваров В. П., Тучков М. Ю., Кужиль А. С., Майорова М. М., Падун С. П. О проблеме интеллектуальной поддержки операторов для современных автоматизированных систем управления технологическим процессом энергоблоков с ВВЭР // Ядерная и радиационная безопасность. 2019. № S1. С. 46–54.
11. Расчетный анализ режимов нормальной эксплуатации и с нарушением нормальной эксплуатации систем и оборудования энергоблока № 2 Нововоронежской АЭС-2 по теме: «Комплексный анализ режимов с отключением основного оборудования первого и второго контуров и разработка рекомендаций по повышению динамической устойчивости энергоблоков АЭС с ВВЭР-1200 и ВВЭР-ТОИ». – Технический отчет ВНИИАЭС. – 2024.
12. Абагян А. А., Емельяненко В. Ю., Злоказов А. Б., Крошилилин А. Е. Создание полномасштабных тренажеров для АЭС // Атомная энергия. 2000. Т. 88. Вып. 6. С. 407–414.

### References

1. Gusev I. N., Smorodinov D. S., Kazakov K. V., Zhudnikov V. V., Mamontov G. A. (2024). K voprosu o dinamicheskoi ustoichivosti ehnergoblokov s VVEHR-1200 [On the issue of dynamic stability of power units with VVER-1200]. Izvestiya vuzov. Yadernaya ehnergetika – Izvestiya vuzov. Nuclear Power Engineering, No. 1, pp. 18–25. [in Russian]. DOI: 10.26583/npe.2024.1.02.
2. Filimonov P. E., Semchenkov Yu. M., Malyshev V. V., Dolgopолоv N. Yu., Povarov V. P. and Gusev I. N. (2020). Ispytaniya VVEHR-1200 pri ehkspluatatsii v rezhime sutochnogo grafika nagruzki na 6-m ehnergobloke Novovoronezhskoi AEHS [Testing of VVER-1200 during operation in the daily load schedule mode at Unit 6 of the Novovoronezh NPP]. Atomnaya ehnergiya – Atomic Energy, vol. 129, No. 3, pp. 123–129. [in Russian].
3. Gusev I. N., Kazansky V. R., Vitkovsky I. L. (2017). Dinamicheskaya ustoichivost' ehnergobloka s VVEHR-1200 [Dynamic stability of a power unit with VVER-1200]. Izvestiya vuzov. Yadernaya ehnergetika – Izvestiya vuzov. Nuclear Power Engineering. No. 3, pp. 22–32. [in Russian]. DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2017.3.02>.
4. Gusev I. N., Vorobyov A. P., Kozlovsky M. N., Padun S. P. (2021). Modelirovanie rezhima s otklyucheniem dvukh pitatel'nykh ehlektronasosov bez vklyucheniya rezervnogo na ehnergoblokakh Novovoronezhskoi AEHS-2 [Modeling of the mode with disconnection of two feeding electric pumps without turning on the standby pump at the power units of the Novovoronezh NPP-2]. Izvestiya vuzov. Yadernaya ehnergetika – Izvestiya Vuzov. Nuclear Power Engineering, No. 2, pp. 16–26. [in Russian]. DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2021>.
5. Novovoronezh NPP. NPP-2006 project. URL: <http://www.rosenergoatom.ru/upload/iblock/f01/f01b5ca309dbda1917c112d6897c0959.pdf> (reference date: 28.07.2025).
6. AEHS 2006. Novovoronezhskaya AEHS-2. Tekhnicheskii proekt ASU TP. Vedomost' proekta [NPP 2006. Novovoronezh NPP-2. Technical project of the ACS. The project statement. NW2O.B.133.&&&&&.01.&&&.070.BA.01]. 2006.
7. Povarov V. P., Ukraintsev V. F. et al. (2020). Sistemy bezopasnosti AEHS-2006 [Safety systems of NPP-2006]. Tula: LLC Vsrok, 540 p. [in Russian].
8. Programma RELAP5\Mod3.2 dlya teplogidravlicheskogo rascheta perekhodnykh i avariinykh rezhimov RU VVEHR [The RELAP5\Mod3.2 program for thermal-hydraulic calculation of transient and emergency modes of VVER]. 2004.
9. Virtual'no-tsifrovaya AEHS s VVEHR [Virtual-digital NPP with VVER. JSC Rosenergoatom Concern]. АО «Концерн Росэнергоатом». URL: <https://www.rosenergoatom.ru/about/programmnye-produkty/virtualno-tsifrovaya-aes-s-vver> (reference date: 28.07.2025).
10. Gusev I. N., Povarov V. P., Tuchkov M. Yu., Kuzhil A. S., Mayorova M. M., and Padun S. P. (2019). O probleme intellektual'noi podderzhki operatorov dlya sovremennykh avtomatizirovannykh sistem upravleniya tekhnologicheskim protsessom ehnergoblokov s VVEHR [On the problem of intelligent operator support

for modern automated process control systems for VVER power units]. *Yadernaya i radiatsionnaya bezopasnost'* – Nuclear and Radiation Safety Journal, No. S1, pp. 46–54. [in Russian].

