

КОЛЬЦЕВЫЕ СТРУКТУРЫ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ДЛЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ УПРАВЛЕНИЯ

А.А. Боровков*, Р.С. Корсес, А.И. Мозиллов

*Новосибирский государственный технический университет
Новосибирская государственная академия водного транспорта
E-mail: mozil@bk.ru

Обсуждается алгоритм для построения замкнутых систем автоматического регулирования, не использующих в качестве своей основы отрицательную обратную связь по движению этой системы или так называемое рассогласование (ошибку) между желаемым и заданным ее движениями. Получены соотношения для управляющего воздействия предлагаемого алгоритма. Проведен анализ работоспособности алгоритма в условиях действия аддитивного возмущения. Сделан анализ неподвижной точки алгоритма управления. Приведены результаты моделирования.

Ключевые слова:

Система автоматического регулирования, системы без отрицательной обратной связи по ошибке, моделирование, псевдоинверсия вектора, AR-алгоритм, неподвижная точка, пространство текущих управлений, билинейные формы, двухконтурные системы, обобщенный ряд Фурье, система ортогональных функций.

Актуальность создания альтернативных алгоритмов регулирования и управления обуславливается необходимостью обеспечения более широкого диапазона изменения параметров объекта управления. В некоторых случаях возникает необходимость создания регулятора для объекта с неизвестными параметрами, т. е. в определенном смысле универсального алгоритма, не нуждающегося в настройке. Данная задача является перспективной для разработки и анализа характеристик алгоритма построения замкнутых систем автоматического управления и регулирования, не использующих отрицательную обратную связь по движению.

Предлагаемый алгоритм автоматического регулирования, который условно назовем AR-алгоритмом, опишем, сравнивая его с традиционным алгоритмом (принципом) отрицательной обратной связи. В качестве основы изложения используем конечно-разностную аппроксимацию математической модели объекта управления (ОУ), которую представим в виде свертки на скользящем интервале времени $T_i = t - T \dots t$, т. е., имеем соотношение

$$x(t) = \int_{t-T}^t w(t-\tau) u(\tau) d\tau, \quad (1)$$

где $w(t)$ – весовая функция линейного стационарного динамического ОУ, $u(t)$ – его управление.

Переходя к дискретному времени $\dots, t_{i-1}, t_i, \dots$ и выделяя на интервале T n отрезков длительностью $\Delta t = t_i - t_{i-1}$, получим выражение для текущего движения $x_i = x(t_i)$ ОУ в виде скалярного произведения $(n+1)$ -мерных векторов

$$x_i = \mathbf{w}^T \mathbf{u}_i, \quad (2)$$

где $\mathbf{w}^T = [w_n, \dots, w_1, w_0]$, $\mathbf{u}_i^T = [u_{i-n}, \dots, u_{i-1}, u_i]$. В формуле (2) компоненты векторов \mathbf{w} , \mathbf{u}_i , соответствуют значениям непрерывных функций $w(t)$, $u(t)$ в точках дискретизации интервала T , причем, наряду с текущим движением x_i ОУ, здесь введен \mathbf{u}_i – вектор текущего управления, обозначаемый по его компоненте $u_i = u(t_i)$, соответствующей текущему времени t_i .

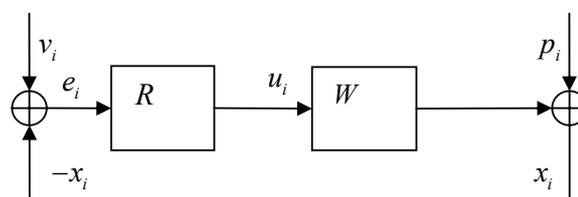


Рис. 1. Классическая структура САР

Приведем классическую структуру системы автоматического регулирования (САР) с отрицательной обратной связью для одномерного ОУ типа (1), используя введенные обозначения. Имеем структуру рис. 1 с сигналами, соответствующими времени t_i . На рис. 1 R , W представляют операторы регулятора и ОУ, причем оператор W соответствует ур. (1) и дополнен аддитивным возмущением p_i и заданием v_i так, что текущее движение x_i определено уравнением

$$x_i = \mathbf{w}^T \mathbf{u}_i + p_i. \quad (3)$$

Дискреты v_i , x_i , $e_i = v_i - x_i$, u_i обозначают соответственно дискретные текущие значения входа $v(t)$, выхода $x(t)$, ошибки $e(t) = v(t) - x(t)$ и управления $u(t)$ системы рис. 1.

