

УДК 621.039.4

doi: 10.18698/0536-1044-2022-5-15-26

Опыт виброналадки турбогенераторов К-1200-6.8/50 + ТЗВ-1200-2АУЗ первого и второго энергоблоков Нововоронежской АЭС

Г.В. Аркадов¹, И.Н. Гусев², М.Т. Слепов², Д.Е. Усачев², Д.Г. Эсперов³

¹ АО «Научно-технический центр «Дианпром»

² АО «Концерн Росэнергоатом» Нововоронежская АЭС

³ ОАО «Научно-производственное объединение по исследованию и проектированию энергетического оборудования им. И.И. Ползунова

On Vibration Control of Turbo Generators K-1200-6.8/50 + ТЗВ-1200-2АУЗ Installed in the First and Second Units of Novovoronezh Nuclear Power Plant

G.V. Arkadov¹, I.N. Gusev², M.T. Slepov², D.E. Usachev², D.G. Esperov³

¹ Joint Stock Company Scientific Technical Center Diaprom

² Novovoronezh NPP, branch of Rosenergoatom JSC

³ JSC I.I. Polzunov Scientific and Development Association on Research and Design of Power Equipment

Приведены краткие сведения о турбинной установке К-1200-6.8/50, являющейся составной частью инновационного блока ВВЭР-1200. Основным преимуществом этой установки перед аналогами является использование полного водяного охлаждения с отказом от охлаждения водородом, заполняющим внутреннее пространство генератора, что исключает возможность взрыва и возгорания. Непосредственное охлаждение обмотки статора генератора осуществляется дистиллятом, подаваемым в полые водоохлаждающие элементы, выполненные из нержавеющей стали и уложенные в пазы статора, и циркулирующим по замкнутому контуру. Количество полых водоохлаждающих элементов в пазах статора генератора определяется стремлением к достаточной эффективности охлаждения и наименьшим электромагнитным потерям. Рассмотрены особенности вибрационных проявлений и виброналадки турбогенератора в части узла генератор — возбудитель, так как в процессе балансировки для коррекции вибрации с минимальными затратами времени на установку и корректировку грузов наиболее доступны плоскости, расположенные на роторах генератора и возбудителя. Исследована возможность снижения осевых составляющих колебаний опор № 10 и 11 путем балансировки роторов валопровода в собственных подшипниках на рабочей частоте.

Ключевые слова: спектральный состав вибрации, виброналадка турбогенератора, резонанс ротора генератора, лобовые части статора, водяное охлаждение, осевые колебания опор

The paper briefly describes the K-1200-6.8/50 turbine, a component of the innovative VVER-1200 pressurised water reactor unit. The main advantage of this turbine is that instead of implementing cooling by filling the generator interior with hydrogen it uses full water cooling, which prevents explosion or combustion. Direct cooling of the stator winding works as follows: distillate circulating in a closed circuit flows through hollow stainless steel water-cooling components laid within the stator grooves. The number of hollow water-cooling elements in the stator grooves is dictated by a desire to ensure sufficient cooling effi-

ciency while minimising electromagnetic losses. The paper considers the features of vibration manifested and vibration control of the turbo generator in terms of the generator-exciter assembly, as, when seeking to minimise time spent on mounting and adjusting loads while performing vibration correction via balancing, the most readily available planes are those located on the rotors of the generator and exciter. We investigated the possibility to reduce axial components of oscillations occurring in supports No. 10 and 11 by balancing the shaft line rotors in their own bearings at the operating frequency.

Keywords: spectral composition of vibration, turbo generator vibration control, rotor resonance, stator overhang, water cooling, axial oscillations in supports

По данным Международного энергетического агентства, доля атомной энергетики в мировом энергетическом балансе составит 16 % к 2030 г. Мощность атомных электростанций (АЭС) в России увеличится к этому году на 28 ГВт. Их доля от всей выработки электроэнергии в России будет равна 25 %.

В последние годы государственная корпорация «Росатом» (далее ГК «Росатом») построила АЭС «Тяньвань» в Китае, АЭС «Бушер» в Иране и АЭС «Куданкулам» в Индии. В планах ГК «Росатом» строительство по российским проектам АЭС: 28 энергоблоков в России и 22 энергоблока за рубежом.

В построенных ГК «Росатом» энергоблоках отечественных и зарубежных АЭС мощностью 1000 МВт применена реакторная установка ВВЭР-1000. В новых проектах ГК «Росатом» предусмотрено использование энергоблока ВВЭР-1200 и турбинной установки (далее турбина) мощностью 1200 МВт.

Разработка паротурбинных установок для этих проектов требовала учета существенных различий в проектных требованиях (по мощности турбины, температуре и расходу охлаждающей воды, габаритным и весовым ограничениям и т. д.). ГК «Росатом» планирует строительство по российским проектам АЭС в Индии, Иране, Турции, Бангладеш, Вьетнаме, Иордании и других странах.

Цель работы — представить в краткой форме некоторые особенности виброналадки турбины энергоблоков поколения 3+ на основе опыта, полученного при работе на первом и втором энергоблоках Нововоронежской АЭС-2.

Конструктивные особенности турбины энергоблока с реакторной установкой ВВЭР-1200.

Основным источником энергии для работы турбогенератора ТЗВ-1200-2АУЗ служит быстросходная турбина К-1200-6,8/50 производства филиала ОАО «Силловые Машины» ЛМЗ. Она представляет собой конденсационную паровую

одновальную турбину с промежуточной сепарацией и двухступенчатым перегревом пара, с рабочей частотой вращения (ЧВ) 3000 мин^{-1} , длиной последней лопатки цилиндров низкого давления (ЦНД) 1200 мм, изготавливаемых из титанового сплава ВТ-6 [1].

Парораспределение турбины — дроссельное (изменение ее мощности происходит не только по причине уменьшения расхода пара, но и вследствие уменьшения теплоперепада ее проточной части).

Турбина установлена в закрытом машинном зале и рассчитана на работу в базовой части графика нагрузок, а также на участие в нормальном и аварийном регулировании мощности энергосистемы (с возможностью покрытия переменной части графиков нагрузок).

Турбина К-1200-6,8/50 предназначена для работы на насыщенном паре со следующими параметрами: давление пара перед турбиной — 6,8 МПа, температура — $283,8^\circ\text{C}$. По конструктивному исполнению — соотношению числа цилиндров высокого давления (ЦВД) и ЦНД — турбина К-1200-6,8/50 напоминает «бабочку»: 2ЦНД + ЦВД + 2ЦНД. Схема продольного разреза турбины К-1200-6,8/50 приведена на рис. 1 [1–3].

Симметрия турбины относительно ЦВД позволяет равномерно нагрузить подшипниковые опоры (далее опоры), снизить приходящиеся на ее патрубки усилия, упростить компенсацию тепловых расширений паропроводов, выполнить симметричную обвязку трубопроводами сепараторов-пароперегревателей, обеспечивающую надежную эксплуатацию этих аппаратов.

