

# Проектирование функционала сложной системы управления состоянием комплексного объекта

К. В. Мартиросян, А. Б. Чернышев

Северо-Кавказский федеральный университет, г. Пятигорск  
kvmartirosian@ncfu.ru

**Аннотация.** Проектирование функционала сложной системы управления состоянием комплексного объекта предполагает определение набора функций и параметрического обеспечения программного комплекса. Необходимо дать наименование и однозначно трактуемое описание задействованным в системе сущностям, функциям, триггерам, определить взаимодействие компонентов системы. Предлагаемый подход к проектированию позволит разработать формализованное описание объекта управления и определить функционал сложной системы управления.

**Ключевые слова:** сложная система управления, моделирование систем, комплексный объект управления, функционал сложной системы управления

## I. ВВЕДЕНИЕ

Проектирование функционала системы управления является необходимым этапом автоматизации управления состоянием комплексного объекта. Для автоматизации системы управления необходимо решить ряд задач: выделить параметры, оказывающие влияние на состояние объекта; определить диапазон и характер изменения параметров; дать формализованную характеристику управляющего воздействия на объект.

Первым этапом проектирования функционала системы управления является определение параметров объекта, их однозначное наименование и описание.

Объект управления является природной системой, в этой системе постоянно происходят процессы, которые определяют динамический характер изменения его характеристик. Это изменение может быть мгновенным и значительным, но обычно это достаточно медленный процесс. Таким образом, параметры объекта, которые условно принимаются постоянными в расчетах, таковыми не являются. Для получения формализованного представления об объекте разумным является установление приемлемых диапазонов изменения состояния объекта, когда такое состояние можно считать устойчивым.

## II. МЕТОДЫ И ИНСТРУМЕНТЫ

Проектирование функционала системы управления требует определения параметрического обеспечения процесса. Представим параметры объекта, которые являются наиболее значимыми в описании его состояния. Гидроминеральные ресурсы представляют собой сложный природный объект с большим количеством физических и гидрогеологических параметров, характеризующих их состояние. Такими параметрами является дебит скважины, глубина залегания водоносного пласта, коэффициент проницаемости границ водоносного пласта, размеры водоносной линзы, геометрия геологического разреза.

Указанный выше набор данных позволяет использовать вычислительную схему с системой дифференциальных уравнений второго порядка. Дифференциальные уравнения аналогичны уравнению теплопроводности, где вместо коэффициента теплопередачи используется синтетический коэффициент пьезопроводности, представляющий собой комбинацию двух гидрогеологических параметров: коэффициента фильтрации и коэффициента упругоэластичности. Температуру в уравнении теплопроводности заменяет функция напора воды в скважине.

Управляющим воздействием считаем отбор гидроминеральных ресурсов из скважины. Необходимо определить условия, при которых в результате такого воздействия состояние объекта остается устойчивым, а отбор гидроминеральных ресурсов не приводит к значимому изменению его характеристик.

Таким образом, формализованное описание объекта может быть представлено функциями и параметрами, описание которых приведено в табл. 1.

ТАБЛИЦА I. ФУНКЦИИ И ПАРАМЕТРЫ ОБЪЕКТА

Наименование	Характеристики		
	Описание	Обозначение	Ед. изм.
Дебит	объем воды в единицу времени		м <sup>3</sup> /час
Напор	гидростатическое давление в скважине	H	м
Коэффициент фильтрации	характеристика проницаемости пласта	k	м/сутки
Коэффициент упругоэластичности	количество воды, которое может вместить пласт	$\eta^*$	л/м
Коэффициент пьезопроводности	показатель скорости изменения напора, отношение коэффициента фильтрации к коэффициенту упругоэластичности	a	м <sup>2</sup> /сутк и
Глубина	глубина залегания водоносного пласта	g	м
Размеры линзы	условный размер водоносной линзы	Lx, Ly, Lz	км

В общем виде система исходных дифференциальных уравнений (1), описывающих пространственный процесс геофильтрации и массопереноса, может быть представлена в следующем виде:

$$\begin{cases} \eta^* \frac{\partial H}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( k_x \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k_y \frac{\partial H}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k_z \frac{\partial H}{\partial z} \right) \\ n \frac{\partial C}{\partial t} = D_x \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - \frac{\partial(v_x C)}{\partial x} + D_y \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} - \frac{\partial(v_y C)}{\partial y} + D_z \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} - \frac{\partial(v_z C)}{\partial z} + \omega \end{cases} \quad (1)$$