Известно, что всякая САР предназначена для решения задачи автоматического регулирования, заключающейся в определении такого управления u_i объектом, которое с заданной точностью приближает реальное движение x_i к желаемому v_i . Такое приближение сводится к подавлению ошибки $e_i = v_i - x_i$, возникающей под действием возмущения p_i , изменения входа v_i и наличия инерционности (динамики) ОУ.

Решение задачи автоматического регулирования достигается соответствующим построением регулятора R в САР, который содержит так называемый большой коэффициент усиления, т. е. множитель k_{yc} (много больше единицы) для подавления ошибки от действия возмущения p_i и входа v_i и динамическое преобразование R_d для компенсации динамики ОУ. Таким образом, как правило, для оператора R имеем выражение

$$R = k_{yc} R_d. \quad (4)$$

Отметим, что для определения регулятора R , как правило, используют его уравнение $u_i = R(v_i - x_i)$, которое совместно с уравнением ОУ (3) приводит к уравнениям движения САР

$$x_i + wRx_i = wRv_i + p_i$$

и ее ошибки

$$e_i + wRe_i = v_i - p_i,$$

на основании которых находят параметры регулятора R , обеспечивающие требуемую точность в установившемся режиме и динамическое качество САР типа рис. 1.

Таким образом, как правило, для определения регулятора R в классических САР, основанных на алгоритме отрицательной обратной связи, управление u_i таких систем не используется в качестве самостоятельного фактора.

Обратимся теперь к описанию предлагаемого AR-алгоритма, основанного на следующем тезисе.

Классический алгоритм отрицательной обратной связи построен на алгебраической операции суммирования $v = e + x$. Следовательно, автоматическое регулирование в соответствующей САР (например, рис. 1) достигается с помощью отрицательного движения ($-x$). То есть регулирующим в таких системах является сигнал, противоположный суммированию, которое определяет данный алгоритм.

Аналогично: AR-алгоритм, построенный на алгебраической операции умножения должен иметь в качестве регулирующего сигнал x^+ , квазиобратный (обратный) умножению – операции, положенной в его основу.

Таким образом, исходным для AR-алгоритма является равенство

$$(x_i, x_i^+) = 1, \quad (5)$$

где x_i, x_i^+ – векторы, порождающие скалярное произведение, являются, соответственно, векторами движения и псевдоинверсии (регулирующего) движения в AR-алгоритме и определены на интервале T_i , причем $x_i^+ = x(x_i, x_i)^{-1}$.

Использование текущих векторов движения в основном соотношении требует приведения уравнения ОУ к виду, содержащему вектор текущего движения x_i , т. е. к рассмотрению его на интервале T_i , тогда имеем уравнение ОУ в виде

$$x_i^T = w^T U_i, \quad (6)$$

где матрица управления $U_i = U_i^T$ есть $U_i = [u_{i-n}, \dots, u_{i-1}, u_i]$ и определена векторами управлений u_{i-j} , где j – индекс смещения по времени от настоящего момента $j = [-n; 0]$ для моментов времени t_{i-j} подинтервала T_i .

