

УДК 681.5

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА ДИАГНОСТИКИ И УПРАВЛЕНИЯ РЕЖИМАМИ РАБОТЫ НАСОСНОГО КОМПЛЕКСА ПРИ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ПРОЦЕССАХ

А. Г. Лютов¹, М. Б. Новоженин²

¹lutov1@mail.ru, ²novozhenin.maxim@yandex.ru

ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет» (УГАТУ)

Поступила в редакцию 23.07.2018

Аннотация. Рассмотрены вопросы построения автоматизированной системы диагностики и управления режимами работы насосного комплекса при нестационарных процессах. Предложена блок-схема алгоритма работы автоматизированной системы. Рассмотрена процедура настройки нейронной сети для нахождения кавитационного объема при диагностике нестационарного режима. Предложена схема use-case модели взаимодействия оператора и системы диагностики и управления режимами работы насосного комплекса. Использование предложенной автоматизированной системы позволяет обеспечить выбор безкавитационных режимов работы насосного комплекса.

Ключевые слова: насосный комплекс; нестационарные режимы; кавитация; центробежный насос; автоматизированная система; диагностика режима; интеллектуальное управление; прецедент.

ВВЕДЕНИЕ

При эксплуатации насосных комплексов (НК), широко применяемых в различных отраслях промышленности и народного хозяйства, часто происходит изменение режима их работы из-за воздействия различного рода возмущающих факторов и возникновения нестационарных режимов, при которых появляются такие явления, как кавитация, гидравлический удар и автоколебания, что ведет к уменьшению КПД и срока службы оборудования. Нестационарные процессы при эксплуатации НК приводят к изменению режима его работы, нарушению сплошности потока жидкости и могут приводить к выкрашиванию металла и эрозионному износу элементов НК. Диагностика и учет при управлении НК таких нестационарных процессов на практике весьма затруднительны вследствие отсутствия системного подхода к диагностике и управлению режимами работы НК. Известные ме-

тоды не позволяют диагностировать режим достаточно определенно, а могут лишь оценить принадлежность к режиму по косвенным параметрам. Среди нестационарных процессов наибольшую опасность для НК представляет кавитация.

В настоящее время широкое распространение получили автоматизированные НК с частотно-регулируемыми центробежными насосами [1, 2], которые позволяют обеспечить устранение нестационарных процессов за счет возможности плавного регулирования частоты вращения насоса с помощью частотного регулятора.

При этом наиболее целесообразным путем обеспечения эффективного управления режимами работы НК в условиях возникновения нестационарных процессов является построение комплексной интегрированной системы диагностики и управления (ДиУ) на основе новых подходов с использованием интеллектуальных технологий.

