

*А.А. Мусаев, В.А. Никитин*

# Оценивание качества управления процессами на основе многомерного статистического контроля

## МЕТОДЫ ОЦЕНКИ И РАСЧЕТА

Статистические методы анализа точности, стабильности и качества управления технологическими процессами (ТП) в настоящее время все шире применяются в различных областях промышленности. При этом методы анализа предусматривают контроль ТП, как правило, лишь по одному или нескольким показателям качества продукции. Вместе с тем контроль продукции или процесса по отдельным показателям может привести к значительным ошибкам в управлении и контроле технологической установки вследствие различия их доверительных областей. Как показывает анализ многомерных данных ТП, значения параметров продукции и параметров состояния процесса в той или иной степени коррелированы. Это позволяет при решении задач контроля и управления ТП использовать представление векторов управления, состояния процесса (технологической установки) и продукции в главных компонентах (ГК) [1].

Действительно, данные измерений при мониторинге и управлении ТП, как правило, имеют вид набора многомерных векторов. Данное представление

(при числе контролируемых параметров больше трех) не позволяет непосредственно визуализировать многомерную динамику изменения состояния ТП, а разрозненные визуализации трендов отдельных параметров существенно снижают возможность оценки оператором интегрального состояния управляемого ТП.

Для анализа, контроля и визуализации этих данных целесообразно представить их в сжатом виде с минимальной потерей информации. Проблема сжатия данных (создание новой информационной структуры с меньшей размерностью признакового пространства) заключается в нахождении в некотором смысле оптимального отображения, выполняющего преобразование координат в исходном векторном пространстве. Иными словами, проблема визуализации и интегрированного контроля состояния процесса заключается в сокращении размерности признакового пространства. Такое сокращение возможно, так как в большинстве случаев признаки (элементы вектора измерений) сильно взаимосвязаны (коррелированы) и, следовательно, данные мо-

нитинга обладают некоторой информационной избыточностью, определяемой корреляционной матрицей исходных переменных.

Сжатие информации сводится к ортогональному преобразованию исходного пространства матрицы измерений  $X$  в пространство обобщенных параметров  $Y$  меньшей размерности. В соответствии с технологиями многомерной статистики [1, 2] выбор вида преобразования  $Y = G(X)$  и числа обобщенных переменных, объясняющих наблюдаемые переменные, зависит от конкретной специфики решаемой задачи и должен опираться на критерий обеспечения сохранности достаточного объема информации об  $X$ , в сжатом образе  $Y$ . Для осуществления такого перехода к новым переменным можно использовать статистические свойства матрицы измерений  $X$  определяемые ее ковариационной (или корреляционной) матрицей.

В методе главных компонент пространство  $X$  преобразуется так, чтобы сохранялась большая часть суммарной дисперсии, объясняющей максимальную «вариативность» данных. В качестве обобщенного фазового пространства при этом используется пространство главных компонент, имеющее меньшую размерность. Обычно для представления используется две или три главные компоненты. В то же время пространство главных компонент практически сохраняет содержательную информацию о контролируемом многомерном процессе. При наличии достаточной степени связности, характерной для результатов мониторинга технологического процесса, ортогональное преобразование в пространство главных компонент, согласно критерию Кайзера и критерию каменной осыпи [3], позволяет сохранить до 85–95% технологической информации.

Обеспечение визуализации предполагает, что каждый многомерный вектор измерений может быть отображен не более чем тремя координатами точки в пространстве главных компонент. Оперирование сжатыми векторами измерений позволяет не только оценить качество управления процессом, но и наглядно контролировать состояние технологической установки (ТУ), включая переходные режимы. Очевидно, что для различных режимов работы ТУ и производимых видов продукции значения главных компонент векторов управления, состояния и продукции будут группироваться в кластеры, что и подтверждается на практике для многих технологических процессов.

Контроль многомерных технологических процессов с использованием представления векторов в главных компонентах актуален в связи с необходимостью оценивания качества управления процессом APC-системами<sup>1</sup> [4]. Применение APC-систем улучшает качество управления ТУ, которое оценивается в терминах технологической и экономической эффективно-

сти, при этом целевой функцией обычно является получение дополнительной прибыли за счет:

- разумного снижения запаса по качеству выпускаемой продукции;
- реализации ресурсосберегающих режимов;
- управления режимами с целью стабильного выпуска более дорогостоящей или более востребованной рынком продукции;
- выявления эффективных технологических режимов;
- возможности перехода к квазинепрерывному автоматическому управлению с динамической оптимизацией управления;
- минимальной потери качества продукта при переходе на другое сырье или на новую спецификацию продукта.

Внедрение APC-систем на крупнотоннажных производствах довольно быстро (обычно до одного года) окупается и увеличивает прибыль до 10%, а в некоторых случаях и больше в зависимости от типа и свойств технологического процесса или установки.

