

УДК 621.316.3

# Прогнозирование эксплуатационного состояния турбогенераторов

В.В. Шевченко, канд. техн. наук, [zurbagan@mail.ru](mailto:zurbagan@mail.ru)

Национальный технический университет «ХПИ», г. Харьков, Украина

Рассматривается решение задачи прогнозирования технического состояния турбогенераторов с целью определения их остаточного ресурса. Эти задачи требуют особых методов обеспечения высокой достоверности прогноза состояния, построения совершенных математических моделей, создания эффективных, экономичных и технологичных средств диагностики.

*Ключевые слова:* турбогенератор, электроэнергетика, достоверность прогноза, остаточный ресурс, математическая модель.

The prediction problem the technical state of turbogenerators to determining their remaining life is considered. These problems require special methods to ensure high reliability of the state prediction, construction of perfect mathematical models, creating efficient economic and technological diagnostic tools.

*Keywords:* turbogenerator, electricity, reliability prediction, residual life, mathematical model.

**Д**иагностика электрооборудования и, в первую очередь, основных генерирующих систем — турбогенераторов (ТГ), — предполагает развитие теории, методов и средств обнаружения, поиска причин возникновения дефектов, установления мест их формирования. Развитие диагностики позволит повысить эксплуатационную надежность, которая характеризуется такими показателями, как время наработки на отказ и восстановления работоспособного состояния ТГ, значение его коэффициента готовности, ресурса остаточной эксплуатации и т.д. То есть диагностирование — это проверка соответствия основных диагностируемых параметров технического состояния ТГ номинальным данным. Способы и правила диагностики для определения степени развития дефектов устанавливаются на базе исследований процессов на реальных объектах, на физических и математических моделях. Диагностика ТГ может осуществляться техническими и методическими средствами, тестовым и функциональными методами [1].

Проведение диагностики можно условно разделить на два направления: определение реального, настоящего состояния ТГ с целью выполнения ремонтных работ и прогнозирование дальнейшего развития событий во временном

контексте: оценка скорости развития найденных дефектов, предположений о возникновении новых дефектов или мест их возможного формирования. Эти направления, несмотря на внешнее различие, во многом базируются на подобных принципах и научных основах, хотя и решают свои специфические задачи. Диагностирование настоящего и прогнозирование будущего состояний требуют построения совершенных математических моделей и определения критериев достоверности. Для решения первой задачи используют тестовую и функциональную диагностику. При тестовой диагностике в ТГ искусственно создают различные, подобные реальным, условия, а затем проводят исследования и расчеты. При функциональной диагностике для определения состояния ТГ используют данные, которые получают от штатно установленных датчиков на работающем оборудовании.

Вопросы, связанные с прогнозом надежности работы и будущего технического состояния оборудования, сложнее и требуют особых методов, которые обеспечат высокую достоверность прогноза. В общем случае прогноз может быть качественным и количественным, может определяться как предвидение или базироваться на результатах объективных расчетов по математическим или физическим моделям в опре-

деленном временном интервале. В общем случае схема прогнозируемой оценки исследуемого объекта, ТГ, может быть представлена в следующем виде (см. рисунок) [2].

Построение математической модели определяется целью и задачами прогноза, кроме того, необходимо выбрать метод математического анализа, например, метод наименьших квадратов. По этому методу определяются неизвестные параметры модели, прогнозируется состояние объекта на заданный промежуток времени. Правильность выбора математической модели определяет точность и достоверность прогноза, адекватность применяемой математической модели. Для каждой задачи создается своя модель, которая учитывает закономерности процессов и явлений, наиболее важных для заданной цели прогноза, поэтому модель не может быть универсальной для всех узлов и ситуаций, разных уровней развития производства, науки и отраслей техники.

В зависимости от установленных неопределенностей процесса прогнозирования модели разделяют на детерминированные и стохастические. Учитывая вид функций, описывающих детерминированную характеристику процесса, модели могут быть полиномиальные, тригонометрические, экспоненциальные и комбинированные. Подходы к созданию моделей бывают эвристическими и математическими.

