

**КОНТРОЛЬ И АВТОМАТИЧЕСКОЕ УПРАВЛЕНИЕ  
СТОХАСТИЧЕСКОЙ ЭНЕРГОУСТАНОВКОЙ  
НА ОСНОВЕ НЕЙРОСЕТЕВЫХ ПРИНЦИПОВ**

Предлагается реализовать автоматическое нелинейное управление энергоустановкой путем использования ресурсов информационной системы. Применение статистических методов обработки временных реализаций, накапливаемых информационной системой, позволит систематизировать переходные режимы и провести оптимизацию стационарных режимов работы энергоустановки. Компьютерные анализ, ранжирование, оптимизация и запоминание технологических режимов установки являются основой системы нелинейного управления энергоустановкой. Разработка интеллектуального блока компьютерной автоматизированной системы управления технологическими процессами, использующего накопленные данные информационной системы на основе нейросетевых методов, позволит создать полностью автоматическую систему управления энергоустановкой.

*Ключевые слова:* автоматическое нелинейное управление, информационная система, нейронные сети.

A. V. Borovsky

**MONITORING AND AUTOMATION CONTROL  
OF STOCHASTIC POWER EQUIPMENT  
ON THE BASIS OF NEURON-NET PRINCIPLES**

The author proposes to carry out automation nonlinear control of power equipment (PE) by means of utilization of data acquisition system (DAS) resources. Applying statistical methods of temporal function computing accumulated by DAS allows systemizing transient working conditions and making optimization of stationary conditions for PE. Computer analysis, ranking, optimization and acquisition of technological regimes form the base for power equipment nonlinear control system. Development of neuron-net intellect part for SCADA using DAS potential will provide creating a fully automatic control system for PE.

*Keywords:* automation nonlinear control, data acquisition system, neuron-net.

С появлением мощной вычислительной техники, примерно с начала 1980-х гг., начались разработки компьютерных автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУ ТП) для различных применений, в том числе в энергетике. В тепловой энергетике, о которой пойдет речь ниже, проблема управления технологическими процессами делится на два уровня. К задачам нижнего уровня относится создание полностью автоматизированных компьютерных АСУ ТП энергоустановками (ЭУ)<sup>1</sup>. Задачи верхнего уровня связаны с организацией управления тепловыми электростанциями и энергосистемами [2]. Далее

<sup>1</sup> Под энергоустановкой в тепловой энергетике понимаются котельные агрегаты, турбины с электрогенераторами и энергоблоки, содержащие два котла и турбину с электрогенератором.

рассмотрим некоторые перспективные подходы, направленные на решение задач нижнего уровня.

Энергоустановка тепловой электростанции является дорогостоящим и очень сложным технологическим объектом. Стоимость строительства энергоустановки может превышать 1 млрд р. в современных ценах. Количество каналов информации для мощной энергоустановки может достигать 1 тыс. единиц. Полностью автоматической системы управления энергоустановкой тепловой электростанции в настоящее время не существует.

Рассмотрим причины такого странного обстоятельства. Примерно до конца 1980-х гг. во всех странах энергоустановки оснащались только электромеханическими системами управления, не использовавшими вычислительную технику. Существенной особенностью ЭУ являются большие временные задержки между управляющими воздействиями (изменение подачи топлива и воздуха) и выходными параметрами ЭУ (давление, температура и расход острого пара). Такие временные задержки достигают минуты и более. В этих условиях электромеханические системы, не обладающие «интеллектом», не справляются с задачей регулирования. Они не могут «предвидеть» развитие процесса после изменения положения регуляторов. Поэтому управляет ЭУ человек — машинист установки.

Разработка и внедрение компьютерных АСУ ТП для ЭУ в энергетике пришлось на период «рыночной» экономики в РФ. При этом главной целью ставилось не решение имеющейся технической проблемы, а экономия средств. В результате компьютерные АСУ ТП просто скопировали старые электромеханические системы управления. Новой компьютерной АСУ ТП точно так же, как и старой электромеханической, управляет все тот же машинист установки.

