

# Особенности разработки алгоритмического обеспечения автоматов пуска высокоманевренных паровых турбин большой мощности

В последние годы в результате приближения к предельным показателям термического КПД и единичной мощности паротурбинных установок по технологическим и экономическим возможностям традиционное понятие базовых, полупиковых и пиковых энергоустановок в структуре генерирующих мощностей в значительной мере утрачивают прежний смысл, все более сливаясь в понятие высокоманевренных многорежимных установок. Широкое применение получают паровые турбины, работающие в парогазовом цикле. Поэтому одно из ведущих направлений в современных исследованиях посвящено проблеме повышения маневренности, надежности и эффективности как действующих энергоустановок ТЭС и АЭС, так и вновь разрабатываемых.

Все детали и узлы турбины при эксплуатации на различных режимах находятся под воздействием неравномерного температурного поля и представляют собой в совокупности сложную систему с распределенными параметрами. Отличительной чертой таких систем является пространственная протяженность входящих в них объектов.

Существенным для отнесения системы к классу распределенных является невозможность этой протяженностью пренебречь (в описании, аппроксимации, моделировании, управлении и др.), не рискуя при этом адекватностью, качеством представления в различных процессах на основе как физических, так и вычислительных экспериментов. Допустимость тех или иных режимов пуска, нагружения или разгружения, сброс

са или наброса нагрузки, остановка или различных внештатных режимов, так же как и надежная работа турбины на стационарных режимах, определяются рядом факторов, главными из которых являются общее вибрационное состояние турбины и тепловое состояние ее основных узлов, причем присутствует тесная связь между тепловым и вибрационным состоянием турбины. Однако заранее учесть и рассчитать все возможные режимы высокоманевренных турбин большой мощности в условиях эксплуатации на ТЭС и АЭС практически невозможно.



Для современных паровых турбин как объектов управления регулирующими воздействиями являются изменение расхода пара через турбину, а также температуры свежего пара и пара промежуточного перегрева, а ведущими показателями – разности температур в корпусных деталях и роторах, характеризующих их термонапряженное состояние и определяемых режимами их прогрева. Расчетные значения ведущих показателей определяют скорость пуска турбины, а их превышение может приводить к появлению

трещин на поверхности деталей турбины, снижению ее остаточного ресурса и к аварийным ситуациям.

Теория автоматического управления при всех своих практических успехах не позволяет выполнять достаточно точно оценки термонапряжений в элементах паровых турбин (особенно в роторе). Определение внутренних термонапряжений и прогнозирование их изменения в реальном времени является важной задачей. Ее сложность заключается в необходимости владения полной информацией о тепловых полях, термонапряжениях, перемещениях и динамике их изменения. Математический аппарат, основанный на решении уравнений в частных производных, натурная тензометрия, моделирование часто не дают возможность установить причинные факторы и не подходят для оперативного управления в пусковых режимах паровых турбин. В связи с этим в настоящее время используется два подхода к формированию алгоритмов управления турбиной, используемых в автоматах пуска.

1. Реализация программы пуска и остановка турбины, полученной на основе предварительного расчета для нее задачи нестационарной теплопроводности.
2. Упрощение исходных расчетных математических моделей турбины и их непосредственное использование в реальном времени в автоматах пуска.

К недостаткам первого подхода следует отнести:

▣ программы пусков и остановки обеспечивают приемлемую точность только для тех сценариев нагружения и разгружения

турбины, которые приняты при предварительных расчетах;

- ▶ невозможность оптимизации режимов пуска и останова турбины по нескольким критериям, например, времени и экономичности пуска.

Второй подход является более перспективным, так как позволяет учитывать фактическое состояние турбины. Существенным недостатком его в большинстве случаев является отсутствие погрешностей расчетов, связанных с использованием упрощенных математических моделей непосредственно в процессе управления в реальном времени. При этом в качестве основных показателей также используются температурные поля и термические напряжения, но зоны концентрации напряжений, напряжения от центробежных сил и объемных сил тяжести, деформации в деталях турбины не учитываются, что не может быть признано достаточно обоснованным.

Для продления сроков службы и оптимизации режимов работы паровых турбин фирмами-изготовителями предлагаются различные способы и устройства, основанные на указанных подходах или их комбинации. Например, фирмой Siemens PG разработано и применяется на многих электростанциях устройство TSE для оценки уровня напряжений в основных частях и деталях паровых турбин. Сигналы от датчиков, расположенных в различных частях турбины, автоматически и постоянно записываются в так называемом модуле расчета усталости. Зная фактическое значение показателей давления, температуры, расходов и расчетные значения напряжений, можно определить ожидаемое время появления трещины на поверхности детали и определить фактический остаточный ресурс работы турбины.