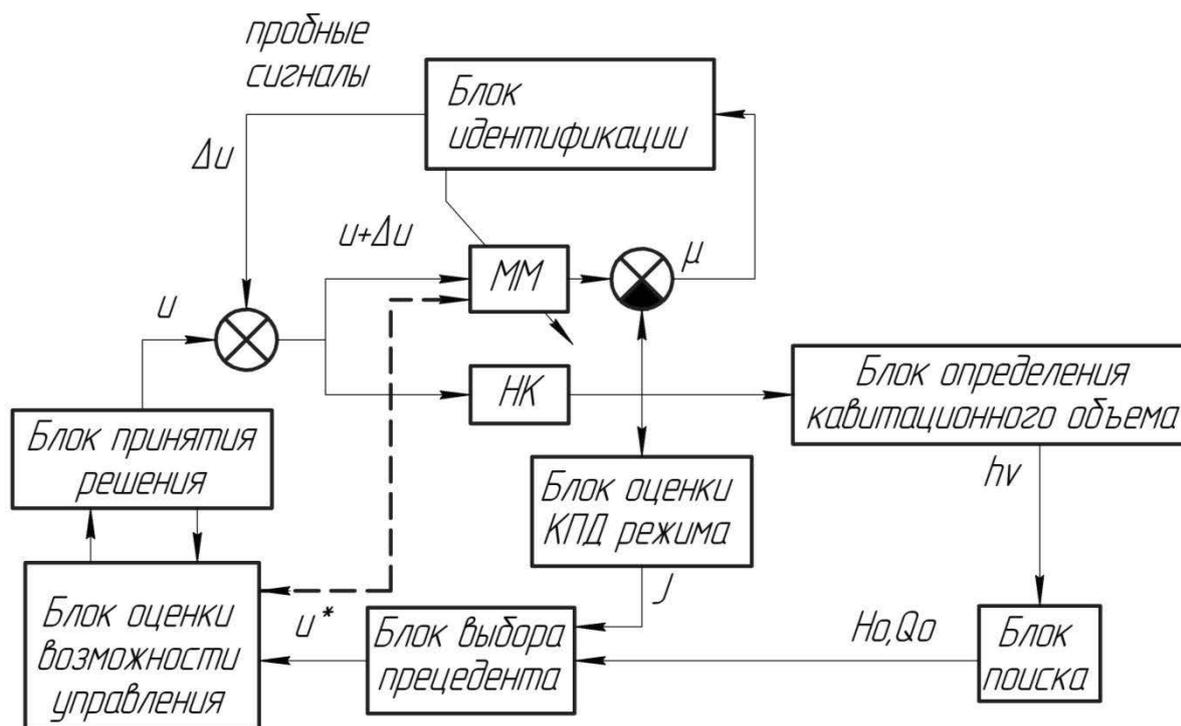


Рис. 1. Структурная схема автоматизированной системы диагностики и управления режимами работы насосного комплекса

ПРЕДЛАГАЕМЫЙ ПОДХОД

Структура автоматизированной системы ДиУ режимами работы НК представлена на рис. 1.

Задачами системы являются диагностика нестационарного режима и выбор решения по допустимому изменению режима работы НК, обеспечивающего отсутствие кавитации при максимальном возможном в данных условиях значении КПД.

В основе структуры находится блок объекта управления (ОУ) – насосного комплекса (НК) и его математической модели (ММ). Используемая ММ отражает режим работы НК на основе подобия режимов работы центробежного и поршневого насосов [3].

В рассматриваемой системе ММ настраивается на режим работы НК и подвергается тестированию по управляющему воздействию. Настройка ММ производится после определения значения интегрального критерия J (если интегральный критерий имеет очень малое значение до 3%, то настройка (идентификация) ММ не производится). Для

обеспечения процедуры идентификации ММ производится подача дополнительного управляющего воздействия Δu , которое суммируется с рабочим сигналом u НК.

Дальнейшее описание связано с двумя состояниями НК – предыдущим ($\tau - 1$) и текущим τ . Для диагностики и управления режимами работы сначала необходимо произвести сверку текущего режима работы ОУ во время τ и режима в момент ($\tau - 1$). Проверка также осуществляется с помощью интегрального критерия J . При $J > 3$ необходимо проведение диагностики режима работы НК и в зависимости от результатов возможно формирование следующих выводов:

– величина кавитационного объема h_v в τ больше, чем при ($\tau - 1$). Это свидетельствует об отсутствии кавитации. Значение управляющего воздействия u в данном случае не меняется.

– величина кавитационного объема h_v при τ меньше, чем при ($\tau - 1$). Кавитация присутствует. Необходимо изменение управляющего воздействия u .

АЛГОРИТМ РАБОТЫ СИСТЕМЫ ДИАГНОСТИКИ И УПРАВЛЕНИЯ

Блок-схема алгоритма работа системы ДиУ режимами работы НК представлена на рис. 3.