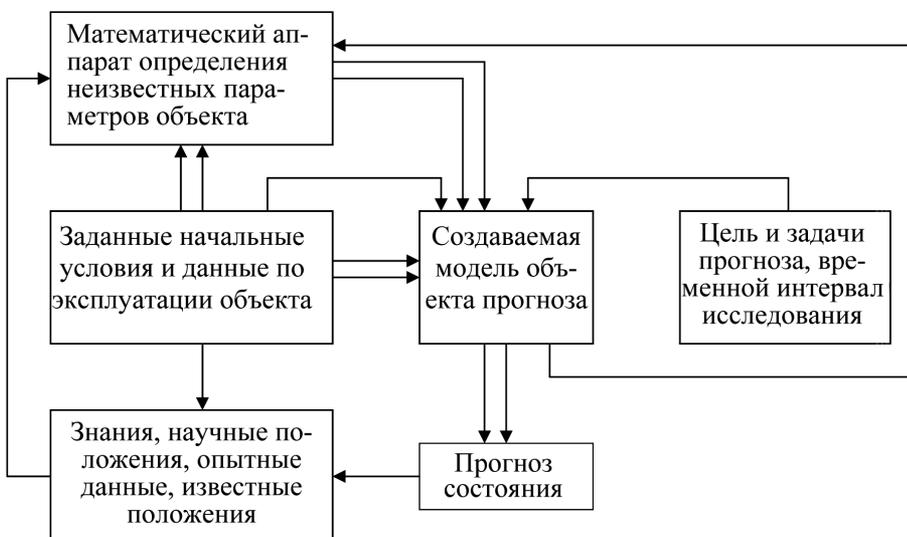
Эвристический метод прогнозирования наиболее распространен в технике и основан на использовании экспертных оценок специалистов в данной области знаний. Этот метод в целом

субъективный. Но обычно он выполняется высококвалифицированными специалистами, что дает возможность не допустить грубых ошибок, особенно если проводятся коллективные экспертные оценки, так называемый «метод комиссий» [3]. Для повышения точности прогноза коллективных экспертных оценок иногда применяют метод Дельфи [2, 3], в основе которого лежат правила: опрос проводится в несколько этапов, а ответы собирают в количественной форме; после каждого этапа проводят статистическую обработку результатов, эксперты знакомятся с ответами других, но дают ответы независимо друг от друга и т.д.

К эвристическим методам относят морфологический метод, который строится на знании «предыстории» развития и взаимосвязей объектов прогноза. Есть и другие способы обработки экспертной информации, например, на основе построения экспертных систем. Анализ методов и технологий эвристического прогнозирования показывает, что он может успешно реализовываться в условиях достаточно сложных систем и описаний процессов. В частности, этот метод может быть использован для диагностирования состояния и определения ресурса работоспособности ТГ [2].

Методы математического прогнозирования, в отличие от эвристических, основаны на количественных оценках характеристик прогнозируемого объекта. При этом данные подлежат обработке математическими методами, что позволяет получить различные зависимости, вычислить и построить по этим зависимостям характеристики

объекта в заданный, прогнозный, момент времени. Основными этапами математического прогнозирования являются сбор и подготовка исходных и статистических данных, разработка или выбор и обоснование математической модели объекта, обработка статистических данных для определения неизвестных параметров модели и получения зависимостей, которые связаны со временем или другими известными параметрами характеристик прогнозируемого объекта,



Структурная схема прогнозирования

расчет его характеристик. Точность прогнозирования зависит от погрешностей и ошибок в статистических данных. Поэтому в них не должно быть случайных погрешностей. Это относится и к значениям интервалов между наблюдениями. Если есть возможность выбирать такой интервал, то его значение определяется с требуемой точностью моделирования рассматриваемого процесса. Если строятся статистические модели в виде регрессионных зависимостей, необходимо, как минимум, 10 точек наблюдений. Для нахождения коэффициентов модели, когда точек наблюдения значительно больше, чем неизвестных параметров, используется метод наименьших квадратов, который дает возможность реализовать метод максимума правдоподобия для повышения точности прогноза.

