

ОБОСНОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И СОСТАВА СИСТЕМ ВОДООЧИСТКИ НА ОСНОВЕ ОЦЕНКИ УРОВНЯ АВТОМАТИЗАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

В. Н. Штепа¹, Н. А. Заец², О. Н. Прокопеня³, А. Н. Желновач⁴

¹ К. т. н., доцент, доцент кафедры высшей математики и информационных технологий Полесского государственного университета, Пинск, Беларусь, e-mail: shns1981@gmail.com

² К. т. н., доцент, доцент кафедры автоматики и робототехнических систем им. акад. И. И. Мартыненко Национального университета биоресурсов и природопользования Украины, Киев, Украина

³ К. т. н., доцент, заведующий кафедрой автоматизации технологических процессов и производств Брестского государственного технического университета, Брест, Беларусь

⁴ К. т. н., доцент, доцент кафедры экологии Харьковского национального автомобильно-дорожного университета, Харьков, Украина

Реферат

Исследована зависимость эффективности работы системы водоочистки от уровня автоматизации отдельных подсистем. Исследование эффективности проводилось методом экспертных оценок для реальных систем из различных отраслей промышленности. Установлено, что отдельные подсистемы оказывают различное влияние на качество очистки сточных вод. При этом эффективность работы системы очистки существенно зависит от взаимного влияния отдельных подсистем, что необходимо учитывать при выборе структуры и состава системы автоматизации.

Ключевые слова: эффективность водоочистки, подсистема, качество очистки сточных вод, автоматизация.

SUBSTANTIATION OF STRUCTURE AND COMPOSITION OF THE WATER TREATMENT SYSTEMS BASED ON ASSESSMENT OF AUTOMATION LEVEL OF TECHNOLOGICAL PROCESSES

V. M. Shtepa, N. A. Zaets, O. N. Prokopenya, A. N. Gelnovach

Abstract

The dependence of the efficiency of the water treatment system on the level of automation of individual subsystems is investigated. The study of efficiency was carried out by the method of expert evaluations for real systems from various branches of industry. It has been established that individual subsystems have a different effect on the quality of wastewater treatment. Moreover, the efficiency of the cleaning system depends significantly on the mutual influence of individual subsystems, which must be taken into account when choosing the structure and composition of the automation system.

Keywords: efficiency of water treatment, subsystem, quality of waste water treatment, automation.

Введение

Ключевыми параметрами качества сточных вод, контролируемые соответствующими органами, являются [1, 2]: азот аммонийный, биологическое потребление кислорода (БПК₅), водородный показатель (рН), взвешенные вещества, железо, нефтепродукты, нитриты, нитраты, химическое потребление кислорода (ХПК), фосфаты, хлориды, синтетические поверхностно-активные вещества (СПАВ), сульфаты. Химический анализ других показателей проводится при необходимости с учетом специфики предприятия – как правило, анализы дополняются несколькими показателями.

Концептуальные вопросы экологической безопасности в контексте построения систем водоочистки, рассматривались такими специалистами, как Ф.И. Гончаров, М. Ф. Реймерс, Г. А. Белявский, Ю. А. Израэль, И. П. Крайнов и другими [3, 4].

В рамках унификации международного законодательства была принята Директива 2000/60/ЕС Европарламента и Совета Европы, принципы для действий сообщества в области водной политики – Рамочная Директива о воде (Water Frame Directory, WFD) [5]: методология оценки экологического статуса в рамках 5-классовой системы. Важнейший принцип этой рамочной директивы ЕС вне зависимости от того, соответствует ли вода в водоеме нормативу или нет, заключается в том, что нельзя допускать ухудшения ее качества и нельзя допускать повышения объема сбросов загрязнителей в водоем; каждый новый сброс необходимо компенсировать снижением объема существующих.

Однако в документе не представлены подходы к выбору технологического оборудования водоочистки. Такой выбор рекомендуется выполнять согласно Best available technology (BAT), где, как и в Техническом кодексе установившейся практики (ТКП), нет методических обоснований оптимального выбора схем систем водоочистки и уровня их автоматизации [5].

Именно поэтому актуальной задачей является обоснование новых подходов к выбору структуры и состава систем водоочистки, а также функций, реализуемых системой автоматизации.