В состав APC-системы входят прямая и/или обратная динамические прогностические идентификационные модели управления ( $M_{dir}$  или  $M_{rev}$ ), которые связывают  $P_{crit}$  — целевой вектор продукта — и вектор оптимального управления  $U_{opt}$ :

$$P_{crit}(t_j + \tau) = M_{dir}[Z(t_j), V(t_j), U_{opt}(t_j), S(t_j)]; \quad (1)$$

$$U_{opt}(t_j) = M_{rev}[Z(t_j), V(t_j), P_{crit}(t_j - \tau), S(t_j)], \quad (2)$$

где  $t_j$  — момент реализации  $j$ -го цикла управления;  $\tau$  — время запаздывания анализов продукции относительно управляющих воздействий;

$Z$  — вектор неуправляемых параметров состояния процесса;

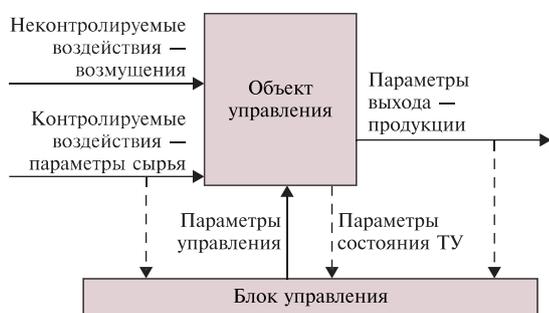
$V$  — вектор параметров сырья;

$S$  — вектор состояния процесса.

Прогностические идентификационные модели используются для определения вектора управления — значений уставок регуляторов нижнего уровня и значений других управляющих параметров ТУ для управления процессом в соответствии с установленным критерием оптимизации, обеспечивая устойчивую работу при действии различных возмущений или изменении режимов работы ТУ. Общим свойством APC-систем является способность их идентификационных моделей обучаться и переобучаться адекватному определению некоторых величин (свойства виртуального анализатора), которые иначе можно было бы определить только путем лабораторных анализов и непосредственных измерений в реальном времени, что не всегда является возможным или целесообразным. Разработка, обучение и переобучение идентификационных моделей осуществляется на основе оперативной статистической измерительной информации и обобщенных технологических знаний из базы знаний предприятия (цеха или установки).

<sup>1</sup> APC-система (Advanced Process Control) — система управления на основе технологий улучшенного или расширенного управления процессом.

С х е м а 1



Основные информационные потоки при управлении технологической установкой

Адекватную обратную модель  $M_{rev}$  процесса не всегда удастся построить, поэтому вектор управления для АРС-системы чаще всего находят по прямой модели с помощью поисковой процедуры.

Таким образом, при реализации контроля и управления многомерными технологическими процессами возникают задачи, требующие решения (табл. 1).

**Свойства представлений векторов в главных компонентах.** Основным условием представления векторов в главных компонентах является корреляционная связь элементов векторов. Для векторов управления, состояния технологической установки и продукции

многих технологических процессов это условие выполняется.

Информационные потоки управляемого ТП приведены на схеме 1.

Информационные потоки представляют собой многомерные данные, получаемые от системы мониторинга и управления ТП (на практике — от распределенных систем управления ТУ или заводского сервера технологических данных) с интервалом, равным длительности цикла управления<sup>2</sup>.

Можно отметить следующие свойства представленный вектора многомерных данных в главных компонентах управляемого технологического процесса:

- кластеризация значений ГК векторов для различных режимов работы ТУ (рис. 1–3);
- наличие целевого вектора продукции и/или состояния ТУ;
- наличие рассеяния значений ГК из-за действия шумовых составляющих и неконтролируемых возмущений процесса, при этом степень рассеяния может измеряться, например, средним евклидовым расстоянием от центра кластера до его границы;
- при неоптимальном управлении ТП имеется смещение центра кластера ГК векторов продукции относительно ГК целевого вектора продукции (это смещение может быть также оценено евклидовым расстоянием).

Процесс управления ТП с представлением векторов в ГК в некотором упрощенном, но наглядном виде, может быть представлен как процесс стрельбы по мишени. При этом цель (центр мишени) — это целевые свойства продукта, стрелок — это оператор или

Таблица 1

Оценивание качества управления процессами с представлением векторов в главных компонентах

