

УДК 502/504: 626.83: 519.2

Ю.Г. БУРКОВА, А.Л. СОКОЛОВ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева», г. Москва, Российская Федерация

ВЫБОР ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ КРУПНОЙ НАСОСНОЙ СТАНЦИИ МЕЛИОРАТИВНОГО И КОМПЛЕКСНОГО НАЗНАЧЕНИЯ В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ

Рассмотрены вопросы применения теории нечетких множеств при моделировании крупных насосных станций перекачки с целью учета неопределенности при их проектировании и эксплуатации. По рекомендациям действующих норм, выбор расчетных характеристик производится внутри интервалов интуитивно, и при этом возникают лингвистические неопределенности. При эксплуатации таких систем многие параметры непрерывно изменяются также интервально, в математических моделях приходится учитывать их средние величины. Предлагаемая модель, описывающая поведение исследуемой системы, позволяет рассматривать неопределенные величины как нечеткие с присвоением каждой из этих величин функции принадлежности. Приведен конкретный алгоритм решения данной задачи, даются рекомендации по выбору носителя и вида функций принадлежности. Определены входные и выходные лингвистические переменные, примерами которых являются «подача насосной станции», «напор насосной станции», «величина экономического функционала» и термы. Задача выбора оптимальных нечетких параметров системы не может быть решена с помощью применения разных вариантов – необходим направленный поиск решения, при котором процесс изменения вариантов приводит к оптимальному решению. При этом наиболее эффективным является сочетание теории нечетких множеств и методов оптимизации. Использование нечетких подходов расширяет область поиска оптимальных решений и позволяет получить параметры системы в целом, наиболее близкие требуемым.

Неопределенность, лингвистические переменные, теория нечетких множеств, функции принадлежности.

Введение. При проектировании сложных народнохозяйственных комплексов большого масштаба необходимо решать задачи, требующие исследование закономерностей их функционирования. Решение этих задач возможно двумя путями: расчетными и экспериментальными. В связи с возникновением организационных и технических трудностей, а также с ростом затрат времени и средств проведение натурального эксперимента становится сложным. Поэтому необходимо использовать математические модели, при этом повышая их точность и применяя новые расчетные методы: например, такие, как теория массового обслуживания, методы динамики средних, теория статистических решений и др.

Материалы и методы. При проектировании и эксплуатации сложных техни-

ческих систем, к числу которых относятся крупные насосные станции мелиоративного и комплексного назначения, приходится принимать решения в условиях неопределенности. Приводимые в литературе параметры расчетов в большинстве случаев задаются в виде интервалов, приоритеты отдельных элементов которых никак не оговариваются.

В процессе проектирования специалисты выбирают то или иное точечное значение параметра, исходя из собственных представлений, опыта, аналогий и других факторов, а в случае затруднений – руководствуясь интуицией или обеспечением некоторого «запаса». В таких случаях обычно выбирают средние или граничные значения интервалов, не принимая во внимание

возможные разбросы конечных результатов. Так, по рекомендациям п. 9.3.1 действующего свода правил СП 100.13330.2011 «Мелиоративные системы и сооружения», тип и число насосных агрегатов следует выбирать из условия наиболее точного обеспечения графика водоподачи на основании технико-экономических сравнений вариантов. Число насосных агрегатов на насосных станциях, как правило, следует принимать в соответствии с приведенной ниже таблицей. Число основных резервных агрегатов может быть увеличено при работе насосных станций в тяжелых условиях: при перекачке агрессивных вод, а также вод, содержащих абразивные взвеси, при большой загрузке насосов (более 5500 ч/год).

Таблица
**Число насосных агрегатов
в зависимости от подачи воды**

Подача воды, м ³ /с	Число насосных агрегатов, шт.
до 1	2-4
1-5	3-5
5-30	4-6
св. 30	5-9

Упомянутые в своде правил словосочетания «как правило», «может быть» являются типичными примерами лингвистической неопределенности. Пункт 9.3.5 СП констатирует, что «необходимое насосно-силовое оборудование следует подбирать на основании технико-экономического сравнения вариантов различных насосных агрегатов в зависимости от их подачи, КПД при средневзвешенном напоре, допускаемой высоты всасывания, наличия насосов данного типа на оросительной системе, возможности наиболее точного обеспечения графика водоподачи и работы насосов в диапазоне колебаний напоров без регулирования подачи задвижкой, эксплуатационных и конструктивных преимуществ».

