<https://doi.org/10.24223/1999-5555-2019-12-2-135-143>

УДК 621.192

Статистический метод оценки стабильности параметров рабочих лопаток паровых турбин тепловых электростанций при изготовлении и испытаниях

Труханов В. М.^{1,2*}, Султанов М. М.¹, Кухтик М. П.²

¹ Филиал ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» в г. Волжском
пр. Ленина, 69, 404110, г. Волжский, Россия

² ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет»
пр. им. В. И. Ленина, 28, 400005, г. Волгоград, Россия

Поступила / Received 29.05.2019

Принята к печати / Accepted for publication 18.06.2019

Статья посвящена актуальной проблеме повышения качества и надежности рабочих лопаток паровых турбин. Это вызвано тем, что количество отказов рабочих лопаток находится в пределах от 20 до 60% всех отказов паровых турбин, находящихся в эксплуатации. В дополнение к существующему методу контроля качества рабочих лопаток паровых турбин, предлагается ввести разработанный метод контроля стабильности параметров и уровня надежности рабочих лопаток при их изготовлении и испытаниях. Подробно описаны методы контроля качества рабочих лопаток в процессе их изготовления и испытаний по существующей нормативной документации. В дополнение к нормативной документации разработана форма 1 «Перечень дефектов, неисправностей и отказов, выявленных при изготовлении и испытаниях» и форма 2 «Карта контроля стабильности параметров». Представлены расчетные формулы для оценки стабильности параметров технологических процессов и уровня надежности. Разработана методика определения предельного отклонения параметров и границ регулирования по заданным допускам. Приведен пример контроля стабильности частоты собственных колебаний рабочих лопаток. Представленная методика реализована на предприятиях промышленности специального назначения. В целях сбора статистической информации на заводе-изготовителе на каждый комплект рабочих лопаток оформляется внутренний паспорт, который разрабатывается предприятием-изготовителем и в который заносятся сведения о сертификате материала, результаты контроля, проведенного в процессе изготовления и испытаний с указанием отклонений от чертежа, технических условий при испытаниях, описание технологического процесса термообработки заготовок и т. п.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: стабильность, параметры, лопатки, изготовление, испытания, карта контроля, допуск, отклонения, статистическая информация

Благодарности

Результаты исследований, представленные в статье, получены при финансовой поддержке в рамках научного проекта РФФИ № 17-01-00018 и государственного задания № 13.9602.2017/БЧ по теме 1041170.

Адрес для переписки:

Труханов В. М.
ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет», кафедра АПП
пр. им. В. И. Ленина, 28, 400005, г. Волгоград, Россия
e-mail: trukhanov1939@mail.ru

Address for correspondence:

Trukhanov V. M.
Volgograd State Technical University, Department AMP
Lenin av., 28, 400005, Volgograd, Russia
e-mail: trukhanov1939@mail.ru

Для цитирования:

Труханов В. М., Султанов М. М., Кухтик М. П. Статистический метод оценки стабильности параметров рабочих лопаток паровых турбин тепловых электростанций при изготовлении и испытаниях. Надежность и безопасность энергетики. 2019. – Т. 12, №2. – С. 135 – 143.
<https://doi.org/10.24223/1999-5555-2019-12-2-135-143>

For citation:

Trukhanov V. M., Sultanov M. M., Kukhtik M. P. [Statistical method of estimation of stability of parameters of rotor blades of steam turbines of thermal power plants during manufacturing and testing]. Nadezhnost' i bezopasnost' energetiki = Safety and Reliability of Power Industry. 2019, vol. 12, no. 2, pp. 135 – 143 (in Russian).
<https://doi.org/10.24223/1999-5555-2019-12-2-135-143>

Statistical method of estimation of stability of parameters of rotor blades of steam turbines of thermal power plants during manufacturing and testing

Trukhanov V. M.^{1,2*}, Sultanov M. M.¹, Kukhtik M. P.²

¹ Volzhsky Branch of the National Research University «Moscow Power Engineering Institute»