ЦВД имеет шесть ступеней давления в каждом потоке. Из камер отбора за второй, третьей и пятой ступенями каждого из потоков ЦВД предусмотрены отборы пара на регенеративный подогрев питательной воды в подогревателях высокого давления (ПВД) ПВД6, ПВД5 и деаэраторе. Из выхлопа ЦВД пар отбирается на

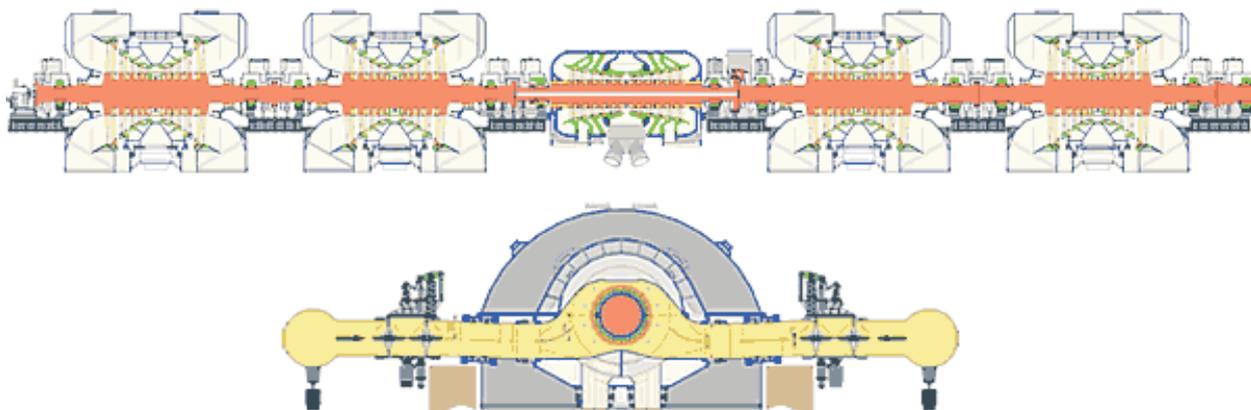


Рис. 1. Схема продольного разреза турбины К-1200-6,8/50

ПНД4. Проточная часть ЦНД состоит из пяти ступеней. Каждый ЦНД является двухпоточным и имеет наружный и внутренний корпуса [1, 4].

Турбогенератор ТЗВ-1200-2АУЗ представляет собой синхронную машину переменного тока с полным водяным охлаждением. Система охлаждения турбогенератора — водяная двухконтурная с циркуляцией охлаждающего дистиллята по замкнутому контуру. Первый контур включает в себя цепи охлаждения обмотки статора и охладителей нажимных колец. Второй контур предназначен для охлаждения обмотки возбуждения и демпферной обмотки, сердечника статора, посадочных мест лабиринтных уплотнений вала.

Корпус статора заполнен воздухом при давлении, близком к атмосферному. Система вентиляции внутреннего пространства генератора обеспечивает непрерывный поток воздуха через статор и зазоры в лабиринтных уплотнениях, предотвращая попадание влаги или увлажненного воздуха внутрь статора из сливных камер.

Для поддержания температуры и влажности воздуха внутри генератора в необходимых пределах при длительном останове и для исключения увлажнения изоляции установлены электронагреватели. Опора турбогенератора со стороны возбуждителя и опоры возбуждителя предусматривают применение жидкости ОМТИ и снабжены резервными емкостями, обеспечивающими опоры смазкой в случаях кратковременных перерывов питания и аварийного останова турбогенератора при отказе всех электронасосов смазки.

Система смазки опор генератора — общая с турбиной, принудительная. Применение пол-

ного водяного охлаждения с отказом от водорода, заполняющего внутреннее пространство генератора, является важнейшим достоинством, исключающим возможность взрыва и возгорания.

Статор имеет две трехфазные обмотки по схеме «звезда», которые сдвинуты относительно друг друга на 30 электрических градусов. Каждая обмотка содержит две параллельные ветви. Система возбуждения — бесщеточная диодная. Бесщеточный возбудитель состоит из синхронного генератора обращенного типа и вращающегося выпрямителя [5].

Автоматический регулятор возбуждения построен по принципу подчиненного регулирования. Внешний контур регулирования напряжения генератора замыкается через его автоматический регулятор напряжения, реализующий пропорционально-интегрально-дифференциальный закон регулирования.

Внутренний контур регулирования тока возбуждения возбудителя замыкается через соответствующий регулятор напряжения, реализующий пропорционально-интегральный закон. Внутренний контур имеет ограничение, предотвращающее недопустимое повышение напряжения на обмотке ротора [6–8].

Непосредственное охлаждение обмотки статора генератора осуществляется дистиллятом, подаваемым в полые водоохлаждающие элементы (выполненные из нержавеющей стали и уложенные в пазы статора) и циркулирующим по замкнутому контуру. Количество таких элементов в пазах статора генератора определяется, с одной стороны, обеспечением достаточной эффективности охлаждения, а с другой — стремлением к наименьшим электромагнитным потерям.



Рис. 2. Внешний вид статора с системой водяного охлаждения обмотки

К системе водяного охлаждения обмотки статора (рис. 2) предъявляются следующие требования:

- полная проходимость всех каналов в течение всего срока эксплуатации;
- хорошая герметичность;
- высокие диэлектрические свойства ди-стиллята.

Подача дистиллята осуществляется в автоматическом режиме. При превышении ЧВ ротора $n = 520 \text{ мин}^{-1}$ задвижки, подающие дистиллят, открываются наполовину, а при достижении $n = 1000 \dots 1100 \text{ мин}^{-1}$ — полностью [1].

Особенности вибрационных явлений и виброналадки турбогенератора К-1200-6.8/50. Рассмотрим особенности вибрационных проявлений и виброналадки турбогенератора в узле генератор — возбудитель, так как в процессе балансировки для коррекции вибрации с минимальными затратами времени на установку и корректировку грузов наиболее доступны плоскости, расположенные на роторах генератора (РГ) и возбудителя (РВ).

Резонанс РГ на ЧВ 500 мин^{-1} . Резонанс РГ в поперечном направлении наблюдается в опорах № 10–12 при ЧВ $n \approx 500 \text{ мин}^{-1}$ (рис. 3). Максимальные значения колебаний РГ фиксируются в опоре № 11 (в случае неудовлетворительной сбалансированности размах колебаний в поперечном направлении может достигать 500... 550 мкм и более, в вертикальном направлении колебания значительно ниже).

Следует отметить, что указанный резонанс никак не отражается на вибрации самих опор № 11 и 12, что видно из рис. 4, где СКЗ — среднее квадратическое значение виброскорости колебаний. Выдержка турбоагрегата на указанной ЧВ связана с технологической необходимостью, так как в этот период (что указывалось ранее) происходит заполнение РГ охлаждающим дистиллятом. Изменение вибрации РГ при постоянной ЧВ обусловлено протеканием процесса заполнения дистиллятом.