Задачи оценивания	Содержание задач
Контроль параметров управления (вектора управления)	1. Определение параметров (элементов вектора) управления. 2. Контроль соответствия вектора управления текущему режиму и спецификации продукции
Контроль состояния ТУ	1. Определение параметров (элементов вектора) состояния ТУ 2. Контроль соответствия вектора состояния вектору управления, режиму, с учетом возмущений и неуправляемых параметров. 3. Оценивание стабильности процесса. 4. Оценивание качества переходных процессов
Измерение возмущений, действующих на ТУ (климатические и другие факторы)	1. Определение параметров возмущений. 2. Классификация возмущений по видам и интенсивности
Оценивание неуправляемых параметров ТП (например, свойства сырья)	1. Измерение неуправляемых параметров входов процесса. 2. Классификация свойств входов процесса
Контроль продукции	1. Определение параметров продукции (вектора продукции). 2. Определение соответствия качества продукции установленным требованиям. 3. Оценивание стабильности качества продукции. 4. Оценивание запаса по качеству
Оценивание качества управления процессом операторами или АРС-системой	1. Оценивание по стабильности технологического процесса и качества продукции. 2. Оценивание по степени соответствия качества продукции установленным требованиям. 3. Оценивание по запасу качества продукции. 4. Определение рейтинга операторов

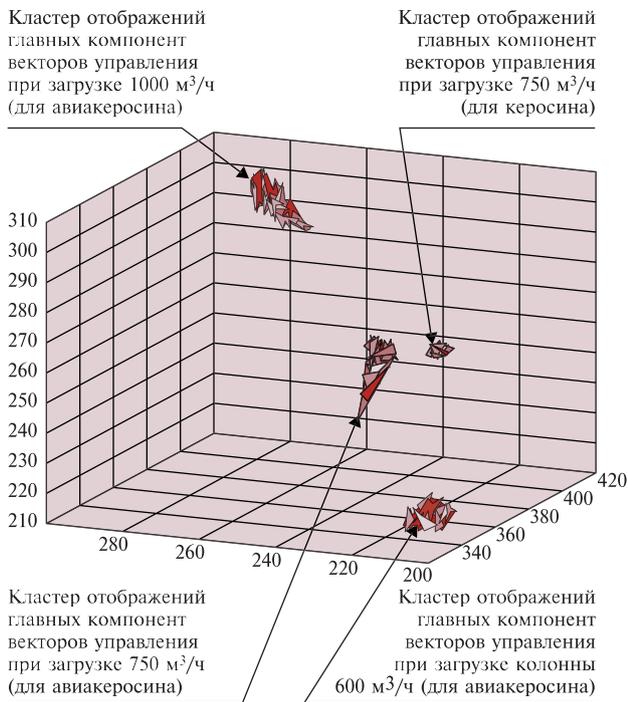


Рис. 1. Кластеризация ГК векторов управления установкой первичной переработки нефти для различных режимов загрузки и видов продукции

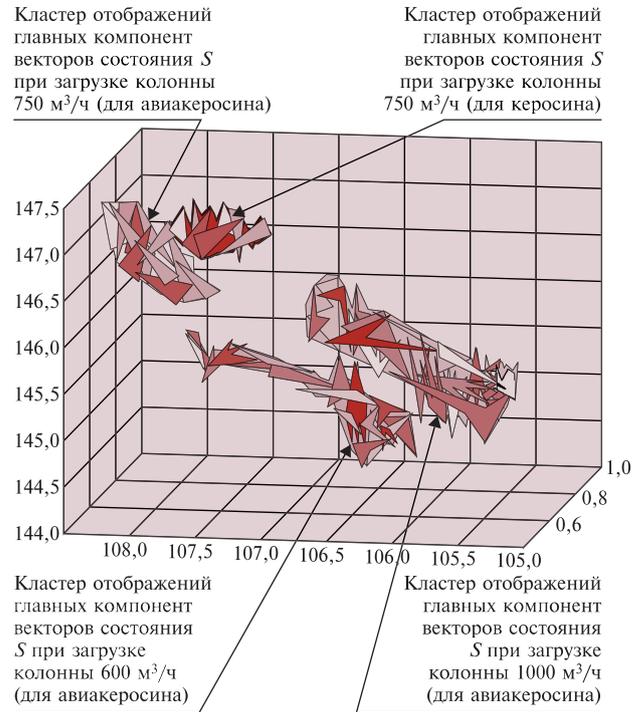


Рис. 2. Кластеризация ГК векторов состояния установки первичной переработки нефти для различных режимов загрузки и видов продукции

АРС-система, оружие и его состояние — ТУ. Кроме того, ветер, дождь, туман и прочие внешние факторы при стрельбе — это внешние неуправляемые и неконтролируемые воздействия на ТП, параметры траектории пули — вектор управления. Оценки качества стрельбы при этом будут соответствовать параметрам оценивания качества управления, а именно: степень рассеяния (или кучность стрельбы) соответствует рассеянию значений ГК вектора продукта, а величина среднего смещения координат попаданий в мишень относительно центра мишени соответствует среднему отклонению значений ГК продукта от ГК его целевого вектора.

При представлении векторов в ГК легко может быть определен оптимальный переход из одного кластера в другой, что соответствует переходу из одного режима работы ТУ в другой. Путь перехода может контролироваться при эксплуатации ТУ.