С учетом (6) основное уравнение (5) принимает вид

$$w^T U_i x_i^+ = 1, \quad (7)$$

что задает неподвижную точку САР, построенную по AR-алгоритму. Отметим, что соотношение (7)

имеет место для всех линейных стационарных динамических объектов управления, любых их управлений u_{i-j} и их соответствующих движений x_i . Из формулы (5), в частности, следует представление вектора w_i^+ , компенсирующего динамику ОУ в виде итерационной процедуры

$$U_i x_i^+ = w_i^+, \quad (8)$$

согласно которой последовательность векторов

$$U_i x_i^+ \xrightarrow{i \rightarrow \infty} w_i^+,$$

так что

$$w^T w^+ = 1.$$

На основании последовательности (8) определен вектор управления AR-алгоритма, вычисленный на интервале T_i в виде

$$u_{i+1} = U_i x_i^+. \quad (9)$$

То есть, вектор AR-алгоритма задается в виде последовательности векторов, которая в пределе компенсирует динамику ОУ.

Теперь легко определить AR-алгоритм для текущего управления $u_{i+1} = u(t_{i+1})$ одномерного ОУ, т. е. объекта со скалярным управлением. Из выражения (9) для любого t_{i+1} имеем

$$u_{i+1} = u_i^T x_i^+, \quad (10)$$

что является некоторым аналогом алгоритма

$$u_{i+1} = k_{yc} (v_i - x_i),$$

где k_{yc} – коэффициент регулятора (4) классического принципа отрицательной обратной связи.

Покажем на примере тривиального ОУ с передаточной функцией $W(s) = k_o > 0$, что регулятор, действующий по алгоритму (10), действительно, подавляет возмущение p_i , действующее на выходе этого объекта, воспроизводит заданный входной сигнал v_i и осуществляет компенсацию динамики ОУ, реализуя последовательность (8), которая в пределе приводит к равенству

$$k_o k_o^{-1} = 1.$$

В соответствии с изложенным, имеем структуру САР с AR-алгоритмом для тривиального ОУ в виде рис. 2, где полезный сигнал v_i и возмущение p_i введены мультипликативно и аддитивно, соответственно.

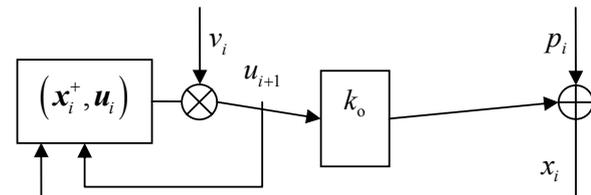


Рис. 2. Структура САР с AR-регулятором

Использование тривиального ОУ для анализа свойств элементарного AR-алгоритма (10) объясняется, во-первых, особой простотой и очевидностью этого анализа для таких простейших регулятора и объекта, и, во-вторых, необходимостью

обеспечить равные условия при сравнении предлагаемого и классического алгоритмов, поскольку компенсация динамики в традиционных САР достигается оператором регулятора (4).

Анализ алгоритма начнем, положив в структуре рис. 2 $v_i=1$, $p_i=0$, $k_o=1$, тогда из определений функции косинуса угла между векторами u , $x \in E^n$ n -мерного евклидова пространства

$$\cos(\mathbf{u} \angle \mathbf{x}) = \frac{(\mathbf{u}, \mathbf{x})}{\|\mathbf{u}\| \|\mathbf{x}\|},$$

где (\mathbf{u}, \mathbf{x}) – скалярное произведение этих векторов, $\|\mathbf{u}\|$, $\|\mathbf{x}\|$ – их евклидовы нормы, для AR-алгоритма получаем

$$(\mathbf{u}_i, \mathbf{x}_i^+) = \cos(\mathbf{u}_i \angle \mathbf{x}_i^+) \cdot \frac{\|\mathbf{u}_i\|}{\|\mathbf{x}_i^+\|} > 0. \quad (11)$$

Таким образом, AR-алгоритм (10), для введенных условий порождает положительное произведение двух функций векторов u_i , x_i , а именно, $\cos(\mathbf{u}_i \angle \mathbf{x}_i^+)$ и $\|\mathbf{u}_i\| \cdot \|\mathbf{x}_i^+\|^{-1}$. Поэтому, текущее управление $u_{i+1} = (u_i, x_i^+)$ принадлежит поверхности, заданной над плоскостью, на которой определены две оси: углов $(\mathbf{u}_i \angle \mathbf{x}_i^+)$ между векторами u_i , x_i^+ и отношения норм $\|\mathbf{u}_i\| \cdot \|\mathbf{x}_i^+\|^{-1}$ векторов u_i , x_i .