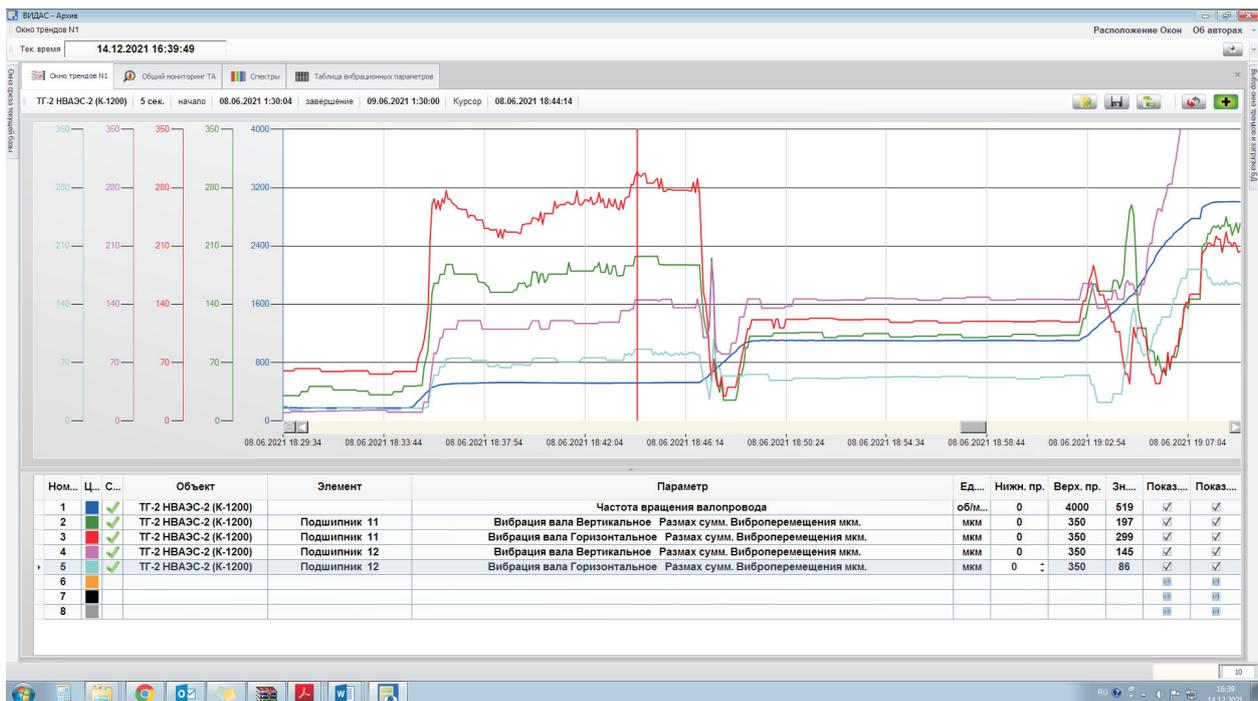


Рис. 3. Зона резонанса РГ в поперечном направлении на ЧВ $n = 520 \text{ мин}^{-1}$

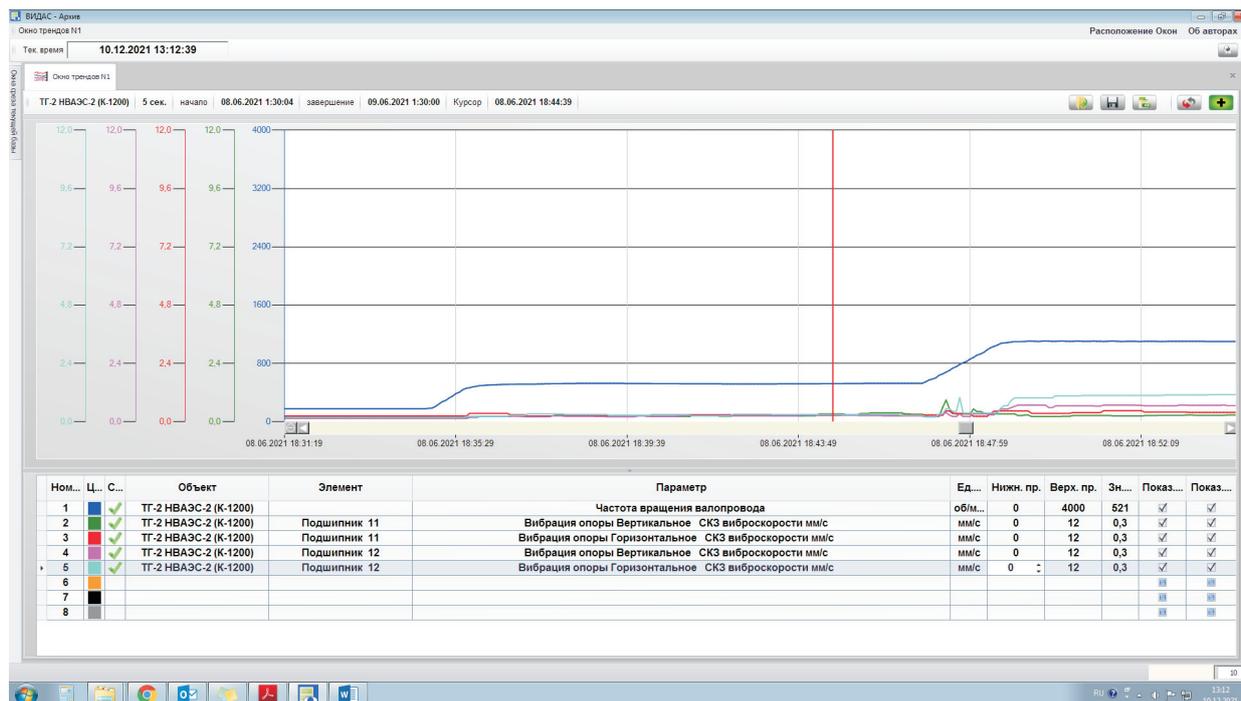


Рис. 4. Зависимость вибрации опор № 11 и 12 от ЧВ валопровода (зона резонанса РГ)

Резонансы РГ после его полного заполнения охлаждающим дистиллятом. Наличие осевого резонанса опорных элементов на стыке узла турбина — генератор, близкого к рабочей ЧВ. Резонанс РГ в вертикальном направлении наблюдается при ЧВ $n \approx 1650 \text{ мин}^{-1}$ (первой критической ЧВ РГ, рис. 5). Наличие резонансов РГ при увеличении указанной ЧВ, вплоть до частот срабатывания автоматов безопасности, не зафиксировано [9, 10].