Отметим некоторые особенности вектора продукции:

- значения параметров продукции (элементов вектора продукции), как правило, коррелированы;
- разные параметры могут поступать на обработку не одновременно, при этом возникает необходимость их синхронизации;
- разная достоверность значений параметров продукта (из-за того, что некоторые параметры измеряются одной группой измерителей, а другие —

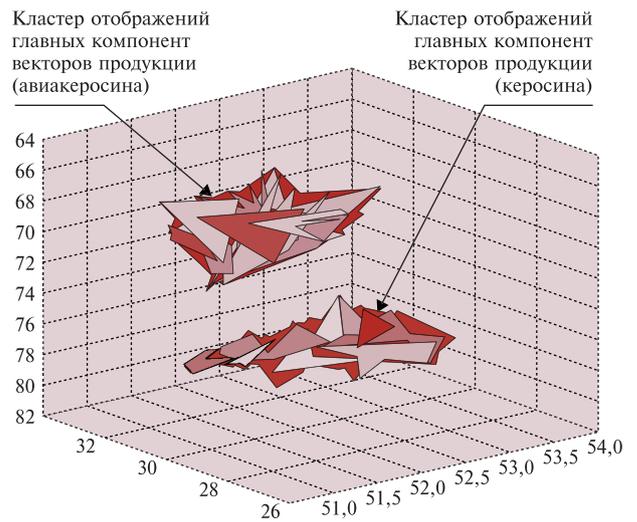


Рис. 3. Кластеризация ГК векторов продукции установки первичной переработки нефти

могут измеряться другой группой измерителей с другим быстродействием или точностью, кроме того, данные измерений некоторых параметров продукции могут поступать из лаборатории с большим запаздыванием);

- иногда требуется восстановление отдельных значений параметров или оценка параметров, прямое измерение которых по ряду причин невозможно (в этом случае могут использоваться виртуальные анализаторы на основе методов множественной регрессии или канонической корреляции [5]).

Правильность выбора текущего вектора управления может проверяться оценкой соответствия его ГК кластеру ГК векторов управления, контроль (диагностика) установки — оценкой величины и направления отклонения ГК текущего вектора состояния ТУ относительно кластера ГК векторов состояния ТУ. Текущее качество управления определяется положением ГК текущего вектора продукции относительно кластера ГК векторов продукции. Качество переходного процесса ТУ при изменении ее режима работы может быть оценено по траектории перехода из одного кластера в другой.

Таким образом, представление векторов в ГК может быть эффективно использовано при разработке алгоритмов управления и контроля ТУ, включая управление и контроль ТУ в переходных режимах.

**Показатели качества управления многомерным технологическим процессом по параметрам продукции.**

Качество управления часто используется как частный показатель эффективности управления ТП и зависит как от статических, так и динамических характеристик системы управления. Как правило, управление реализуется в соответствии с установленным критерием оптимальности, целевая функция при этом представляет собой линейную или нелинейную функцию от вектора параметров выходной продукции  $P$ .

Примеры целевых функций: себестоимость продукции, глубина отбора или выход продукции, запас по качеству продукции, энергетические затраты на единицу продукции, расход используемого реагента на единицу продукции и др.

Если найден оптимальный вектор управления  $U_{opt}$ , то целевой вектор продукта  $P_{crit}$ , соответствующий  $U_{opt}$  и доставляющий экстремум целевой функции  $F(P)$ , можно определить по модели (1). Поэтому для оценивания качества управления по производимой продукции целесообразно использовать следующую группу показателей:

- 1) значение целевой функции  $F(P)$ ;
- 2) отношение числа неудовлетворительных анализов продукции к общему числу анализов;
- 3) среднее смещение ГК векторов продукции относительно главных компонент целевого вектора продукции;

4) среднее рассеяние ГК векторов продукции (стабильность процесса).

Стабильность качества продукции по времени при воздействии возмущений показана на рис. 4 и 5, при этом может быть получено количественное интегральное значение стабильности.

Рассмотрим перечисленные показатели качества управления на примере сравнения качества управления технологическим процессом APC-системой и оператором ТУ.

1. *Значение целевой функции* характеризует степень достижения цели при реализации управления. При сравнении качества управления можно использовать отношение значений целевых функций

$$R = F(P_{APC}) / F(P_{опер})$$

или разность значений целевых функций

$$D = F(P_{APC}) - F(P_{опер}),$$

где  $P_{APC}$  — вектор продукции при управлении технологическим процессом APC-системой;

$P_{опер}$  — вектор продукции при управлении технологическим процессом оператором.