Компьютерные системы управления сложными технологическими объектами, к числу которых относятся ЭУ, делятся на два обширных класса. К первому относятся системы, осуществляющие *нелинейное управление* технологическим объектом. Ко второму относятся АСУ, осуществляющие *линейное управление*. Последнее связано с компенсацией малых отклонений регулируемых величин от заданных значений. На современных ЭУ линейное управление является основным. При таком подходе невозможна полная автоматизация ЭУ.

Рассмотрим подробнее основные принципы нелинейного управления. Прежде всего, системы нелинейного управления должны строиться на основе точных теоретических моделей технологического объекта. Математические модели бывают двух типов — *динамические* (системы дифференциальных и алгебраических уравнений) и *статистические* (использующие информацию, накапливаемую компьютерной информационной системой). В соответствии с основными принципами статистической теории оба подхода эквивалентны при условии полного описания [3]. Реальное описание ЭУ не может быть полным. Поэтому главным вопросом при выборе модели является следующий вопрос: какая модель способна обеспечить *более полное описание ЭУ*. Динамические модели ЭУ достаточно хорошо известны [4]. К числу их недостатков относится невозможность учета долговременно действующих случайных факторов, влияющих на работу установки. Например, для котельных агрегатов ТЭС возможно шлакование стенок топки, уменьшающее отбор тепла или случайные колебания теплотворной способ-

ности топлива. С указанными трудностями можно справиться в рамках статистической модели ЭУ.

Пусть  $\vec{A}$  — совокупность значений входных параметров ЭУ (положений регуляторов), а  $\vec{X}$  — совокупность выходных параметров установки. Обычно число входных параметров (размерность вектора  $\vec{A}$ ) достигает величины 20–30, а число выходных параметров (размерность вектора  $\vec{X}$ ) менее 10. Количество информационных каналов мощной ЭУ достигает нескольких сот или даже 1 тыс. параметров. Однако большая часть этих параметров не участвует в непосредственном управлении ЭУ. Информационные параметры в основном следят за исправностью тех или иных механизмов ЭУ и работают на сигнализацию или отключение ЭУ при возникновении неисправностей.

Все процессы, протекающие в ЭУ делятся на переходные (нестационарные) и установившиеся (стационарные). Введем понятие — *переходный режим* ЭУ. Назовем переходным режимом ЭУ нестационарный случайный процесс  $\vec{X}(t, \vec{A}(t))$ , возникающий в результате заданного изменения положения регуляторов  $\vec{A}(t)$  на интервале времени от  $t_1$  до  $t_2$ . (Читателя, незнакомого с понятиями статистической теории, отсылаем к [5]).

Назовем установившимся режимом ЭУ стационарный случайный процесс, возникающий при фиксированном положении регуляторов  $\vec{A} = \text{Const}$  после прекращения любых переходных процессов

$$\vec{X} = \vec{X}(t, \vec{A}). \quad (1)$$

Избежать элемента случайности при эксплуатации ЭУ невозможно, так как к нему приводят объективные обстоятельства — например, случайные вариации теплоты сгорания топлива, связанные с колебаниями его состава, влажности, минеральных примесей, а также процесс налипания золы на стенки топки. Стационарный случайный процесс (1) представляет собой сумму случайных процессов на конечных интервалах времени, на которых имели место одни и те же положения регуляторов — «склеенная выборка». Отметим, что частотный спектр стационарного случайного процесса (1) лежит в области весьма малых частот  $\omega < 0,001\text{--}0,0001$  Гц, поскольку случайные факторы, влияющие на работу ЭУ, обладают значительными временами появления или развития. Эти времена могут составлять часы, сутки и более. Данное обстоятельство приводит к тому, что для выявления элементов случайности требуется анализировать работу установки на весьма протяженных интервалах времени (месяц, год).

Наиболее трудным вопросом статистической теории является описание нестационарных процессов. При построении нелинейной системы управления можно избежать их углубленного рассмотрения, если принять во внимание, что случайные колебания выходных параметров на переходных процессах не играют существенной роли, в силу малости временных интервалов для переходных процессов по сравнению со временем эксплуатации ЭУ в стационарных режимах. Отсутствует также необходимость проводить оптимизацию ЭУ на переходных режимах. Таким образом, при рассмотрении переходных режимов достаточно ограничиться изучением и запоминанием нестационарных режимов регуляторов  $\vec{A}(t)$ .