Характерной особенностью данной поверхности, т.е. пространства текущих управлений AR-алгоритма, является наличие на ней единственной стационарной точки

$$\cos(\mathbf{u}_i \angle \mathbf{x}_i^+) \Big|_{u_i=x_i} \cdot \|\mathbf{u}_i\| \cdot \|\mathbf{x}_i^+\|^{-1} \Big|_{\|\mathbf{u}_i\|=\|\mathbf{x}_i^+\|} = 1, \quad (12)$$

соответствующей совпадению векторов u_i , x_i по углам и модулю. Действительно, положительная обратная связь, формирующая алгоритм (10) всегда приводит к возрастанию управления u_{i+1} и тем самым к уменьшению угла между векторами u_i , x_i . Такое сближение этих векторов по углу имеем место при любом расположении u_i , x_i ограниченном двумя условиями ортогональности

$$\mathbf{u}_i \perp (-\mathbf{x}_i) \leq \cos(\mathbf{u}_i \angle \mathbf{x}_i^+) \leq \mathbf{u}_i \perp \mathbf{x}_i.$$

При этом одновременно действует фактор сближения длин векторов u_i , x_i , определенный сомножителем $\|\mathbf{u}_i\| \cdot \|\mathbf{x}_i^+\|^{-1}$ AR-алгоритма, действующим разнонаправлено при согласованном изменении норм векторов u_i , x_i , что и устанавливает равенство

$$\|\mathbf{u}_i\| = \|\mathbf{x}_i^+\|$$

для любых векторов замкнутой системы вида рис. 2.

Таким образом, содержание AR-алгоритма для тривиального ОУ приводит к движению векторов управления u_i и движения x_i системы рис. 2 из любых начальных положений в устойчивую неподвижную точку (12), где эти векторы совпадают по углу и длине.

Сделаем небольшие обобщения сказанного, положив коэффициент передачи k_o тривиального ОУ отличным от единицы, то есть, принимаем $W(s)k_o > 0$ ($k_o \neq 1$). Тогда для структуры рис. 2 последовательно имеем

$$x_i = k_o u_i, \mathbf{x}_i^T = k_o \mathbf{u}_i, \mathbf{x}_i^+ = (k_o \mathbf{u}_i)(k_o \mathbf{u}_i, k_o \mathbf{u}_i)^{-1},$$

$$u_{i+1} = (\mathbf{u}_i, \mathbf{x}_i^+) = \cos(\mathbf{u}_i \angle (k_o \mathbf{u}_i) \|k_o \mathbf{u}_i\|^{-2}) \cdot \frac{\|\mathbf{u}_i\|}{\|k_o \mathbf{u}_i\|} = \mathbf{u}_i^T \mathbf{u}_i^+ k_o^{-1}, \quad (13)$$

откуда следует, что теперь происходит сближение по углу векторов u_i , $x_i = k_o u_i$ и длин этих векторов.

Таким образом, текущее управление $u_{i+1} = k_o^{-1}$ последовательно инвертирует объект, приближаясь к неподвижной точке для выхода

$$x_i = k_o k_o^{-1} \rightarrow 1, \quad i \rightarrow \infty,$$

при этом сама неподвижная точка вместе с поверхностью текущих управлений смещается по вертикали в положение, соответствующее обратно пропорциональному значению коэффициента k_o .