2. *Среднее относительное число удовлетворительных анализов продукции* характеризует качество управления с точки зрения пригодности качества получаемой продукции.

$$A_{опер} = N_{sat\_опер} / N_{total\_опер};$$

$$A_{APC} = N_{sat\_APC} / N_{total\_APC};$$

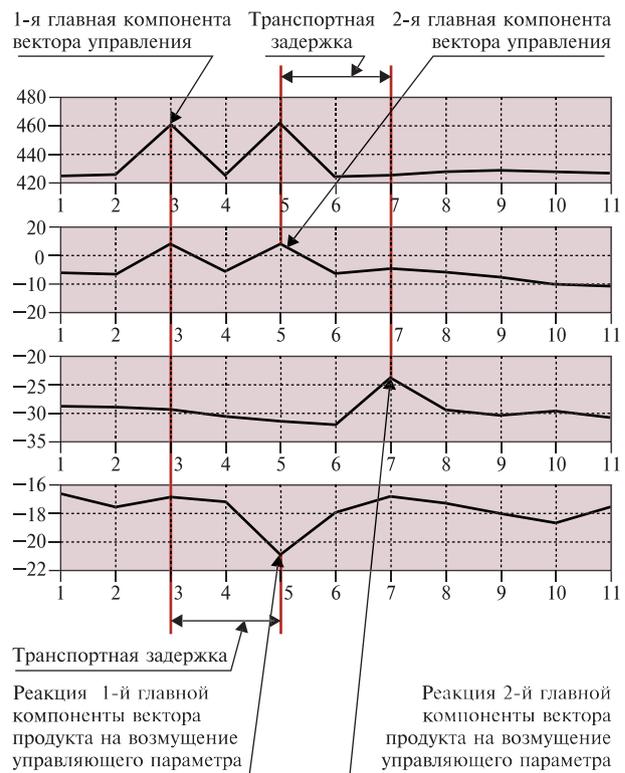


Рис. 4 Вариация стабильности качества продукции при воздействии возмущения по управляющему параметру

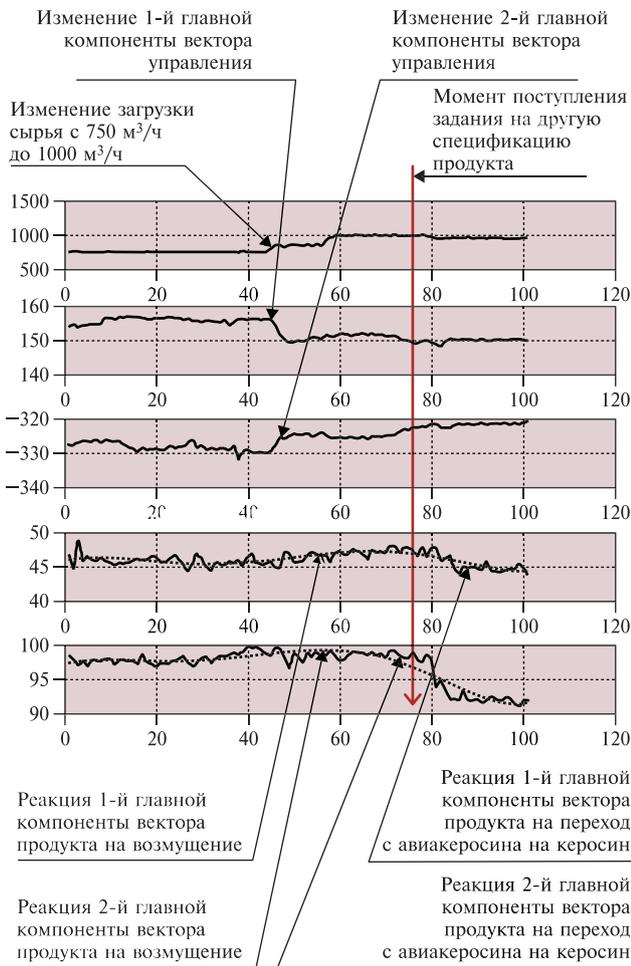


Рис. 5. Вариации стабильности качества продукции при действии возмущения по загрузке установки и переходе на другую спецификацию

где  $A_{опер}$ ,  $N_{sat\_опер}$  — соответственно относительное и абсолютное числа удовлетворительных анализов продукции при работе оператора;

$N_{total\_опер}$ ,  $N_{total\_APC}$  — общее число анализов продукции при работе оператора и APC-системы;

$A_{APC}$ ,  $N_{sat\_APC}$  — относительное и абсолютное числа удовлетворительных анализов продукции при работе APC-системы.

3. *Среднее смещение значений ГК векторов продукции относительно значений главных компонент целевого вектора.*

Для APC-системы  

$$Dr\_APC = R(\overline{MC3\_P_{crit}}, \overline{MC3\_P_{APC}}).$$

Для оператора  

$$Dr\_опер = R(\overline{MC3\_P_{crit}}, \overline{MC3\_P_{опер}}),$$

где  $\overline{MC3\_P_{crit}}$  — вектор, элементы которого — значения трех ГК целевого вектора продукта;

$\overline{MC3\_P_{APC}}$  — вектор, элементы которого — средние значения трех ГК векторов продукта при управлении процессом APC-системой;

$\overline{MC3\_P_{опер}}$  — вектор, элементы которого средние значения трех ГК векторов продукта при управлении процессом оператором;

$R$  — евклидово расстояние между векторами.