Особые трудности возникают при контроле термонапряжений в роторе турбины в связи с невозможностью непосредственного измерения температуры на поверхности ротора в точках по его длине, а также в осевой расточке ротора. Для этих целей ряд зарубежных фирм используют устройство Tensomax, работа которого базируется на измерении трех параметров пара. Это изме-

рение давления пара в зоне критических точек (лимитирующих узлов) турбинного вала, а также измерение температуры и давления отработавшего пара на выходе из ротора (в точке отбора пара). Далее эти данные вводятся в вычислительное устройство, которое обеспечивает возможность контроля термической нагрузки вала в пусковых режимах. Однако для всех подобных зарубежных устройств, включая и TSE, отсутствуют данные о точности оценки температурных полей, термонапряжений, показателей повреждаемости ротора турбины и их сравнение со значениями, которые были получены на этапе проектирования турбин заводами-изготовителями. Кроме того, стоимость этих устройств достигает миллиона долларов и даже выше.

**В НПО "АМТ" для создания эффективных алгоритмов управления турбиной, используемых в автоматах пуска, использован второй подход, недостатки которого, указанные выше, устранены.**

Построение приближенных расчетных математических моделей турбины основано на теории факторного планирования эксперимента. Методы этой теории дают принципиальную возможность количественно оценить влияние как каждого фактора в отдельности, так и их совокупности на состояние турбины. Для этих целей предлагается использовать регрессионные модели, построение которых выполняется по исходным моделям с помощью вычислительных экспериментов для всего временного интервала управления объектом. Однако построение регрессионных моделей методами теории планирования эксперимента возможно только для статических задач, то есть для фиксированного момента времени. Чтобы расширить область их применения для задач динамики, предлагается весь процесс управления разбить на отдельные временные интервалы (временные сечения) и для каждого временного сечения строить отдельные уравнения регрессии. Для связи уравнений регрессии для отдельных сечений между собой используются фиктивные переменные, которые исключаются из уравнений регрессии по мере перехода от од-

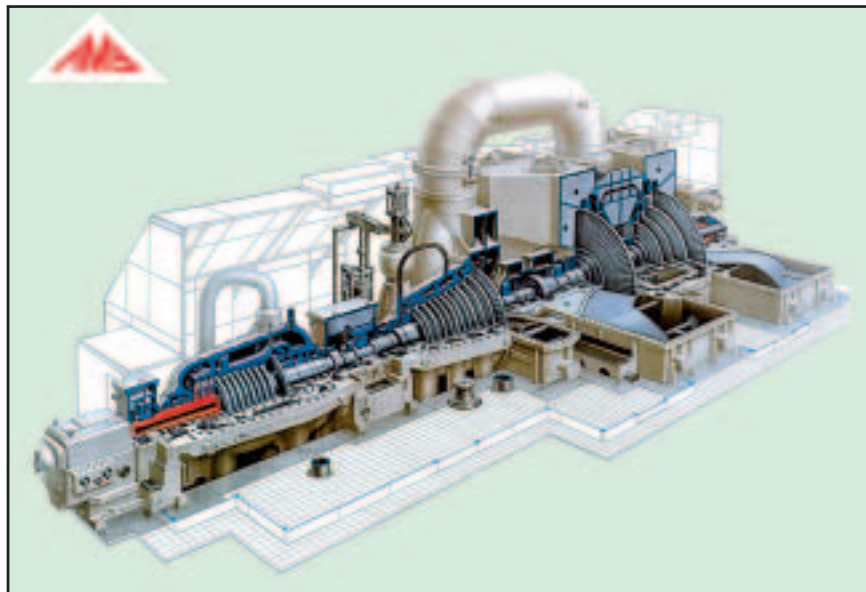
ного временного сечения к другому для всего процесса управления.

Таким образом, особенности разработки алгоритмического обеспечения автоматов пуска на основе предложенного метода заключаются в формировании приближенной динамической модели турбины как объекта управления в виде системы модифицированных уравнений регрессии, ориентированных на их непосредственное использование в реальном времени для решения задач управления пусковыми режимами. Использование таких уравнений позволяет решать как прямую, так и обратную задачи в реальном времени в условиях эксплуатации турбины на электростанции. Под прямой задачей управления понимается расчет по уравнениям регрессии показателя повреждаемости (или максимальных термонапряжений) в зависимости от значения внешних параметров (расхода пара через турбину, температуры свежего пара и пара промежуточного перегрева), под обратной – расчет по заданной величине показателя повреждаемости (или максимальных термонапряжений) значения того или иного внешнего параметра.