где  $\eta^*$  - упругость породы (коэффициент вязкости), 1/м;  $k_x, k_y, k_z$  - коэффициенты фильтрации по соответствующим координатам, м/сут;  $H$  - функция напора;  $n$  - активная пористость;  $D_x, D_y, D_z$  - коэффициент динамической дисперсии;  $C$  - концентрация исследуемого компонента;  $v_x, v_y, v_z$  - компоненты скорости фильтрации;  $\omega$  - интенсивность внутрипластовых процессов.

На данном этапе исследования проводятся в области автоматизации системы управления. Необходимо от хорошо изученных и верифицированных моделей объекта перейти к проектированию программного комплекса, где процессы управления будут автоматизированы, а параметры объекта управления будут поступать в систему непосредственно с датчиков на скважинах месторождений.

В ходе проектирования информационной системы управления был разработан прототип. Тестирование работы прототипа позволяет сделать предположение, что состояние объекта управления можно рассматривать как устойчивое при достижении определенной комбинации его характеристик. Хорошо изученная проф. И.М. Першиным модель процессов отбора ресурсов месторождения позволяет сделать ряд выводов о допустимых изменениях характеристик объекта, не приводящих к деструктивным последствиям.

Полагаем, что разработка модели системы управления позволит структурировать представление о функциях и параметрах исследуемого процесса. В таблице 1 представлено описание базовых параметров скважины. Эти параметры применяются при расчете устойчивости процесса с использованием Регулятора И.М. Першина. Алгоритм, предложенный проф. И.М. Першиным, использует метод синтеза пространственно-распределенного регулятора и позволяет оценить устойчивость объекта после воздействия.

Сделаем предположение о том, что алгоритм управления может быть построен на основе сети Байеса с применением в качестве априорных вероятностей наступления событий результатов, полученных на основе «Регулятора» проф. И.М. Першина.

В ходе исследований построена общая модель функционирования системы управления, включающая в себя два управляющих воздействия: расчетные данные специалистов по эксплуатации скважины и научно обоснованные расчеты на основе модели распределенного регулятора. На выходе проводится оперативный учет параметров эксплуатации скважины. Условное представление системы показано на рис. 1. Такая схема требует обратной связи, которая будет учитывать не только результат техногенного воздействия, но и другие факторы.

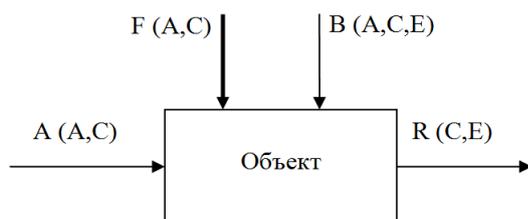


Рис. 1. Модель управления сложным объектом

На рис. 1 приведены следующие обозначения:

$F(A, C)$  – управление на основе распределенного регулятора;

$B(A, C, E)$  – управление инженерным объектом: расчетные параметры добычи, полученные специалистами по эксплуатации месторождений;

$A$  – исходные геофизические данные по скважине: расположение скважины, геофизические параметры пласта, прогнозируемая добыча;

$C$  – дебит скважины;

$E$  – экономический эффект эксплуатации скважины;

$R$  – оперативные данные по эксплуатации (дебит скважины, экономический эффект добычи минеральной воды).

Алгоритмы обработки данных используют информацию о месторождениях, которая взята из гидрогеологических отчетов. Результаты расчетов сравниваются с опытными данными. Как показано на рисунке, вычислительная схема использует гидрогеологические данные и данные о размерах месторождения. Итогом является оценка устойчивости процесса извлечения, а также выводы о рекомендуемых параметрах отбора ресурса. Указанная вычислительная схема учитывает только гидрогеологию месторождения минеральных вод. Чтобы сделать результат расчета более точным, необходимо добавить влияние внешних факторов в используемую модель, сохранив в основе модели базовые алгоритмы оценки значений дебита.