4. *Среднее рассеяние значений ГК векторов продукции* характеризует рассеяние векторов продукции.

Для APC-системы

$$D_{APC} = R[\overline{MC3\_P_{APC}(i)}, \overline{MC3\_P_{APC}}], i = 1, \dots, n_{APC},$$

для оператора

$$D_{опер} = R[\overline{MC3\_P_{опер}(i)}, \overline{MC3\_P_{опер}}], i = 1, \dots, n_{опер},$$

где  $n_{APC}$  — число измерений продукта при работе APC-системы;

$n_{опер}$  — число измерений продукта при работе оператора.

**Сравнение качества управления оператором и APC-системой.** Представление векторов управления в ГК дает возможность контролировать текущий вектор управления с точки зрения правильности его вычисления по прогнозной модели для APC-системы или его выбора оператором.

Контроль вектора управления состоит из трех этапов.

Этап 1 — предварительное определение кластеров векторов управления в ГК для всех режимов работы установки (например, режим загрузки, вид производимой продукции и др.), из имеющихся в базе данных (знаний), расчет размеров и центров этих кластеров.

Этап 2 — определение положения ГК текущего вектора управления относительно центра кластера, соответствующего текущему режиму работы.

Этап 3 — определение оптимального текущего вектора  $U_{opt}$  с допустимым смещением его ГК относительно центра соответствующего кластера, причем оператор установки находит текущий вектор управления на основании своего опыта или рекомендаций регламента ТУ, а с помощью APC-системы рассчитывается оптимальный вектор управления по прогнозной модели.

Общее представление о качестве управления процессом первичной переработки нефти (ректификации) для случая управления процессом оператором и APC-системой дает рис. 6, на котором показаны векторы продукции в трех координатах главных компонент (за 50 ч работы ТУ и интервале измерений 0,5 ч).

Другим примером оценки качества управления может служить ТП компаундирование (смешение) дизельного топлива в потоке. На вход установки компаундирования поступают базовые потоки сырья с установок гидроочистки, затем в линиях происходит смешение с дополнительными компонентами топлива (обычно используется пять-шесть компонентов).

Особенность процесса смешения в потоке состоит в жестком требовании полного использования базовых потоков. Задача управления состоит в оптимальном распределении компонентов смешения с задан-

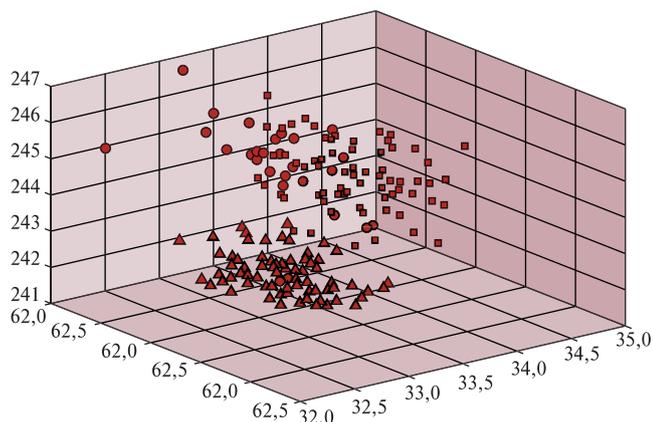


Рис. 6. Представление векторов продукции в ГК на выходе ректификационной колонны установки первичной переработки нефти: ▲ — при управлении APC-системой; ■ — при управлении оператором; ● — при управлении оператором

ными свойствами по линиям смешения и последующей оптимальной коррекцией расходов компонентов с учетом существенной нелинейности процесса компаундирования. Критерием оптимизации чаще всего выбирается минимум себестоимости дизельного топлива или минимальный запас качества по массовой доле серы в дизельном топливе. Таким образом, управляющие параметры — это расходы компонентов дизельного топлива.

Представление о качестве управления процессом компаундирования дизельного топлива в потоке оператором и APC-системой можно получить из рис. 7, на котором показаны векторы продукции (дизельного топлива) в трех координатах главных компонент (за 120 ч работы и интервале измерений 4 ч).

Результаты сравнения качества управления описанными выше многомерными технологическими

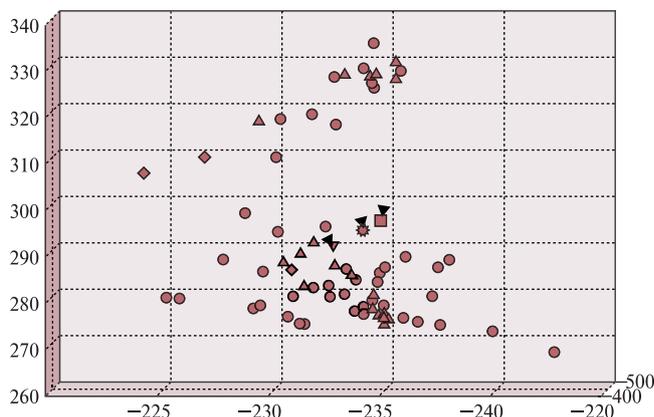


Рис. 7. Представление векторов продукции в ГК на выходе установки компаундирования дизельных топлив в потоке: ▲ — при управлении APC-системой; ● — при управлении оператором; ■ — с неудовлетворительными результатами анализа продукции при управлении оператором

процессами с учетом процедуры сжатия векторов управления, состояния ТУ и продукции приведены в табл. 2.