Данный алгоритм укрупненно состоит из следующих этапов:

- запуск автоматизированной системы при изменении параметров НК более чем на 3% при отсутствии изменения управляющих воздействий;

- подача тестового управляющего воздействия на НК и ММ и применение интегрального критерия для сравнения разницы давлений (объектного и модельного);

- если интегральный критерий очень мал – то классифицировать как рабочий режим; если значительный – то произвести более глубокую классификацию;

- при значительном интегральном критерии подбирается такой набор управляющих воздействий для ММ, чтобы снизить критерий до нуля (выход с помощью ММ на объектный режим, который выполняется с помощью обратной модели);

- как только критерий снижен, производится классификация объектного режима работы с помощью прецедентных диаграмм, построенная на нейронной сети;

- если известен режим работы, подбирается более подходящий прецедент с помощью диаграмм и установленных ограничений, или выдается решение о невозможности применения такого прецедента. Выбор прецедента проводится с помощью метода возможных направлений, критериев экономичности и безкавитационности;

- тестируется прецедент на ММ и, в случае его пригодности (согласно интегральному критерию), применяется на НК.

Данный алгоритм можно условно разделить на две части, первая из которых (1–3) связана с настройкой ММ для дальнейшего использования, а вторая (4–10) – непосредственная работа со средствами диагностики и управления режимами работы на основе интеллектуальных средств.

Для эффективной работы экспертных средств необходима организация человеко-машинного интерфейса (HMI), в качестве которого может выступать SCADA-система.

ПРИМЕНЕНИЕ ПРЕЦЕДЕНТНОГО ПОДХОДА В СИСТЕМЕ ДиУ РЕЖИМАМИ РАБОТЫ НК

В основе автоматизированной системы ДиУ режимами работы НК удобно использовать прецеденты – вектора данных, включающий в себя информацию о текущем состоянии объекта, возможных стратегиях управления, и последствиях принимаемых стратегий.

В соответствии с представленным алгоритмом работы системы ДиУ применение прецедентного подхода состоит в выполнении последовательности следующих операций:

1. Анализ объекта управления. На этом этапе производится сбор информации об НК как ОУ, его количественных и качественных характеристиках, рабочих характеристиках насосного оборудования.

2. Выбор структуры ММ. Для дальнейшего использования ММ необходима ее настройка.

3. Настройка ММ по значению ошибки. Это значение получается в результате сравнения выходных характеристик с ОУ и ММ. Величина ошибки учитывается в процессе настройки ММ, в том числе и с использованием пробных сигналов.

4. Определение текущего значения КПД на основании кривых распределения КПД НК (рис. 2). Данные кривые сохранены в базе знаний для насоса (обозначим данные значения как эталонные). Величина удаленности текущей рабочей точки от кривой с максимальным значением КПД обозначается через J (рис. 4, а). Пример определения значения J представлен на рис. 5.