При математическом прогнозировании всегда стоит проблема выбора прогнозного интервала, то есть интервала экстраполяции. Он определяется интервалом наблюдений в «предыстории», что составляет базу экстраполяции. Различают точечный и интервальный прогнозы. Точечный прогноз осуществляется, когда процесс детерминированный и в заданное время функция, описывающая объект, имеет только одно значение. Интервальный прогноз определяет область значений прогнозной характеристики, в которую с данной вероятностью ее значение попадает в заданный момент времени или при заданных значениях известных параметров. Для описания ТГ можно использовать такую модель [2, 4]:

$$\ln Y = \ln f(\bar{a}, \bar{x}) + \lambda \cdot \ln \varphi(\bar{b}, \bar{x}),$$

где  $f$  — функция, детерминированная основа прогнозной величины  $Y$ ;  $f(\bar{a}, \bar{x})$  и  $\varphi(\bar{b}, \bar{x})$  — некоторые детерминированные функции;  $\bar{x}$  — вектор известных параметров;  $\bar{a}, \bar{b}$  — векторы неизвестных параметров;  $\lambda$  — случайный процесс с нулевым математическим ожиданием (помеха).

В электроэнергетике методы прогнозирования широко используются при разработке стратегий и программ развития отдельных составляющих отрасли, а также при построении прогнозов перспектив, при определении приоритетов и направлений систем диагностики. Для ТГ метод прогнозирования на основе математических моделей целесообразно применять для отдельных процессов, например, вибрационных, которые характеризуют и определяют, в значительной степени, ресурс ТГ и в то же время являются

причиной различного вида помех. При разработке систем диагностики ТГ используются методы построения экспертных систем [2, 3], вероятностные и статические методы. Однако достоверных методик прогнозирования ресурса ТГ в настоящее время недостаточно.

Для современных ТГ есть три основных направления продления срока эксплуатации: разработка новых технических решений, направленных на повышение показателей надежности; создание новых устройств и систем мониторинга; создание новых технологий эксплуатации и технического обслуживания. Одной из основных проблем, возникающих при эксплуатации мощных ТГ, является состояние их торцевой зоны. Проблемы этого узла — «распушивание» (распрессовка) торцевых пакетов магнитопровода. Возможны и другие механические повреждения элементов сердечника статора ТГ. Для ТГ, работающих в ненормальных режимах, необходимо дальнейший поиск новых конструктивных решений обеспечения монолитности торцевой зоны, которые обеспечили бы инновационные основы при модернизации и замене устаревших ТГ новыми, но, что более важно, учитывая экономическое состояние страны, предоставили бы возможности продления срока их эксплуатации. Основной причиной и следствием развития этой проблемы является вибрация. Например, с 1983 по 1988 г. произошло большое количество отказов энергоблоков 800 МВт из-за повреждения торцевой зоны ТГ. (С 1988 г. выпуск документов статистического учета «Обзоры» практически прекратился, и дальнейшие данные по надежности работы ТГ типа ТВВ-800-2 и ТВВ-800-2Е нам не известны.) Кроме того, эксплуатация ТГ мощностью 800 МВт практически прекращена, так как эти генераторы эксплуатируют на «газовых» блоках, которые в настоящее время практически все остановлены (см. таблицу).

Количество отказов энергоблоков

Год	1983	1984	1985	1986	1987	1988
Параметры отказов						
Число отказов	16	28	26	16	31	22
Время восстановления, ч	3714	2528	271	410	2265	1287

В «Обзорах» не всегда детализировали причины отказов, но приведена цитата [4]: «В 1985 г. произошло 10 отказов энергоблоков мощностью 800 МВт из-за повреждений узлов ТГ. Основная доля отказов (5) и время восста-