Из анализа таблицы следует, что качество управления процессами APC-системой существенно лучше как по значениям целевых функций (для ТП первичной переработки нефти глубина отбора светлых продуктов увеличивается на 2%, а для ТП компаундирования запас качества уменьшается на 22,4%), так и по «прицельности» и стабильности параметров качества продукции.

### Сравнение качества управления разными операторами (сменами)

Рассмотрим задачу интегрального оценивания качества работы оператора ректификационной колонны установки первичной переработки нефти.

Таблица 2

Сравнение качества управления многомерными технологическими процессами с представлением векторов в главных компонентах

Показатели	Первичная переработка нефти		Компаундирование дизельного топлива в потоке	
	Оператор	APC-система	Оператор	APC-система
	Глубина отбора светлых продуктов (суммарный отбор бензина, керосина и дизельного топлива)		Запас качества по массовой доле серы в дизельном топливе, %	
Среднее значение целевой функции	0,57	0,59	22,4231	0
Доля неудовлетворительных анализов, %	5	0	5,7143	0
Среднее смещение главных компонент векторов продукции относительно целевого вектора	5,82	0,23	2,686	0,5961
Среднее рассеяние главных компонент векторов продукции	0,96	0,48	4,4299	1,4032

Таблица 3

Пример оценивания качества работы оператора ректификационной колонны установки первичной переработки нефти

Номер смены	Глубина отбора продукции из сырья	Доля времени некорректного управления процессом, %	Коэффициент эффективности управления (энергозатраты на единицу продукции)	Доля удовлетворительных анализов по поточному анализатору	Доля удовлетворительных анализов по данным лаборатории, %	Запас качества продукции				
						Запас по температуре начала кипения керосина	Запас по температуре выкипания 10%-ного керосина	Запас по температуре выкипания 70%-ного керосина	Запас по температуре конца кипения керосина	Запас по температуре выкипания 90%-ного дизельного топлива
1	0,5426	0,3959	41,37	74,41	100,00	0	3,8222	17,8541	22,7227	9,5261
2	0,5502	0,2573	40,87	76,13	100,00	0,3179	7,4084	8,1706	9,8198	21,8786
3	0,5455	0,9435	41,07	73,81	98,30	1,0950	5,1801	2,2941	15,1395	16,7312
4	0,5398	1,4151	40,72	72,01	97,70	1,8740	9,3266	6,0095	8,1954	10,1800
5	0,5462	1,1949	41,86	76,66	98,50	0,4282	2,3030	5,7315	27,5992	9,8154
6	0,5454	1,5287	41,88	74,54	98,30	0,8956	9,4373	9,4279	28,7130	12,8144
7	0,5234	2,2193	39,95	66,41	100	0,7310	5,2053	5,0003	15,1742	8,4329
8	0,5221	2,1707	40,42	59,86	98	3,5779	9,0093	16,7711	24,2444	7,4418
9	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...