69 Lenin av., 404110, Volzhsky, Russia

² Volgograd State Technical University

28 Lenin av., 400005, Volgograd, Russia

The paper is devoted to relevant issue of raising the quality and reliability of rotor blades of steam turbines. This is due to the fact that the number of failures of rotor blades exceeds 60% of all failures of steam turbines, which are in operation. The developed method of control of stability of parameters and reliability of rotor blades during their manufacturing and testing is proposed to introduce in addition to the existing method of quality control of rotor blades of steam turbines. The methods of quality control of rotor blades during the process of their manufacturing and testing according to existing normative documentation are described in detail. The form 1 "List of defects, malfunctions and failures, which have been revealed during manufacturing and testing" and form 2 "Inspection chart of stability of parameters" have been developed in addition to normative documentation. The calculation equations for estimation of stability of parameters of technological processes and reliability level have been presented. A technique for determination of extreme deviation of parameters and regulation boundaries according to preset tolerance has been developed. An example of stability control of natural oscillation frequency has been presented. The presented technique has been implemented at special purpose enterprises. An internal certificate is drawn up for each set of rotor blades at the manufacturing plant with a view to gather statistical information. This certificate is developed by the manufacturer. Information about the material certificate, the results of control, which has been carried out during the process of manufacturing and testing, with indication of deviations from the draft, the technical specifications during the testing, the description of technological process of thermal treatment of stocks etc. are noted down in the internal certificate.

KEYWORDS: stability, parameters, blades, manufacturing, testing, inspection chart, tolerance, deviations, statistical information

Acknowledgments

The results of research presented in the paper are obtained with financial support within the RFBR research project No. 17-01-00018 and state assignment No. 13.9602.2017/BCh on subject 1041170.

Практика технологической отработки рабочих лопаток паровых турбин, бандажей, дисков и других деталей указывает на следующие достаточно типичные ситуации. Для ряда рабочих лопаток и других деталей процесс технологической отработки заканчивается достаточно быстро. Одна-две принципиальные технологические доработки приводят к желательному результату, т. е. лопатки и другие детали можно считать практически освоенными и готовыми к серийному производству. Такой случай соответствует ситуации, когда лопатки, бандажи, диски и другие детали скомпонованы из типовых конструктивно-технологических решений, по которым имеется отработанная нормативно-техническая документация.

Другая ситуация соответствует случаю, когда технологический процесс выпуска рабочих лопаток, бандажей, дисков и других деталей изделий затягивается. Это связано с тем, что по отдельным технологическим параметрам рабочих лопаток, бандажей, дисков и других деталей нормативно-техническая документация отработана недостаточно.

Актуальность проблемы вызвана тем, что количество отказов (повреждений) рабочих лопаток, установленных в паровой турбине, находится в пределах от 20 до

60% от всех повреждений турбины [1, 2]. Ставится задача уменьшить количество отказов рабочих лопаток за счет совершенствования технологического процесса.

Объектом исследования является 661 турбоустановка мощностью от 100 до 800 МВт различных типов и разных заводов-изготовителей, находящаяся в эксплуатации в течение последних 15 лет [1, 3]. Статистическая информация сведена в таблицу 1.

Распределение отказов турбин по причинам их проявления представлено на рисунке 1 [1, 3]. Наибольшее число отказов приходится на повреждения систем регулирования и повреждения подшипников.

Большинство повреждений рабочих лопаток (до 65%), распределение которых представлено на рисунке 2, а, связано с обрывом пера рабочей лопатки в прикорневой зоне и в сечении отверстий под демпферную проволочку. В ряде случаев обнаружены трещины в лопатке (12% общего числа повреждений рабочих лопаток) и повышенный эрозионный износ рабочих лопаток (8% повреждений рабочих лопаток). Обрыв рабочих лопаток практически всегда сопровождаются заметными изменениями в состоянии турбины (рисунок 2, б). В большинстве случаев (62%) происходит изменение вибрационного состояния турбины. Кроме того, в 14% слу-

Таблица. Типы и количество анализируемых турбоустановок
Table. Types and number of analyzable turbine plants

Турбоустановка с турбиной типа Turbine plant with turbine of type	Количество Number	Турбоустановка с турбиной типа Turbine plant with turbine of type	Количество Number
К-800-240 ЛМЗ	19	К-300-240 ХТЗ	76
К-500-240 ЛМЗ	6	К-150-130 ХТЗ	84
К-300-240 ЛМЗ	89	Т-250/300-240 ТМЗ	29
К-100-90 ЛМЗ	95	Т-175-130 ТМЗ	15
Т-180/210-130 ЛМЗ	17	Т-100-130 ТМЗ	190
К-500-240 ХТЗ	10	ПТ-135-130 ТМЗ	31