Следует отметить, что при ЧВ $n = 2750...2820 \text{ мин}^{-1}$ резонанс опорной системы находится в районе опор № 10 и 11 (рис. 6). Расположение этого резонанса близко к рабочим оборотам, что вызывает сложности в ходе виброналадки, так как при определенных условиях распределения вертикальных составляющих колебаний указанных опор (соотношение фаз колебаний близко к 180° при том, что значения вертикальных составляющих вибрации могут быть не выше $2,0...2,5 \text{ мм/с}$) возникает значительный момент, приводящий к повышенным колебаниям в осевом направлении до $5...7 \text{ мм/с}$.

Как видно из рис. 6, при вертикальных составляющих $3,1$ и $4,5 \text{ мм/с}$ осевые составляющие равны соответственно $10,4$ и $10,0 \text{ мм/с}$. Поскольку специальных испытаний по определению податливости опорных элементов и

фундамента на агрегатах такого типа не проводилось, дать заключение о том, какой именно узел находится в резонансе сложно.

Однако наиболее вероятно, что им является ригель фундамента под опорами с пониженной динамической жесткостью, так как даже при резонансе РГ на ЧВ $n = 1650 \text{ мин}^{-1}$ колебания опор № 10 и 11 в осевом направлении выше, чем в вертикальном [11, 12].

Наличие и доступность штатных плоскостей коррекции. Традиционно на рассматриваемом агрегате являются доступными следующие плоскости коррекции: торцевые плоскости на РГ, муфта РГ–РВ и торцевые плоскости на РВ. Для доступа к торцевым плоскостям на РГ предусмотрены люки в лобовых частях статора генератора. Однако их расположение сложно назвать удобным, так как доступ к ним затруднен ввиду отсутствия каких-либо площадок или уступов для удобства размещения специалиста, проводящего установку груза на РГ.

Влияние грузов на вертикальные и осевые составляющие вибрации опор. Помимо стандартной задачи виброналадки по снижению уровней вибрации опор и роторов в данном случае из-за наличия резонанса в осевом направлении при ЧВ $n = 2750...2820 \text{ мин}^{-1}$ приходится решать задачу снижения осевых составляющих колебаний опор № 10 и 11 путем балансировки

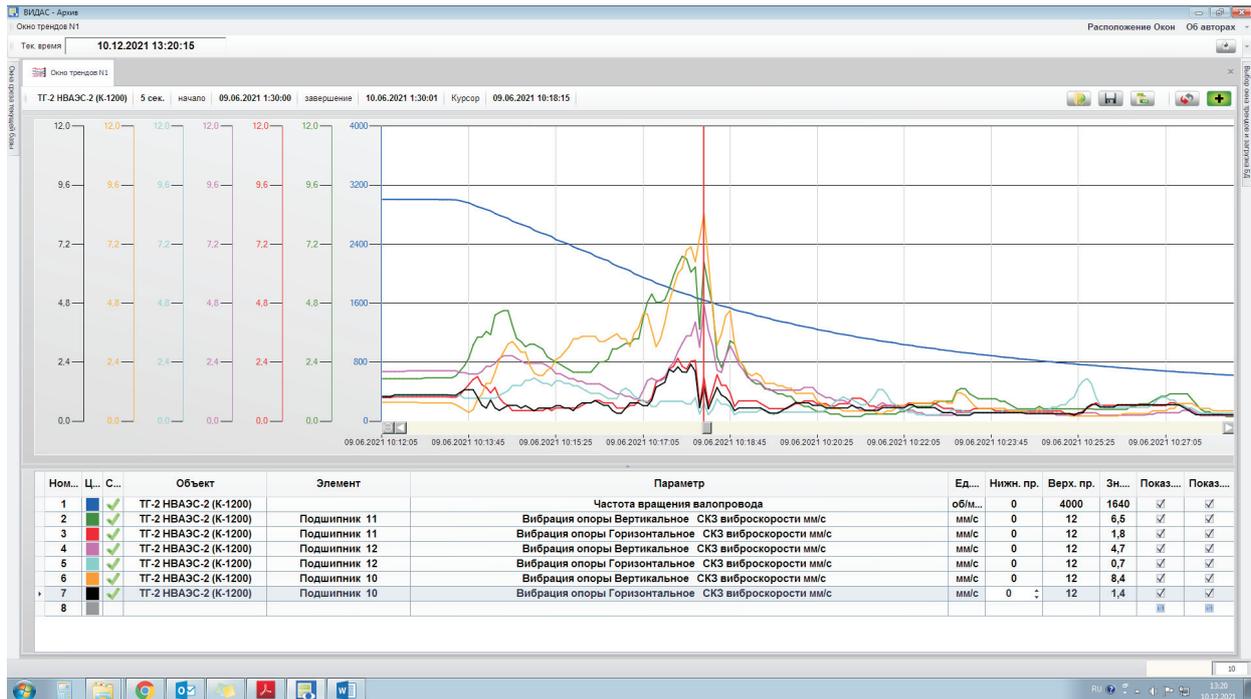


Рис. 5. Зона резонанса РГ в вертикальном направлении на ЧВ $n = 1650 \text{ мин}^{-1}$