Постановка задачи

На основе оценки значимости автоматизируемых функций необходимо обосновать рациональный уровень их автоматизации и выбрать структуру системы управления, при которой обеспечивается взаимосвязь между отдельными подсистемами, обеспечивающая наиболее эффективное функционирование всей системы водоочистки.

Материалы и методика исследований

С учетом многофакторности и нелинейности изменения параметров сточных вод [2] можно рассматривать автоматическую систему управления (АСУ) технологическими процессами (ТП) водоочистки как эффективное средство согласования работы различных электро-технологических установок и повышения их эффективности [6], особенно при рисках возникновения чрезвычайных ситуаций (ЧС) [1]. Однако для определения комплексов таких технических средств, на которых необходимо акцентировать внимание при автоматизации, целесообразно провести предварительную оценку степени автоматизации существующих установок.

Показатель уровня автоматизации P определяется на основе декомпозиции всего управляющего процесса на отдельные функции управления. Для каждой i -ой функции задается коэффициент важности γ_i , который определяет относительную важность функции управления в общем процессе управления и оценивает требуемую степень автоматизации данной функции.

Коэффициент γ_i и оценка оптимального значения степени автоматизации $\beta_{\text{опт}}$ задаются с помощью экспертных оценок.

Перечень функций, для которых проведен такой анализ, выбран в соответствии с предложенным алгоритмом [2], а расчет степени автоматизации составлен на основе анализа действующей системы автоматизации объектов и инструкций оператора [6], характеризующих неавтоматизированную часть функций.

Например, для реализации функции «контроль ТП» системы водоочистки значение β определяется следующим образом:

$$\beta = \sum_{\gamma=1}^3 \frac{\beta_{\gamma} n_{\gamma}}{n_3} \quad (1)$$

Значения коэффициентов β_i и $\beta_{\text{юпт}}$ для этой реализации функции АСУ рационально принять соответственно 0,9 и 1.

Соответствие рассчитанной степени автоматизации его оптимальному значению:

$$S = \frac{\beta}{\beta_{\text{опт}}} \cdot 100\% \quad (2)$$

Аналогично определяется степень автоматизации для других функций действующих (проектируемых) технических средств систем водоочистки. В соответствии с методикой [2] и предложенным в ней алгоритмом выполнялись исследования отклонения существующего уровня автоматизации от оптимального для рассмотренных методов водоочистки (отдельно для каждого из них без интеграции в единый комплекс). На основе полученных результатов выполнялась комплексная экспертная оценка направлений структурного улучшения систем водоочистки.

Для репрезентативной оценки характеристик качества водосброса и выбора технических средств систем водоочистки выбрали предприятия из разных секторов реальной экономики:

- мясоперерабатывающая отрасль;
- деревоперерабатывающая отрасль;
- предприятие малой металлургии;
- производство продуктов бытовой химии (косметология).

Контролировались два параметра качества водосброса, которые характерны для всех выбранных предприятий: концентрация взвешенных частиц и концентрация азота аммонийного.

Задачей таких исследований систем водоочистки промышленных объектов являлось выявление типичных загрязнителей, залповое увеличение которых (нештатная ситуация) необходимо учесть при работе водоочистного оборудования.

Анализ показателей качества водосброса промышленных предприятий

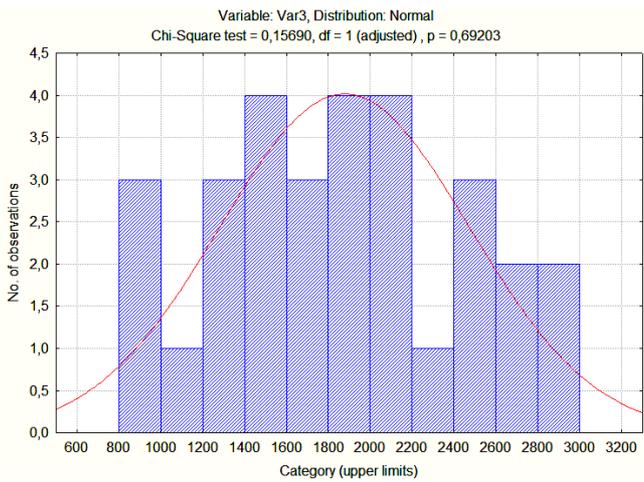
Оценка качественных показателей систем водоочистки промышленных объектов разных отраслей (мясоперерабатывающее предприятие, деревоперерабатывающее предприятие, предприятие малой металлургии и предприятие производства продукции бытовой химии) продемонстрировала разнородность загрязнителей, вызванную различным технологическим использованием водных ресурсов.