чаев повреждения рабочих лопаток сопровождаются шумом в проточной части. Еще одним распространенным признаком (до 10% случаев) обрыва в основном лопаток части низкого давления является увеличение жесткости конденсата. В 14% случаев останова турбин с поврежденными рабочими лопатками наблюдается сокращение времени выбега ротора (как правило, из-за высокого уровня вибрации). Во многих случаях эти признаки наблюдаются одновременно в различных комбинациях. Большинство дефектов рабочих лопаток (рисунок 2, в) связа-

Рисунок 1. Распределение отказов турбин по причинам:

1 — повреждения проточной части; 2 — повреждения системы парораспределения; 3 — повреждения системы регулирования; 4 — повреждения подшипников; 5 — повреждения маслосистемы; 6 — повреждения трубопроводов и арматуры; 7 — повышенная вибрация

Figure 1. Distribution of turbines' failures by reasons:

1 — damages of steam path; 2 — damages of steam distribution system; 3 — damages of regulating system; 4 — damages of bearings; 5 — damages of oil system; 6 — damages of pipelines and armature; 7 — heightened vibration

Рисунок 2. Повреждения рабочих лопаток:

а — распределение повреждений рабочих лопаток (1 — обрыв рабочих лопаток; 2 — трещины в лопатках; 3 — эрозийный износ лопаток; 4 — повреждения бандажа; 5 — подрезка шипов рабочих лопаток; 6 — разрушение демпферной проволоки); б — признаки, наблюдаемые при повреждениях рабочих лопаток (1 — нарушение нормального вибростояния; 2 — шум в проточной части; 3 — сокращение времени выбега ротора; 4 — увеличение жесткости конденсата вследствие повреждения трубок конденсатора оторвавшимися рабочими лопатками или их частями); в — распределение причин повреждений рабочих лопаток (1 — истощение запасов прочности и усталость металла; 2 — эрозийный износ; 3 — коррозионный износ; 4 — прочее)

Figure 2. Damages of rotor blades:

а — distribution of rotor blades' damages (1 — strip of rotor blades; 2 — cracks in blades; 3 — erosive wear of blades; 4 — damages of shroud; 5 — trimming of rotor blades' tenons; 6 — destruction of damper wire); б — features, which are observed when rotor blades are damaged (1 — violation of normal vibration state; 2 — noise in steam path; 3 — reducing of rotor run-down time; 4 — increase of condensate harshness in consequence of condenser pipes' damage by detached rotor blades or their parts); в — distribution of reasons for rotor blades' damages (1 — exhaustion of safety margins and metal fatigue; 2 — erosive wear; 3 — corrosive wear; 4 — others)

но с исчерпанием запасов прочности и усталостью металла (50% повреждений). Второй основной причиной дефектов является эрозионный износ входных и выходных кромок (25% повреждений) [1, 3].

В соответствии с инструкцией о порядке оценки работоспособности рабочих лопаток паровых турбин в процессе изготовления определяется их объем и последовательность проведения, а также оценка качества рабочих лопаток на стадии их изготовления [4, 5]. Рабочие лопатки изготавливают по нормативным документам, указанным в чертежах завода-изготовителя турбины или организации-проектировщика, проводящей модернизацию турбины [6].

На заводе-изготовителе на каждый комплект рабочих лопаток оформляется внутренний паспорт. В пределах комплекта лопатки пронумеровываются. Форма паспорта (сертификата качества) разрабатывается предприятием-изготовителем.

В паспорт комплекта заносятся:

- сертификат материала лопаток и комплектующих;
- нумерация лопаток в технологическом процессе;
- результаты контроля, проведенного в процессе изготовления, с указанием отклонений от чертежа, согласованных с конструкторской службой предприятия-изготовителя лопаток;
- заключение о соответствии собственных частот нормативным;
- результаты сдаточного контроля;
- заключение технического контроля о соответствии лопаток требованиям чертежей;
- порядок расстановки лопаток на колесе по результатам развески (если оговорено требованиями чертежа).