Таким образом, предлагается от классической модели системы управления перейти к модели сложной системы управления, которая будет учитывать влияние внешних факторов.

### III. РЕЗУЛЬТАТЫ

Разработка функционала сложной системы управления основана на данных наблюдения. Многолетние исследования объекта, накопленные экспериментальные данные и результаты расчетов с применением регулятора предоставляют определенные знания в области представления о поведении объекта. Существует возможность использовать эти знания для классификации состояния объекта с точки зрения устойчивости. Определим исходные параметры объекта, факторы влияния на состояние объекта, управляющее воздействие и получим на выходе комбинацию параметров, которую можно считать устойчивой только в том случае, если априорные вероятности событий находятся в заранее установленных диапазонах. Такая система управления может быть получена на основе предыдущих исследований и далее настраиваться в ходе последующих итераций.

При разработке функционала сложной системы управления необходимо определиться с параметрами объекта, которые являются важными для алгоритма управления. Начальное состояние объекта задается значением дебита скважины. Конечным состоянием объекта является тот диапазон значений дебита, при котором состояние месторождения остается устойчивым.

Процесс отбора гидроминеральных ресурсов не должен приводить к истощению месторождения, разубоживанию (обеднению) формулы минерализации ресурса. Обычно дебит скважины после отбора



На первом этапе достаточно структуры представления о процессе – диаграмма Байеса может не содержать точных численных данных. Необходимо определить взаимосвязь процессов и формат конечного состояния: нормальный дебит, пониженный дебит, повышенный дебит. Точные числовые данные будут использоваться для тестирования алгоритма на этапе его отладки.

Для разработки диаграммы Байеса, которая позволит автоматизировать процесс управления состоянием объекта без использования сложных вычислительных механизмов регулятора, необходимо проектирование функционала системы управления. Надо точно определить данные, функции и триггеры сложной системы управления. Необходимо дать однозначное наименование всем элементам системы управления на уровне интерфейса и на уровне вычислительного алгоритма.

#### IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе проведенного исследования показано, что модель систем управления состоянием гидроминеральной базы может быть определена посредством разработки функционала проекта. Разработка функционала проекта сложной системы управления позволяет однозначно определить данные, функции и триггеры программного обеспечения. Проведенные исследования определяют конфигурацию параметров объекта, позволяющую организовать контроль его состояния. Необходимо знать допустимые диапазоны изменения параметров объекта и вероятности выхода за установленные пределы значений. В отношении функциональности системы управления установлена необходимость оперативного контроля дебита скважины путем передачи данных с датчиков на объекте непосредственно в систему управления. Такая функциональность будет дополнена набором интеллектуальных сервисов, позволяющих выполнять более точную настройку работы системы управления на основе алгоритмов сети Байеса. Алгоритмы сети Байеса учитывают априорные вероятности наступления событий и дают возможность достаточно точно определить вероятность выхода заданной конфигурации параметров объекта за допустимые границы. Это дает возможность предотвращения нежелательных ситуаций и оперативной остановки процесса эксплуатации в случае возникновения проблем, обеспечивая устойчивый режим работы объекта.

Предлагаемый проект сложной системы управления включает в себя структурированное представление о параметрах объекта, математическую интерпретацию процессов извлечения ресурса и алгоритм Байеса, учитывающий внутренние и внешние воздействия на состояние скважины. Задачей вычислительного алгоритма управления является определение допустимых значений отбора ресурса.

Отметим, что проект системы управления требует дальнейшей разработки. Предлагается разработать систему триггеров, обеспечивающих переход между режимами отбора ресурса. Такая система триггеров обеспечит автоматизированное управление процессом отбора воды, а также аварийную остановку процесса извлечения в случае возникновения нештатной ситуации. Также возможно применение технологии агентно-ориентированного моделирования. Включение в