Наличие грубой погрешности оценивалось по критерию Стьюдента. При этом были систематизированы типичные загрязнители, которые характерны для указанных предприятий и касаются четырех объектов (табл. 1).

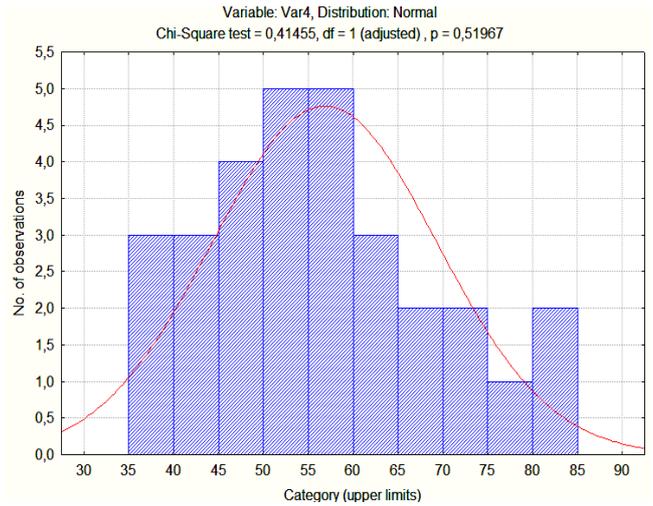
Таблица 1 – Значения загрязнителей для исследуемых предприятий (среднесуточные показатели в течение месяца)

№ п/п	Мясоперерабатывающее предприятие		Деревоперерабатывающее предприятие		Предприятие малой металлургии		Предприятие производства продукции бытовой химии	
	ВЧ, мг/л	АА, мг/л	ВЧ, мг/л	АА, мг/л	ВЧ, мг/л	АА, мг/л	ВЧ, мг/л	АА, мг/л
1	3455	37	1364	74	365	36	5334	123
2	2856	43	1456	67	257	37	5231	137
3	2647	51	1982	53	249	28	4129	67
4	2364	31	2465	60	153	29	6201	53
5	3871	34	1003	43	602	53	3257	102
6	1534	39	975	49	577	26	5790	78
7	1687	51	2471	82	421	33	2312	45
8	1789	62	2147	49	234	34	3023	67
9	2586	47	1972	51	678	38	4720	97
10	3456	42	1870	44	423	40	5673	80
11	2890	36	1783	39	499	43	3805	53
12	2987	37	987	57	206	38	4597	62
13	4237	43	1347	52	347	34	2156	58
14	3984	53	1463	37	346	49	1869	42
15	2041	57	1824	77	198	50	4687	59
16	1475	54	1798	82	265	37	2349	67
17	1243	37	2736	68	379	40	3574	98
18	3897	39	2135	58	425	45	4239	82
19	4712	42	2400	61	320	53	2017	74
20	3471	47	2178	53	389	37	1164	63
21	2147	50	1463	49	403	36	2497	58
22	1870	37	1783	42	306	34	5724	83
23	1400	52	896	59	256	59	4668	77
24	1563	42	2793	62	242	47	5780	117
25	987	38	1423	37	657	39	4237	64
26	3412	39	2879	73	432	27	3338	58
27	2789	47	2473	60	360	46	2786	67
28	2104	56	2140	49	257	45	2347	75
29	1902	48	2893	55	523	41	987	69
30	3477	36	1230	63	467	53	6476	43

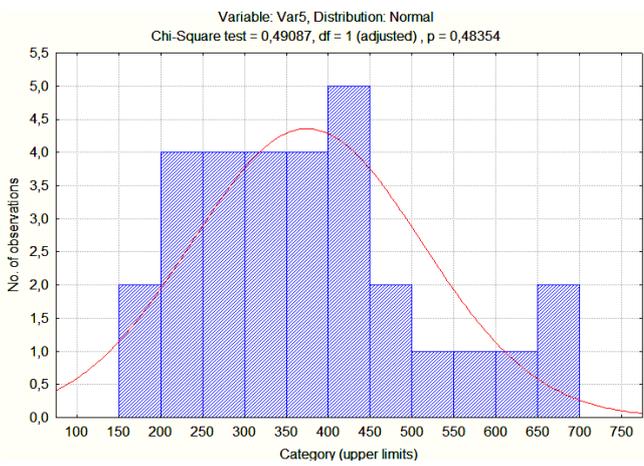
Примечание: ВЧ – взвешенные частицы, АА – азот аммонийный