Простым применением разных вариантов задача выбора оптимальных параметров системы не может быть решена, особенно при непрерывном их изменении, например, требуемых подач, колебаний напоров без регулирования подачи задвижкой или высоты всасывания (параметры, указанные в СП). Это приводит к необходимости направленного перебора, при котором процесс изменения вариантов приводит к оптимальному решению. В данном случае наиболее

эффективным решением является сочетание теории нечетких множеств и методов оптимизации.

Вопросы неопределенности возникают и при разработке рекомендаций по эксплуатации насосных станций.

Рекомендации вышеуказанного свода правил заключаются в следующем:

«9.7.1. Гидравлический расчет водоводов необходимо выполнять после выбора их форм, напорных коммуникаций и диаметров труб. Расчетом должны учитываться все варианты работы насосов (включая и аварийные), колебания уровней воды в водовыпуске и водоприемнике или давления в закрытой сети, повышение шероховатости стенок во время эксплуатации».

«9.7.2. При гидравлическом анализе работы насосов следует учитывать величины обточки их рабочих колес или углы разворота лопаток, допускаемые высоты всасывания; при этом должен быть составлен водно-энергетический расчет и даны рекомендации по эксплуатации насосных агрегатов для всех вариантов их работы и геометрических напоров».

Вопросы неопределенности возникают при обосновании необходимости автоматизации работы насосных станций различного назначения [1, 2]. Кроме решения прочих задач, оборудование насосной станции средствами телемеханики и автоматики обеспечивает:

- регулирование расхода и давления;
- контроль и регистрацию основных параметров, характеризующих работу насосов.

Алгоритм нечеткого регулятора обладает рядом преимуществ перед классической схемой управления, которые позволяют понизить расходы на обслуживание и ремонт автоматизированной насосной станции [2].

Процесс принятия решений в условиях неопределенности можно разбить на несколько этапов. Прежде всего строится подходящая обычная («четкая») модель расчета параметров исследуемой системы с наиболее ожидаемыми («четкими») параметрами.

Составленная «четкая» математическая модель преобразуется в нечеткую путем «размывания» параметров в интервалах возможных значений, т.е. параметры представляются нечеткими числами. При этом вектор решения (например, подача насосной станции, количество насосных агрега-

тов разных типов, промежутки между ремонтами) также становятся нечетким.

Математические модели выбора оптимальных параметров крупных насосных станций мелиоративного и комплексного назначения, основанные на вероятностных методах с использованием теории массового обслуживания, теории надежности и имитационных расчетах в четкой постановке, рассматриваются в работах авторов статьи [3-6]. В данной работе предлагается рассматривать неопределенные величины, учитываемые при моделировании системы, как на этапе проектирования, так и при ее эксплуатации, как нечеткие с присвоением каждой из этих величин функции принадлежности.

Алгоритм решения данной задачи включает в себя следующие этапы:

1. С помощью «четкой» модели определяются наиболее ожидаемые значения «четких» параметров исследуемой системы (например, требуемые подачи насосной станции на разных интервалах графика водоподач).

2. Входящие параметры преобразуются в «нечеткие», при этом их значения задаются с определенным уровнем функции принадлежности.

3. Проводится оптимизация системы одним из известных методов (например, методом математического программирования).

4. Для полученного решения находится функция принадлежности.

5. Изменяя уровень принадлежности входящих параметров и повторяя вышеуказанные действия, находится максимальное значение функции принадлежности решения и соответствующие ему параметры системы.

Оптимизация основывается на первом приближении – традиционном технико-экономическом расчёте, при котором в заданном интервале времени выбранные характеристики системы попадают в допустимую область. В другой схеме совместного использования оптимизационных и имитационных моделей основой является включение имитационного блока в алгоритм оптимизации.

Носители функций принадлежности выбираются исходя из допустимых значений параметров, возможных интервалов их изменения, а также на основе накопленного опыта и системы предпочтений лица, принимающего решение.

Количественной оценкой отклонения параметра x от требуемого значе-

ния x_{mp} является функция принадлежности $\mu(x) \leq 1$, которая обычно достигает максимума при $x = x_{mp}$ ($\mu(x_{mp}) = 1$) [7], а в других, отличных от нуля точках, изменяется по одному из заданных законов (рис. 1): экспоненциальному (1), линейно-треугольному (2), трапецеидальному (3), в виде сопряжённых отрезков парабол (р-функций) (4), ступенчатому (5) и т.д.