системы агентов позволит моделировать различные виды воздействия: управляющего воздействия и внешних факторов. Целесообразным полагаем продолжение работы над структурированием представления данных о месторождениях. Отметим важность временного параметра как в отношении горизонта наблюдений, так и в отношении горизонта прогнозирования.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Korotenko V.A., Grachev S.I., Kushakova N.P., Mulyavin S.F. Assessment of the influence of water saturation and capillary pressure gradients on size formation of two-phase filtration zone in compressed low-permeable reservoir, *Journal of Mining Institute*, vol. 245, pp. 569-581, 2020.
- [2] Kukharova T.V., Utkin V.A., Pershin I.M. Modeling of a Decision Support System for a Psychiatrist Based on the Dynamics of Electrical Conductivity Parameters, 2021 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus), pp. 975-978, 2021.
- [3] Meshkov A.A., Kazanin O.I., Sidorenko A.A. Improving the efficiency of the technology and organization of the longwall face move during the intensive flat-lying coal seams mining at the kuzbass mines, *Journal of Mining Institute*, vol. 249, no. 5, pp. 342-350, 2021.
- [4] Pershin I.M., Kukharova T.V., Tsapleva V.V. Designing of distributed systems of hydrolithosphere processes parameters control for the efficient extraction of hydromineral raw materials, *Journal of Physics: Conference Series (JPCS)* 2021, vol. 1728, no. 1, pp. 1-6, 2021.
- [5] Sidorenko A.A., Dmitriev P.N., Sirenko Y.G. Predicting Methane Emissions from Multiple Gas-Bearing Coal Seams to Longwall Goafs at Russian Mines, *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*, vol. 16, no. 8, pp. 851-857, 2021.
- [6] Sidorenko A.A., Sidorenko S.A., Ivanov V.V. Numerical modelling of multiple-seam coal mining at the Taldinskaya-Zapadnaya-2 mine", *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*, vol. 19, no. 5, pp. 568-574, 2021.
- [7] Ilyushin Y.V., Fetisov V.A. Experience of virtual commissioning of a process control system for the production of high-paraffin oil. *Sci Rep* 12, 18415, 2022. doi: 10.1038/s41598-022-21778-0
- [8] Martirosyan A.V., Ilyushin Y.V. Modeling of the Natural Objects Temperature Field Distribution Using a Supercomputer. *Informatics* 2022, 9, 62. doi: 10.3390/informatics9030062.
- [9] Martirosyan A.V., Ilyushin Y.V., Afanaseva O.V. Development of a Distributed Mathematical Model and Control System for Reducing Pollution Risk in Mineral Water Aquifer Systems. *Water* 2022, 14, 151. doi: 10.3390/w14020151.
- [10] Martirosyan A.V., Kukharova T.V., Fedorov M.S. Research of the Hydrogeological Objects' Connection Peculiarities. 2021 IV International Conference on Control in Technical Systems (CTS), 2021, pp. 34-38, doi: 10.1109/CTS53513.2021.9562910.
- [11] Matrokhina K.V., Trofimets V.Y., Mazakov E.B. Development of methodology for scenario analysis of investment projects of enterprises of the mineral resource complex. *Journal of Mining Institute*. 2022, no. 259, pp. 112-124. doi: 10.31897/PMI.2023.3.
- [12] Pershin I.M., Malkov A.V., Pomelyayko I. S. Design of a Distributed Debit Management Network of Operating Wells of Deposits of the CMW Region. *FTNCT 2020. Communications in Computer and Information Science*, vol 1396. Springer, Singapore. doi: 10.1007/978-981-16-1483-5\_29.
- [13] Nosova V.A., Pershin I.M. Determining the Optimal Number of Wells during Field Development, 2021 IV International Conference on Control in Technical Systems (CTS), Saint Petersburg, Russian Federation, 2021, pp. 42-44, doi: 10.1109/CTS53513.2021.9562965.
- [14] Makarova A.A., Kaliberda I.V., Kovalev D.A., Pershin I.M. Modeling a Production Well Flow Control System Using the Example of the Verkhneberezhovskaya Area, 2022 Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus), Saint Petersburg, Russian Federation, 2022, pp. 760-764, doi: 10.1109/EIConRus54750.2022.9755852.
- [15] Mishin V.V., Tsapleva V.V., Myasnikova E.V., Makarova A.A. Development of an Intelligent Information System "Smart Deposit" for Mineral Water Resource, 2023 XXVI International Conference on Soft Computing and Measurements (SCM), Saint Petersburg, Russian Federation, 2023, pp. 244-247, doi: 10.1109/SCM58628.2023.10159067.