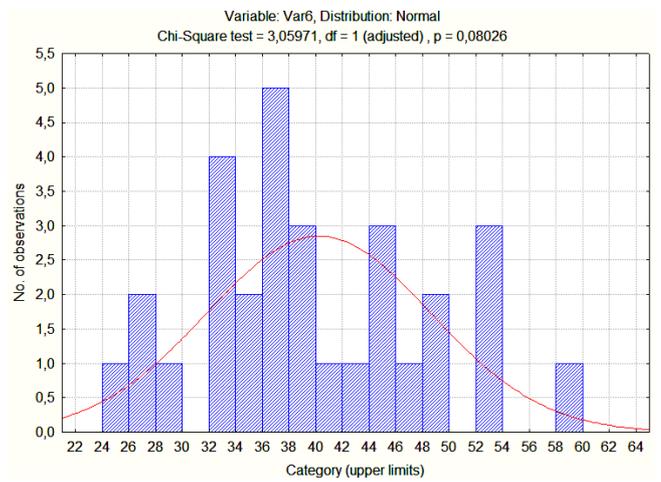
A)



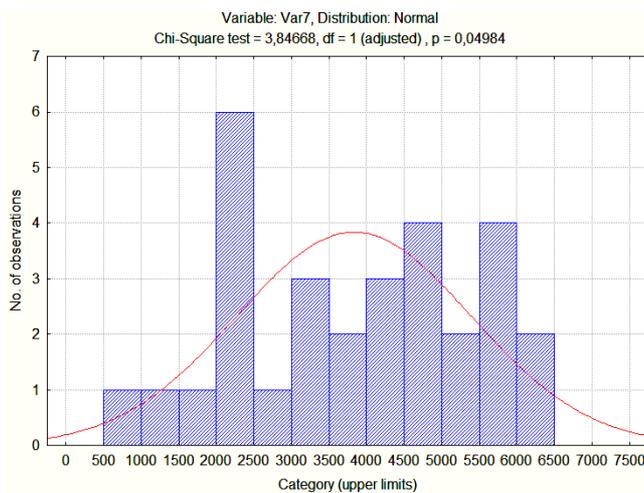
Б)



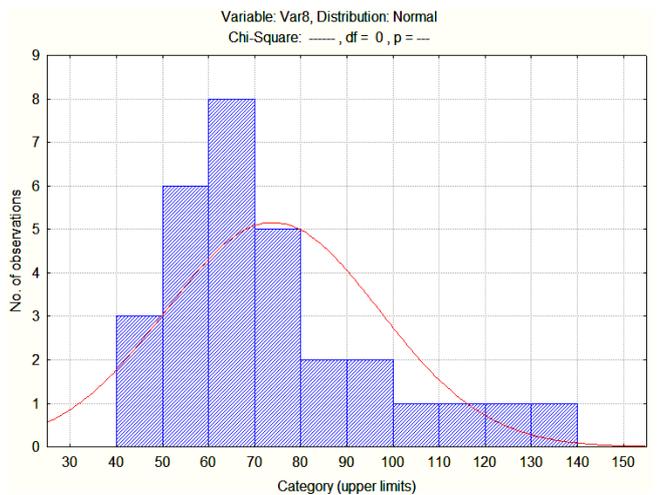
В)



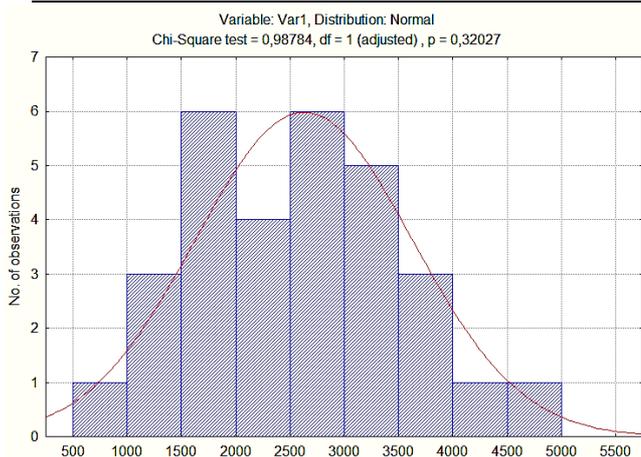
Г)



