

Максимальная производительность

Анализ основных причин нестабильности производства

Александр Хорч, Джон У. Кокс, Нунцио Бонавита

Возмущения и колебания в технологических процессах обычно оказывают существенное влияние на качество выпускаемой продукции, эксплуатационные расходы и рентабельность производства.

Международный научно-исследовательский коллектив разработал новое решение для анализа нестабильности производства. После обширных натурных испытаний и сбора необходимых данных был создан PDA-модуль, который прекрасно зарекомендовал себя в компании Eastman Chemical Company, г. Кингспорт, шт. Теннесси

В своем стремлении повысить эффективность производства современные перерабатывающие заводы все больше используют рециркуляционные потоки и интегрирование тепла. Это интегрирование массы и энергии усложняет управление технологическими процессами, так как отклонения могут распространяться по всему заводу достаточно сложным образом. Нередко единственный источник отклонения проявляет себя как широко распространенное возмущение. Распространенное возмущение может сказываться на основных технологических переменных типа скорости подачи сырья, температуры в колоннах и состава продукта. Подобное возмущение может затронуть единственную установку, например, ректификационную колонну, может распространиться по всему заводу, оказывая влияние на весь технологический цикл, а может затронуть и целый район, если речь, скажем, идет о паровом отоплении в жилых домах. При наличии множества прерванных или непостоянных измерений поиск основной причины возмущения сродни поиску иголки в стог сена. Задачей описываемой здесь работы является автоматическое обнаружение распространенных по всему заводу возмущений и выявление их вероятных основных причин. Это позволяет устранить возмущения за счет проведения технического обслуживания, создания новых схем управления или простой перенастройки контроллеров.

В последние годы для диагностики производственных процессов в университетах было разработано несколько новых алгоритмов, в основе которых лежат современные методы обработки сигналов, а также спектральный анализ и анализ нелинейных временных рядов. Чтобы использовать эти алгоритмы применительно к описанным здесь проблемам, компания АББ инициировала проект, реализованный в содружестве с Imperial

College / UCL Center for Process Systems Engineering (CPSE = Центр проектирования больших систем Лондонского университетского колледжа).

После предварительных производственных испытаний компания АББ произвела оценку крупномасштабного экспериментального применения методологии с использованием первого прототипа. Технология выявления нестабильности производства была опробована на данных, полученных на норвежской нефтяной платформе. В основу анализа возмущений были положены данные, полученные от более чем 2000 измерительных тегов, а также данные с высоким разрешением, на получение которых было затрачено более одного месяца.

В последние годы для диагностики производственных процессов в университетах было разработано несколько новых алгоритмов, в основе которых лежат современные методы обработки сигналов, а также спектральный анализ и анализ нелинейных временных рядов.

На основании тщательного анализа и обсуждения его результатов были вскрыты значительные возмущения, которые также были выявлены в ходе проведенных на заводе параллельных исследований, в которых участвовали технологи и специалисты по текущему контролю компании

АББ и заказчика. Эти обнадеживающие результаты показали, что интеллектуальный анализ технологических данных может в значительной степени способствовать выявлению, локализации и диагностике проблем.

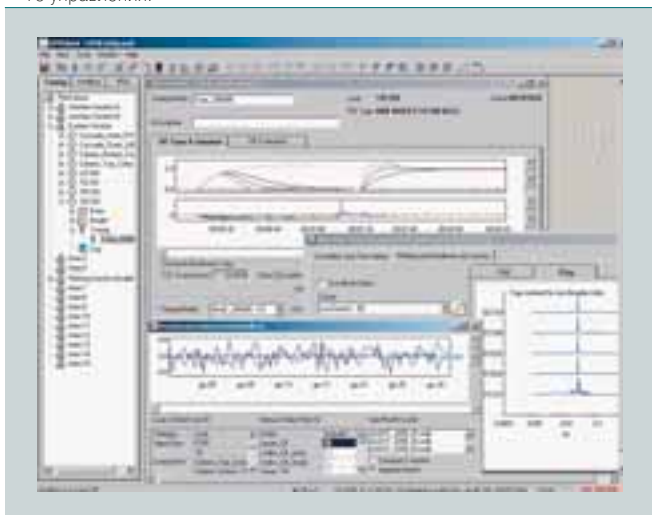
Последним шагом в деле разработки программного продукта было его сопряжение с изделиями АББ. Учитывая характер использованной методологии, было решено создать новый модуль под названием Plant-wide Disturbance Analysis (PDA), который вошел в состав программного обеспечения для оптимизации контуров автоматического управления LPM (Optimize^{IT} Loop Performance Manager). Сегодня компания АББ готова предложить всем желающим программную версию LPM, содержащую PDA-модуль.

