

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ, ИЗГОТОВЛЕНИЕ И ВВОД
В ЭКСПЛУАТАЦИЮ ОБОРУДОВАНИЯ
ОБЪЕКТОВ АТОМНОЙ ОТРАСЛИ**
DESIGN, MANUFACTURE AND COMMISSIONING
COMMISSIONING OF EQUIPMENT
NUCLEAR INDUSTRY FACILITIES

<https://doi.org/10.26583/gns-2025-01-04>

EDN MNYPGH

Оригинальная статья / Original paper



**Опыт наладки системы автоматического регулирования турбины
К-1200-6,8/50**

**В.В. Филатов¹  , А.А. Беляков², А.А. Сорокин³, А.И. Бодров³,
А.В. Варзанов³, Н.С. Волков³**

¹ АО «Концерн Росэнергоатом», г. Москва, Российская Федерация

² Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина, г. Иваново,
Российская Федерация

³ АО «Силловые машины», г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

 Filatov-vv@rosenergoatom.ru

Аннотация. Строительство новых атомных электростанций по проекту АЭС-2006 потребовало от Ленинградского металлического завода (ЛМЗ) в проекте конденсационной турбины большой мощности К-1200-6,8/50 реализации электронной и гидравлической системы регулирования и защиты турбины (САРЗ) на основе опыта, конструктивных и схемных решений для аналогичной системы быстроходной турбины-аналога К-1000-60-3000 производства ЛМЗ. Несмотря на сохранение компоновки турбины по отношению к турбине-аналогу (2 ЦВД + ЦВД + 2 ЦНД), концепции управления турбиной посредством САРЗ и применения соответствующих конструктивных референтных решений ЛМЗ, в период пусконаладочных работ на энергоблоках Нововоронежской АЭС-2, как показал опыт, возникали случаи некорректной работы САРЗ по причине скрытых несоответствий отдельных элементов оборудования. Устранение причин некорректной работы гидравлических узлов зачастую непосредственно связано с поиском коренной причины «изнутри», т.е. требуется разборка оборудования. В представленной статье приведены случаи некорректной работы САРЗ и пути их решения из опыта пусконаладочных работ на турбине большой мощности К-1200-6,8/50 с кратким описанием проблемных гидравлических узлов САРЗ, объемов доработки конструктивных элементов. Приведенный в настоящей статье опыт пусконаладочных работ и по сей день является актуальным по причине проведения регулярных планово-предупредительных ремонтов на введённых в эксплуатацию энергоблоках проекта АЭС-2006, в процессе которых выполняется регламентная ревизия гидравлических элементов органов парораспределения, а также предпусковая проверка взаимодействия гидравлической (ГЧСР) и электронной (ЭЧСР) частей САРЗ. Кроме того, в настоящее время за рубежом выполняется ввод в эксплуатацию энергоблоков АЭС с турбиной К-1200-6,8/50 (Народная Республика Бангладеш), где описанный опыт по случаю может быть применен.

Ключевые слова: АЭС, система автоматического регулирования, пусконаладочные работы, блок регулирования, огнестойкая жидкость, ЭПП-С.

Для цитирования: Филатов В.В., Беляков А.А., Сорокин А.А., Бодров А.И., Варзанов А.В., Волков Н.С. Опыт наладки системы автоматического регулирования турбины К-1200-6,8/50. *Глобальная ядерная безопасность*. 2025;15(1):33–39. <https://doi.org/10.26583/gns-2025-01-04>

For citation: Filatov V.V., Belyakov A.A., Sorokin A.A., Bodrov A.I., Varzanov A.V., Volkov N.S. Setup experience in commissioning hydraulic control system of turbine K -1200-6,8/50. *Nuclear Safety*. 2025;15(1):33–39. (In Rus.). <https://doi.org/10.26583/gns-2025-01-04>

Setup experience in commissioning hydraulic control system of turbine K -1200-6,8/50

Vyacheslav V. Filatov¹  , Andrey A. Belyakov², Aleksandr A. Sorokin³,
Aleksandr I. Bodrov³, Andrey V. Varzanov³, Nikita S. Volkov³

¹ Joint Stock Company «Rosenergoatom», Moscow, Russian Federation

² State Educational Institution of Higher Professional Education Ivanovo State Power University named after V.I. Lenin, Ivanovo, Russian Federation