11. *Tekhnicheskii otchet VNIIEAEHS “Raschetnyi analiz rezhimov normal'noi ehkspluatatsii i s narusheniem normal'noi ehkspluatatsii sistem i oborudovaniya ehnergobloka No. 2 Novovoronezhskoi AEHS-2 po teme: “Kompleksnyi analiz rezhimov s otklyucheniem osnovnogo oborudovaniya pervogo i vtorogo konturov i razrabotka rekomendatsii po povysheniyu dinamicheskoi ustoichivosti ehnergoblokov AEHS s VVEHR-1200 i VVEHR-TOI”* [Technical report by VNIIEAES “Calculation analysis of normal operation modes and modes of abnormal operation of systems and equipment of Unit 2 of the Novovoronezh NPP-2 on the topic: “Comprehensive analysis of modes with shutdown of the main equipment of the first and second circuits and development of recommendations for improving the dynamic stability of NPP power units with VVER-1200 and VVER-TOI”]. 2024.

12. Abagyan A. A., Emelianenko V. Yu., Zlokazov A. B., and Kroshilin A. E. (2000). *Sozdanie polnomasshtabnykh trenazherov dlya AEHS* [Creation of full-scale simulators for nuclear power plants]. *Atomnaya ehnergiya – Atomic Energy*, vol. 88, No. 6. Pp. 407–414. [in Russian].

### Сведения об авторах

*Поваров Владимир Петрович*, заместитель генерального директора, директор филиала АО «Концерн Росэнергоатом» «Нововоронежская атомная станция» (396072, Воронежская обл., г. Нововоронеж, промышленная зона Южная, д. 1).

*Тучков Максим Юрьевич*, заместитель главного инженера по эксплуатации 4 очереди, филиал АО «Концерн Росэнергоатом» «Нововоронежская атомная станция» (396072, Воронежская обл., г. Нововоронеж, промышленная зона Южная, д. 1).

*Поваров Пётр Владимирович*, начальник РЦ-6, филиал АО «Концерн Росэнергоатом» «Нововоронежская атомная станция» (396072, Воронежская обл., г. Нововоронеж, промышленная зона Южная, д. 1).

### Authors credentials

*Povarov Vladimir Petrovich*, Deputy General Director – Director of Novovoronezh Nuclear Power Plant branch of Rosenergoatom JSC (1, Yuzhnaya industrial zone, Novovoronezh, Voronezh reg., 396072), e-mail: PovarovVP@nvnpp1.rosenergoatom.ru.

*Tuchkov Maxim Yuryevich*, Deputy Chief Engineer for Operation of the 4th Stage, Novovoronezh Nuclear Power Plant branch of Rosenergoatom JSC (1, Yuzhnaya industrial zone, Novovoronezh, Voronezh reg., 396072), e-mail: TuchkovMU@nvnpp1.rosenergoatom.ru.

*Povarov Petr Vladimirovich*, Chief of reactor department No. 6, Novovoronezh Nuclear Power Plant branch of Rosenergoatom JSC (1, Yuzhnaya industrial zone, Novovoronezh, Voronezh reg., 396072), e-mail: PovarovPV@nvnpp1.rosenergoatom.ru.

### Для цитирования

*Поваров В. П., Тучков М. Ю., Поваров П. В.* Предложения по повышению динамической устойчивости энергоблоков с ВВЭР-1200 // *Ядерная и радиационная безопасность*. 2025. № 3 (117). С. 5–14. DOI: 10.26277/SECNRS.2025.117.3.001.

### For citation

*Povarov V. P., Tuchkov M. Yu., Povarov P. V.* (2025). *Predlozheniya po povysheniyu dinamicheskoi ustoichivosti ehnergoblokov s VVEHR-1200* [Methods of increasing the dynamic stability of power units with WVER-1200]. *Yadernaya i radiatsionnaya bezopasnost'* – Nuclear and Radiation Safety Journal, No. 3 (117), pp. 5–14. [in Russian]. DOI: 10.26277/SECNRS.2025.117.3.001.