Рабочий чертеж лопатки содержит:

- требования к марке и категории прочности материала (с указанием соответствующих стандартов и технических условий);
- геометрические размеры, допуски и предельные отклонения. Базовые поверхности для исполнения и контроля геометрических размеров;
- требования к шероховатости поверхностей;
- требования к упрочнению и покрытиям;
- номера чертежей профилей рабочей и хвостовой частей;
- указание контрольных сечений;
- требования к сварочным операциям;
- требования к контролю (сплошности материала неразрушающими методами, измерениям геометрических размеров, вибрационному и др.).

Описание технологического процесса изготовления лопаток включает в себя:

- последовательность исполнения технологических операций;
- перечень используемых станков, инструментов, приспособлений и материалов;
- контрольные операции, проведенные в процессе изготовления, со ссылками на инструкции, контрольные приспособления, измерительные устройства.

Описание технологического процесса термообработки заготовок составляется предприятием, изготов-

ливающим лопатки, в соответствии с требованиями, установленными заводом-изготовителем турбины к качеству рабочих лопаток.

Описание технологического процесса крепления защитных пластин должно содержать:

- требование к режимам пайки или сварки;
- требования к подготовительным операциям;
- порядок выполнения работ;
- перечень используемого оборудования, инструментов и материалов;
- список контрольных операций.

Инструкция на проведение вибрационных испытаний содержит методику, перечень используемых приспособлений и приборов, объем контроля (какие формы колебаний контролируются) конкретной ступени, разрешенные частоты и допустимый их разброс в процентах в пределах одного комплекта, указания по допустимому изменению фактической геометрии лопаток в случае отклонения собственных частот за пределы разрешенного интервала.

Описание технологического процесса сварки пакетов с указанием допустимых отклонений и методов их выявления.

С целью сокращения числа отказов (повреждений) рабочих лопаток, установленных в паровой турбине, в настоящей статье предлагается к существующему методу контроля оценки качества рабочих лопаток на стадии их изготовления и испытаний по инструкции [4] добавить статистический метод оценки стабильности параметров рабочих лопаток паровых турбин [7, 8]. Таким образом, новизной данной статьи является разработка дополнительного подхода к оценке качества и надежности рабочих лопаток энергетического оборудования тепловых электростанций.

К вопросу оценки качества рабочих лопаток, установленных на паровых турбинах, относится также облопачивание рабочих колес, которое проводят на заводе-изготовителе турбины или в условиях электростанции или ремонтной базы специализированным ремонтным предприятием по облопачиванию роторов паровых турбин.

При облопачивании особое внимание должно быть в соответствии с [4] обращено на:

- проверку радиусов переходных галтелей на лопатках и дисках;
- набор на диск заданного количества лопаток по чертежу;
- надежное закрепление лопаток на дисках ротора при полном взаимном прилегании по сопрягаемым плоскостям хвостов лопаток в соответствии с допусками, установленными заводами-изготовителями;
- заданный по чертежу шаг для получения расчетного проходного сечения парового канала на выходе из лопаток;
- заданные аксиальные и радиальные положения лопаток на диске в соответствии с допусками;
- надежную посадку и закрепление замковых лопаток и замков;
- свободное прохождение проволочных и трубча-

тых бандажей и припайку шайб и вставок к трубчатым бандажам;

- посадку ленточных бандажей на шипы лопаток без больших напряжений и плотность прилегания бандажей к торцам лопаток;
- качественную расклепку или подварку шипов с бандажами;
- плотный контакт наружных опорных поверхностей лопаток с ободом диска после расклепки или закатки по ободу диска грибовидных и Т-образных хвостов.

Как видно из описанного, при изготовлении лопаток и их облопачивании собирается огромная информация о допустимых отклонениях и возможных повреждениях, которая позволяет применить статистический метод контроля стабильности параметров технологических процессов и уровня надежности лопаток.

Суть статистического метода состоит в сборе всей информации, полученной в процессе изготовления и испытаний рабочих лопаток, на основе которой дается оценка стабильности параметров рабочих лопаток и уровень их надежности.

Сбор статистических данных по каждому параметру, занесенному в паспорт комплекта, предлагается внести в «Перечень дефектов, неисправностей и отказов» по форме 1 [3].