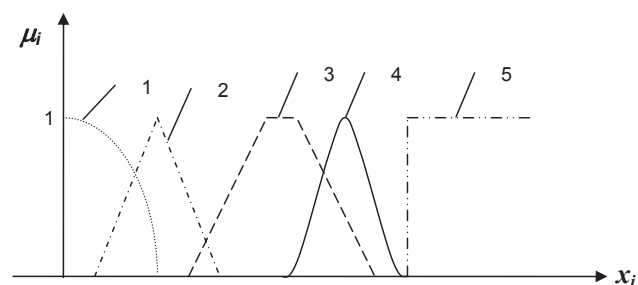


Рис. 1. Виды функций принадлежности

Функция принадлежности – это некоторая невероятностная субъективная мера нечеткости, определяемая в результате опроса экспертов о степени соответствия элемента x понятию, формализуемому нечетким множеством A [8].

Выбор функции принадлежности в значительной мере определяется объемом имеющейся информации о моделируемой системе, а также качеством методов настройки модели. Теория нечетких множеств не требует абсолютно точного задания функций принадлежности.

При малом объеме имеющейся информации о системе следует использовать простейшие функции принадлежности, состоящие из прямолинейных участков, для нахождения параметров которых требуется значительно меньшее количество информации. Наличие большого количества информации о системе в виде входных и выходных данных позволяет использовать более сложные функции принадлежности – такие, как гауссовы или гармонические, что приводит к моделям, более точным, чем при использовании функций, состоящих из прямолинейных участков.

На начальном этапе построения модели рекомендуется использовать простейшие функции принадлежности, а на последующих – проводить тестирование модели с применением более сложных функций принадлежности.

Наибольшее распространение при построении функций принадлежности нечет-

ких множеств получили прямые методы, когда эксперт или группа экспертов просто задают для каждого $x \in X$ значение функции принадлежности $\mu_A(x)$.

Результаты и обсуждения. Для создания нечеткой модели крупной насосной станции (НС) необходимо ввести лингвистические переменные (носители функций принадлежности), являющиеся входными параметрами системы, наряду с четкими исходными данными. Примерами таких переменных являются «величина требуемых подач» и «величина требуемого напора» насосной станции. Вид μ -функции принадлежности требуемых подач НС приведен на рисунке 2 [9].

Примерами выходной лингвистической переменной являются «включенные насосы» [2], «уровень воды» в регулирующей емкости в верхнем бьефе насосной станции, «подача насосной станции», «напор насосной станции», «величина экономического функционала». Вид экспоненциальной функции принадлежности экономического функционала приведен на рисунке 3 [9].

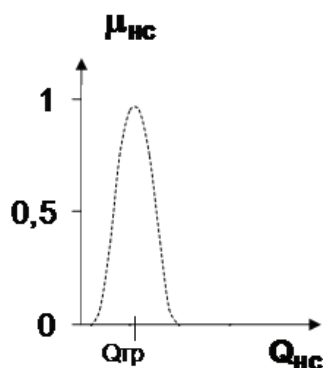


Рис. 2. Функция принадлежности требуемых подач насосной станции

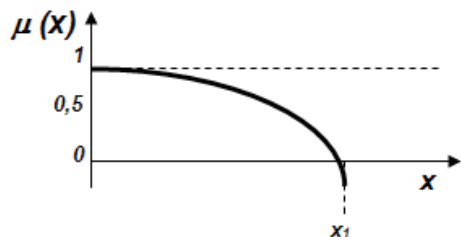


Рис. 3. Функция принадлежности экономического функционала

Для реализации лингвистической переменной необходимо определить точные физические значения ее термов.

Для каждого набора независимых переменных (требуемых подач, диаметров

и материала напорных трубопроводов; показателей надежности насосных агрегатов; параметров рабочих точек для разных схем напорных коммуникаций; параметров регулирующих емкостей и т.д.) определяем лингвистические переменные и получаем набор уровней принадлежности каждого контролируемого параметра, соответствующих ограничениям ($\mu_1, \mu_2 \dots \mu_n$).

Заметим, что в этот набор входят функции принадлежности основной оптимизируемой величины (экономического функционала) и ограничений. Для сравнения решений необходимо свернуть полученный вектор в число. Это можно сделать, выбрав в качестве показателя оптимальности минимальный компонент вектора, т.к. остальные приближения являются лучшими:

$$m_{\min} = \min_i m_i \quad (1)$$

Тогда оптимальным будет решение (из k возможных), для которого этот минимум достигает максимального значения (принцип Беллмана-Заде) [11]:

$$Z_{\max} = m_{\text{opt}} = \max \min m_{ik} \quad (2)$$

Выводы

При проектировании, разработке рекомендаций по эксплуатации и при обосновании автоматизации насосных станций возникают вопросы неопределенности.