³ Joint Stock Company «Power machines», St. Petersburg, Russian Federation

 Filatov-vv@rosenergoatom.ru

Annotation. The construction of new nuclear power plants under the NPP-2006 project required Leningradsky Metallichesky Zavod (LMZ) to implement an electronic and hydraulic turbine regulation and protection system (TRPS) in the design of a large capacity condensing turbine K-1200-6,8/50, based on the experience, design and circuit solutions for a similar system of a high-speed turbine-analogue K-1000-60-3000 manufactured by LMZ. Despite the preservation of the turbine layout in relation to the turbine-analogue (2LP module + HP module + 2LP module), the turbine control concept through the TRPS and the available references at the stage of commissioning of the Novovoronezh NPP-2 power units (before the power unit was turned on to the grid), as experience has shown, there were cases of incorrect operation of the TRPS due to the ambiguity of the assembly or hidden inconsistencies. The elimination of the causes of incorrect operation of hydraulic assemblies is often directly related to the search for the root cause "from the inside", i.e. disassembly of equipment is required. The presented article shows cases of incorrect operation of the TRPS and ways to solve them from the experience of commissioning on a high-capacity turbine K-1200-6,8/50 with a brief description of the problematic TRPS hydraulic components, the amount of refinement of structural elements. The experience of commissioning described in this article is still relevant today due to regular scheduled preventive repairs at commissioned power units of the NPP-2006 project, during which a routine audit of the hydraulic elements of the steam distribution organs is carried out, as well as a pre-start check of the interaction of the hydraulic and electronic parts of the TRPS. In addition, the commissioning of nuclear power plants with turbine K-1200-6,8/50 is currently underway abroad (in People's Republic of Bangladesh) where the described experience can be applied on occasion.

Keywords: NPP, automatic control system, commissioning, control unit, fire-resistant liquid, EHC-A.

Успешное проведение пусконаладочных работ на технологических системах турбоустановки на этапе ввода энергоблока АЭС в эксплуатацию требует тщательной подготовки и сопровождения монтажа трубопроводов и оборудования (в том числе на этапе ревизии или расконсервации) для выявления возможных скрытых несоответствий отдельных элементов оборудования. Повышенное внимание к производству монтажных работ, обеспечению технологии «чистого» монтажа, соблюдению требований заводской и пусконаладочной документации на пусковых энергоблоках АЭС уделяется системе автоматического регулирования и защиты паровой турбины большой мощности, являющейся системой, обеспечивающей поддержание параметров турбины в различных режимах работы (режима разворота, поддержание номинальной частоты вращения, режим нагружения/разгрузки с требуемой скоростью, динамические режимы работы энергоблока).

В проекте систем турбоустановок К-1200-6,8/50 [1] энергоблоков АЭС, введенных в промышленную эксплуатацию за последние 10 лет в Российской Федерации и за рубежом (Новovoroneжская АЭС-2, Ленинградская АЭС-2, Белорусская АЭС), применена электрогидравлическая система регулирования и защиты производства Ленинградского металлургического завода (далее – ЛМЗ) (САРЗ) с применением в качестве рабочей среды огнестойкой жидкости. Объем модернизации САРЗ при сохранении конструктивной схемы 2 ЦНД + ЦВД + 2 ЦНД быстроходной турбины-прототипа меньшей мощности К-1000/60-3000 [2] следующий:

- применен электронный автомат безопасности наряду с механическим регулятором безопасности;
- функции управления, алгоритмы работы реализованы в микропроцессорном турбинном контроллере;
- сервомоторы регулирующих клапанов турбины оснащены блоками пружин (вместо

паровых сервомоторов) и индивидуальными электрогидравлическими преобразователями-сумматорами (ЭГП-С) [3];

– компоновка сливных коллекторов САРЗ по бортам турбины дополнена отдельным сливным коллектором ЭГП-С;

– понижена высота переливного порога всасывающих отсеков блока маслоснабжения.

Основными гидравлическими узлами в составе САРЗ являются: блок маслоснабжения, блок регулирования, ЭГП-С, сервомоторы органов парораспределения турбины (стопорные клапаны, регулирующие клапаны, сбросные клапаны, клапан греющего пара СПП). Следует отметить, что электрогидравлическая схема управления регулирующими клапанами турбины К-1200-6,8/50 реализована ЛМЗ с учетом обратной связи по управляющим давлениям [4].