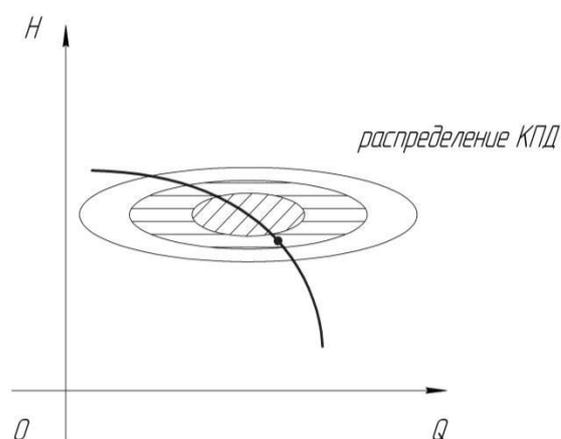


Рис. 2. Пример распределения областей КПД НК

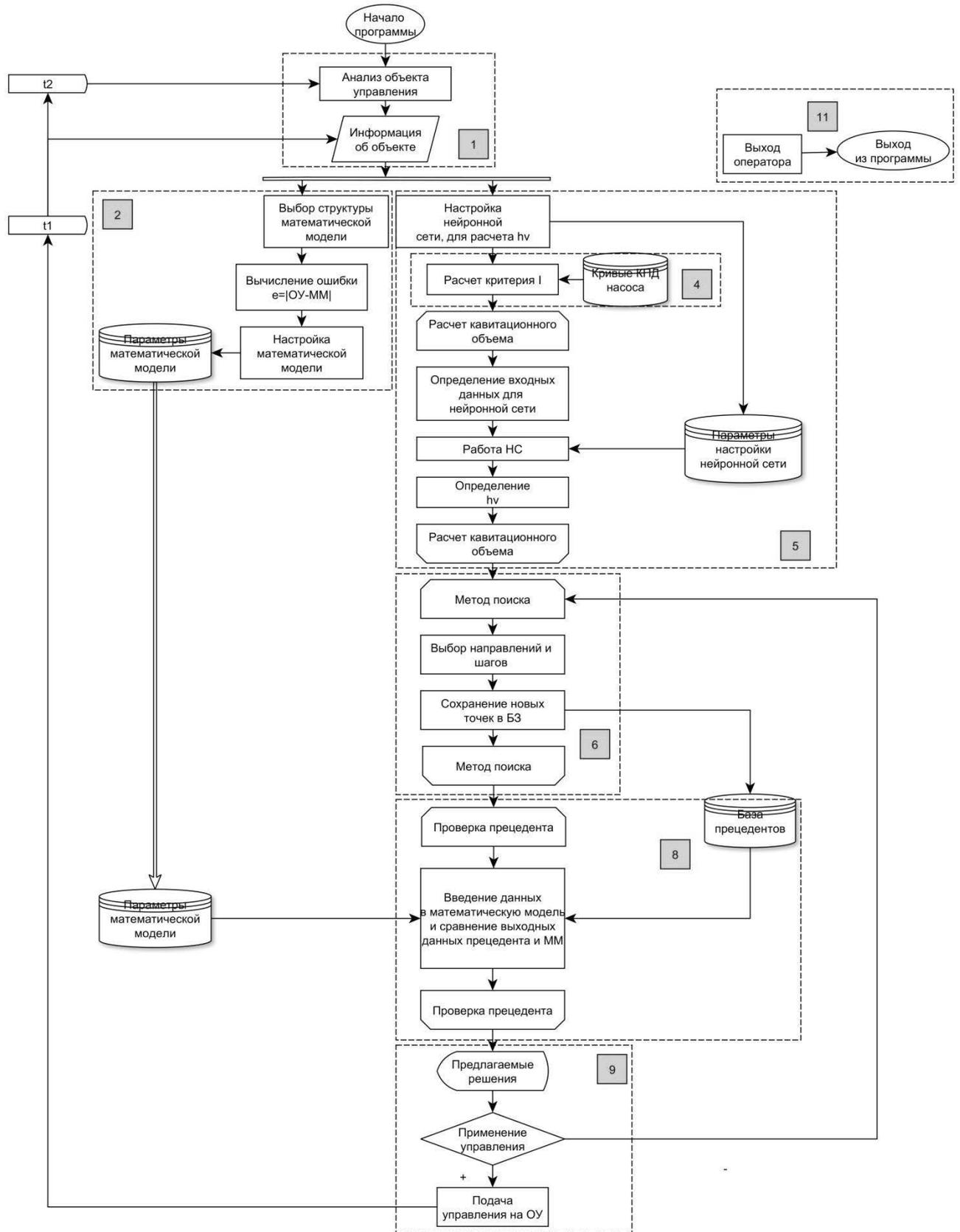


Рис. 3. Блок-схема алгоритма работы автоматизированной системы ДиУ режимами работы НК