новления (543 ч) приходится на системы охлаждения обмотки статоров, где главной причиной повреждений явились трещины и течи дистиллята из медных водосоединительных трубок линейных и нулевых выводов (Славянская ТЭС и Запорожская ТЭС), вызванных нарушением целостности торцевой зоны ТГ». В настоящее время по сведениям, полученным от ремонтных предприятий, они также производят работы по модернизации крепления обмотки статора при капитальных ремонтах, что необходимо при нестабильности конструкции торцевой зоны. На Змиевской ТЭС в 2012 г. на ТГ-3 была отмечена повышенная вибрация сердечника статора в период нагружения блока от 0 до 100 МВт из холодного состояния, что, учитывая текучесть компаундной изоляции, представляло опасность ее повреждения и вызвало аварийный останов блока. К повышению вибрации привели отрывы шпилек стягивающих призм сердечника статора в его верхней части, к ослаблению запрессовки шихтованного сердечника. Это произошло из-за длительной работы генератора с перегрузками, а также его работы в маневренных режимах и в условиях частых пусков и остановов [3, 4].

Мониторинг состояния ТГ и всего оборудования является мировой проблемой, но особенно остро она стоит на электростанциях Украины, где диагностика оборудования недостаточна для обеспечения безопасности и надежности эксплуатации морально и физически изношенных ТГ. Существует много методов контроля состояния ТГ в процессе их работы (без вывода и при выводе в ремонт): электромагнитные методы контроля состояния изоляции листов стали с повышенными потерями; ультразвуковые методы контроля плотности запрессовки и выявления ослабленных зубцов активной стали и контроль технического состояния торцевых и зубцовых зон сердечника статора; виброакустическая диагностика состояния сердечника и крепления обмотки статора, вибрационные методы выявления ослабления и разрушения в статоре ТГ и появление дефектов в роторе и т.д.

Существует проблема оптимального управления эксплуатацией и технического обслуживания, включая проведение ремонтных работ и определение остаточного ресурса ТГ. Изношенность оборудования приводит к необходимости повышения эффективности ремонта,

а стоимость ремонтов и эксплуатационные расходы с каждым годом растут. Учащаются отказы ТГ, уменьшается их надежность. Необходимо ускоренное обновление энергетического оборудования на инновационной основе, на базе достижений науки, техники и технологий. Проблемы современных энергосетей ускоряют деградацию ТГ и уменьшают показатели надежности. Повреждаемость генераторов, работающих в маневренных режимах, по разным оценкам, возрастает в 2—4 раза. Анализ показателей эксплуатационной надежности ТГ и средств диагностики, применяемых для электростанций, показывает на необходимость разработки новых эффективных, экономических и технологических способов и средств диагностики, в частности диагностики технического состояния шихтованных магнитопроводов, изоляции обмоток ТГ и т.д., его механического и вибрационного состояний.

### Выводы

1. Для обеспечения высоких показателей надежности большое значение имеет дальнейшее развитие достоверных способов и методов прогнозирования технического состояния ТГ с целью определения остаточного времени до аварийных отказов. Существующие способы прогнозирования остаточного ресурса ТГ недостаточны и/или сложны для практической эксплуатации.

2. Существуют разработки новых эффективных систем диагностики и прогноза оценки технического состояния ТГ. При этом наиболее эффективным является сочетание детерминированных и стохастических методов, использование «эвристических» моделей прогнозирования и экспертных систем при создании глобальных систем диагностики ТГ.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шевченко В.В. Системный подход к вопросам оценки технического состояния электрооборудования энергосистем Украины / В.В. Шевченко // Электрика (Россия). 2013. № 1. С. 6—11.
2. Титко А.И. Оценка состояния статора турбогенератора по показаниям штатных вибродатчиков / А.И. Титко, В.Л. Ахременко, В.А. Титко // Энергетика та електрифікація. К.: 2011. № 1 (329). С. 36—40.
3. Бутов А.В. Повреждаемость и контроль зубцовых зон запеченных крайних пакетов сердечников статора турбогенератора / А.В. Бутов, Л.Г. Мамиконянц // Электрические станции. 2001. № 5. С. 41—47.
4. Титко В.А. Методика решения задач поиска оптимальной стратегии модернизации, замены и ремонта оборудования в электроэнергетике / В.А. Титко // Технічна електродинаміка. 2001. № 4. С. 45—50.