Все режимы ЭУ можно разбить на следующие группы:

1. Стационарные режимы.
2. Набор стандартных переходных режимов (переключений).

3. Аварийные переходные режимы, возникающие при срабатывании защит оборудования.

4. Испытательные режимы.

Набор стандартных переходных режимов система управления должна держать в своей памяти в виде временных реализаций  $A(t)$ . Стационарные режимы должны включать оптимизацию параметров ЭУ, например величины к.п.д. установки. Переходные режимы, реагирующие на защиты оборудования, должны запоминаться в виде временных реализаций  $A(t)$  и ранжироваться по степени важности. Испытательные режимы должны исключаться из запоминания.

Рассмотрим задачу оптимизации ЭУ в стационарном режиме. Стационарный случайный процесс (1) может быть описан при помощи аппарата функций распределения, простейшей из которых является

$$f = f(\bar{X}, \bar{A}). \quad (2)$$

Функция распределения имеет смысл плотности вероятности, а величина

$$f(\bar{X}, \bar{A})d\bar{X} —$$

есть вероятность обнаружения выходных параметров  $\bar{X}$  в интервале от  $\bar{X}$  до  $\bar{X} + d\bar{X}$  при фиксированных положениях регуляторов  $\bar{A}$ .

Согласно центральному утверждению статистической теории, известному под названием «Эргодическая гипотеза», функция распределения (2) может быть восстановлена, если известна конкретная временная реализация случайного процесса (1). Точность восстановления функции распределения тем выше, чем длиннее во времени временная реализация.

При помощи функции распределения можно вычислять средние значения выходных параметров системы при заданных положениях регуляторов

$$\langle \bar{X} \rangle(\bar{A}) = \int \bar{X} f(\bar{X}, \bar{A}) d\bar{X}.$$

Если задана некоторая функция, например к.п.д. ЭУ

$$\eta(\bar{X}, \bar{A}),$$

то она также является случайной функцией, так как  $\bar{X}$  представляет собой случайную величину. Средние значения к.п.д. вычисляются по формуле

$$\langle \eta \rangle(\bar{A}) = \int \eta(\bar{X}, \bar{A}) f(\bar{X}, \bar{A}) d\bar{X}.$$

Знание средних  $\langle \bar{X} \rangle(\bar{A})$ ,  $\langle \eta \rangle(\bar{A})$  позволяет сформулировать задачу управления сложным объектом, подверженным воздействию случайных факторов. Требуется удерживать в среднем заданные значения выходных параметров при обеспечении максимального к.п.д. установки. Уравнения такой задачи имеют вид

$$\eta^m = \max(\langle \eta \rangle(\bar{A})),$$

$$\langle \bar{X} \rangle(\bar{A}) = \bar{X}_0. \quad (3)$$

Таким образом, (3) есть задача нелинейного программирования на нахождение условного экстремума.

На практике, сначала определяют совокупность комбинаций положений регуляторов, при которых реализуются заданные выходные параметры, затем выбирают ту комбинацию, которая реализует максимальный к.п.д.

Задачу можно расширить на предмет оптимизации каких-либо дополнительных характеристик ЭУ. Например, можно формализовать положение факела в объеме топки котельного агрегата [1] и искать решение, оптимальное одновременно по положению факела и к.п.д. установки. Возможно дальнейшее расширение объема нелинейного управления.