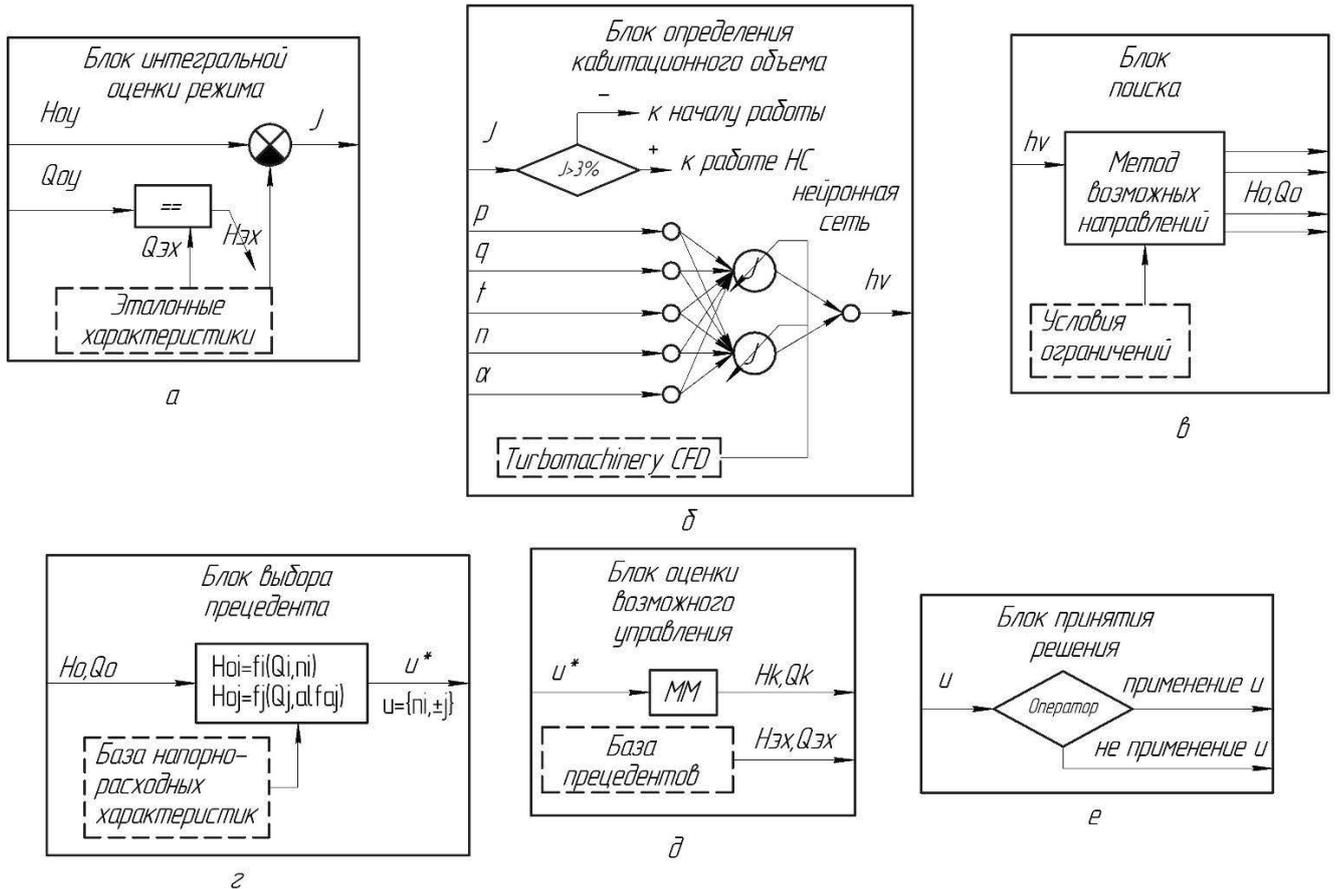


Рис. 4. Структура блоков алгоритма работы автоматизированной системы ДиУ режимами работы НК:
 а – блок интегральной оценки режима; б – блок определения кавитационного объема;
 в – блок поиска; г – блок выбора прецедента; д – блок оценки возможного управления;
 е – блок принятия решения