После краткого изложения методологии в данной статье будут представлены два успешных и удивительно точных результата, полученные в результате оценки качества нового инструмента у конечного пользователя. С многообещающими результатами проверка интегрированного инструмента была проведена в компании Eastman Chemical Company, г. Кингспорт, шт. Теннесси (см. титульную фотографию).

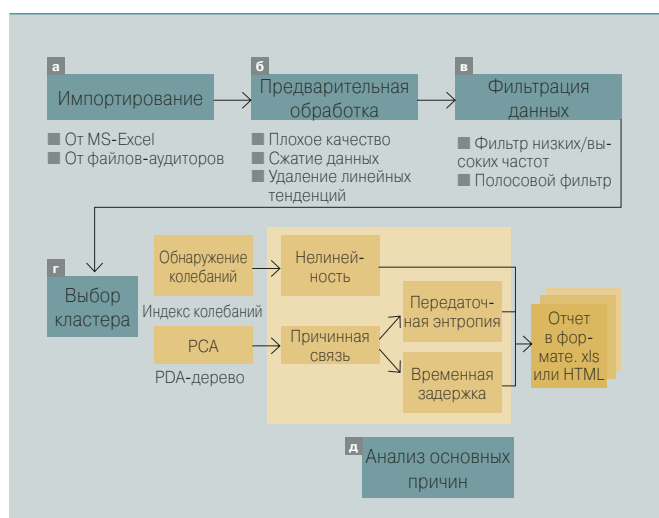
Optimize^{IT} – Loop Performance Manager (LPM)

LPM представляет собой программный инструмент обслуживания систем автоматического управления. Он предназначен для инженеров по системам управления, для специалистов по приборам и для персонала, занятого техническим обслуживанием. LPM был создан для того, чтобы перекинуть мостик между технологиями, разработанными научным сообществом, и существующими реальными нуждами промышленного мира [4]. Его задача заключается в том, чтобы

1 Снимок экрана LPM. Общая среда для анализа возмущений, выявления основных причин, а также контроля и настройки контуров автоматического управления.



2 Типичный ход проведения PDA-анализа внутри инструмента LPM; а – е – пять этапов этого анализа.



Рентабельность производства

контуры автоматического управления и, следовательно, весь процесс выпуска продукции обеспечивали максимальную производительность.

Весь пакет имеет модульную структуру и в настоящее время включает в себя три программных компонента:

- компонент настройки контура управления, предназначенный для улучшения работы этой системы;
- компонент «ревизии» или проверки контура управления, предназначенный для контроля работы этой системы;
- PDA-компонент, который одновременно анализирует несколько систем управления, обеспечивая при этом выявление общего поведения и нахождение вероятных основных причин.

На рис. 1 показан типичный снимок экрана LPM-инструмента.

Анализ нестабильности производства

Хороший обзор проводимых сегодня исследований приведен в работе [6]. На рис. 2 показана вся процедура работы PDA-модуля внутри LPM-инструмента [7].

Импортирование данных

Данные можно считывать в автономном режиме либо из Excel-файлов, либо из информации, собранной в LPM-инструменте в процессе осуществления контроля работы контура управления (см. рис. 2а).