Рассмотрим вопрос о восстановлении функции (2) на основе записей информационной системы. Используя записанный архив, определяем набор стационарных режимов, имевших место за все время работы ИС. Разные стационарные режимы отличаются различными значениями положения регуляторов  $\vec{A}$ . Рассматриваем далее конкретный стационарный режим. Такой режим представляет собой «склеенную выборку», т.е. состоит из совокупности временных интервалов, на которых имели место одни и те же значения  $\vec{A}$ . Допустим, что суммарная длительность таких интервалов времени  $T(\vec{A})$ . В силу случайности процессов в ЭУ значения выходных параметров при фиксированных  $\vec{A}$  будут колебаться по закону (2). Разбиваем диапазон допустимых значений  $\vec{X} \in [\vec{X}_1, \vec{X}_2]$  на малые приращения  $\Delta\vec{X}_n$ , так что

$$\sum_n \Delta\vec{X}_n = \vec{X}_2 - \vec{X}_1.$$

Анализируя временную реализацию случайного процесса, находим, что значение  $\vec{X}$  из интервала  $\Delta\vec{X}_n$  поддерживается на суммарном интервале времени  $\Delta t_n$ , где

$$\sum_n \Delta t_n = T(\vec{A}).$$

Находим далее функцию распределения

$$f(\vec{X}_n, \vec{A})\Delta\vec{X}_n = \Delta t_n / T(\vec{A}).$$

Остановимся на вопросе организации архивирования в ИС. Для того чтобы осуществить анализ и запоминание временных режимов работы ЭУ, процесс архивирования временной реализации должен быть надлежащим образом организован.

Прежде всего, следует строго определить набор регуляторов  $\vec{A}$  и выходных параметров объекта  $\vec{X}$ . Эти величины подлежат архивированию в виде временных реализаций  $\vec{A}(t)$ ,  $\vec{X}(t)$ . Далее требуется определить набор сигнализаций и зашит, при срабатывании которых возникают переходные режимы. Сигнализация и зашиты отображаются бинарными параметрами, которые также подлежат архивированию. Требуется ввести специальные реперы между последовательными режимами ЭУ, т.е. система должна отличать конец одного режима и начало другого. Вспомогательные параметры ИС, не влияющие на процесс управления ЭУ, можно исключить из рассмотрения

Система должна состоять из:

- архива временных реализаций ИС;
- склада отсортированных режимов ЭУ в виде набора функций  $\vec{A}(t)$ , разбитого на подразделы;
- программы анализатора основного архива;
- сортировщика вновь возникших режимов;
- программы вычисления и корректировки функции распределения (2);
- программы оптимизатора стационарных режимов;
- интерфейса подсказок машинисту установки;
- программы автоматического нелинейного управления ЭУ.

Подводя итоги, можно предложить следующую последовательность действий по реализации эффективного контроля и, в перспективе, системы нелинейного управления ЭУ:

1. Создается информационная система для типовой ЭУ.
2. За длительный период эксплуатации ЭУ (год, два) записывается архив временных реализаций входных и выходных параметров  $A(t)$ ,  $X(t)$ .
3. На основе анализа архива извлекаются и запоминаются, прежде всего, стандартные переходные режимы  $A(t)$ .
4. На основе анализа архива извлекаются, ранжируются и запоминаются переходные режимы, представляющие собой реакции на срабатывание сигнализаций и защит.
5. Вычисляются функции распределения (2) для стационарных режимов, решаются оптимизационные задачи, разрабатываются стандартные оптимальные режимы эксплуатации установки.
6. На основе проделанной работы создается программа «подсказчик» машинисту установки.
7. На завершающем этапе создается система автоматического нелинейного управления установкой.

Представленная программа является, по-видимому, единственно возможным путем, ведущим к полной автоматизации энергоустановок. В самом деле, создаваемые в настоящее время компьютерные АСУ ТП без интеллектуальных блоков, основаны на принципе линейного регулирования отдельных параметров. Они являются, по существу, компьютерными клонами старых электромеханических систем управления энергоустановками и поэтому не решают проблемы полной автоматизации ЭУ. Хотя такие АСУ ТП позволяют восстановить в полном объеме функции старых деградировавших систем управления и до некоторой степени улучшить регулирование по отдельным контурам.

Мы ожидаем, что создание компьютерных АСУ ТП с интеллектуальным блоком, основанным на динамических моделях ЭУ, затруднено, поскольку эти модели являются чрезмерно усложненными, и в то же время недостаточно полными, так как не учитывают целого ряда случайных факторов.