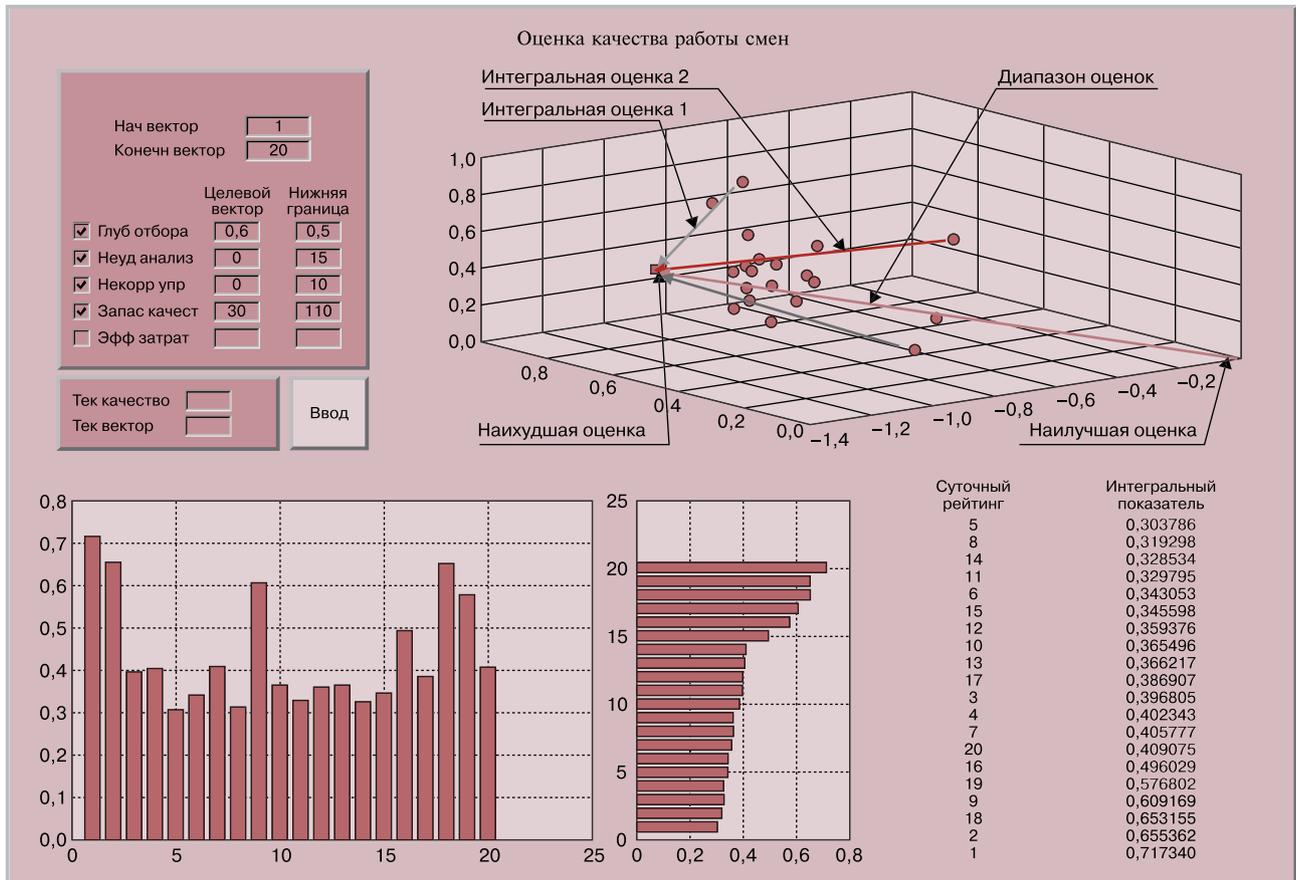


Рис. 8. Фрагмент интерфейса программы оценивания качества управления установкой первичной переработки нефти операторами (сменами)

В табл. 3 приведены параметры оценивания 20 операторов (смен) (для краткости в таблице показано 8).

Для интегрального оценивания качества работы операторов здесь использован метод главных компонент. Действительно, если считать, что результаты работы зависят только от квалификации оператора, свойств сырья и состояния установки, которые можно считать независимыми, то можно приближенно учитывать только три главные компоненты. Таким образом, сжатые данные о работе оператора представляются в виде точки в трехмерном пространстве (рис. 8). По евклидову расстоянию точки, соответствующей интегральной оценке оператора от максимально возможной оценки, можно объективно судить о качестве его работы (определить его рейтинг). Если считать, что качество сырья, загрузка и состояние установки во время анализа оставались неизменными, то рейтинг оператора определяется только его квалификацией.

Таким образом, представление векторов в главных компонентах в задачах контроля и управления многомерными технологическими процессами дает более полную информацию о свойствах объекта управления, позволяя проводить более объективное и корректное

сравнение качества управления процессом, различных алгоритмов управления ТУ, а также качества управления операторами ТУ и АРС-системами. Кроме того, появляется возможность построения эффективных алгоритмов контроля (диагностики) и управления ТП за счет реализации возможностей измерения рассеяния и смещения главных компонент текущих векторов управления, состояния установки и продукции, сокращается область поиска вектора оптимального управления, что улучшает оперативность управления, а также сравнительно легко реализуется контроль стабильности качества продукции. 

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Болч Б., Хуань К. Дж. Многомерные статистические методы для экономики: Пер. с англ. / Под ред. С. А. Айвазяна. — М.: Статистика, 1979. — 317 с.
2. Айвазян С.А., Бухштабер В.М., Енюков И.С., Мешалкин Л.Д. Прикладная статистика. Классификация и снижение размерности / Под ред. С.А. Айвазяна. — М.: Финансы и статистика, 1989. — 607 с.
3. <http://statsoft.ru/home/textbook/modules/stfacan.html>.
4. Гроссдиер П. Залог успеха проектов прогрессивных средств управления процессами // Нефтегазовые технологии. — 2005. — № 2. — С. 56–58.
5. Мусаев А.А. Виртуальные анализаторы: концепция построения и применения в задачах управления непрерывными технологическими процессами // Автоматизация в промышленности. — 2003. — № 8. — С. 28–33.