

Гидравлика и инженерная гидрология

УДК 502/504:556.3.01

С. Н. КАРАМВИРОВ, П. М. УМАНСКИЙ

Федеральное государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования
«Московский государственный университет природообустройства»

НЕЧЕТКОЕ УПРАВЛЕНИЕ ЗАБОРОМ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

Приведен алгоритм управления работой водозаборных скважин на основе нечеткого управления их подачами в сборном резервуаре с целью минимизации рассогласования между расчетным и фактическим объемами воды в резервуаре для каждого часа суток.

Подземный водозабор, скважины, сборный резервуар, подача, нечеткое управление.

There is given an algorithm of operation control of water supply wells on the basis of the fuzzy control of water supply in the collecting tank aiming at minimizing mismatching between the designed and actual volumes of water in the tank for each hour of the day.

Underground water intake, wells, collecting tank, supply, fuzzy control.

Расходование воды из сети для расчетных суток принято определять суммарными ступенчатыми графиками водопотребления. Ранжированный график водопотребления можно описать формулой следующего вида [1, 2]:

$$Q = \frac{Q_{\text{сут}}}{24} \cdot KT^{K-1},$$

где Q – часовой расход воды в момент времени T ($T = t/24$); $Q_{\text{сут}}$ – суточное потребление воды; K – коэффициент часовой неравномерности (для получения расчетного графика используются таблицы номеров последовательных расходов для различных потребителей: $t = 1, 2, \dots, 24$).

Обычно такие графики имеют несколько характерных многочасовых

ступеней (режимов), вокруг которых происходят незначительные колебания часовых расходов.

Один из способов получения графика характерных режимов заключается в осреднении на нескольких характерных интервалах исходного графика водопотребления. Искомый график для забора подземных вод условно назовем «графиком подач водозаборных скважин» – $Q_{\text{ВС}}$.

Мерой близости графиков – исходного и искомого – может быть выбрана величина суммы квадратов их

разностей для каждого часа суток [3], а оптимальной величиной – значения Q_{BC} , минимизирующие это выражение. Рассмотрим данный процесс оптимизации как многошаговый процесс управления системой «подача – потребление». На i -м этапе значение Q_{BCi} выбирается из условия [4]:

$$\sum_{j \in i} (Q_{BCi} - Q_j)^2 \Rightarrow \min.$$

Необходимое условие экстремума дает

$$\frac{\partial \sum (Q_{BCi} - Q_j)^2}{\partial Q_{BCi}} = 0$$

или

$$Q_{BCi} = \frac{\sum_{j \in i} Q_j}{n},$$

где n – число часов i -го периода постоянного значения Q_{BC} .

Таким образом, оптимальным значением Q_{BC} на заданном отрезке является усредненное на этом отрезке водопотребление. Методом математической индукции легко показать, что это условие должно выполняться для каждого шага, а процесс оптимизации сводится к выбору времени переключения, где график водопотребления усредняется на некотором периоде. Для небольших систем водоснабжения графики работы насосов имеют простую форму. В случае постоянной подачи задача оптимизации становится тривиальной и сводится к выражению:

$$Q_{HC} = \frac{\sum_{i=1}^{24} Q_i}{24}.$$

При полном отключении насосов или переходе на пониженную подачу при уменьшении водопотребления (двухступенчатый график) задача решается простым перебором вариантов. Для упрощения алгоритма расчета целесообразно смещать время начала суток таким образом, чтобы вместо двух ступеней переключения осталась одна. В более сложных случаях задача решается методом динамического программирования. Необходимо найти моменты «переключения» t_i , обеспечивающие [4]

$$\min \sum_{i=1}^k \sum_{j=t_i}^{t_{i+1}} (Q_{HCi} - Q_j)^2,$$

где $Q_{HCi} = \sum_{j=t_i}^{t_{i+1}} \frac{Q_j}{t_{i+1} - t_i}$; k – число ступеней; $t_i \in [1, 2, \dots, 24]$.

В общем виде эта задача может быть записана в виде

$$f_k(S) = \min_U [Q(S, U) + f_{k-1}(S')],$$

где S – состояние системы (время переключения, ч); U – управление (ширина интервала, ч); $Q(S, U)$ – значение целевой функции (суммы квадратов разностей) при U -м варианте управления на k -м шаге; S' – состояние системы за $k - 1$ ступеней до конца графика; $f_k(S)$ – сумма квадратов разностей при оптимальном управлении за k ступеней до конца графика для S -го варианта состояния.