Проведем следующее обобщение, введя переменное возмущение p_i на выходе ОУ. Тогда формула текущего управления AR-алгоритма принимает вид

$$u_{i+1} = \cos(\mathbf{u}_i \angle \mathbf{x}_{pi}) \cdot \frac{\|\mathbf{u}_i\|}{\|\mathbf{x}_{pi}\|}, \quad (14)$$

где $x_{pi} = x_i + p_i$, p_i – вектор возмущения на интервале T , причем x_i – движение невозмущенного объекта, $x_i = k_o u_i$.

Несложно видеть, что теперь неподвижная точка текущих управлений смещается в положение

$$(\mathbf{u}_i \angle \mathbf{x}_{pi}) = 0, \|\mathbf{u}_i\| \|\mathbf{x}_{pi}\|^{-1} = 1, \quad (15)$$

т.е. AR-алгоритм подстраивается под новый выход x_{pi} , изменение которого, как видим, может быть вызвано как изменением управления u_i , так и действием возмущения p_i .

Сделаем еще одно усложнение, положив переменным действующим на AR-регулятор сигнал v_i , подлежащий воспроизведению. Тогда текущее управление примет вид

$$u_{i+1} = v_i (\mathbf{u}_i, \mathbf{x}_{pi}^+) = \cos(\mathbf{u}_i \angle \mathbf{x}_{pi}^+) \|\mathbf{u}_i\| \|\mathbf{x}_{pi}^+\|^{-1}.$$

Теперь аналитическая основа AR-алгоритма заданная выражением (11) подвергается изменению за счет вектора управления u_{vi} и сближение векторов x_{pi} , u_{vi} по углу и норме осуществляется для новой неподвижной точки

$$(\mathbf{u}_{vi} \angle \mathbf{x}_{pi}) = 0, \|\mathbf{u}_{vi}\| = \|\mathbf{x}_{pi}\|. \quad (16)$$

Очевидно также, что точка (16) как и предыдущая точка (15) перемещается в соответствии с параметрами возмущения p_i и входа v_i . Данное обстоятельство ставит вопрос о границах применимости AR-алгоритма, связанных с возмущениями его основы (11) и мероприятиях по расширению этих границ.

Сделаем несколько замечаний.

1. AR-алгоритм тесно связан с некоторыми фундаментальными математическими построениями, такими как метод наименьших квадратов, разложение в обобщенный ряд Фурье по системе ортогональных функций и так далее. Действительно, решая с помощью метода наимень-

ших квадратов вырожденную систему алгебраических уравнений вида

$$\mathbf{u}^T \mathbf{k} = \mathbf{x}^T, \quad (17)$$

где $\mathbf{u}, \mathbf{x} \in E^n$, получаем такое решение в виде

$$\mathbf{k} = \mathbf{x}^T \mathbf{u}^+. \quad (18)$$

Поскольку решение задачи автоматического регулирования требует компенсации динамики ОУ, то вместо системы (17) принята «инверсная» система

$$\mathbf{x}_i^T \bar{\mathbf{k}} = \mathbf{u}_i^T,$$

образованная последовательностями n -мерных векторов $\mathbf{u}, \mathbf{x} \in E^n$, решение которой по методу наименьших квадратов

$$\bar{\mathbf{k}} = \mathbf{u}_i^T \mathbf{x}_i^+$$

совпадает с правой частью алгоритма (10), который, как отмечалось, порождает неподвижную точку (12), компенсирует «тривиальный» ОУ системы (17) и приводит к необходимым обобщениям (13), (14).

2. AR-алгоритм порождает структуры САР, содержащие два контура: текущих управлений и движений. Такое привлечение управления к построению САР часто оказывается необходимым. Подобные структуры автоматических систем для динамических ОУ, не содержащие отрицательной обратной связи и построенные на операциях умножения типа (10), (18), отмечались в [2], где условно были названы кольцевыми структурами. Примером такой кольцевой структуры является также система рис. 2.
3. Наиболее значимым применением подобных кольцевых структур являются объекты энергетики, в том числе и электроэнергетики, где процессы движения и управления часто протекают с небольшим темпом в присутствии возмущений и тому подобного. Поэтому управление такими процессами требует их рассмотрения на интервалах, т. е. в форме сверток типа (1), что

приводит к алгоритмам подобным (10), хотя, по-видимому, возможна и более широкая область применения таких алгоритмов.