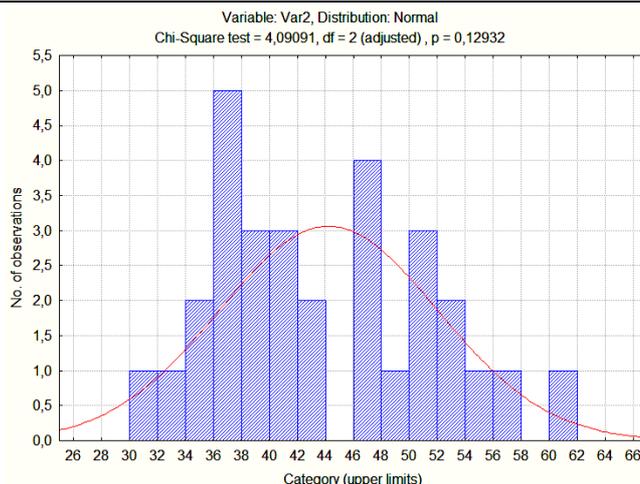
Д)



Е)



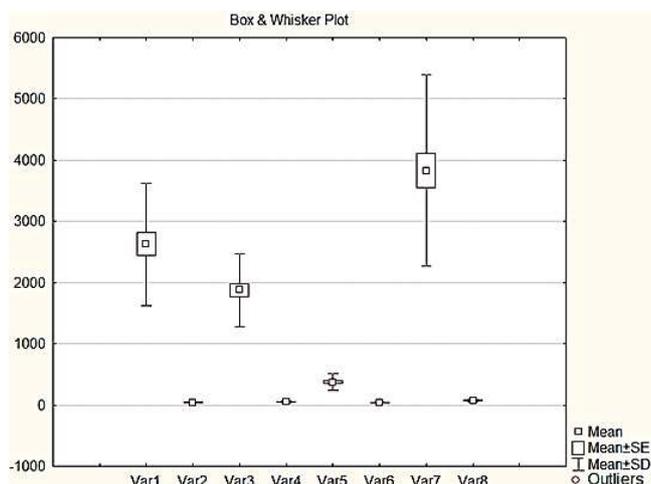
Ж)



З)

А – концентрация ВЧ на предприятии мясопереработки, Б – концентрация АА на предприятии мясопереработки, В – концентрация ВЧ на предприятии деревопереработки, Г – концентрация АА на предприятии деревопереработки, Д – концентрация ВЧ на предприятии малой металлургии, Е – концентрация АА на предприятии малой металлургии, Ж – концентрации ВЧ на предприятии бытовой химии, З – концентрация АА на предприятии бытовой химии

Рисунок 1 – Проверка на нормальность закона распределения выборок концентраций однопипных загрязнителей, полученных при анализе стоков предприятий



Var 1-8 – соответственно, концентрация ВЧ на предприятии мясопереработки, концентрация АА на предприятии мясопереработки, концентрация ВЧ на предприятии деревопереработки, концентрация АА на предприятии деревопереработки, концентрация ВЧ на предприятии малой металлургии, концентрация АА на предприятии малой металлургии, концентрация ВЧ на предприятии бытовой химии, концентрация АА на предприятии бытовой химии

Рисунок 2 – Оценка наличия статистических выбросов исследования выборок концентраций однопипных загрязнителей, полученных на реальных предприятиях (в качестве центральной точки выбрано среднее значение)

На основе анализа рисунка 2 можно утверждать, что выбросов, которые нужно было бы отсеивать, не обнаружено. В общем статистические исследования (см. рис. 1, 2) показали, что для анализа значений показателей качества поступающей на очистку сточной воды нужно применять непараметрические подходы и разрабатывать технологические решения, способные работать в условиях нелинейных и нестационарных изменений концентраций загрязнителей.

Дальнейший выбор методов очистки стоков промышленных объектов разных отраслей выполнялся на основе СНиП 2.04.02-84, результатов собственных исследований и научно-технических работ других авторов [1–4, 7–9].