Предварительная обработка и фильтрация данных

Когда необходимо исследовать различные аспекты данных, например, различные частотные

диапазоны, очень полезной оказывается стандартная и простая функция для предварительной обработки информации. При этом проблематичные данные, например, плохие данные, выбросы или линейные тенденции, отфильтровываются автоматически.

Простое представление наложенных данных в форме графика высокой плотности уже является очень полезным процессом для специалистов. Такие режимы представления информации на операторских экранах обычно отсутствуют (см. рис. 2б и 2в).

Выбор проблемного кластера

Первым и основным шагом при анализе является выявление кластеров временных тенденций, которые показывают схожие периодические колебания. Выявление колебаний производится по методам обработки сигналов. В этом контексте сигналы являются временными тенденциями измерений. При выявлении колебаний традиционно ищутся нулевые пересечения сигнала. Одним из слабых мест такого подхода является то, что шумы вызывают дополнительные нулевые пересечения, уменьшая значимость полученного результата. Здесь же принципиальным отличием является то, что для выявления колебаний используются нулевые пересечения автоковариационной функции сигнала [1]. В сравнении с ранее известными методами, в которых временные тенденции используются непосредственно, этот метод существенно выигрывает (см. рис. 2г).

Количество тегов, с которыми можно работать, не ограничено. В ходе предыдущих исследований использовалось несколько сотен тегов. Благодаря эффективному внедрению соответствующих

алгоритмов их теперь можно анализировать без особого труда.

Графики высокой плотности, приведенные на рис. 3, показывают временные тенденции. Подобную информацию можно также получить с помощью спектрального анализа. Этот метод выявляет периодические параметры лучше, чем временные тенденции. Когда дело доходит до выявления распределенных возмущений, то частотные спектры демонстрируют несколько преимуществ. Достоинство же описываемого инструмента состоит в том, что в нем одновременно используются как временной, так и частотный подходы. Метод, примененный для выбора кластеров, основывается на спектральном анализе основных компонентов [2].

Спектральные кластеры лучше всего представлять в виде иерархического дерева [9]. Спектральная кластеризация также очень надежно работает применительно к временным тенденциям с непериодическими параметрами, но только в том случае, если их спектры являются схожими. В инструмент также включены другие очень интуитивные способы представления кластеров.

Нахождение вероятных основных причин для кластеров возмущений

Хорошо известно (см., например, работу [8]), что очень частой причиной возмущения в химических процессах является неисправный клапан управления с нелинейными характеристиками, скажем, с зоной нечувствительности или с избыточным статическим трением. Предельные циклы, возникающие из-за заедающих клапанов управления в контуре обратной связи, могут распространяться по всему заводу. По этой причине инструмент с самого начала предусматривал диагностику нелинейных основных причин. Методы, разработанные для диагностики заедающих клапанов управления, могут также использоваться для обнаружения отказов, возникающих из-за технологических нелинейностей, например, из-за периодического вспенивания в ректификационной колонне (см. рис. 2д).

Нелинейные тенденции

Нелинейная временная тенденция [3] представляет собой сигнал, который не может быть описан как выход линейной системы, работающей от белого шума. Он характеризуется фазовой когерентностью и, если является колебательным, присутствием гармоник. Примером очень нелинейного сигнала является меандр. Как правило, перерабатывающий завод работает как низкочастотный фильтр, а это означает, что измерение вблизи от нелинейного источника обладает большей нелинейностью, чем измерение вдалеке от этого источника. По мере распространения по заводу нелинейный меандр сглаживается.



Такое поведение используется для выявления возможных зон нахождения основных причин.

Один из способов выявления нелинейности – это визуальный анализ временных тенденций и спектров. Процедура эта, к сожалению, «ручная» и потому ненадежная, замысловатая и предрасположенная к ошибкам. Новая концепция подхода сегодняшнего дня – это оценка нелинейности, которая в наибольшей степени выражена у источника последних. В этом случае есть возможность отличить основное колебание от пространственных вторичных колебаний. Индекс оценки является большим для периодических (но не синусоидальных) временных тенденций (которые являются типичными для выхода контура управления с предельным циклом, вызванным нелинейностью).