Порядок проведения контроля стабильности устанавливает:

- подразделения, участвующие в работах по контролю стабильности параметров технологических процес-

сов и объем выполняемых ими работ;

- порядок сбора и обработки информации, необходимый для проведения контроля стабильности;
- формы необходимых документов по контролю стабильности;
- порядок отчетности о результатах проведения контроля стабильности;
- порядок работ по установлению и устранению нарушений стабильности параметров лопаток.

Ответственность за проведение работ по контролю стабильности несут начальники соответствующих цехов.

Техбюро цеха еженедельно заполняет карты контроля стабильности параметров (форма 2) по таблице исходных данных (форма 1), заполняемым сектором технического контроля цеха, и отмечает на них фактические значения контролируемого параметра в порядке изготовления лопаток, принятых и забракованных.

Одновременно техбюро проводит оперативный анализ распределения значений параметров, выявляя тенденцию к нестабильности, если значения параметров выходят за границы регулирования.

При выявлении тенденции к нестабильности параметров техбюро цеха, не останавливая технологического процесса изготовления (испытания) лопаток и их составных частей, выявляют и устраняют причины появления тенденции к нестабильности по всем факторам, участвующим в производственном процессе

Форма 1. Перечень дефектов, неисправностей и отказов, выявленных при изготовлении и приемо-сдаточных испытаниях лопаток, установленных в паровых турбинах заказа _____ по цеху № _____ месяц _____ 20__ г.

Form 1. List of defects, malfunctions and failures, which have been revealed during manufacturing and acceptance testing of blades, which are installed at steam turbines of order _____ of production unit № _____ month _____ 20__ year

Обозначение, наименование и заводской номер сборочной единицы или детали Designation, name title and serial number of assembly unit or part	Содержание дефекта, неисправности, отказа Content of defect, malfunction, failure	Причина дефекта, неисправности, отказа Cause of defect, malfunction, failure	Принятые меры по устранению и предупреждению дефекта, неисправности, отказа Taken actions on clearing and preventing of defect, malfunction, failure	Характер дефекта, неисправности, отказа: производственный, технологический, конструкционный, отказ комплектующего элемента Character of defect, malfunction, failure: manufacturing, technological, constructive, failure of constituent element

Зам. нач. цеха по технической части

_____ (Ф.И.О.)

«__» _____ 20__ г.

Начальник сектора технического контроля цеха

_____ (Ф.И.О.)

«__» _____ 20__ г.

Форма 2. Карта контроля стабильности параметров

Form 2. Control chart of stability of parameters

Обозначение и наименование детали (сб. единицы)

Наименование контролируемого параметра

Год изготовления

Designation and name of detail (assembly)

Name of controllable parameter

Manufacture year

Рисунок 3. Пример карты контроля стабильности параметров.

Figure 3. Example of control chart of stability of parameters.

- $x_{\text{тр}}$ — номинальное (требуемое) значение параметра по паспорту; x_i
- $\sigma_{\text{тр}}$ — среднее квадратическое отклонение параметра от номинального значения;
- $x_{\text{тр}} + 2,7\sigma_{\text{тр}}$ — верхняя граница предельно допустимого значения (величина предельного допуска);
- $x_{\text{тр}} + 2\sigma_{\text{тр}}$ — верхняя граница регулирования (поле допуска);
- $x_{\text{тр}} - 2\sigma_{\text{тр}}$ — нижняя граница регулирования (поле допуска);
- $x_{\text{тр}} - 2,7\sigma_{\text{тр}}$ — нижняя граница предельно допустимого значения (величина предельного допуска);
- На карте отмечаются значения x_i контролируемых параметров всех деталей (сборочных единиц), изготовленных в течение (месяца, квартала, полугодия), независимо от того были они приняты или забракованы.
- Значения параметров отмечают знаком:
 - — не выходящие за границы регулирования;
 - ⊙ — выходящие за границы регулирования и указывающие на появление нестабильности;
 - ⊗ — выходящие за предельно допустимые значения.