С нашей точки зрения наиболее полное описание ЭУ может обеспечить компьютерная информационная система. Поэтому, стратегическим направлением, обеспечивающим полную автоматизацию энергоустановок, является создание компьютерных АСУ ТП, использующих принципы «нелинейного управления» на основе «нейронных сетей». Такие АСУ ТП являются самообучающимися и используют в своей работе весь ранее приобретенный опыт.

Следует отметить, что имеющиеся в настоящее время компьютерные АСУ ТП уже оснащены мощными информационными системами. К сожалению, возможности этих ИС не используются в должной мере. Поэтому речь должна идти о разработке методов нелинейного управления ЭУ на основе имеющихся ИС.

Работа является следствием дискуссий, проведенных в разное время с топ-инженерами ОАО Иркутскэнерго С.В. Куимовым, А.Н. Свидченко, М.А. Грайвером, А.Я. Перетокиным, Г.И. Прокофьевым, В.А. Полосковым, с генеральным конструктором кольцевого котельного агрегата Е-800 Ф.А. Серантом, работником ИСЭМ Э.А. Таировым, а также с американским ученым-энергетиком Дж. Оффеном (EPRI) и инженером американской энергетической компании Д. Одором (CINERGY).

Список использованной литературы

1. Боровский А.В. Система управления положением факела в топке котельного агрегата вихревого типа / А.В.Боровский, Г.Г. Гоппе, П.И. Матюхин. — Иркутск; М.: ПНТЦ «Видеоэнергодиагностика», 1995. — 32 с.
2. Клер А.М. Математическое моделирование и оптимизация в задачах оперативного управления тепловыми электростанциями / А.М. Клер, Н.П. Деканова, А.В. Михеев. — Новосибирск: Наука, Сибирское предприятие РАН, — 1997. — 120 с.
3. Климонтович Ю.Л. Статистическая физика / Ю.Л. Климонтович. — М.: Наука, 1982. — 608 с.
4. Логинов А.А. Алгебро-дифференциальная система математической модели Энергоблока ТЭС / А.А. Логинов, Э.А. Таиров, В.Ф. Чистяков // Труды XI международной Байкальской школы-семинара. — Иркутск, 1998. — Т. 4.
5. Рытов С.М. Введение в статистическую радиофизику / С.М. Рытов. — М.: Наука, 1976. — Т.1: Случайные процессы. — 494 с.; Т.2: Случайные поля. — 463 с.

Referenses

1. Borovsky A.V. Sistema upravleniya polozheniem fakela v topke kotel'nogo agregata vikhreвого типа / A.V. Borovsky, G.G. Goppe, P.I. Matyukhin. — Irkutsk; M.: PNTTs «Videoneergodiagnostika», 1995. — 32 s.
2. Kler A.M. Matematicheskoe modelirovanie i optimizatsiya v zadachakh operativnogo upravleniya teplovymi elektrostantsiyami / A.M. Kler, N.P. Dekanova, A.V. Mikheev. — Novosibirsk: Nauka, Sibirskoe predpriyatie RAN, — 1997. — 120 s.
3. Klimontovich Yu.L. Statisticheskaya fizika / Yu.L. Klimontovich. — M.: Nauka, 1982. — 608 s.
4. Loginov A.A. Algebro-differentsial'naya sistema matematicheskoi modeli Energobloka TES / A.A. Loginov, E.A. Tairov, V.F. Chistyakov // Trudy XI mezhdunarodnoi Baikal'skoi shkoly-seminara. — Irkutsk, 1998. — T. 4.
5. Rytov S.M. Vvedenie v statisticheskuyu radiofiziku / S.M. Rytov. — M.: Nauka, 1976. — T.1: Sluchainye protsessy. — 494 s.; T.2: Sluchainye polya. — 463 s.

Информация об авторе

*Боровский Андрей Викторович* — доктор физико-математических наук, профессор, кафедра информатики и кибернетики, Байкальский государственный университет экономики и права, г. Иркутск, e-mail: andrei-borovskii@mail.ru.

Author

*Borovsky Andrey Victorovich* — Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Chair of Computer Science and Cybernetics, Baikal State University of Economics and Law, Irkutsk, e-mail: andrei-borovskii@mail.ru.