Задача выбора оптимальных нечетких параметров системы не может быть решена простым применением разных вариантов – необходим направленный поиск решения, при котором процесс изменения вариантов приводит к оптимальному решению. При этом наиболее эффективным является сочетание теории нечетких множеств и методов оптимизации.

Использование нечетких подходов расширяет область поиска оптимальных решений и позволяет получить параметры системы в целом, наиболее близкие к требуемым.

Библиографический список

1. Кудинов Ю.И., Уварова Л.В., Кудинов И.Ю. Разработка нечеткой системы регулирования с использованием LABVIEW // Вести высших учебных заведений Черноземья. 2010. № 3 (21). С. 62-67.
2. Есилевский В.С., Кузнецов В.Н., Панов В.П. Управление насосными агрега-

тами К.Н.С. с помощью систем нечетко-нейронного управления // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2012. Вып. 9. Т. 8. С. 12-16.

3. **Буркова Ю.Г.** Оптимизация технико-экономических параметров крупных насосных станций с учетом их надежности: Автореферат диссертации кандидата технических наук: 06.01.02. М., 2000. 24 с.

4. **Буркова Ю.Г., Карамбиров С.Н., Манушин А.Т.** Выбор насосно-силового оборудования станций с учетом надежности работы элементов гидроузла // Вопросы совершенствования мелиоративных систем: Сб. трудов. М.: МГМИ, 1985. С. 77-81.

5. **Буркова Ю.Г., Карамбиров С.Н., Манушин А.Т.** Математическое моделирование режимов работы насосных станций каскада на ЭЦВМ // Повышение эффективности мелиоративных систем: Сб. трудов. М.: МГМИ, 1986. С. 127-133.

6. **Буркова Ю.Г.** Сопоставление результатов расчетов насосной станции как системы массового обслуживания и методом имитационного моделирования // Природообустройство и рациональное природопользование – необходимые условия социально-экономического развития России: Сборник научных трудов. Ч. 1 / Московский государственный университет природообустройства. М.: МГУП, 2005. С. 150-153.

7. **Мальшев Н.Г., Берштейн Л.С., Боженик А.В.** Нечеткие модели для экспертных систем в САПР. М.: Энергоатомиздат, 1991. 136 с.

8. **Леоненков А.В.** Нечеткое моделирование в среде Matlab и fuzzyTECH. СПб.: BHV-Санкт-Петербург, 2003. 736 с.

9. **Карамбиров С.Н.** Новые подходы в моделировании и оптимизации трубопроводных систем. Основы, концепции, методы. Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2012. 355 с.

10. **Карамбиров С.Н., Буркова Ю.Г.** Анализ и синтез сложных инженерных систем с применением современных математических методов: Монография. М.: Издательство РГАУ-МСХА, 2016. 193 с.

11. **Заде Л.** Понятие лингвистической переменной и его применение к понятию приближенных решений. М.: Мир, 1976. 166 с.

Материал поступил в редакцию 05.04.2017 г.

Сведения об авторах

Буркова Юлия Геннадьевна, кандидат технических наук, доцент кафедры информационных технологий в строительстве, ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева; 127550, Москва, ул. Большая Академическая, 44; тел.: 8(499)153-97-66; e-mail: burkova.msuee@mail.ru

Соколов Андрей Львович, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, доцент кафедры информационных технологий в строительстве, ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева; 127550, Москва, ул. Большая Академическая, 44; тел.: 8(499)153-97-66; e-mail: andrey.sokolov2014@yandex.ru

YU.G. BYRKOVA, A.L. SOKOLOV

Federal state budgetary educational institution of higher education «Russian state agrarian university-MAA named after C.A. Timiryazev», Moscow, Russian Federation

CHOICE OF OPTIMAL PARAMETERS OF A LARGE PUMPING STATION OF A RECLAMATION AND COMPLEX PURPOSE UNDER THE UNCERTAINTY CONDITIONS

The problems of application of the fuzzy sets theory are considered at modeling of large swapping pump stations for the purpose of the uncertainty accounting at their design and operation. According to the recommendations of effective standards the choice of estimated parameters is made inside the intervals intuitively, however there arise linguistic variables. During operation of such systems many parameters also continuously vary at intervals, in mathematical models their average values must be taken into account. The proposed model describing the behavior of the system under study makes it possible to consider uncertain variables as fuzzy with the assignment of each of these values to the membership function. There is given a specific algorithm for solving this problem, recommendations are given on the choice of the carrier and type of membership functions. Input and output linguistic variables are defined, the examples of which are “feeding of the pumping station”, “head of the pumping station”, “economic functional value” and terms. The problem of choosing the optimal fuzzy parameters of the system cannot be solved by a simple search of variants, a directed search for the solution is necessary in which

the process of changing variants leads to the optimal solution. In this case, the most effective is the combination of fuzzy sets theory and optimization methods. The use of fuzzy approaches widens the area of searching optimal solutions and allows obtaining the parameters of the system as a whole, closest to the required ones.