Зам начальника цеха _____ Ф.И.О. _____ Подпись
по технической части _____ Дата

Начальник сектора _____ Ф.И.О. _____ Подпись
технического контроля _____ Дата

- x_{req} — nominal (required) value of parameter according to certificate; x_i
- σ_{req} — standard deviation of parameter from nominal value;
- $x_{\text{req}} + 2,7\sigma_{\text{req}}$ — upper bound of rated value (magnitude of tolerable limit);
- $x_{\text{req}} + 2\sigma_{\text{req}}$ — upper bound of regulation (tolerance range);
- $x_{\text{req}} - 2\sigma_{\text{req}}$ — low bound of regulation (tolerance range);
- $x_{\text{req}} - 2,7\sigma_{\text{req}}$ — low bound of rated value (magnitude of tolerable limit);
- Values x_i of all controllable parameters for all details (assemblies), which were manufactured during the month (quarter, half year), are marked at a chart irrespective of the fact if they have been accepted or rejected.
- Values of parameters are marked with a sign:
 - — nor exceeding the control limits;
 - ⊙ — exceeding the control limits and pointing at appearance of instability;
 - ⊗ — exceeding the rated values.

Technical deputy _____ Full name _____ Signature
shop foreman _____ Date

Shop technical control _____ Full name _____ Signature
department foreman _____ Date

(оборудование, средства контроля, материал, исполнитель).

Анализ причин нарушения стабильности техпроцессов включает проведение следующих работ:

- проверку исходных данных, используемых при оценке стабильности, с целью выявления возможной их недостаточности;
- оценку точности измерения и определения контролируемого параметра;
- выявление лопаток, имеющих значения параметров, значительно отличающиеся от требуемых значений;
- определение тенденции изменения параметра;
- установление по технологическому процессу изготовления конкретной лопатки возможных причин, приведших к нестабильности и т. п.

На основании анализа техбюро цехов разрабатывают и внедряют мероприятия по устранению причин нестабильности параметров.

Если при изготовлении (испытании) последующих лопаток вновь появляется тенденция к нестабильности контролируемого параметра, сектор технического контроля цеха совместно с начальником цеха должны сообщить главным специалистам предприятия о фактах повторного нарушения стабильности параметра.

Для выявления и устранения причины повторной нестабильности, при необходимости, начальником цеха назначается комиссия, которая разрабатывает план мероприятий. В план мероприятий могут быть включены следующие пункты:

- проверка соответствия технической документации, оборудования и средств контроля параметра;
- проверка соответствия технологического процесса требованиям конструкторской документации;
- контроль за соблюдением требований технологического процесса исполнителем;
- проведение оценки точности измерения контролируемого параметра и др.

Если мероприятия, разработанные и внедренные цехом, оказались неэффективными, начальник цеха обязан поставить в известность о фактах нарушения стабильности технологического процесса и принятых мерах Технического директора (главного инженера) предприятия.

Расчетные формулы для оценки стабильности параметров технологических процессов и уровня надежности

Принимая во внимание, что отклонение номинального значения параметра подчиняется нормальному закону распределения, рассчитаем границы регулирования по заданным в чертеже допустимым отклонениям $\Delta_{\text{в}}$ и $\Delta_{\text{н}}$ [8].

Верхнюю и нижнюю границы допустимого отклонения определяют с вероятностью $P=0,997$, которой соответствует квантиль нормированного нормального распределения $u_p = 2,7$. Допустимые отклонения $\Delta_{\text{в}}$ и $\Delta_{\text{н}}$ заданы в конструкторской документации. С

целью недопущения брака в технологической документации сужают границы допуска на величину квантили $u_p = 2,0$, которой соответствует вероятность $P = 0,977$. Отсюда по заданным предельным отклонениям рассчитаем и построим границы регулирования по формуле

$$2,0\sigma_{\text{тр}} = \sigma_{\text{рег}} = 0,977 \cdot \Delta, \quad (1)$$

где Δ — величина допуска, заданная в чертеже или техническом задании.

Рассмотрим методику определения предельного отклонения параметра и границы регулирования по заданным допускам. Номинальное значение и предельные отклонения единичных лопаток ступеней до обондаживания и установки проволоки оцениваются по частотам собственных колебаний, их разброс не должен превышать 8%. Допускается снижение частот отдельных лопаток не более, чем на 1 Гц [9]. Для ступеней с пакетным облопачиванием, имеющих частоту собственных колебаний первого тона пакетов менее 350 Гц, проводятся типовые вибрационные испытания [4].

