Энерго- и ресурсосбережение – XXI век. 2023. С \_ \_ - \_ \_.

Energy and resource saving XXI century. 2023. P. \_ \_ - \_ \_.

# Интеллектуальные технологии в энергетическом машиностроении

Научная статья

УДК 621.313.322

## Адаптивно-предиктивная модель анализа надежности турбогенератора

**Кристина Владимировна Смирнова** 1**, Максим Эдуардович Бондаренко** 2**,   
Роман Николаевич Поляков** 3

1,2,3ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева», Орёл, Россия,

1 [kristinka\_boom@mail.ru](mailto:dimas.corenkov@yandex.ru)

2 maxbondarenko22@yandex.ru

3 romanpolak@mail.ru

Автор, ответственный за переписку: Максим Эдуардович Бондаренко, maxbondarenko22@yandex.ru

***Аннотация.*** В статье рассматривается адаптивно-предиктивная модель для анализа надежности турбогенератора, которая используется для обеспечения надежной и безотказной работы оборудования. Эта модель позволяет оценивать остаточный ресурс отдельных узлов, что затруднено при прямом анализе в процессе работы. Интеграция соответствующих модулей в систему мониторинга и диагностики позволяет контролировать техническое состояние оборудования и прогнозировать вероятность его безотказной работы.

***Ключевые слова:*** адаптивно-предиктивная модель, турбогенератор, интеллектуальные технологии.

***Для цитирования:*** Смирнова К.В., Бондаренко М.Э., Поляков Р.Н. Адаптивно-предиктивная модель анализа надежности турбогенератора // Энерго-и ресурсосбережение – XXI век. 2023. С. \_ \_ - \_ \_.

Intelligent technologies in power engineering.

Original article

**Adaptive-predicative model of turbo generator reliability analysis**

**Kristina Vladimirovna Smirnova** 1**, Maxim Eduardovich Bondarenko** 2**,   
Roman Nikolaevich Polyakov** 3

1,2,3Oryol state university n.a. I.S. Turgenev, Oryol, Russia

1 [kristinka\_boom@mail.ru](mailto:dimas.corenkov@yandex.ru)

2 maxbondarenko22@yandex.ru

3 romanpolak@mail.ru

Corresponding author: Maxim Eduardovich Bondarenko, maxbondarenko22@yandex.ru

***Abstract.***The article discusses an adaptive-predictive model for analyzing the reliability of a turbogenerator, which is used to ensure reliable and trouble-free operation of the equipment. This model allows you to estimate the residual life of individual nodes, which is difficult with direct analysis during operation. Integration of relevant modules into a monitoring and diagnostic system allows you to monitor the technical condition of equipment and predict the likelihood of its failure-free operation.

***Keywords:***adaptive-predictive model, turbogenerator, intelligent technologies.

***For citation:*** Smirnova K.V., Bondarenko M.E., Polyakov R.N. Adaptive-predicative model of turbo generator reliability analysis // Energy and resource saving XXI century. 2023. P. \_ \_ - \_ \_.

\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

© Смирнова К.В., Бондаренко М.Э., Поляков Р.Н., 2023

Введение. Турбогенераторные электростанции являются основой функционирования и жизнеобеспечения городов, предприятий и других структур. Повышение безопасности и эффективности работы электростанций с использованием программно-аппаратных комплексов и интеллектуальных систем мониторинга и диагностики ключевых компонентов турбогенератора (турбины и генератора) на основе создания проверенной цифровой модели этих компонентов с помощью методов управления динамическими процессами и инструментов анализа в режиме реального времени позволит улучшить эффективность работы электростанций.

Возникновение аварий на объектах энергетической отрасли следует свести к минимуму. Повышение надежности и безопасности с помощью технологических и конструкторских решений достигло своего предела. Однако, по статистике более 70% случаев ремонта вызваны ошибками монтажа, которые приводят к постепенному или внезапному отказу оборудования. При установке оборудования обнаруживаются непредвиденные и скрытые рабочими дефекты, которые впоследствии приводят к аварии и необходимости внепланового ремонта.

Переход от планового обслуживания к ремонту на основе фактического технического состояния требует хранения, обработки и передачи большого объема информации, что стало возможным только сейчас, благодаря развитию компьютерных систем и технологий анализа и обработки больших объемов данных с помощью машинного обучения и нейронных сетей.

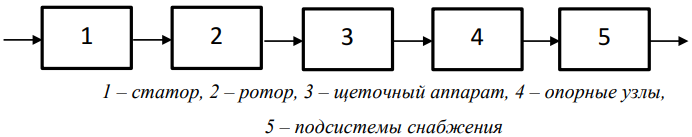
Анализ многолетнего опыта эксплуатации турбогенераторов показывает, что отказ может произойти в любой из подсистем. Причины таких отказов сложны и могут быть связаны с различными факторами и их взаимосвязями.