Необходимо отметить, что метод не накладывает ограничений на вид исходных математических моделей турбины. В частности, они могут быть линейными или нелинейными, дифференциальными или интегродифференциальными, в частных производных с различными вариантами граничных условий. Более того, он может применяться при отсутствии исходных моделей, но при этом необходимо наличие возможности проведения экспериментальных исследований для реализации матрицы планирования. Вид приближенной математической модели может быть выбран с учетом ее дальнейшего использования (для синтеза систем управления, решения задач контроля, прогнозирования и т.д.). Приближенная математическая модель может быть разработана для любой конкретной пространственной координаты и любой совокупности временных интервалов. Такая модель позволяет реализовать алгоритмы синтеза оптимальных управлений с помощью существующей микропроцессорной

элементной базы. Использование уравнений регрессии в качестве математических моделей для расчета температур и термонапряжений в лимитирующих узлах роторов турбин обеспечивает фиксированную погрешность и не требует дополнительных измерений по сравнению со штатной аппаратурой.

Предложенный метод был использован для создания алгоритмов пусковых режимов паровой турбины типа К-167-107. Паровая конденсационная турбина типа К-167-107 спроектирована ОАО «Ленинградский Металлический завод» для работы в составе энергетической установки комбинированного цикла, состоящей из двух газотурбинных блоков, двух котлов-утилизаторов тройного давления и одной паровой турбины. Турбина предназначена для непосредственного привода генератора переменного тока с частотой вращения 3000 об/мин. Номинальная выходная мощность турбины 168,36 МВт. Величина повреждаемости ротора высокого давления турбины рассчитывалась для любых условий пуска и различных пусковых режимов на ЭВМ по специально разработанной программе на основе исходных математических моделей в СКБ «Турбина» и сравнивалась с результатами расчета изменения температурного поля и термонапряжений по полученным уравнениям регрессии. Погреш-



ность расчетов на основе уравнений регрессии не превысила 10%.

**Выполненные работы показали, что принципиально новый подход формирования приближенных моделей паровых турбин с использованием модифицированных уравнений регрессии позволяет создать отечественный аналог устройства Tensomax.**

Причем указанные преимущества подхода обеспечивают снижение стоимости предлагаемого аналога по сравнению с зарубежным устройством Tensomax в сотни раз. Наряду с этим использование нового метода для решения задачи управ-

ления пусковыми режимами турбин можно рассматривать как пример оптимизации управления объекта с распределенными параметрами. Этот метод обладает определенной универсальностью и может быть распространен на другие сложные динамические объекты с распределенными параметрами в металлургии и машиностроении, нефтегазовом комплексе и энергетике.

**Э. Б. Быков, к.т.н.,  
генеральный директор,  
И. И. Туркин, д.т.н., профессор,  
зам. генерального директора,  
Л. В. Баскаков, к.т.н., доцент,  
начальник отдела, НПО «АМТ»**

## НОВОСТИ

### IBM и Business Objects расширяют партнерство

Корпорация IBM и компания Business Objects заключили новое соглашение, направленное на разработку и поставку интегрированных решений для организации хранилищ данных и бизнес-анализа. Эти решения позволяют заказчикам повысить эффективность использования информации и принимать более взвешенные деловые решения.

«Клиенты ищут пути внедрения инновационных технологий, способствующих получению дополнительных преимуществ для бизнеса благодаря интел-

лектуальной обработке имеющейся информации, – подчеркивает Амбуж Гойял (Ambuj Goyal), генеральный менеджер подразделения IBM Information Management Software. – Помогая им решить эту проблему, мы расширяем наше партнерство с компанией Business Objects, что позволит ускорить распространение передовых решений, построенных на концепции Information on Demand (Информация по требованию)».

По условиям соглашения, IBM будет осуществлять поставку программных систем Business Objects для бизнес-анализа (в версии на-

чального уровня) в составе своих продуктов IBM DB2 и IBM DB2 Warehouse. Компания Business Objects, в свою очередь, будет поставлять по своим дистрибьюторским и розничным каналам сбыта программное обеспечение IBM DB2 Warehouse, включив его в состав своих решений серии Business Objects XI и пакета приложений CFO Performance Management.

«Сегодня Business Objects и IBM – два ведущих поставщика решений в области бизнес-анализа, управления производительностью и организации хранилищ данных – объединяются в партнерский

альянс, призванный помочь компаниям любого масштаба капитализировать свои информационные активы или, иными словами, использовать корпоративные данные с максимальной выгодой для бизнеса, – говорит Джон Шварц (John Schwarz), главный исполнительный директор компании Business Objects. – Это соглашение, направленное на обеспечение рынка передовыми решениями для бизнес-анализа, развернутыми на базе проверенной и надежной информационной инфраструктуры, принесет большую пользу нашим общим клиентам и партнерам».

# Научно–производственное объединение "АВТОМАТИЗАЦИЯ МАШИН И ТЕХНОЛОГИЙ"



## 15 лет

судостроение

нефтегаз

порты

энергетика



Системы  
управления



Пульты управления



Распред-  
устройства

НПО "АМТ"

196128, Санкт-Петербург, Благодатная ул., 6

Тел./факс: (812) 389-88-05, 389-01-79, 389-00-87

[www.amtnpo.ru](http://www.amtnpo.ru)

e-mail: [info@amtnpo.ru](mailto:info@amtnpo.ru)