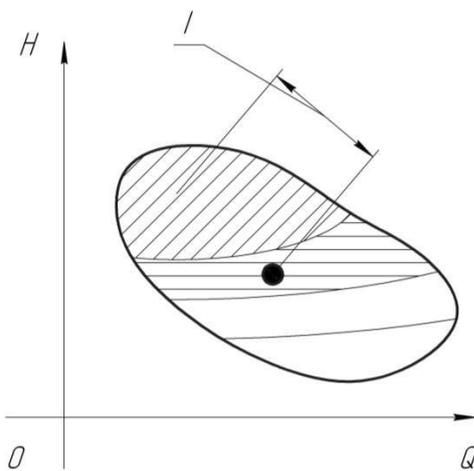


Рис. 5. Пример определения значения интегрального критерия на значении разности текущего и требуемого КПД

5. Так как значение КПД не характеризует режим работы однозначно, необходима проверка рабочей точки на наличие кавитации (рис. 6). Это производится с помощью

нейронной сети, выходным значением которой является кавитационный объем, а входными – характеристики НК (рис. 4, б).

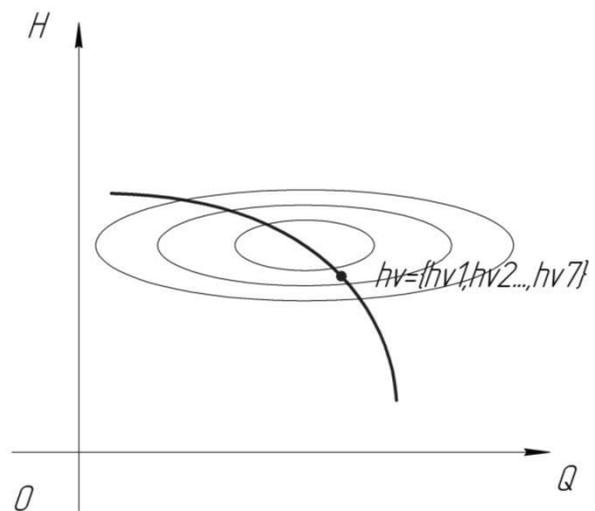


Рис. 6. Пример определения текущего значения кавитационного объема h_v для рабочей точки

6. С помощью метода возможных направлений [4] выполняется поиск новых рабочих точек (рис. 4, в). Метод возможных направлений является одним из вариантов для поиска новых рабочих точек (рис. 7). Кроме этого, в качестве эффективного метода может быть использован метод поиска на основе генетических алгоритмов.

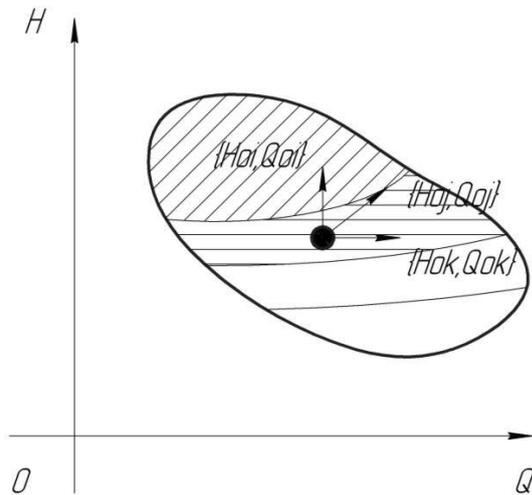


Рис. 7. Пример выбора новых рабочих точек с помощью метода возможных направлений

7. Объединение имеющихся данных в прецедент. Прецедентом в данном случае является взаимосвязь данных, которая наиболее полно отражает режим работы в данной рабочей точке (рис. 8). Она включает в себя напор H , расход Q , величины управляющих воздействий: для частоты вращения n и угла задвижки на перепускном канале α , величину кавитационного объема h_v и величину распределения КПД I (рис. 4, з).