Для безотказной работы турбогенератора требуется безотказное функционирование всех его подсистем. Узлы, содержащие несколько однотипных деталей, такие как щеткодержатели в щеточно-коллекторном узле, нельзя рассматривать с точки зрения надежности как параллельное соединение элементов. Хоть они и выполняют сходные функции, но при выходе из строя одной детали нагрузка на остальные перераспределяется, что может вызвать их последовательный отказ по принципу домино.

В целом, турбогенераторы не имеют резервных подсистем для повышения надежности и могут рассматриваться как последовательное соединение компонентов (рисунок 1). Таким образом, общая надежность такой системы равна:

, (1)

где *Ps* – надёжность системы в целом; *pi* – надежность отдельных посистем.



***Рисунок 1 – Совокупность подсистем турбогенератора***

*1 – статор, 2 – ротор, 3 – щёточный аппарат, 4 – опорные узлы, 5 – подсистемы снабжения*

При таком способе объединения подсистем сбой в одной из них приводит к сбою всей системы, что для турбогенераторов чревато описанными ранее негативными последствиями. Поэтому задача обеспечения надежной и бесперебойной работы каждой подсистемы стоит особенно остро. С другой стороны, полностью предотвратить отказы невозможно из-за естественного ограничения ресурса отдельных элементов турбогенераторов. Поэтому для обеспечения максимально стабильной работы генерирующего энергию оборудования решаются две основные задачи:

1) Обеспечение надежной работы и продление срока службы узлов и компонентов, для которых существует значительный риск отказа.

2) Обеспечение комплекса мер по контролю технического состояния соответствующих компонентов и узлов, а также использование систем прогнозирования их остаточного ресурса с учетом фактической рабочей нагрузки для обоснования планирования и своевременной реализации необходимых технических операций.

Подсистемы анализа состояния оборудования обычно предоставляют данные двух видов: качественные и количественные оценки параметров, определяющих состояние контролируемого оборудования. Это обычно выполняется путем прямого анализа показаний датчиков и сравнения текущих показаний с предельными значениями. Превышение критического значения указывает на наличие неисправности, а превышение степени указывает на степень неисправности.

Результатом работы предикативной системы является количественная оценка остаточного ресурса контролируемого узла, которая зависит от его исходного состояния и условий работы за прошедший период. Сложность реализации предиктивного функционала системы диагностики для различных подсистем турбогенераторов варьируется. Например, степень износа щёточных колодок легко оценить непосредственно путём прямого измерения с помощью измерительных инструментов или датчиков системы контроля, что невозможно для оценки степени износа вкладышей подшипников, доступ к которым доступен только в результате демонтажа ротора. Или же, как таковая невозможность измерения контролируемых параметров (например, величину усталостных напряжений ротора). Все эти факторы создают потребность в использовании адаптивно-прогнозческих моделей для оценки оставшегося ресурса определенных компонентов, для которых прямой анализ в процессе работы машины затруднен. Такие модули должны быть включены в систему контроля и диагностики вращающейся машины, а их данные должны использоваться для оценки надежности и вероятности бесперебойной работы оборудования. Таким образом, адаптивно-прогнозческие модели должны включать в себя следующие математические модели:

1) износных процессов в узлах трения турбогенератора [1];

2) геометрических параметров износа [2];

3) условий и механизмов изнашивания [3];

4) факторов, влияющих на интенсивность изнашивания [4];

5) влияния распределения высот микронеровностей на изнашивание [5];

6) влияния температуры на химические процессы смазки и изнашивание [6];

7) учета усталостных процессов в механических элементах турбогенератора [2].

Перечисленные математические модели можно обобщить в блок-схему адаптивно-предиктивной модели анализа надёжности работы турбогенератора, объединяющую контрольно-измерительную систему, математическую модель турбины и типовых отказов ключевых узлов, неросетевой модуль и алгоритм формирования прогнозной информации по остаточному ресурсу (рисунок 2).