Как показал опыт выполнения подготовительных и наладочных работ на вводимых в эксплуатацию энергоблоках Нововоронежской АЭС-2 из перечисленного выше перечня гидравлических узлов следует выделить несколько элементов, правильная настройка и работа которых непосредственно влияет на ход проведения наладочных работ и сроки завершения комплексного опробования САРЗ в целом. Таковыми являются блок регулирования и ЭГП-С. Именно эти элементы САРЗ потребовали большего времени на выявление причин отклонения в работе САРЗ на турбине с невращающимся ротором после проведения ревизии оборудования, предмонтажных очисток и сборки штатной схемы маслопроводов.

Вибрация трубок внутри блока регулирования

Блок регулирования САРЗ (рис. 1), расположенный на отливе первой опоры паровой турбины, представляет собой главную узловую точку распределения рабочей среды «внутри себя» (элементы, выполняющие защитную функцию: золотники отключения турбины, регулятор безопасности) [5] и к гидравлическим узлам органов парораспределения турбины (ЭГП-С, сервомоторы). Штатная подача огнестойкой жидкости (ОЖ) в блок регулирования осуществляется из

блока маслоснабжения, при этом предэксплуатационный разогрев ОЖ до требуемого ЛМЗ диапазона температур от 45 до 55 °С выполняется одним из штатных насосных агрегатов Н1 (Н2) (рис. 2). На энергоблоке № 1 Нововоронежской АЭС после разогрева ОЖ и перевода механизма управления турбины (МУ) в положение 90°, инициирующее рабочее состояние ЭГП-С и взвод стопорных клапанов турбины, появлялась высокочастотная вибрация внутри блока регулирования. Возможность идентифицировать источник вибрации по причине закрытой конструкции блока регулирования отсутствовала. При этом параметры давления ОЖ в блоке регулирования соответствовали требованиям заводской документации. Недлительная работа САРЗ с вибрацией внутри блока регулирования приводила к разрыву сварных швов линии подачи ОЖ на вход в ЗРБ. Дополнительное раскрепление жесткими связями линии ЗРБ к устранению вибрации не приводило. По результатам ревизии обратного клапана ОК1 (рис. 2, 3) зафиксированы разрушения направляющих для движения шарика. Доработка конструкции обратного клапана на площадке ЛМЗ и согласование переноса места установки обратного клапана внутри блока регулирования в непосредственной близости к МУ (рис. 1) привело к устранению вибрации трубок при номинальном температурном режиме работы САРЗ.



Рисунок 1. Внутренние элементы блока регулирования турбины К-1200-6,8/50 (обратный клапан перенесен)

Figure 1. TRPS control block internal components (check valve replaced)