4. Отмеченная выше зависимость качества AR-алгоритма от его фильтрующих свойств и параметров возмущения p_i и входа v_i , т. е. в рамках итерационных процедур типа (10), частично иллюстрируется результатами моделирования, приведенными на рис. 3.
5. Обобщение AR-алгоритма от тривиального на динамические ОУ может быть проведено на основании конечно-разностной аппроксимации (2) математической модели линейного стационарного динамического ОУ. Тогда, положив в качестве регулятора к такому ОУ AR-регулятор, заданный алгоритмом (10), получаем уравнение движения соответствующей кольцевой структуры в виде

$$\mathbf{x}_i = \mathbf{w}^T \mathbf{u}_i \mathbf{u}_i^T \mathbf{x}_i^+$$

$$\mathbf{x}_i = \mathbf{w}^T \mathbf{U}_i \mathbf{x}_i^+,$$

или

где матрица управления $\mathbf{U}_i = \mathbf{u}_i \mathbf{u}_i^T$ представляет собой внешнее произведение вектора \mathbf{u}_i на самого себя.

Аналогичным уравнением описывается и контур управления данной структуры, т. е. имеем

$$\mathbf{u}_{i+1} = \mathbf{w}^T \mathbf{U}_i \mathbf{x}_i^+.$$

Таким образом, текущие управления и движения описываются билинейными формами, максимизирующими свои значения, при этом многократная вырожденность матриц \mathbf{U}_i этих форм делает такую процедуру максимизации неустойчивой. Естественно, возникает задача обеспечения устойчивости таких структур, и, поскольку протекающие в них процессы определены на интервалах конечной длительности, такая коррекция имеет свою специфику. Рассмотрение этого вопроса приводит к обеспечению устойчивости так называемых некорректно поставленных задач.

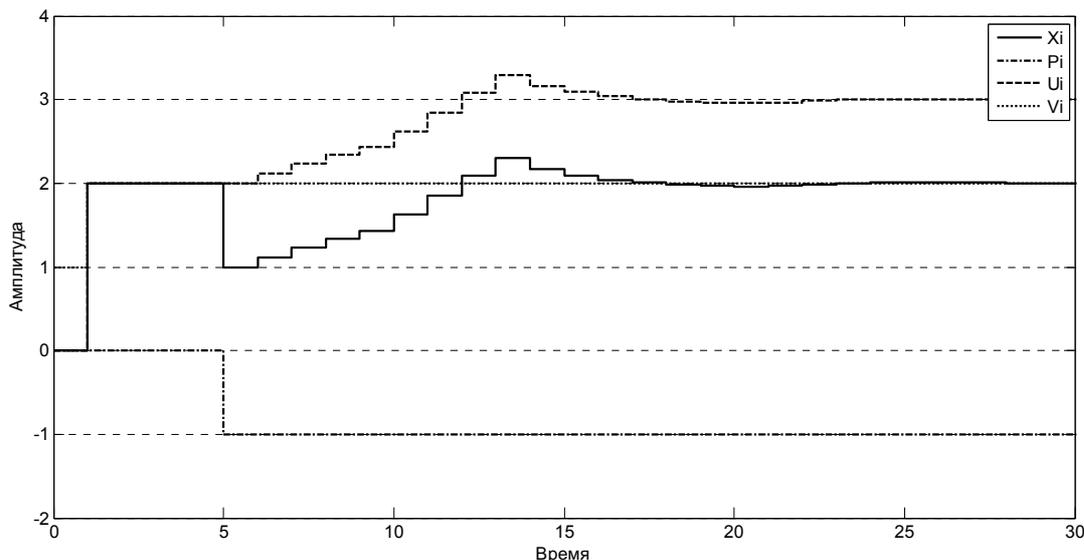


Рис. 3. Результаты моделирования

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Теория автоматического регулирования / Под ред. В.В. Соловникова. – М.: Машиностроение, 1967. – Т. 1. – 46 с.
2. Borovkov A.A., Pivnev S.V., Tsivinsky M.Yu. About the Ring Structure of the Control System // The Third Russian-Korean Internatio-