***Рисунок 2 – Блок-схема взаимодействия контрольно-измерительной системы, математической модели турбины, математических моделей типовых отказов и нейросетевого модуля***

Данные с датчиков контрольно-измерительной системы поступают в блок математической модели турбины, в которой происходит расчёт требуемых параметров для выявления критических узлов, затем данные передаются в блок расчёта остаточного ресурса до отказа ключевых узлов турбогенератора. Полученные данные одновременно сравниваются с прогнозом нейросетевого модуля, который предобучен на модельных роторных системах. В конечном итоге данные передаются в блок алгоритма формирования прогнозной информации по остаточному ресурсу для критических узлов

Заключение. Более глубокий анализ состояний наиболее ответственных и опасных компонентов, а также других сигналов системы мониторинга и диагностики состояния генерирующих энергию машин, позволяет проводить более точную оценку реального технического состояния агрегатов. С одной стороны, такой подход позволяет избежать лишних затрат на плановые ремонты, если состояние соответствующих компонентов допускает продолжение эксплуатации без потери качества и с высоким уровнем вероятности безотказной работы. С другой стороны, прогнозные возможности модели позволяют владельцам заранее получать оповещения о возможности и повышении вероятности отказов и предпринимать необходимые ответные действия. Более того, такие действия могут быть предприняты заблаговременно, что сводит к минимуму время простоя оборудования и увеличивает экономическую эффективность его эксплуатации.

**Список источников**

1. Чинчинадзе А.В. Основы трибологии (трение, износ, смазка): Учебник для технических вузов. 2-е изд. переработ. и доп. / А.В. Чинчинадзе, Э.Д. Браун, Н.А. Буше и др.; Под общ. ред. А.В. Чинчинадзе. – М.: Машиностроение, 2001. 664 с.
2. Shutin, D., Bondarenko, M., Polyakov, R., Stebakov, I., Savin, L. Prediction of Remaining Useful Life of Passive and Adjustable Fluid Film Bearings Using Physics-Based Models of Their Degradation // Mechanisms and Machine Sciencethis link is disabled, 2024, 139, pp. 211–223.
3. Крагельский И.В. Трение и износ. М.: Машгиз, 1961. 383 с.
4. Kasai M., Fillon M., Bouyer J., Jarny S. Influence of lubricants on plain bearing performance: Evaluation of bearing performance with polymer-containing oils. Tribology International, №46. 2012. P. 190-199.
5. Мышкин Н.К., Петроковец М.И. Трение, смазка, износ. Физические основы и технические приложения трибологии. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007. 368 с.
6. Ростик Г.В. Оценка технического состояния турбогенераторов. Учебно-практическое пособие (изд. 2-е: исправленное и дополненное). Санкт Петербург, 2015. 410 с

**References**

1. Chinchinadze A.V. Osnovy tribologii (treniye, iznos, smazka): Uchebnik dlya tekhnicheskikh vuzov. 2-ye izd. pererabot. i dop. / A.V. Chinchinadze, E.D. Braun, N.A. Bushe i dr.; Pod obshch. red. A.V. Chinchinadze. – M.: Mashinostroyeniye, 2001. 664 s.

2. Shutin, D., Bondarenko, M., Polyakov, R., Stebakov, I., Savin, L. Prediction of Remaining Useful Life of Passive and Adjustable Fluid Film Bearings Using Physics-Based Models of Their Degradation // Mechanisms and Machine Sciencethis link is disabled, 2024, 139, pp. 211–223.

3. Kragel'skiy I.V. Treniye i iznos. M.: Mashgiz, 1961. 383 s.

4. Kasai M., Fillon M., Bouyer J., Jarny S. Influence of lubricants on plain bearing performance: Evaluation of bearing performance with polymer-containing oils. Tribology International, №46. 2012. P. 190-199.

5. Myshkin N.K., Petrokovets M.I. Treniye, smazka, iznos. Fizicheskiye osnovy i tekhnicheskiye prilozheniya tribologii. M.: FIZMATLIT, 2007. 368 s.

6. Rostik G.V. Otsenka tekhnicheskogo sostoyaniya turbogeneratorov. Uchebno-prakticheskoye posobiye (izd. 2-ye: ispravlennoye i dopolnennoye). Sankt Peterburg, 2015. 410 s

**Информация об авторах**

К.В. Смирнова – магистрант;

М.Э. Бондаренко – канд. техн. наук, доцент кафедры мехатроники, механики и робототехники ОГУ имени И.С. Тургенева;

Р.Н. Поляков – д-р. техн. наук, заведующий кафедрой мехатроники, механики и робототехники ОГУ имени И.С. Тургенева.

**Information about the authors**

K.V. Smirnova – Undergraduate student of OSU n.a. I.S. Turgenev;

M.E. Bondarenko – сandidate of sciences in technology, Associate Professor of Department of Mechatronics, Mechanics and Robotics of the OSU n.a. I.S. Turgenev;

R.N. Polyakov – doctor of sciences in technology, Head of Department of Mechatronics, Mechanics and Robotics of the OSU n.a. I.S. Turgenev;

Статья поступила в редакцию 06.10.2022; одобрена после рецензирования 10.10.2022; принята к публикации 14.10.2022.

The article was submitted 06.10.2022; approved after reviewing 10.10.2022; accepted for publication 14.10.2022.

Выделенное желтым цветом заполняется редакцией.