Расчет начинается с последней ступени.

Следует отметить, что полученное приближение ступенчатого графика водопотребления при использовании его в качестве графика подач насосных станций обязательно соответствует минимальному объему регулирующих емкостей. Для уменьшения регулирующего объема можно в пределах полученных ступеней перераспределить значения расходов с соблюдением их общего баланса [4].

Пример расчета для двух ступеней приведен в таблице.

В таблице представлен идеальный случай детерминированного водопотребления, которое в реальных условиях носит стохастический характер. Это повлечет отклонение фактического остатка воды в резервуаре для каждого часа от расчетного, что может привести как к отказу, связанному с дефицитом регулирующего объема, так и к сбросу воды через переливную трубу при переполнении резервуара.

С целью минимизации рассогласования между расчетным и фактическим объемами воды в резервуаре для каждого часа выходом из положения может быть регулирование подачи

Расчетный режим подачи и потребления воды

		$Q_{свт} = 3667,2 \text{ м}^3$		$V_{рег} = 340,4 \text{ м}^3$	
Час	$Q_{об}, \text{ м}^3/\text{ч}$	$Q_{нс}, \text{ м}^3/\text{ч}$	$Q_{рег.емк}$	$V_{ост}, \text{ м}^3$	Примечание
0...1	41,06	28,26	12,80	82,1	
1...2	18,02	28,26	10,24	92,3	
2...3	13,88	28,26	14,37	106,7	Час минимального водопотребления
3...4	18,02	28,26	10,24	116,9	
4...5	19,49	28,26	8,76	125,7	
5...6	133,41	194,31	60,90	186,6	
6...7	224,48	194,31	30,07	156,5	
7...8	252,14	194,31	57,82	98,7	
8...9	223,58	194,31	29,27	69,5	
9...10	247,21	194,31	52,89	16,6	
10...11	210,88	194,31	16,57	0,0	
11...12	183,71	194,31	10,61	10,6	
12...13	138,22	194,31	56,09	66,7	
13...14	155,35	194,31	38,96	105,7	
14...15	119,91	194,31	74,41	180,1	
15...16	147,08	194,31	47,23	227,3	
16...17	139,11	194,31	55,21	282,5	
17...18	156,24	194,31	38,08	320,6	
18...19	174,55	194,31	19,76	340,4	
19...20	209,70	194,31	15,38	325,0	
20...21	205,27	194,31	10,95	314,0	
21...22	297,92	194,31	103,60	210,4	Час максимального водопотребления
22...23	279,02	194,31	84,70	125,7	
23...24	59,07	28,26	30,82	94,9	

Примечания: $Q_{об}$ – общее водопотребление, $\text{м}^3/\text{ч}$; $Q_{нс}$ – ожидаемые подачи погружных насосов, $\text{м}^3/\text{ч}$; $Q_{рег. емк}$ – поступление (отдача) воды регулирующей емкостью, $\text{м}^3/\text{ч}$; $V_{ост}$ – остаток воды в баке, м^3 .

подземного водозабора одним из известных способов [5].

На практике наибольшее распространение получило регулирование в зависимости от достигнутого уровня воды в резервуаре по тому или другому алгоритму. Однако такой способ не учитывает динамику изменения уровня воды в резервуаре и в некоторых случаях может оказаться неэффективным. Кроме того, он часто вызывает переходные процессы, сопровождающиеся ударными нагрузками. В подобных ситуациях лучшие результаты показывают нечеткие методы управления [5].

В последнее время нечеткое моделирование стало одним из наиболее перспективных направлений исследований в области управления и принятия решений. Особенно полезным оно

оказалось для систем, в работе которых присутствует неопределенность, исключая применение точных количественных методов и подходов. Диапазон применения нечетких методов с каждым годом расширяется и охватывает такие области, как проектирование промышленных роботов и бытовых приборов, управление доменными печами, нефтеперерабатывающими заводами и движением поездов, автоматическое распознавание речи и изображений, создание нечетких контроллеров для автомобильных трансмиссий и подушек безопасности и т.д. Экспертные знания легко внедрить в нечеткую систему, что позволяет сделать понятным для человека алгоритм ее функционирования. Нечеткое управление оказывается особенно эффективным, когда технологические процессы слишком сложные или когда доступные источники информации рассматриваются неточно [6].