Номинальное значение и предельные отклонения этого параметра $f_{\text{д}} = 350_{-1}^{+1}$ [9]. Необходимо найти границы регулирования по заданным допускам:

$2,7\sigma_{\text{тр}} = \Delta_{\text{в}} = +1$ Гц — предельно допустимое верхнее отклонение частоты собственных колебаний;

$2,7\sigma_{\text{тр}} = \Delta_{\text{н}} = -1$ Гц — предельно допустимое нижнее отклонение частоты собственных колебаний.

По формуле (1) найдем границы регулирования:

$$2,0\sigma_{\text{тр}} = \Delta_{\text{р.в}} = 1 \cdot 0,977 = 0,977;$$

$$2,0\sigma_{\text{тр}} = \Delta_{\text{р.н}} = -1 \cdot 0,977 = -0,977.$$

Графически это выглядит так, как показано на рисунке 4.

Анализ карты стабильности частоты собственных колебаний показывает, что при испытаниях 5-й лопатки на вибрацию было отклонение частоты колебаний за верхнюю границу регулирования. После установления причины были разработаны мероприятия по недопущению отклонения частоты вибрации и их эффективность была подтверждена до испытаний 20-й лопатки. При испытаниях 20-й лопатки зарегистрировано отклонение от верхнего допустимого уровня регулирования. Была создана комиссия, установлена причина нарушения технологического процесса и разработаны мероприятия, после чего отклонений не наблюдалось вплоть до испытания 36-й лопатки. При испытаниях 36-й лопатки отклонение соответствовало нижнему уровню регулирования, после чего были снова разработаны мероприятия по устранению причины разрегулирования техпроцесса до испытания 40-й лопатки. При испытаниях 40-й лопатки отклонение частоты собственных колебаний практически соответствовало предельно допустимому значению.

При оценке стабильности параметров технологического процесса, кроме нахождения границ регулиро-

Рисунок 4. Контрольная карта стабильности частоты собственных колебаний.
Figure 4. Inspection chart of stability of natural oscillation frequency.

вания, оценивается также вероятность отклонения параметра от границ регулирования и границ предельно допустимого отклонения и ее нижняя доверительная граница с уровнем доверия $\gamma = 0,9$ по формуле:

$$\hat{P} = \frac{m}{n}, \quad (2)$$

где $\hat{P}$ — оценка вероятности отклонения частоты собственных колебаний лопатки от границ регулирования и предельно допустимых отклонений; m — число лопаток, вышедших за границу поля допуска или границу регулирования; n — число всех лопаток, прошедших вибрационные испытания.

Нижняя доверительная граница определяется из соотношения

$$P_n = \hat{P} - U_\gamma \sqrt{\frac{\hat{P}(1-\hat{P})}{n}}, \quad (3)$$

где U_γ — квантиль функции нормального распределения, выбирается из таблиц [10, 11]. При $\gamma = 0,9$ $U_\gamma = 1,282$.

Верхняя доверительная граница соответственно равна

$$P_B = \hat{P} + U_\gamma \sqrt{\frac{\hat{P}(1-\hat{P})}{n}}. \quad (4)$$

В условиях вышерассмотренной методики найдем оценку вероятности отклонения параметра (частоту собственных колебаний лопатки) от границ регулирования

$$\hat{P} = \frac{m}{n} = \frac{4}{40} = 0,1.$$

Нижняя доверительная граница равна

$$P_n = \hat{P} - 1,282 \cdot \sqrt{\frac{\hat{P}(1-\hat{P})}{n}} = 0,1 - 1,282 \cdot \sqrt{\frac{0,1 \cdot 0,9}{40}} = 0,05.$$

Верхняя доверительная граница равна

$$\begin{aligned} P_B &= \hat{P} + 1,282 \cdot \sqrt{\frac{\hat{P}(1-\hat{P})}{n}} = \\ &= 0,1 + 1,282 \cdot \sqrt{\frac{0,1 \cdot 0,9}{40}} = 0,16. \end{aligned}$$

Разработанная методика контроля стабильности параметров технологических процессов изготовления, испытаний и уровня надежности внедрена на промышленных предприятиях отрасли специального машиностроения, в частности, на АО «ФНПЦ «Баррикады» (г. Волгоград), АО «Завод №9» (г. Екатеринбург) и АО «ПК «Ахтуба» (г. Волгоград).