Основой для оценки нелинейности является сравнение прогнозируемости каждой временной тенденции с рядом построенных временных тенденций, которые имеют тот же самый энергетический спектр, но произвольные фазы. В сравнении с построенными временными тенденциями нелинейная временная тенденция будет иметь высокую прогнозируемость, в то время как для линейной временной тенденции эта разница будет незначительной [3].

По мере распространения по заводу нелинейный мейандр сглаживается. Такое поведение используется для выявления возможных зон нахождения основных причин.

Достоинства описанной методологии подтверждаются рассмотренными ниже примерами. Ясное и понятное направление действий и/или технического вмешательства вполне может обеспечить значительное уменьшение времени, потраченного на погоню за ложной основной причиной. Более того, будучи примененной к крупномасштабным проблемам, данная методология помогает идентифицировать проблемы, которые никогда не могли бы быть выявлены вручную, поскольку основная причина может располагаться очень далеко от своего следствия.

Показанная здесь компьютерная методология представляет собой ценный инструмент подде-

8 Колебательные данные из кластера с 68-минутными колебаниями. Данные отсортированы по нелинейности и правильно указывают на LC2 как на основную причину.



Ключевые особенности анализа возмущений по всему заводу

- Автоматическое обнаружение присутствия одного или нескольких периодических колебаний.
- Обнаружение неперiodических возмущений и отклонений технологических процессов от нормы.
- Определение местонахождения на заводе различных колебаний / возмущений и их наиболее вероятных основных причин.

Optimize^{IT} Loop Performance Manager

Объединение сквозного контроля (проверка контура управления) и сквозного анализа возмущений (PDA-модуль) с контроллером мирового класса дает в руки персоналу, управляющему ходом производства, наилучший инструмент из всех, имеющихся на рынке.

Промышленные примеры

PDA-модуль направил технологов непосредственно к основной причине возникновения заводских проблем. Эти основные причины невозможно было определить, глядя на данные или используя накопленный опыт.

ржки. Она, конечно, не сможет заменить человеческие знания и умение, но вполне может существенно сократить усилия, затрачиваемые на нахождение заводских проблем и установление причин их возникновения.

К двум дополнительным подходам к анализу основных причин относятся методы передаточной энтропии и оценки временной задержки [5].

Передаточная энтропия

Этот статистический метод позволяет оценить прогнозируемость одной переменной в зависимости от другой на основе функций плотности вероятности (ФПВ). Мера причинной связи, используемая для количественного выражения степени влияния переменной X на другую переменную Y ,

выводится из передаточной энтропии $T(X/Y)$. Последняя сама выводится из энтропии, которая представляет собой меру неопределенности произвольной переменной и суммирует взвешенные логарифмы ФПВ. Передаточная энтропия вычисляется из совместной ФПВ двух переменных. Это обеспечивает меру для зависимостей между этими переменными. Мера причинной связи $t(X, Y)$ выводится путем сравнения влияния X на Y с влиянием Y на X :

$$t(X, Y) = T(X/Y) - T(Y/X)$$

Таким образом, большие значения $t(X, Y)$ указывают на сильную причинную связь в направлении от X к Y .

Анализ временных задержек

Второй метод, реализованный в PDA-модуле для анализа причинных связей, основывается на функции взаимной корреляции (ФВК). Эта функция определяет причинную связь между измерениями, исходя из существующей между ними временной задержки. Основной принцип метода состоит в том, что при распространении возмущения по всему заводу это возмущение часто можно наблюдать в ряде технологических переменных с задержкой во времени. Знание временной задержки дает ключ к нахождению основной причины, поскольку понятно, что переменная, находящаяся ближе к основной причине, продемонстрирует возмущение раньше, чем более удаленная переменная. ФВК измеряет подобие между сигналами в различные моменты времени и, следовательно, может быть использована для измерения временных задержек между этими сигналами.

ФВК двух сигналов имеет максимальное значение в момент времени, равный времени запаздывания.