nal Symposium on Science and Technology, KORUS'99: Abstracts. – June 22-25, 1999 at Novosibirsk State Technical University. – Novosibirsk, 1999. – V. 1. – P. 219.

Поступила 12.03.2008 г.

УДК 658.012.011.56:681.324

ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ СИСТЕМ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ДЛЯ ОПЕРАТИВНОГО ДИСПЕТЧЕРСКОГО УПРАВЛЕНИЯ В MES ГАЗОДОБЫВАЮЩИХ КОМПАНИЙ

С.А. Богдан, А.В. Кудинов

Институт «Кибернетический центр» ТПУ
E-mail: bogdan@tpu.ru

Проведена классификация функций диспетчерских служб газодобывающих предприятий, с использованием которой выполнен анализ подходов к формированию систем принятия решений для оперативного диспетчерского управления в газодобывающих компаниях.

Ключевые слова:

MES, диспетчерское управление, автоматизация газодобычи, системы принятия решений.

Введение

Одним из актуальных вопросов в управлении предприятием газовой отрасли является сокращение производственных издержек. Известны различные подходы к решению данного вопроса [1]. Основным из них является внедрение современных информационных технологий: цифрового измерительного оборудования, автоматизированных систем управления технологическими процессами, новых технологий передачи данных, систем связи и т. д.

Использование современных технологий приводит к сокращению издержек предприятия за счет снижения числа специалистов, занятых в технологическом процессе, уменьшения риска аварийных ситуаций связанных с человеческим фактором, повышения оперативности при действиях в аварийной ситуации, снижения потерь при добыче, производстве и транспортировке углеводородов. При этом повышается безаварийность, технологичность и экологичность производства. Однако в полной мере воздействие на эти факторы можно оказать только при создании единого информационного пространства для большинства основных служб предприятия.

Задачи диспетчерской службы газодобывающего предприятия

В настоящее время на предприятиях отрасли единым центром сбора оперативной технологической информации и центром оперативного принятия решений является диспетчерская служба. Диспетчерские решения затрагивают множество служб предприятий: технологическую, геологическую, механическую, энергетическую и т. д.

Управление в газодобывающих компаниях имеет иерархическую структуру: производственно-диспетчерские службы (ПДС) месторождений подчиняются центральному производственно-диспетчерским службам (ЦПДС) соответствующих предприятий. ЦПДС предприятий Единой системы газоснабжения, как газодобывающих так и газотранспортных, подчиняются центральному производственно-диспетчерскому департаменту (ЦПДД) ОАО «Газпром».

Основной задачей диспетчерских служб газодобывающего предприятия является обеспечение непрерывного круглосуточного оперативного контроля над работой и взаимодействием основного и вспомогательного производства, а также обеспечением планов предприятия [2]. Это достигается за счет иерархического разделения функций диспетчерских служб согласно уровням их компетенции: на уровне ЦПДД принимаются решения масштаба Единой системы газоснабжения, на уровне ЦПДС принимаются решения связанные с различными задачами в масштабах предприятия, на уровне ПДС решения ЦПДС должны быть реализованы в масштабах промысла. При этом на уровне ЦПДС газотранспортных предприятий решаются задачи своевременного обеспечения потребителей углеводородами в заданных объемах.

От качества диспетчерских решений на любом уровне напрямую зависит стабильность большинства производственных процессов. Ошибочное или недостаточно обоснованное диспетчерское решение, даже в условиях высокоавтоматизированного контроля, может привести к нештатной ситуации. Это определяет исключительную важность лично-