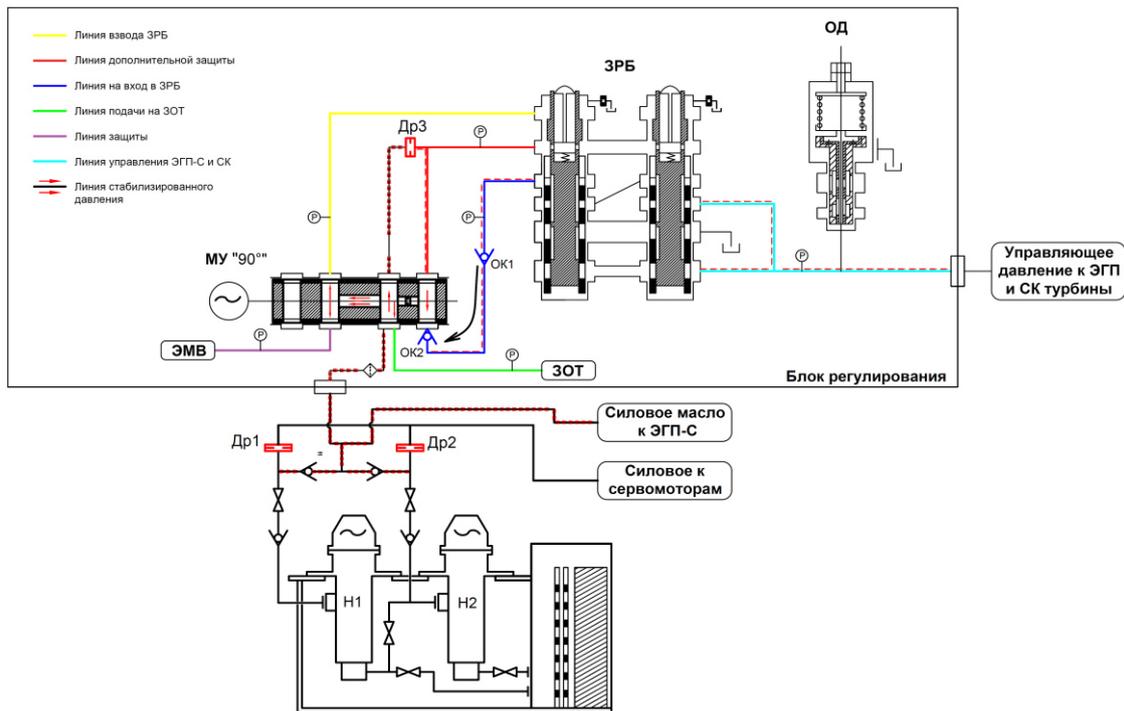


Рисунок 2. Принципиальная схема блока регулирования САРЗ: МУ – механизм управления; ЗРБ – золотники регулятора безопасности; ОД – ограничитель давления; ЗОТ – золотники отключения турбины; ЭМВ – электромагнитные выключатели; Н1, Н2 – маслососы регулирования

Figure 2. Schematic diagram of TRPS control block: GE – governance engine; SSP – safety control spool valves; PR – pressure restrictor; TTSV – turbine trip spool valves; EMS – electromagnetic switcher; P1, P2 – control liquid oil pumps

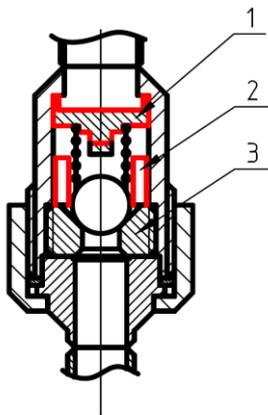


Рисунок 3. Обратный клапан внутри блока регулирования (объем доработки): 1 – доработанная форма упора; 2 – дополнительные направляющие; 3 – седло клапана

Figure 3. Check valve inside TRPS control block (modified): 1 – modified support, 2 – additional railings, 3 – valve seat

Несоответствие параметров давления внутри блока регулирования

Первый ввод в работу САРЗ после проведения послемонтажных очисток и сборки проектной схемы трубопроводов, гидравли-

ческих узлов помимо поиска неплотности системы требует определения соответствия параметров давления внутри блока регулирования (БР) требованиям заводской документации при номинальной температуре ОЖ в диапазоне от 45 до 55 °С. Конструкцией блока регулирования САРЗ турбоустановки К-1200-6,8/50 предусматривается контроль давления ОЖ в линии защиты ($P_{ЗЩ}$), линии к золотникам отключения турбины ($P_{ЗОТ}$), линии управляющего давления к сервомоторам стопорных кланов и ЭГП-С ($P_{УПР.СК}$), линии на взвод ЗРБ ($P_{ЗРБ}$), линии на вход в ЗРБ ($P_{ВХ.ЗРБ}$), линии дополнительной защиты ($P_{ДЗ}$), причем контроль давлений выполняется в двух режимах работы САРЗ: (1) МУ в положении «0°», (2) МУ в положении «90°». На энергоблоке № 1 Нововоронежской АЭС-2 в режиме (2) зафиксировано отклонение давлений (табл. 1) в линиях $P_{ДЗ}$, $P_{ВХ.ЗРБ}$, $P_{УПР.СК}$, которые непосредственно обеспечивают возможность управления стопорными клапанами турбины и ЭГП-С.