Рентабельность производства

Разница между этими двумя методами анализа причинных связей состоит в том, что матрица причинных связей, основанная на передаточной энтропии, является более чувствительной. Она может находить причинную связь даже в тех ситуациях, в которых временную задержку измерить невозможно, поскольку она выявляет другие следствия, например, сглаживание временной тенденции, которое имеет место по мере распространения возмущения от его источника.

Первый промышленный пример

Рассмотрим технологический участок, показанный на рис. 4, который представляет собой участок химического завода, включающий в себя две ректификационные колонны. Как видно из этого рисунка, большинство измерений циклически повторяется с интервалом 68 минут (см. также рис. 3). Технологи предложили несколько

теорий, объясняющих эти устойчивые колебания, и поэтому было предложено несколько основных причин.

Применение PDA-модуля для кластера, связанного с 68-минутным циклом, показало, что вызывать колебания во всех остальных тегах этого конкретного кластера может нелинейная проблема вокруг контура управления уровня LC2. Эта гипотеза, естественно, была подтверждена экспериментально: программа управления в LC2 4-5 раз перестраивалась настолько же радикально, насколько производится его полная перенастройка. Вследствие этого контур LC2 совершал циклы со значительно более высокой частотой, и находящиеся ниже по потоку циклы во всех других переменных более не возникали. Это дало технологам основания полагать, что главная причина крылась внутри контура

LC2 и что с наибольшей вероятностью проблема заключалась в конечном элементе управления. Эта гипотеза была также подтверждена путем LPM-анализа данных, полученных по контуру управления LC2.

Возможным объяснением наличия возмущений по всему заводу является то, что колебания распространяются через технологический участок в то время, когда декантатор заполнен жидкостью. В результате существует тот или иной поток через клапан LC2, а это влияет на измерение уровня LC1. В свою очередь LC1 регулирует подачу FC4 (по иерархической обратной связи) в колонну 2. Результирующие циклы в FC4 влияют на несколько переменных колонны 2, включая поток дистиллята FC6.

Анализ нестабильности производства перестал быть предметом современных академических исследований и превратился в удачное промышленное приложение в форме выпущенного программного продукта.

Кроме того, в наборе данных существует и вторичный цикл. Это колебание имело место на несколько более высокой частоте, и в кластере появились еще пять результатов измерений. Анализ основных причин своевременно показал наличие статического трения в FC2, и это правильный результат.

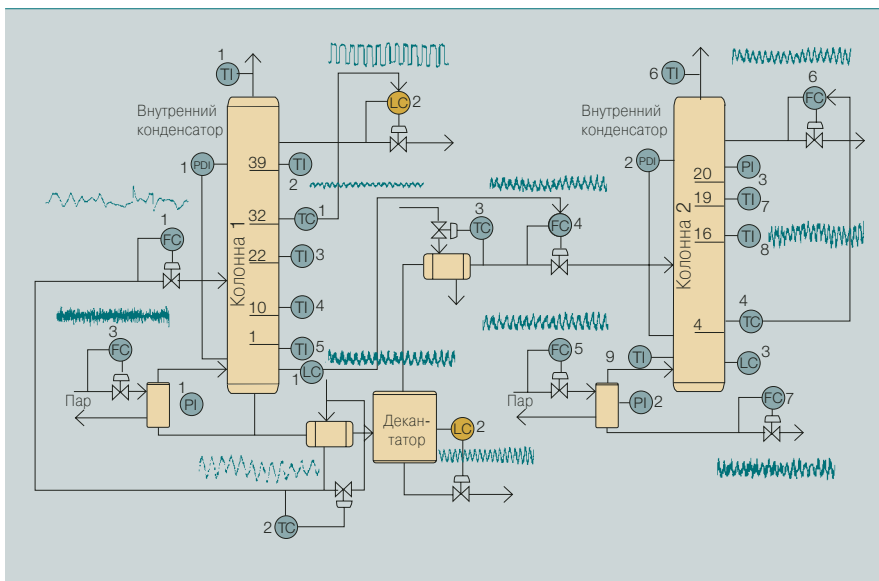
На основании полученных результатов технический персонал может улучшить работу всего технологического участка завода, разобравшись с проблемами в клапанах LC2 и FC2.