Рекомендуется провести апробацию предлагаемого подхода к оценке стабильности на заводах-изготовителях паровых турбин, указанных в таблице, и на новых предприятиях, изготавливающих турбины, в том числе на заводе «Силовые машины» (г. Санкт-Петербург).

Выводы

1. Дано подробное описание методов контроля качества рабочих лопаток в процессе их изготовления и испытаний по существующей нормативной документации.
2. Предложен и разработан статистический метод контроля стабильности параметров лопаток при изготовлении и испытаниях.
3. Разработана и представлена методика контроля стабильности параметров технологических процессов изготовления, испытаний и уровня надежности.

Список использованных источников

1. Султанов М. М. Оценка надежности, продление ресурса и оптимизация ремонта оборудования ТЭС и энергетических систем. Волжский: Филиал ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» в г. Волжском 2016; 100.
2. Segura J. A. et al. (2017). Diagnostic and failure analysis in blades

of a 300 MW steam turbine. Engineering Failure Analysis 2017; (82): 631–641.

3. Труханов В. М., Султанов М. М. Надежность энергетического оборудования тепловых электростанций. М.: ООО Издательский дом «Спектр» 2019; 375.

4. СО 153-34.17.462-2003. Инструкция о порядке оценки работоспособности рабочих лопаток паровых турбин в процессе изготовления, эксплуатации и ремонта. М.: ЦПТИ ОРГРЭС 2004; 56.

5. Боришанский К. Н. Колебания рабочих лопаток паровых турбин и меры борьбы с ними. СПб.: Art-Xpress 2011; 326.

6. Редозубов А. Ю., Кривоногова А. С. Контроль качества лопаток турбин в процессе производства. Молодой ученый 2016; (12.3): 68–71.

7. ГОСТ Р 15.301-2016. Система разработки и постановки продукции на производство. Продукция производственно-технического назначения. Порядок разработки и постановки продукции на производство. М.: Стандартинформ 2016; 16.

8. Труханов В. М. Надежность в технике. М.: ООО Издательский дом «Спектр» 2017; 656.

9. СТО ЦКТИ 063-2017. Нормы на вибрационную отстройку лопаток паровых турбин.

10. Вентцель Е. С. Теория вероятностей. М.: Юстиция, 2018; 664.

11. Гнеденко Б. В., Беляев Ю. К., Соловьев А. Д. Математические методы в теории надежности. Основные характеристики надежности и их статистический анализ. М.: Эдиториал УРСС 2019; 584.

References

1. Sultanov M. M. Reliability assessment, extension of a resource and optimization of repair of the equipment of thermal power plants

and power systems. Volzhsky: MPEI Branch in Volzhsky 2016; 100. (In Russ.)

2. Segura J. A. et al. (2017). Diagnostic and failure analysis in blades of a 300 MW steam turbine. Engineering Failure Analysis 2017; (82): 631–641.

3. Trukhanov V. M., Sultanov M. M. Reliability of power equipment of thermal-power plants. М.: LLC Spektr Publishing house 2019; 375. (In Russ.)

4. SO 153-34.17.462-2003. Instruction about order of estimation of working capacity of rotor blades of steam turbines during the process of manufacturing, operation and repair. М.: TSPTI ORGRES, 2004; 56. (In Russ.)

5. Borishanskij K. N. Kolebaniya rabochikh lopatok parovykh turbin i mery bor'by s nimi. SPb.: Art-Xpress 2011; 326. (In Russ.)

6. Redozubov A.Yu., Krivonogova A. S. Control of quality of turbine blades in-process. Molodoj uchenyj 2016; (12.3): 68–71. (In Russ.)

7. Russian National Standard 15.301-2016. System of development and launching of production into manufacture. Production of industrial and technical purpose. Order of development and launching of production into manufacture. М.: Standartinform 2016; 16. (In Russ.)

8. Trukhanov V. M. Reliability in technique. М.: LLC Spektr Publishing house 2017; 656. (In Russ.)

9. СТО ТСКТИ 063-2017. Standards for vibration detuning of blades of steam turbines. (In Russ.)

10. Venttsel' E. S. Probability theory. М.: Yusticiya 2018; 664. (In Russ.)

11. Gnedenko B. V., Belyaev Yu. K., Solov'ev A. D. Mathematical methods in reliability theory. General characteristics of reliability and their statistical analysis. М.: Editorial URSS. 2019; 584. (In Russ.)