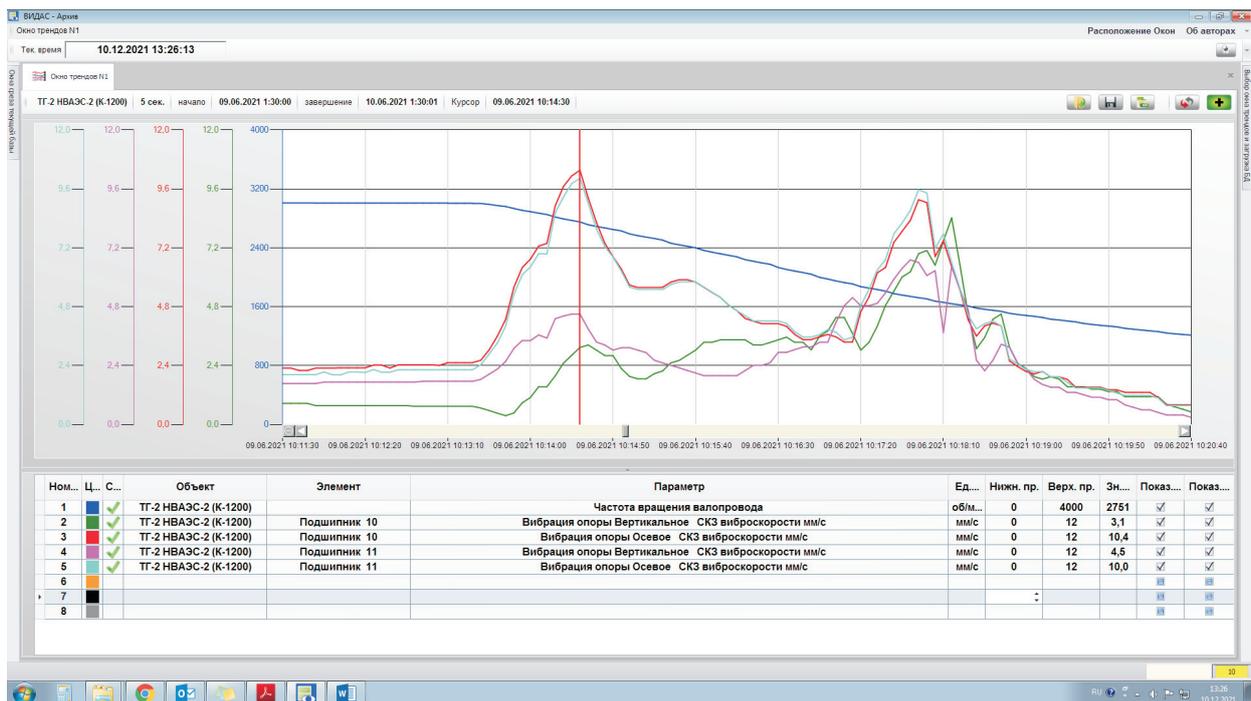
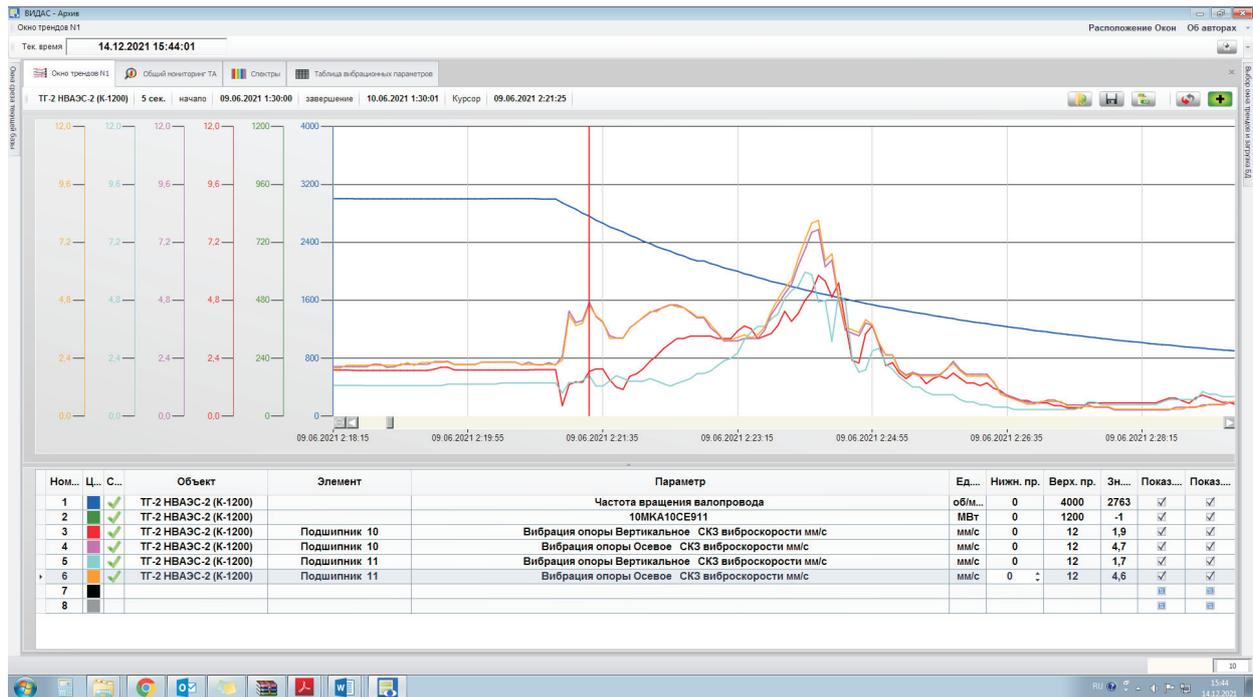


Рис. 6. Зона резонанса опорной системы в осевом направлении на ЧВ $n = 2750...2820 \text{ мин}^{-1}$

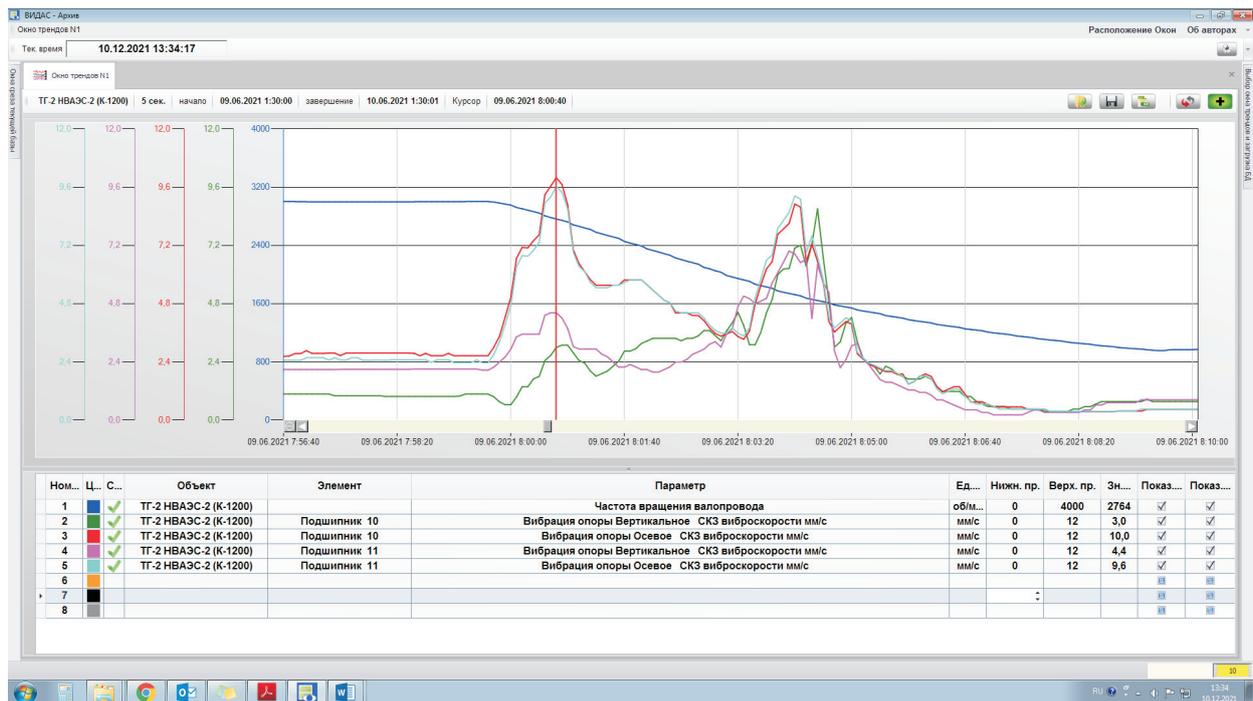
роторов валопровода в собственных опорах на рабочей ЧВ. Такая ситуация требует комплексного подхода к виброналадке энергоблока с учетом всех указанных аспектов.