Второй промышленный пример

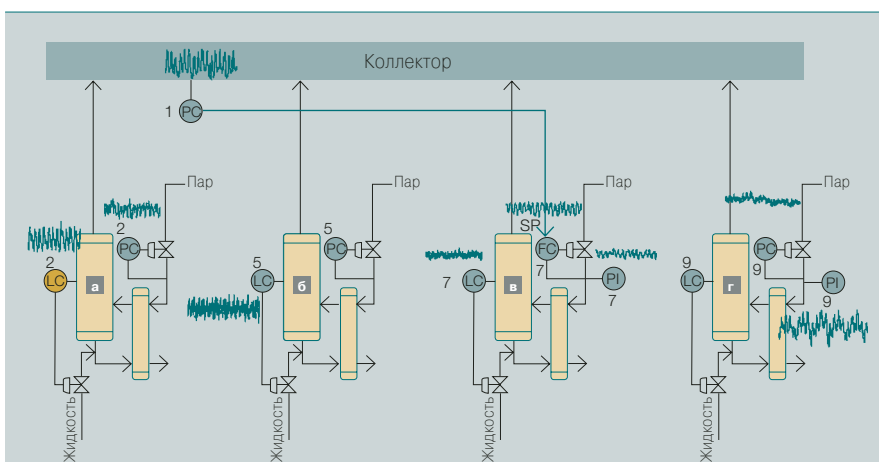
Во втором примере описываются возмущения, обнаруженные в испарительной системе (рис. 5).

Как видно из этого рисунка, давление в паровом коллекторе характеризуется колебаниями с периодом в 220 секунд. Со всей очевидностью эта частота может быть выявлена во всех четырех испарителях (5а, 5б, 5в и 5г), которые используются для образования пара и создания давления. Испаритель 5в используется для регулирования давления в коллекторе. Первым естественным желанием заводского персонала было обследовать испаритель 5в для нахождения основной причины.

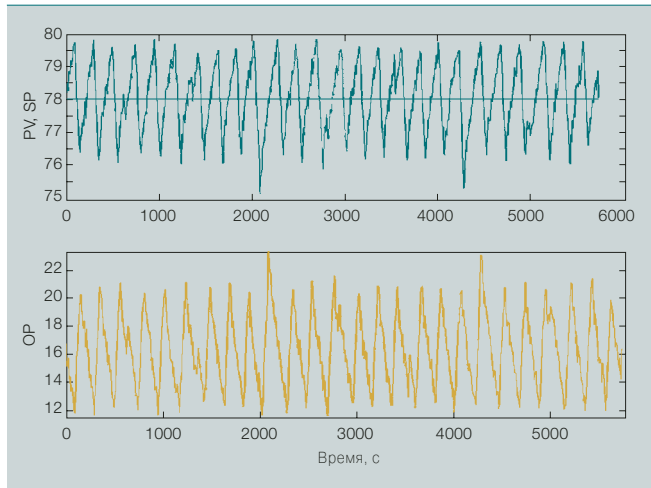
4 Схема технологического процесса для примера 1.



5 Колебательные данные, распространенные по испарительной системе. Выявленная основная причина отмечена красным цветом. а – г представляют собой испарительные колонны.



6 Данные, снятые с контура управления уровнем LC2 в испарителе А. а – уставка и технологическая переменная (0-100 процентов), б – регулируемая переменная (открытие клапана) (0-100 процентов). Полученные данные показывают наличие статического трения.



При использовании же PDA-модуля для решения этой проблемы без особого труда был найден кластер, включающий в себя все относящиеся к проблеме теги. С помощью анализа нелинейностей был выявлен контур управления уровнем (LC2) в испарителе 5а, рис. 6.

Будучи примененной для решения крупномасштабных задач, новая методология позволяет выявить проблемы, которые никогда не могли бы быть выявлены вручную.