В связи с широким распространением нечетких систем вопросы их проектирования реализованы в пакете Fuzzy Logic Toolbox вычислительной среды MATLAB. Рассмотрим его применение для синтеза системы нечеткого вывода по управлению подачами погружных насосов с целью приближения фактических объемов воды в сборном резервуаре к расчетным для режима максимального водопотребления (см. таблицу).

Пусть подземный водозабор состоит из семи основных и двух резервных скважин, при необходимости используемых для управления. Дебит каждой скважины равен примерно $30 \text{ м}^3/\text{ч}$. Так как мы исследуем систему, используя теорию нечеткой логики, то некоторая погрешность арифметических вычислений не имеет принципиального значения.

Основной входной переменной задачи является разность между фактическим и расчетным объемом воды в резервуаре (эту величину легко перевести в уровень воды). Будем считать данную переменную – объем, м^3 –

лингвистической переменной, заданной своими значениями – термами (объем – дефицитный, средний, избыточный) (рис. 1). Используются функции принадлежности Гаусса с параметрами, диктуемыми данными таблицы.

В отличие от детерминированного подхода фактический объем может принадлежать одновременно всем трем значениям лингвистической переменной с разной функцией принадлежности, что позволяет делать процесс управления более гибким.

Аналогично строятся функции принадлежности лингвистической переменной «Подача» ($\text{м}^3/\text{ч}$), которая принимает следующие значения: малая, средняя и большая. Соответствующие функции принадлежности приведены на рис. 2.

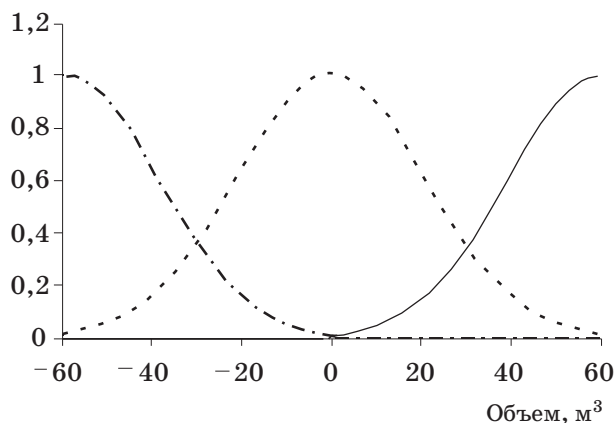


Рис. 1. Функции принадлежности переменной «Объем»: - · - дефицитный; - - - средний; — избыточный

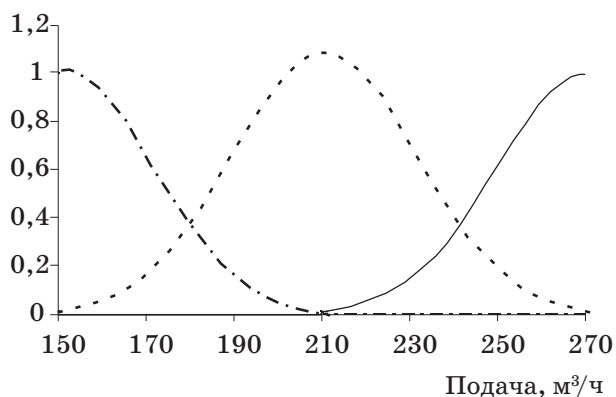


Рис. 2. Функции принадлежности переменной «Подача»: - · - малая; - - - средняя; — большая

В соответствии с системой нечеткого вывода будем использовать следующие правила:

если Объем = Избыточный, то Подача = Малая;

если Объем = Средний, то Подача = Средняя;

если Объем = Дефицитный, то Подача = Большая.

Нечеткие правила образуют базу правил. Важно, что при нечетком управлении, в отличие от традиционного, все правила работают одновременно, но степень их влияния на выходное воздействие может быть различной. Принцип вычисления суперпозиций отдельных влияний на окончательный вариант положен в основу нечеткого управления, что делает его более гибким.