Как видно из рис. 7, а и б, от распределения дисбаланса на роторах низкого давления и РГ зависят значения колебаний опор № 10 и 11

в осевом направлении, особенно при наступлении резонанса (ЧВ $n = 2750...2820 \text{ мин}^{-1}$). Так, при соотношениях вертикальных составляющих вибрации (амплитуд и фаз) опор 18/325 и 17/139 осевые составляющие равны 4,6...4,7 мм/с, а при соотношениях 31/360 и 43/188 — 10,0...10,4 мм/с.



а



б

Рис. 7. Зоны резонанса опор № 10 и 11 в осевом направлении на ЧВ $n = 2750...2820 \text{ мин}^{-1}$ при благоприятном (а) и неблагоприятном (б) соотношениях их вертикальных составляющих вибрации

В этом случае снижения осевых колебаний опор можно достигнуть не только уменьшением значений, но и сведением фаз вертикальных составляющих колебаний [11–13].

Спектральный состав вибрации опор и его зависимость от активной мощности генератора. Спектральный состав вибрации опор № 10–13 достаточно традиционный, его состав

ляющие в режиме холостого хода приведены в табл. 1.

Следует отметить богатый спектр колебаний опоры возбудителя, в котором помимо оборотной составляющей вибрации присутствуют первая, третья и четвертая гармоники. Обраща-

ет на себя внимание гармоника с частотой 100 Гц на опорах № 11–13 в поперечном направлении, где ее значение сравнимо с оборотной составляющей. Остальные высокочастотные составляющие вибрации не столь значительны [1, 13, 14].

Таблица 1

Спектральный состав вибрации опор узла генератор — возбудитель турбины К-1200-6.8/50 второго энергоблока Нововоронежской АЭС-2 в режиме холостого хода

Направление измерения вибрации	Номер гармоники	СКЗ виброскорости, мм/с, опоры			
		10	11	12	13
Вертикальное	1	1,5	2,3	2,9	4,2
	2	0,1	0,2	0,5	1,3
	3	0,1	–	0,2	0,5
	4	–	–	0,1	0,4
Поперечное	1	2,6	2,9	1,4	2,7
	2	0,2	1,1	0,9	2,0
	3	0,1	0,1	–	0,5
	4	–	–	0,2	0,1
Осевое	1	5,0	4,4	3,1	1,3
	2	0,1	0,1	0,2	0,8
	3	0,1	–	–	–
	4	–	–	0,1	–

Таблица 2

Спектральный состав вибрации опор узла генератор — возбудитель турбины К-1200-6.8/50 второго энергоблока Нововоронежской АЭС-2 при различных мощностных режимах

Направление измерения вибрации	Номер гармоники	СКЗ виброскорости, мм/с, опоры			
		10	11	12	13
Вертикальное	1	2,1/1,8	2,6/2,5	2,9/2,7	4,3/4,4
	2	0,1/0,2	0,4/0,3	0,5/0,3	1,3/1,6
	3	–	0,1/0,1	0,1/0,1	0,4/0,8
	4	–	–	0,1/0,1	0,5/0,6
Поперечное	1	1,3/1,5	2,1/2,1	1,3/1,5	3,0/3,0
	2	0,2/0,2	1,0/1,1	0,9/0,6	2,1/2,5
	3	–	0,1/0,1	–	0,7/0,7
	4	–	–	0,2/0,2	0,1/0,1
Осевое	1	7,6/7,4	7,1/6,8	2,7/2,3	1,4/1,3
	2	0,1/0,1	0,1/0,1	0,2/0,2	0,8/1,0
	3	–/0,1	0,1/0,1	0,1/0,1	0,1/0,1
	4	–	–	0,1/0,1	0,1/0,1

Примечание. В числителе дроби указаны значения для мощности генератора $N = 380$ МВт, в знаменателе — для $N = 1130$ МВт.

Спектральный состав вибрации опор № 10–13 в режиме частичной ($N = 380$ МВт) [15, 16] и номинальной ($N = 1130$ МВт) мощностей генератора приведен в табл. 2. При достижении генератором мощности $N = 380$ МВт и $N = 1130$ МВт состав и значения спектральных составляющих колебаний не изменяются значительно, за исключением оборотной составляющей колебаний опор № 10 и 11 в осевом направлении, где вследствие незначительного увеличения вертикальных составляющих с оборотной частотой осевые составляющие повышаются с 5,0 до 7,4...7,6 мм/с и с 4,4 до 6,8...7,1 мм/с соответственно [1, 13, 14].

Выводы

1. Проанализирован опыт работ по снижению вибрационной активности турбоустановки, имеющей в своем составе генератор с полным водяным охлаждением на инновационном энергоблоке ВВЭР-1200 поколения 3+. Все работы проведены персоналом Нововоронежской АЭС с использованием типового приборного парка и программного обеспечения установ-

ленного образца, что позволяет утверждать, что работа может быть выполнена без привлечения специализированных организаций.

2. Сложность виброналадки турбогенераторов первого и второго энергоблоков Нововоронежской АЭС-2 вызвана наличием резонанса опорной системы на стыке турбины и генератора, расположенного близко к рабочей ЧВ. Это определило необходимость (помимо снижения общего уровня колебаний опор и роторов) воздействия балансировочными грузами на соотношение вертикальных составляющих вибрации с целью устранения момента, вызывающего повышенные осевые колебания опорной системы [17].

3. Выявленная особенность турбогенераторов К-1200-6.8/50 + ТЗВ-1200-2АУЗ (наличие резонанса опорной системы на стыке турбины и генератора) требует отдельного изучения, так как, несмотря на положительный опыт Нововоронежской АЭС по снижению вибрационной активности, проблема не устранена на уровне конструкторских решений, и, возможно, при неизменности конструкции будет тиражироваться на другие энергоблоки.