Эксперименты, проведенные технологами завода, на самом деле подтвердили, что именно в этом крылась основная причина, причем найденная отнюдь не интуитивно. Чтобы было понятно, каким образом для последующего подтверждения

можно было использовать LPM-проверку, было поручено провести диагностику этого контура. Результаты диагностики подтвердили правильность обнаружения основной причины (см. вставку).

Выводы

Анализ нестабильности производства перестал быть предметом современных академических исследований и превратился в удачное промышленное приложение в форме выпущенного программного продукта. Промышленные примеры показывают, что новая современная технология является мощным инструментом в руках технологов, когда им необходимо провести анализ основных причин возникновения существенных заводских проблем. Такие основные причины не всегда очевидны для заводского персонала, а при поддержке современного инструмента можно значительно сократить время, затрачиваемое на обнаружение этих причин.

Более того, PDA-методология позволила получить обнадеживающие результаты в новых областях

Результат LPM-проверки

– LC2: Общая оценка контура

Работа контура управления является неприемлемой.

– LC2: Подробные сведения:

Контур управления осциллирует.

– Контур управления осциллирует.

– В управляющем клапане обнаружено статическое трение, которое приводит к колебаниям в контуре. Перевести контроллер в режим ручного управления и проверить.

Колебания объясняют значительную часть общих возмущений. Устранение колебаний должно привести к значительному улучшению работы.

Амплитуда колебаний является достаточно регулярной. Это нетипично для чистой (линейной) проблемы настройки.

– Оконечный элемент управления приводит к неустойчивости выходного сигнала.

В управляющем клапане обнаружено повышенное статическое трение. Неисправный клапан увеличивает неустойчивость контура. Переведите контур в режим ручного управления или проведите техническое обслуживание клапана.

применения, например, в современном управлении аварийными сигналами и при диагностике электрических сетей.

Александр Хорч

ABB Corporate Research
Ладенбург, Германия
alexander.horch@de.abb.com

Джон У. Кокс

Eastman Chemicals Company
Кингспорт, США

Нунцио Бонавита

ABB PS&S S. P. A.
Генова, Италия
nunzio.bonavita@it.abb.com

Литература

- [1] Thornhill, N. F., Huang, B., and Zhang, H., 2003, Detection of multiple oscillations in control loops, *Journal of Process Control*, 13, 91–100.
- [2] Thornhill, N. F., Shah, S. L., Huang, B., and Vishnubhotla, A., 2002, Spectral principal component analysis of dynamic process data, *Control Engineering Practice*, 10, 833–846
- [3] Kantz, H., and Schreiber, T., 1997, *Nonlinear time series analysis*. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- [4] Bonavita, N., Bovero, J. C., and Martini, R., 2004, Control loops: performance and diagnostics, in: 48th ANIPLA Conference, Milano, Italy, September 2004
- [5] Bauer, M., Cox, J. W., Caveness, M. H., Downs, J. J., Thornhill, N. F., 2007. «Finding the direction of disturbance propagation in a chemical process using transfer entropy», *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 17(1), 12–21.
- [6] Thornhill, N. F., and Horch, A., (2006) «Advances and new directions in plant-wide controller performance assessment», *Proc. Of ADCHEM 2006*, Gramado, Brazil, Appil, 2–5, 2006
- [7] Bonavita, N., Caserza-Bovero, J., De Lorenzo, L., Martini, R., 2006, «Control Performance Monitoring: a Data-driven Approach», *Proc. of Monitoraggio delle Prestazioni dei Processi e dei Sistemi di Controllo*, Milan 19 September 2006
- [8] Horch, A. (2006), «Benchmarking control loops with oscillations and stiction». In: *Process Control Performance Assessment*. (Ordys, A., Uduehi, D and Johnson, M. A, Eds), Springer, Guildford, UK.
- [9] Thornhill, N. F., Melbo, H., and Wiik, J., 2006, Multi-dimensional visualization and clustering of historical process data, *Industrial Engineering and Chemistry Research*, 45, 5971–5985.