Таблица 1. Параметры БР

Table 1. Control Unit Parameters

Р _{ЗАЩ}	Р _{ДЗ}	Р _{ЗОТ}	Р _{ЗРБ}	Р _{ВХ.ЗРБ}	Р _{УПР.СК}
Номинальные параметры БР, МПа					
5,0	4,1	5,1	5,0	3,4	3,4
Фактические параметры БР, МПа					
5,0	2,3	5,1	5,0	2,2	2,2

Выполнение контрольного протягивания соединений трубок с гидравлическими узлами внутри БР, как мероприятие, являющееся распространенным на этапе пусконаладочных работ, к устранению причины пониженных давлений БР не привело. Вторым мероприятием по устранению описанного несоответствия являлось выполнение ревизии гидравлической части МУ с привлечением специалистов ЛМЗ для поиска причин неоднозначности сборки, соответствия размеров внутренних элементов МУ (золотник, букса, корпус и др.) детализированным чертежам. Основным внутренним элементом МУ, ограничивающим расход ОЖ в режиме рабо-

ты, (2) и, как следствие, возможное снижение давления рабочей среды, является дроссельная шайба диаметром 4 мм (ДР4), установленная в патрубке линии дополнительной защиты (рис. 4). По результатам ревизии МУ и проведенного анализа причин совместно с представителями ЛМЗ выявлено скрытое несоответствие, не позволявшее идентифицировать себя явно по заводским чертежам – местоположение дроссельной шайбы (рис. 4, поз. 2) не соответствовало требованиям чертежа и препятствовало потоку ОЖ в линию дополнительной защиты. Нарезка внутренней резьбы для дроссельной шайбы выполнена сквозной через корпус МУ. В такой конструкции при установке ДР4 стопорение внутри штуцера к линии дополнительной защиты не обеспечивалось, тем самым ограничивался проток ОЖ (ДР4 вкручивалась до упора в буксу золотника (рис. 4, поз. 1).

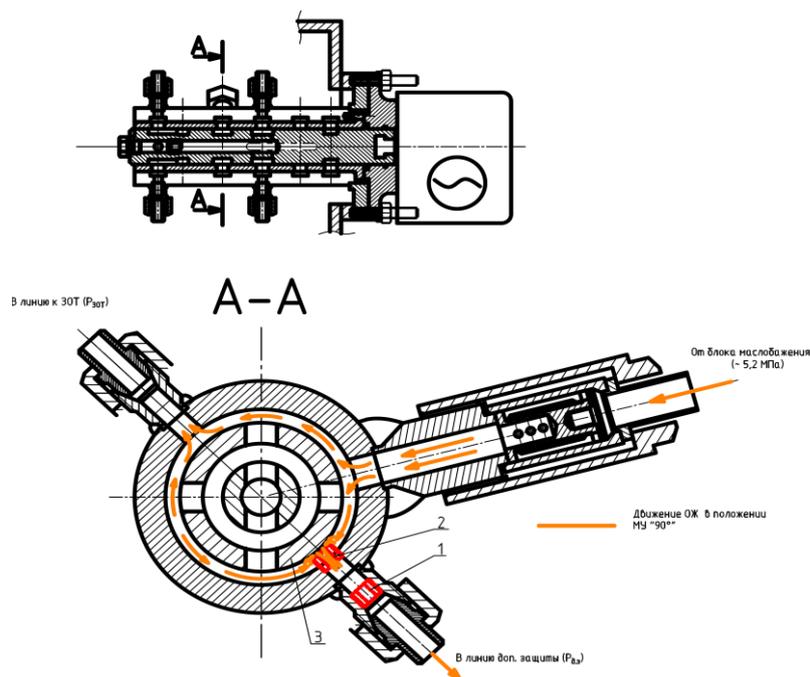


Рисунок 4. Механизм управления БР: 1 – проектное положение дроссельной шайбы; 2 – положение шайбы при ревизии; 3 – букса золотника
Figure 4. Control block governance engine: 1 – throttle design position, 2 – throttle position during inspection, 3 – axle-box of spool valve

Как показывает опыт РФ ввода в эксплуатацию АЭС большой мощности наладочные работы САРЗ турбин

производства ЛМЗ выполняются на завершающем этапе основных пусковых операций вводимого энергоблока (после

проведения холодно-горячей обкатки реакторной установки). Приведенные выше случаи из опыта наладочных работ на первый взгляд кажутся слишком «локальными» и понятными, но, стоит отметить, затраченный временной ресурс на поиск коренных причин для устранения несоизмеримо велик.

Выводы

1. Устранение скрытых несоответствий САРЗ турбин К-1200-6,8/50 в период пусконаладочных на энергоблоке № 1 Нововоронежской АЭС-2 подтвердили соответствие заявленных ЛМЗ характеристик как на отдельных гидравлических узлах, так и в процессе комплексного опробования турбоустановки в целом (режим холостого хода, работа под нагрузкой, динамические режимы), в том числе, в части отработки задания по поддержанию заданной мощности турбогенератора или давления пара второго кон-

тура от автоматического регулятора мощности (АРМ) реакторной установки.