Uncertainty, linguistic variables, fuzzy-set theory, membership functions.

References

1. **Kudinov Yu.I., Uvarova L.V., Kudinov I.Yu.** Razrabotka nechetkoj sistemy regulirovaniya s ispolzovaniem LABVIEW // Vesti vysshih uchebnyh zavedenij Chernozemjya. 2010. № 3 (21). S. 62-67.
2. **Esilevsky V.S., Kuznetsov V.N., Panov V.P.** Upravlenie nasosnymi agregatami K.N.S. s povoshchjyu system nechetko-nejronnogo uprvleniya // Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta. 2012. Vyp. 9. T. 8. S. 12-16.
3. **Burkova Yu.G.** Optimizatsiya tehniko-economiceskikh parametrov krupnyh nasosnyh stantsij s uchetom ih nadezhnosti: Avtorefereat dissertatsii candidate tehničeskikh nauk: 06.01.02. M., 2000. 24 s.
4. **Burkova Yu.G., Karambirov S.N., Manushin A.T.** Vybór nasosno-silovogo oborudovaniya stantsij s uchetom nadezhnosti raboty elementov hydrouzla // Voprosy sovershenstvovaniya meliorativnyh system: Sb. trudov. M.: MGMI, 1985. S. 77-81.
5. **Burkova Yu.G., Karambirov S.N., Manushin A.T.** Matematicheskoe modelirovanie rezhimov raboty nasosnyh stantsij cascada na ETSVM // Povyshenie effektivnosri meliorativnyh system: Sb. Trudov. M.: MGMI, 1986. S. 127-133.
6. **Burkova Yu.G.** Sopostavlenie resuljtatov raschetov nasosnoj stantsii kak sistemy massovogo obsluzhivaniya i metodom imitacionnogo modelirovaniya // Prirodoobustrojstvo i ratsionalnoe prirodopolzovanie – neobhodimye usloviya sotsialjno-economiceskogo razvitiya Rossii: Sbornik nauchnyh trudov. Ch. 1 / Moscovskiy gosudarstvennyy universitet prirodobustrojstva. M.: MGUP, 2005. S. 150-153.
7. **Malyshev N.G., Bershtein L.S., Bozhenyuk A.V.** Nechetkie modeli dlya ekspertnyh system v SAPR. M.: Energoatomizdat, 1991. 136 s.
8. **Leonenkov A.V.** Nechetkoe modelirovanie v srede Matlab i fuzzyTECH. SPb.: BHV-Sankt-Peterburg, 2003. 736 s.
9. **Karambirov S.N.** Novye podhody v modelirovanii i optimizatsii truboprovodnyh. Osnovy, kontseptsii, metody. Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2012. 355 c.
10. **Karambirov S.N., Burkova Yu.G.** Analiz i cintež slozhnyh inženernykh system s primeneniem sovremennyh matematicheskikh metodov: Monografiya. Izdatel'stvo RGAU-MSHA, 2016. 193 s.
11. **Zade L.** Ponyatie lingvisticheskoy peremennoj i ego primenenie k ponyatiyu priblizhennyh reshenij. M.: Mir, 1976. 166 s.

The material was received at the editorial office
05.04.2017

Information about the authors

Burkova Julia Gennadjevna, candidate of technical sciences, associate professor of the chair of informational technologies in building, FSBEI HE RGAU-MAA named after C.A. Timiryazev; 127550, Moscow, ul. Bol'shaya Akademicheskaya, 44; tel.: 8(499)153-97-66; e-mail: burkova.msuee@mail.ru

Sokolov Andrey Ljvovich, candidate of technical sciences, senior researcher, associate professor of the chair of informational technologies in building, FSBEI HE RGAU-MAA named after C.A. Timiryazev; 127550, Moscow, ul. Bol'shaya Akademicheskaya, 44; tel.: 8(499)153-97-66; e-mail: andrey.sokolov2014@yandex.ru