Процесс обработки нечетких правил вывода состоит из следующих этапов [7]:

вычисление мер истинности – степеней принадлежности посылок правил (между «если» и «то»). Эта операция называется импликацией и реализуется, как правило, операцией минимума;

модификация заключений правил (после «то») в соответствии со значениями истинности, полученными на первом этапе;

объединение модифицированных подмножеств (агрегирование) с помощью операции максимума;

переход от нечеткого результата суперпозиции к скалярным значениям (дефаззификация). Здесь использован метод центра тяжести объединенной фигуры.

Суть алгоритма иллюстрирует рис. 3: цифрами 1, 2, 3 обозначены функции принадлежности объемов (см. рис. 1) и соответствующих подач (см. рис. 2).

Варьируя величиной объема воды, получим зависимость «вход – выход» для нечеткого управления подземным водозабором (рис. 4).

Регулирование подач насосов может осуществляться, например, с помощью задвижек, установленных на напорных линиях. Расход, подаваемый i -й скважиной из N скважин, установленных на подземном водозаборе, может быть определен на основе решения системы

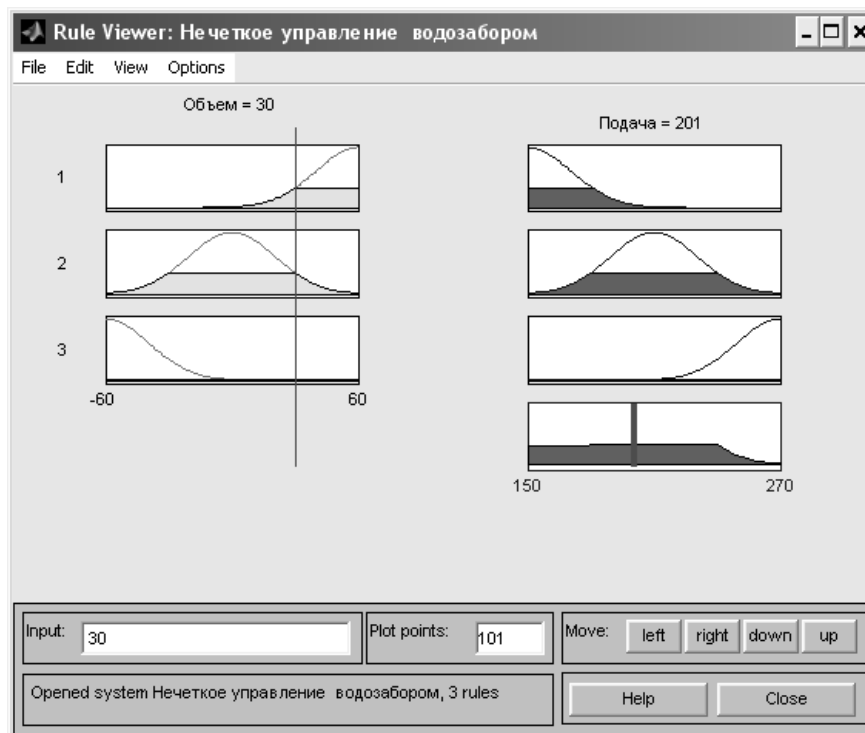


Рис. 3. Иллюстрация работы системы нечеткого управления в пакете MATLAB при заданном объеме воды в емкости

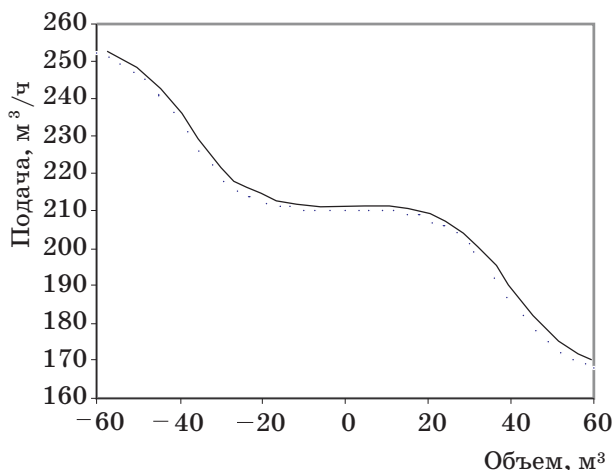


Рис. 4. Результирующая функция нечеткого управления

нелинейных уравнений следующего типа [4, 8]:

$$H_{ni}(Q) = Z_i + S_i + \Delta h_{bi}, \quad (8)$$

где Z_i – геометрическая высота подъема воды из i -й скважины, отсчитанная от статического уровня, м; S_i – понижение уровня в i -й скважине на отметке водоприемной части насоса, м; Δh_{bi} – потери напора в водоподъемных трубах и в водоводе от i -й скважины до резервуара, м; H_{ni} – напор i -го насоса, м.