Оценка уровня автоматизации технологических процессов систем водоочистки в контексте потенциальной оптимизации их структуры

Структура комбинированной электротехнологической системы водоочистки, уровень автоматизации которой оценивался, включает в себя (рис. 3) [8]: электрохимический комплект в составе рН-корректора и электрокоагулятора, электрохимический окислитель (оба с использованием ОРТА – оксид-рутений-титановых анодов), фильтр с плавающей пенополистирольной засыпкой, аэраторы и ёмкость-реактор.

На основе экспериментальных исследований по методике [8] были получены парные поагрегатные соответствия степени автоматизации ТП водоочистки их оптимальному значению (табл. 2).

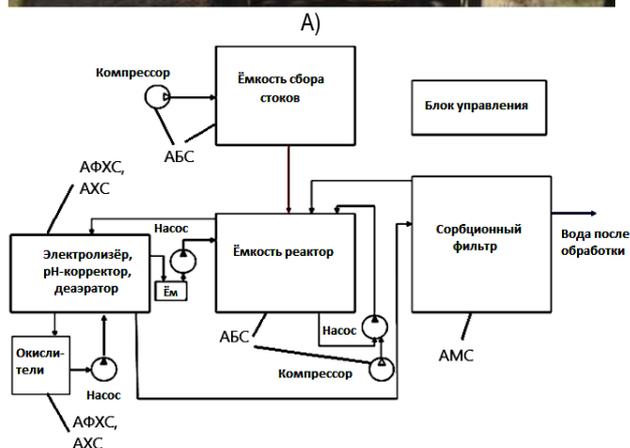
Анализируя полученные результаты, можно сказать, что процессы с незначительным количеством операций и, что самое главное, наличием датчиков, контролирующих технологические параметры в режиме реального времени (фильтрация и аэрация), имеют значительное приближение к оптимальному значению степени автоматизации. Те же процессы, которые характеризуются многофакторностью и многостадийностью, достаточно далеки от оптимального показателя степени автоматизации: электрокоагуляция, рН-коррекция и особенно окисление (процессы там происходят при аппаратно-стабилизированных гидродинамических и электрических параметрах).

При этом среднее отклонение фактической степени автоматизации модулей водоочистного оборудования от оптимальных значений пяти рассмотренных методов (см. табл. 2) – 55,56%.

На основе расчета степени автоматизации единого комплекса электротехнических средств (см. рис. 3), включая выбранные блоки водоочистки, было установлено, что интегральное отклонение от оптимальных значений оказалось значительно ниже среднеарифметического по отдельным блокам и составляет 31,7%.

Это можно объяснить взаимным влиянием модулей. Компенсировать данное влияние бывает затруднительно по следующим причинам:

- связывание различных модулей водоочистки в один комплекс требует дополнительного использования средств контроля, однако во многих случаях датчиков с требуемыми параметрами просто не существует; например, между модулями «окислители» – «электролизер» (выполняет функции электрокоагулятора) надо проводить измерения БПК₅ с быстродействием не менее 1,5 секунды и периодом 25 секунд, а таких измерительных средств промышленностью не выпускается (даже для лабораторного использования);



Б)

АФХС – агрегат физико-химического способа, АХС – агрегат химического способа, АМС – агрегат механического способа, АБС – агрегат биологического способа

А – внешний вид, Б – структурная схема системы водоочистки

Рисунок 3 – Комбинированная система водоочистки с реализацией разных способов удаления загрязнителей

Таблица 2 – Отклонение фактической степени автоматизации модулей комбинированной системы водоочистки от оптимальных значений (с учетом выполнения заданных ТП одним технологическим узлом)

Название оборудования водоочистки	Соответствие степени автоматизации оптимальному значению, S
Электрокоагуляция	54,3%
Аэрация	64,6%
Фильтрация	71,3%
Электрохимическое окисления	34,2%
Электрохимическая рН-коррекция	53,4%

- практически полное отсутствие методической базы для анализа взаимного влияния различных способов удаления загрязнителей из водных растворов в промышленных условиях (особенно в режиме реального времени).

Имитационный статистический анализ также выявил неодинаковое влияние связей между различными модулями. При такой оценке условно менялось количество эффективных (промышленно выпускаемых) датчиков – для определения влияния связей на эффективность автоматизации.