Литература

- [1] Лисянский А.С. *Разработка мощных паровых турбин для быстроходной энерготехнологии АЭС*. Дисс. ... канд. тех. наук. Санкт-Петербург, СПбПУ. 2014. 330 с.
- [2] Цыганкова С.Д., Кравченко В.В. Сравнительный анализ турбогенераторов с турбинами К-1200-6,8/50 и «ARABELLE» для АЭС-2006 с реактором типа ВВЭР-1200. *Наука, техника и образование*, 2018, № 11, с. 35–43.
- [3] Лисянский А.С., Николаенков Н.А., Назаров В.В. и др. Современные быстроходные и тихоходные паровые турбины. *proatom.ru: веб-сайт*. URL: <http://www.proatom.ru/modules.php?name=News&file=article&sid=2330> (дата: доступа: 23.12.2021).
- [4] Веселова И.Н., Окулова М.В. Исследование вибраций главных паропроводов свежего пара первого энергоблока Волгодонской АЭС. *Известия вузов. Ядерная энергетика*, 2010, № 1, с. 49–55.
- [5] Аркадов Г.В., Павелко В.И., Усанов А.И. *Виброшумовая диагностика ВВЭР*. Москва, Энергоатомиздат. 2004. 344 с.
- [6] Аркадов Г.В., Павелко В.И., Финкель Б.М. *Системы диагностирования ВВЭР*. Москва, Энергоатомиздат. 2010. 391 с.
- [7] Аникин Г.Г., Павелко В.И. Опыт внедрения систем виброконтроля на АЭС с реакторными установками типа ВВЭР-440. *Теплотехника*, 1999, № 6, с. 12–17.
- [8] Федоров А.И., Слепов М.Т. Комплексные измерения диагностических параметров оборудования на блоке 1 НВАЭС-2 в процессе опытно-промышленной эксплуатации. *Известия вузов. Ядерная энергетика*, 2017, № 3, с. 77–87, doi: <https://doi.org/10.26583/pre.2017.3.07>
- [9] Аркадов Г.В., Павелко В.И., Слепов М.Т. *Виброакустика в приложениях к реакторной установке ВВЭР-1200*. Москва, Наука. 2018. 469 с.
- [10] Аркадов Г.В., Павелко В.И., Слепов М.Т. *Шумовой мониторинг в приложениях к реакторной установке ВВЭР-1200*. Москва, Наука. 2021. 221 с.

- [11] Павелко В.И., Слепов М.Т., Хайретдинов В.У. Опыт проведения комплексных измерений с использованием разнородных систем на различных этапах пуска энергоблока ВВЭР-1200. *Известия ВУЗов. Ядерная энергетика*, 2016, № 4, с. 44–54, doi: <https://doi.org/10.26583/npe.2016.4.05>
- [12] Аркадов Г.В., Павелко В.И., Слепов М.Т. Виброакустика ВВЭР-1200. *Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР. Сб. тр. 11 межд. науч.-тех. конф.* URL: <http://www.gidropress.podolsk.ru/files/proceedings/mntk2019/autorun/article061-ru.htm> (дата обращения: 15.01.2022).
- [13] Аркадьев Б.А. *Режимы работы турбоустановок АЭС*. Москва, Энергоатомиздат. 1986. 264 с.
- [14] Трояновский Б.М., Филиппов Г.А., Булкин А.Е. *Паровые и газовые турбины атомных электростанций*. Москва, Энергоатомиздат. 1985. 256 с.
- [15] Биялт М.А. *Разработка методов обеспечения вибрационной надежности турбоагрегатов на электростанциях и их реализация в Омской энергосистеме*. Дисс. ... канд. тех. наук. Екатеринбург, УрФУ. 2013. 175 с.
- [16] Салимон А.В., Егоров Г.И., Циклин Е.А. Проблемы виброналадки газотурбинных энергетических установок. *Теплоэнергетика*, 2006, № 7, с. 30–34.
- [17] Arkadov G.V., Pavelko V.I., Slepov M.T. *Vibration acoustics applied to VVER-1200 reactor plant*. Singapore, World Scientific. 2021. 586 p.

References

- [1] Lisyanskiy A.S. *Razrabotka moshchnykh parovykh turbin dlya bystrokhodnoy energotekhnologii AES*. Diss. kand. tekhn. nauk [Design of high-power steam turbine for fast power technology of an atomic power station. Kand. tech. sci. diss.]. Sankt-Petersburg, SPbPU Publ., 2014. 330 p. (In Russ.).
- [2] Tsygankova S.D., Kravchenko V.V. Comparative analysis of turbogenerators with K-1200-6,8/50 AND “ARABELLE” turbines for npp-2006 with reactor WWER-1200 type. *Nauka, tekhnika i obrazovanie* [Science, Technology and Education], 2018, no. 11, pp. 35–43. (In Russ.).
- [3] Lisyanskiy A.S., Nikolaenkov N.A., Nazarov V.V. et al. *Sovremennyye bystrokhodnyye i tikhokhodnyye parovyye turbiny* [Modern full-speed and half-speed steam turbines]. *proatom.ru: website*. URL: <http://www.proatom.ru/modules.php?name=News&file=article&sid=2330> (accessed: 23.12.2021). (In Russ.).
- [4] Veselova I.N., Okulova M.V. Research of vibrations of the main vapor conductors of the first power unit of the Volgodonsk nuclear power plant. *Izvestiya vuzov. Yadernaya energetika*, 2010, no. 1, pp. 49–55. (In Russ.).
- [5] Arkadov G.V., Pavelko V.I., Usanov A.I. *Vibroshumovaya diagnostika VVER* [Vibronoise diagnostics of VVER]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 2004. 344 p. (In Russ.).
- [6] Arkadov G.V., Pavelko V.I., Finkel' B.M. *Sistemy diagnostirovaniya VVER* [Diagnostic systems for VVER]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 2010. 391 p. (In Russ.).
- [7] Anikin G.G., Pavelko V.I. Experience of implementing vibrocontrol systems on atomic power stations with reactor plants of VVER-440 type. *Teplotekhnika*, 1999, no. 6, pp. 12–17. (In Russ.).
- [8] Fedorov A.I., Slepov M.T. Comprehensive measurement of diagnostic parameters of equipment at the power unit № 1 of Novovoronezh NPPi in the process of pilot operation. *Izvestiya vuzov. Yadernaya energetika*, 2017, no. 3, pp. 77–87, doi: <https://doi.org/10.26583/npe.2017.3.07> (in Russ.).
- [9] Arkadov G.V., Pavelko V.I., Slepov M.T. *Vibroakustika v prilozheniyakh k reaktornoy ustanovke VVER-1200* [Vibroacoustics as applied to VVER-1200 reactor plant]. Moscow, Nauka Publ., 2018. 469 p. (In Russ.).