2. Выполненные доработки элементов САРЗ турбины энергоблока № 1 Нововоронежской АЭС-2 были учтены на очередном вводимом энергоблоке № 2 Нововоронежской АЭС-2 в период монтажа турбины (до проведения пусконаладочных работ), что позволило сократить время выполнения настройки ГЧСР в период активного этапа ввода энергоблока.

3. С 2015 г. опыт проведения пусконаладочных работ САРЗ турбины К-1200-6,8/50 энергоблока № 1 Нововоронежской АЭС-2 распространен на турбины-аналоги однотипных энергоблоков (Ленинградская АЭС-2, Белорусская АЭС) и по настоящее время является востребованным и совершенствуется в РФ и за рубежом по причине необходимости выполнения в периоды ежегодных планово-предупредительных ремонтов АЭС выполнения регламентной настройки САРЗ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Поваров В.П., О.Л. Безручко, И.Н. Гусев, Д.Е. Усачев. Паротурбинная установка К-1200-6,8/50. Воронеж: Диагат, 2021. 499 с. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?edn=mvvlib> (дата обращения 06.11.2024).
2. Глазер Ф.Ю., Друзь А.Г., Лишук В.В., Сухой Я.И. [и др.]. Наладка и испытание автоматической системы регулирования турбины К-1000-60/3000 ЛМЗ. *Теплоэнергетика*. 1990;11. Режим доступа: <http://unilibrary.ru/articles/journals/teploenergetika/teploenergetika-1990/teploenergetika-1990-11/glazer-fju-druz-ag-dishhuk-vv-suhoy-jai-fragin-ms-chernjavskij-li-volchegorskij-ml-naladka-i-ispitanie-avtomaticheskoy-sistemi-regulirovanija-turbini-k-1000-603000-lmz.html> (дата обращения: 09.11.2024).
Glazer F.U., Druz A.G., Lishuk V.V., Suhoj Y.I. et al. Commissioning and testing automatic control system of turbine K-1000-60/3000 LMZ. *Thermal Engineering*. 1990;11. Available at: <http://unilibrary.ru/articles/journals/teploenergetika/teploenergetika-1990/teploenergetika-1990-11/glazer-fju-druz-ag-dishhuk-vv-suhoy-jai-fragin-ms-chernjavskij-li-volchegorskij-ml-naladka-i-ispitanie-avtomaticheskoy-sistemi-regulirovanija-turbini-k-1000-603000-lmz.html> (accessed: 09.11.2024).
3. Фрагин М.С., Онацко А.Ф., Волчегорский М.Л., Комаров Д.В., Усанов М.А. Патент РФ на изобретение № 2154201 от 14.08.98. Механогидравлический преобразователь. Режим доступа: https://rusneb.ru/catalog/000224_000128_0098115486_20000610_A_RU/ (дата обращения: 06.11.2024).
Fragin M.S., Onatsko A.F., Volchegorskij M.L., Komarov D.V., Usanov M.A. Russia Federation patent on invention № 2154201 dated 14.08.98. Mechanical-hydraulic converter. Available at: https://rusneb.ru/catalog/000224_000128_0098115486_20000610_A_RU/ (accessed: 06.11.2024).
4. Фрагин М.С. Регулирование и маслоснабжение паровых турбин: настоящее и ближайшая перспектива. Санкт-Петербург: Энерготех, 2005. 247 с. Режим доступа: https://rusneb.ru/catalog/000199_000009_002711884/ (дата обращения: 06.11.2024).
5. Фрагин М.С., Щетинин А.А., Волчегорский М.Л., Любан Е.А. и др. Системы регулирования конденсационных турбины большой мощности ЛМЗ. *Теплоэнергетика*. 1972;11. Режим доступа: <https://clck.ru/3HqdB> (дата обращения: 09.11.2024).
Fragin M.S., Schetinina A.A., Volchegorskij M.L., Ljuban E.A. et al. High-power condensing turbines control systems of LMZ production. *Thermal engineering*, 1972; 11. Available at: <https://clck.ru/3HqdB> (accessed: 09.11.2024).