Установлено, что максимальное влияние на интегральный критерий оценки эффективности автоматизации предоставляют связи между блоками со значительной электро-технологической интенсификацией ТП, где необходима оперативная передача информации на блок управления с согласованием режимных параметров (связи «рН-коррекция – окисление», «рН-коррекция – фильтрация »).

Анализируя полученные результаты, можно прийти к выводу, что системы водоочистки представляют собой сложные многопараметрические объекты, при функционировании которых в режиме реального времени возникает задача координации работы управляемых подсистем. Решением данной задачи является определение способа взаимодействия подсистем, при котором управления, оптимальные по критериям экологической эффективности для каждой из подсистем, являются оптимальными по общему критерию для процесса в целом.

Задача является еще более сложной, если критерий оптимизации помимо качества очистки учитывает также энергоэффективность системы [6].

Заключение

На основе анализа эффективности автоматизации существующих систем водоочистки установлено, что общий эффект от автоматизации не является простой суммой эффектов от автоматизации отдельных подсистем и может быть существенно ниже. Это можно объяснить взаимным влиянием подсистем, которое не всегда в должной степени учитывается. При этом влияние отдельных подсистем также неодинаково.

В частности, среднее значение фактической эффективности автоматизации модулей водоочистного оборудования относительно оптимальных значений для рассмотренных пяти технологических решений (аэрация, фильтрация, электрокоагуляция, электрохимическое окисление и рН-коррекция) составляет 55,56%, в то время как для единого комплекса электротехнических средств (системы водоочистки в целом) оно оказалось значительно ниже (31,7%).

Таким образом, выбор структуры и состава системы управления процессом водоочистки должен осуществляться на основе анализа эффективности автоматизации отдельных подсистем с учетом возможности организации тесной взаимосвязи между отдельными подсистемами. Для этого может потребоваться дополнительная разработка измерительных комплексов, способных работать в промышленных условиях на реальных объектах водоотведения в режиме реального времени.

При работе в нештатных ситуациях состав сточных вод может скачкообразно изменяться, что приведет к изменению влияния отдельных подсистем на качество водоочистки. Система управления должна обладать способностью самонастройки, т. е. относится к классу интеллектуальных систем. Перспективным направлением дальнейшего развития эффективных систем водоочистки может являться применение математических методов системного анализа с использованием, например, информационно-функциональных моделей.

Список цитированных источников

- Мазоренко, Д. І. Інженерна екологія сільськогосподарського виробництва / Д. І. Мазоренко, В. Г. Цапко, Ф. І. Гончаров – К. : Знання, 2006 – 376 с.
- Adav, S. Aerobic granular sludge: Recent advances / S. Adav, D. Lee, K. Show, J. Tay // *Biotechnology Advances*. – 2008. – № 26(5). – P. 411–423.
- Bolzonella, D. Anaerobic co-digestion of sludge with other organic wastes and phosphorus reclamation in wastewater treatment plants for biological nutrients removal / D. Bolzonella, P. Pavan, P. Battistoni, F. Cecchi // *Water Science & Technology*. – 2006. – № 53(12). – P. 177.
- Kawamura, S. Integrated design and operation of water treatment facilities – 2nd ed. – New York : John Wiley, 2000. – Srivastava, V. C. Treatment of pulp and paper mill wastewaters with Polyaluminum chloride and bagasse fly ash, *Colloids and Surface* / V. C. Srivastava, I. D. Mall, I. M. Mishra // *A. Physicochemical Engineering Aspects*. – 2005. – Vol. 260. – P. 17–28.