- [10] Arkadov G.V., Pavelko V.I., Slepov M.T. *Shumovoy monitoring v prilozheniyakh k reaktornoy ustanovke VVER-1200* [Noise monitoring as applied to VVER-1200 reactor plant]. Moscow, Nauka Publ., 2021. 221 p. (In Russ.).
- [11] Pavelko V.I., Slepov M.T., Khayretdinov V.U. Experience of carrying out comprehensive measurements using heterogeneous systems at various stages of the VVER-1200 power unit commissioning for operation. *Izvestiya VUZov. Yadernaya energetika*, 2016, no. 4, pp. 44–54, doi: <https://doi.org/10.26583/npe.2016.4.05> (in Russ.).
- [12] Arkadov G.V., Pavelko V.I., Slepov M.T. [Vibroacoustics of VVER-1200]. *Obespechenie bezopasnosti AES s VVER. Sb. tr. 11 mezhd. nauch.-tekhn. konf.* [Safety Assurance of NPP with VVER. Proc. 11 Int. Sci.-tech. Conf.]. URL: <http://www.gidropress.podolsk.ru/files/proceedings/mntk2019/autorun/article061-ru.htm> (accessed: 15.01.2022). (In Russ.).
- [13] Arkad'yev B.A. *Rezhimy raboty turbostanovok AES* [Working regimes of turbine plants in nuclear power stations]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1986. 264 p. (In Russ.).
- [14] Troyanovskiy B.M., Filippov G.A., Bulkin A.E. *Parovye i gazovye turbiny atomnykh elektrostantsiy* [Steam and gas turbine of nuclear power stations]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1985. 256 p. (In Russ.).
- [15] Biyal't M.A. *Razrabotka metodov obespecheniya vibratsionnoy nadezhnosti turboagregatov na elektrostantsiyakh i ikh realizatsiya v Omskoy energosisteme. Diss. kand. tekhn. nauk* [Design of methods for providing vibration safety of turbine units at power stations and their realization in Omsk energy system. Kand. tech. sci. diss.]. Ekaterinburg, UrFU Publ., 2013. 175 p. (In Russ.).
- [16] Salimon A.V., Egorov G.I., Tsiklin E.A. Problems of vibration adjustment of gas-turbine power units. *Teploenergetika*, 2006, no. 7, pp. 30–34. (In Russ.). (Eng. version: *Therm. Eng.*, 2006, vol. 53, no. 7, pp. 526–530, doi: <https://doi.org/10.1134/S0040601506070056>)
- [17] Arkadov G.V., Pavelko V.I., Slepov M.T. *Vibration acoustics applied to VVER-1200 reactor plant*. Singapore, World Scientific, 2021. 586 p.

Статья поступила в редакцию 13.01.2022

Информация об авторах

АРКАДОВ Геннадий Викторович — кандидат технических наук, заместитель директора. АО «Научно-технический центр «Диапром» (249031, Калужская область, Обнинск, Российская Федерация, ул. Королева, д. 6, e-mail: arkgen47@gmail.com).

ГУСЕВ Игорь Николаевич — заместитель главного инженера филиала АО «Концерн Росэнергоатом» Нововоронежская АЭС (396071, Нововоронеж, Воронежская область, Российская Федерация, Промышленная зона Южная, д. 1, e-mail: gusevin@nvnpp1.rosenergoatom.ru).

СЛЕПОВ Михаил Тимофеевич — кандидат технических наук, начальник отдела технической диагностики филиала АО «Концерн Росэнергоатом» Нововоронежская АЭС (396071, Нововоронеж, Воронежская область, Российская Федерация, Промышленная зона Южная, д. 1, e-mail: slepovmt@nvnpp1.rosenergoatom.ru).

Information about the authors

ARKADOV Gennadiy Viktorovich — Candidate of Science (Eng.), Deputy Director Joint Stock Company Scientific Technical Center Diaprom (249031, Kaluga Region, Obninsk, Russian Federation, Koroleva St., Bldg. 6, e-mail: arkgen47@gmail.com).

GUSEV Igor Nikolaevich — Deputy Chief Engineer. Novovoronezh NPP, branch of Rosenergoatom JSC (396071, Novovoronezh, Voronezh Region, Russian Federation, Yuzhnaya Industrial Zone, Bldg. 1, e-mail: gusevin@nvnpp1.rosenergoatom.ru).

SLEPOV Mikhail Timofeevich — Candidate of Science (Eng.), Head of Department of Technical Diagnostics. Novovoronezh NPP, branch of Rosenergoatom JSC (396071, Novovoronezh, Voronezh Region, Russian Federation, Yuzhnaya Industrial Zone, Bldg. 1, e-mail: slepovmt@nvnpp1.rosenergoatom.ru).

УСАЧЕВ Дмитрий Евгеньевич — начальник турбинного цеха филиала АО «Концерн Росэнергоатом» Нововоронежская АЭС (396071, Нововоронеж, Промышленная зона Южная, Российская Федерация, д. 1, e-mail: usachevde@nvnpp1.rosenergoatom.ru).

USACHEV Dmitriy Evgenyevich — Head of Turbine Shop. Novovoronezh NPP, branch of Rosenergoatom JSC (396071, Novovoronezh, Voronezh Region, Russian Federation, Yuzhnaya Industrial Zone, Bldg. 1, e-mail: usachevde@nvnpp1.rosenergoatom.ru).

ЭСПЕРОВ Дмитрий Геннадьевич — кандидат технических наук, заведующий лабораторией вибрации отдела паровых турбин. ОАО «Научно-производственное объединение по исследованию и проектированию энергетического оборудования им. И.И. Ползунова (191167, Санкт-Петербург, Российская Федерация, ул. Атаманская, д. 3/6, e-mail: EsperovDG@ckti.ru).

ESPEROV Dmitriy Gennadyevich — Candidate of Science (Eng.), Head of Vibration Laboratory, Steam Turbine Department. JSC I.I. Polzunov Scientific and Development Association on Research and Design of Power Equipment (191167, Saint Petersburg, Russian Federation, Atamanskaya St., Bldg. 3/6, e-mail: EsperovDG@ckti.ru).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Аркадов Г.В., Гусев И.Н., Слепов М.Т., Усачев Д.Е., Эсперов Д.Г. Опыт виброналадки турбогенераторов К-1200-6.8/50 + ТЗВ-1200-2АУЗ первого и второго энергоблоков Нововоронежской АЭС. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2022, № 5, с. 15–26, doi: 10.18698/0536-1044-2022-5-15-26

Please cite this article in English as:

Arkadov G.V., Gusev I.N., Slepov M.T., Usachev D.E., Esperov D.G. On Vibration Control of Turbo Generators K-1200-6.8/50+ TЗВ-1200-2АУЗ Installed in the First and Second Units of Novovoronezh Nuclear Power Plant. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2022, no. 5, pp. 15–26, doi: 10.18698/0536-1044-2022-5-15-26



**Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана
предлагает читателям сборник материалов
III Межвузовской конференции аспирантов,
соискателей и молодых ученых
«Наука, технологии и бизнес»**

В сборник вошли тезисы докладов и сообщений на английском и русском языках, сделанные на III Межвузовской конференции аспирантов, соискателей и молодых ученых, состоявшейся 27–28 апреля 2021 г.

Обсуждаются вопросы, связанные с научными исследованиями, проектно-конструкторскими и методическими разработками, экспериментальными работами в области биомедицинских и машиностроительных технологий, радиоэлектроники и лазерной техники, специального машиностроения, робототехники и автоматики, информатики, систем управления, инженерного бизнеса и менеджмента, а также прикладной лингвистики.

По вопросам приобретения обращайтесь:

105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, к. 1.
Тел.: +7 499 263-60-45, факс: +7 499 261-45-97;
press@baumanpress.ru; <https://bmstu.press>