Исходные данные позволяют произвести расчет подачи воды от системы скважин и определить суммарную подачу в резервуар $Q_{скв}$. Однако она ско-

рее всего не будет равна требуемой $Q_{тр}$.

При $Q_{скв} > Q_{тр}$ получаем избыток подачи воды в резервуар, ликвидировать который можно регулированием с помощью задвижек на напорных участках скважин. В расчетной схеме задвижки моделируются участками нулевой длины, потери напора в которых задаются известной формулой: $\Delta h_i = \xi_i \frac{V_i^2}{2g}$.

Задача состоит в определении коэффициентов сопротивления ξ_i , обеспечивающих требуемую подачу водозабора подземных вод. Это соответствует некоторой степени закрытия каждой задвижки в соответствии с ее характеристикой.

Будем считать коэффициенты сопротивления всех задвижек одинаковыми: $\xi_1 = \xi_2 = \dots = \xi_m = \xi$. Тогда общая подача скважинной системы является сложной функцией от ξ : $Q_{скв} = Q_{скв}(\xi)$, задаваемой разработанным авторами алгоритмом.

Для обеспечения требуемой подачи водозабора $Q_{тр}$ необходимо выполнение условия $Q_{скв}(\xi) - Q_{тр} = 0$. Последнее уравнение может быть решено относительно ξ , например, методом деления отрезка пополам.

Как и в случае четкого управления, на конкретном объекте параметры управляющей системы настраиваются (в данном случае – по параметрам функций принадлежности).

Выводы

Нечеткое управление забором подземных вод, обладающее рядом преимуществ перед детерминированным, формулируется вербально, на естественном языке, и обеспечивает более плавное изменение управляющих расходов. Для автоматизации вычислений целесообразно использовать систему компьютерной математики MATLAB.

1. **Николадзе Г. И., Сомов М. А.** Водоснабжение: учеб. для вузов. – М.: Стройиздат, 1995. – 688 с.

2. **Шопенский Л. А.** Определение аккумулялирующих емкостей при разных режимах подачи и потребления воды: Санитарно-техническое оборудование: сб. трудов. – М.: Научно-исследовательский институт санитарной техники, 1969. – № 2. – С. 24–48.

3. **Сумароков С. В.** Математическое моделирование систем водоснабжения. – Новосибирск: Наука, 1983 – 167 с.

4. **Карамбиров С. Н.** Математическое моделирование систем подачи и распреде-

ления воды в условиях многорежимности и неопределенности: монография. – М.: ФГОУ ВПО МГУП, 2004. – 197 с.

5. **Карамбиров С. Н.** Нечеткое управление регулирующими емкостями: Роль природообустройства в обеспечении устойчивого функционирования и развития экосистем: материалы Международной научно-практической конференции. – М.: ФГОУ ВПО МГУП, 2006. – Ч. 2. – С. 93–97.

6. **Штовба С. Д.** Проектирование нечетких систем средствами MATLAB. – М.: Горячая линия – Телеком, 2007. – 288 с.

7. **Корнеев В. В., Гареев А. Ф., Васютин С. В., Райх В. В.** Базы данных. Интеллектуальная обработка информации. – М.: Изд-во Нолидж, 2001. – 496 с.

8. **Буркова Ю. Г., Карамбиров С. Н., Уманский П. М.** Моделирование стохастического функционирования подземного водозабора // Природообустройство. – 2008. – № 4. – С. 52–58.

Материал поступил в редакцию 05.04.10.

Карамбиров Сергей Николаевич, доктор технических наук, профессор кафедры «Вычислительная техника и прикладная математика»

Тел. 8 (499) 153-97-66

Уманский Петр Михайлович, старший преподаватель кафедры «Электротехника, электрификация и автоматизация гидромелиоративных систем»

Тел. 8 (495) 976-18-69