ВКЛАД АВТОРОВ:

Филатов В.В. – непосредственное участие в проведении пусконаладочных работ, формулировка идей, анализ полученных результатов испытаний, разработка статьи;

Беляков А.А. – методологическая поддержка при написании статьи, подготовка материалов к печати;

Сорокин А.А. – участие в проведении пусконаладочных работ, разработка статьи;

Бодров А.И. – исследование, анализ полученных результатов пусконаладочных работ, формулировка идей о возможных причинах некорректной работы элементов САРЗ;

Варзанов А.В. – анализ полученных результатов пусконаладочных работ, разработка технических решений по доработке конструктивных элементов САРЗ;

Волков Н.С. – обработка, систематизация материалов статьи, подготовка к печати.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ:

Авторы заявляют об отсутствии источников финансирования.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ:

Конфликта интересов нет.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ:

Филатов Вячеслав Витальевич, руководитель проекта департамента по реализации проектов ввода энергоблоков в АО «Концерн Росэнергоатом» (центральный аппарат), г. Москва, Российская Федерация.
<https://orcid.org/0009-0004-8814-972X>
e-mail: Filatov-vv@rosenergoatom.ru

Беляков Андрей Александрович, кандидат технических наук, заведующий кафедрой атомных электрических станций Ивановского Государственного Энергетического Университета им. В.И. Ленина (ИГЭУ), г. Иваново, Российская Федерация.
e-mail: Bel-aes@ya.ru

Сорокин Александр Александрович, главный специалист Управления шефмонтажа турбинного оборудования ЛМЗ АО «Силловые машины», г. Санкт-Петербург, Российская Федерация.
e-mail: Sorokin_AA3@power-m.ru

Бодров Александр Игоревич, заместитель начальника отдела СКБ «Турбин» АО «Силловые машины», г. Санкт-Петербург, Российская Федерация.
e-mail: Bodrov_AI@power-m.ru

Варзанов Андрей Владимирович, начальник отдела СКБ «Турбина» АО «Силловые машины», г. Санкт-Петербург, Российская Федерация.
e-mail: Varzanov_AV@power-m.ru

Волков Никита Сергеевич, инженер-конструктор СКБ «Турбина» АО «Силловые машины», г. Санкт-Петербург, Российская Федерация.
e-mail: Volkov_NS@power-m.ru

AUTHORS' CONTRIBUTION:

Filatov V.V. – direct participation in the commissioning work, formulation of ideas, analysis of the test results, article development;

Belyakov A.A. – methodological support during the writing of the article, preparation of materials for publication;

Sorokin A.A. – participation in the commissioning work, article development;

Bodrov A.I. – research, analysis of the results of commissioning, formulation of ideas, adoption of technical solutions for the refinement of structural elements;

Varzanov A.V. – result analysis of the commissioning works, the development of technical solutions for the modified structural elements of the TRPS;

Volkov N.S. – processing, systematization of the article materials, preparation for printing.

FUNDING

The authors state that there are no sources of funding.

CONFLICT OF INTEREST:

No conflict of interest.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS:

Vyacheslav V. Filatov, project manager of new nuclear power plants project implementation JCS «Rosenergoatom» (central office), Moscow, Russian Federation.
<https://orcid.org/0009-0004-8814-972X>
e-mail: Filatov-vv@rosenergoatom.ru

Andrey A. Belyakov, Cand. Sci. (Eng.), Head of nuclear power plants department Ivanovo State Power University (ISPU), Ivanovo, Russia Federation.
e-mail: Bel-aes@ya.ru

Aleksandr A. Sorokin, main expert of installation supervision department » JCS «Power Machines», St. Petersburg, Russian Federation.
e-mail: Sorokin_AA3@power-m.ru

Aleksandr I. Bodrov, deputy head of Department SCB «Turbine» JCS «Power Machines», St. Petersburg, Russian Federation.
e-mail: Bodrov_AI@power-m.ru

Andrey V. Varzanov, head of Department SCB «Turbine» JCS «Power Machines», St. Petersburg, Russian Federation.
e-mail: Varzanov_AV@power-m.ru

Nikita S. Volkov, structural engineer of SCB «Turbine» JCS «Power Machines», St. Petersburg, Russian Federation.
e-mail: Volkov_NS@power-m.ru

Поступила в редакцию / Received 17.11.2024

После доработки / Revision 03.02.2025

Принята к публикации / Accepted 06.02.2025