5. Вертай, С. П. Обоснование структуры и заданий системы поддержки принятия решений обобщённой оценки перспективности инновационных технологий / С. П. Вертай, В. Н. Штепа // Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. – Серія : Техніка та енергетика АПК. – Київ: Видавничий центр НУБіП України, 2016. – Вип. 240. – С. 86–93.
 6. Штепа, В. Н. Концепция управления оборудованием водоочистки с учетом доминирующего загрязнителя / В. Н. Штепа, А. П. Левчук // Агропанорама: научно-технический журнал. – 2018. – № 5. – С. 33–38.
 7. Штепа, В. М. Обґрунтування та розробка критерію енергоефективності функціонування електротехнологічних систем водопідготовки / В. М. Штепа, Ф. І. Гончаров, М. А. Сироватка // Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. – Серія: Техніка та енергетика АПК: збірник наукових праць. – Київ : НУБіПУ, 2011. – Вип. 161. – С. 187–193.
 8. Штепа, В. М. Обґрунтування робочої міри ефективності електротехнологічної водоочистки / В. М. Штепа // Енергетика і автоматика. – 2018. – № 4. – С. 99–111. [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://journals.nubip.edu.ua/index.php/Energiya/article/view/11558>. – Дата доступу : 16.10.2019.
 9. Штепа, В. Н. Вероятностные нейронные сети в задачах управления комбинированными системами водоочистки / В. Н. Штепа, Н. А. Заец, О. Н. Прокопеня, Н. Н. Луцкая // Вестник Брестского государственного технического университета. – 2018. – № 2(110) : Водохозяйственное строительство, теплоэнергетика и геоэкология. – С. 88–90.
- References**
1. Mazorenko, D. I. Inzhenerna ekologiya sil'skogospodars'kogo virobництва / D. I. Mazorenko, V. G. Capko, F. I. Goncharov – K. : Znannya, 2006 – 376 s.
 2. Adav, S. Aerobic granular sludge: Recent advances / S. Adav, D. Lee, K. Show, J. Tay // Biotechnology Advances. – 2008. – № 26(5). – P. 411–423.
 3. Bolzonella, D. Anaerobic co-digestion of sludge with other organic wastes and phosphorus reclamation in wastewater treatment plants for biological nutrients removal / D. Bolzonella, P. Pavan, P. Battistoni, F. Cecchi // Water Science & Technology. – 2006. – № 53(12). – P. 177.
 4. Kawamura, S. Integrated design and operation of water treatment facilities – 2nd ed. – New York : John Wiley, 2000. Srivastava, V. C. Treatment of pulp and paper mill wastewaters with Polyaluminium chloride and bagasse fly ash, Colloids and Surface / V. C. Srivastava, I. D. Mall, I. M. Mishra // A. Physicochemical Engineering Aspects. – 2005. – Vol. 260. – R. 17–28.
 5. Vertaj, S. P. Obosnovanie struktury i zadaniy sistemy podderzhki prinyatiya reshenij obobshchyonnoj ocenki perspektivnosti innovacionnyh tekhnologij / S. P. Vertaj, V. N. SHtepa // Naukovij visnik Nacional'nogo universitetu bioresursiv i prirodokoristuvannya Ukraini. – Seriya : Tekhnika ta energetika APK. – Kiiv: Vidavnichij centr NUBiP Ukraini, 2016. – Vip. 240. – S. 86–93.
 6. SHtepa, V. N. Koncepciya upravleniya oborudovaniem vodoochistki s uchetom dominiruyushchego zagryaznitelya / V. N. SHtepa, A. P. Levchuk // Agropanorama: nauchno-tekhnicheskij zhurnal. – 2018. – № 5. – S. 33–38.
 7. SHtepa, V. M. Obgruntuvannya ta rozrobka kriteriyu energoeftivnosti funkcionuvannya elektrotekhnologichnih sistem vodopidgotovki / V. M. SHtepa, F. I. Goncharov, M. A. Sirovatka // Naukovij visnik Nacional'nogo universitetu bioresursiv i prirodokoristuvannya Ukraini. – Seriya: Tekhnika ta energetika APK: zbirnik naukovih prac'. – Kiiv : NUBiPU, 2011. – Vip. 161. – S. 187–193.
 8. SHtepa, V. M. Obgruntuvannya robochoi miri efekktivnosti elektrotekhnologichnoi vodoochistki / V. M. SHtepa // Energetika i avtomatika. – 2018. – № 4. – S. 99–111. [Elektronnij resurs]. – Rezhim dostupu : <http://journals.nubip.edu.ua/index.php/Energiya/article/view/11558>. – Data dostupu : 16.10.2019.
 9. SHtepa, V. N. Veroyatnostnye nejronnye seti v zadachah upravleniya kombinirovannymi sistemami vodoochistki / V. N. SHtepa, N. A. Zaec, O. N. Prokopenya, N. N. Luckaya // Vestnik Brestskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. – 2018. – № 2 (110) : Vodohozyajstvennoe stroitel'stvo, teploenergetika i geoekologiya. – S. 88–90.

Материал поступил в редакцию 23.03.2020