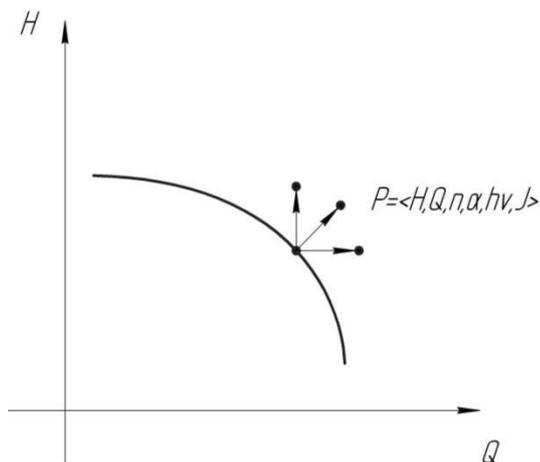


Рис. 8. Запись данных в прецедент

8. Производится проверка прецедента на заранее настроенной ММ (рис. 4, д). Проверка производится следующим образом: прецедент условно разделяется на две части, первая часть подается на вход ММ, а вторая часть сравнивается с выходными значениями ММ (рис. 9).

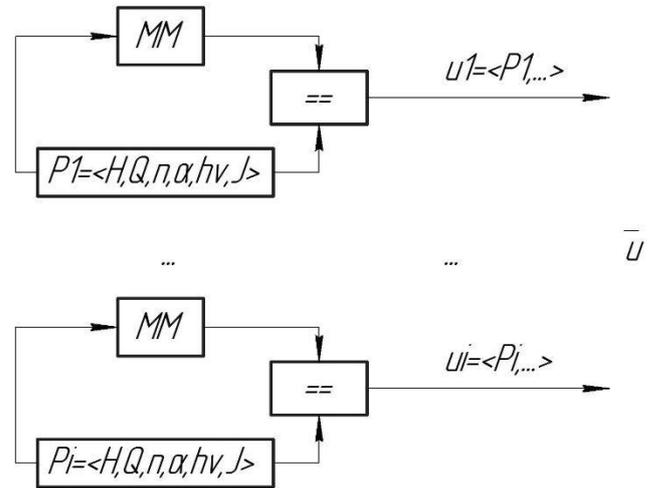


Рис. 9. Метод проверки прецедента

9. Формирование управляющего воздействия и его вывод на панель оператора (рис. 4, е).

10. Возврат к пункту 4.

11. Завершение сеанса работы.

Таким образом, рассмотренная блок-схема (рис. 3) определяет последовательность операций системы ДиУ режимов работы НК.

СБОР ДАННЫХ ПЕРЕД ЗАПУСКОМ В РАБОТУ СИСТЕМЫ ДИАГНОСТИКИ И УПРАВЛЕНИЯ РЕЖИМАМИ РАБОТЫ НАСОСНОГО КОМПЛЕКСА

Перед началом работы экспертных средств системы ДиУ необходимо иметь в наличии следующий набор инструментов:

- 1) математическую модель;
- 2) прецедентные диаграммы.

Математическая модель определяет текущий режим работы НК и характер переходного процесса, построенная на основе подобия режима работы центробежного и поршневого насоса [3].

Процесс подготовки ММ с целью ее дальнейшего использования для контроля режима работы НК состоит в выполнении следующих операций:

– сбор статических параметров НК, в том числе максимально возможного угла задвижки на перепускном канале (при ее наличии) (производится с помощью НК с периодичностью в 1 день для актуализации ММ);

– расчет динамических параметров, таких как расход, давление на входе и выходе, скорость движения жидкости;

– определение наличия нестационарного процесса (кавитации) на основе значения давления на входе в сравнении с давлением насыщенных паров жидкости;

– определение наличия нестационарного процесса (кавитации) на основе значения давления на выходе (напора) в сравнении кавитационного запаса, соответствующего этому напору, со значением кавитационной характеристики (рис. 10);

– классификация режима (на наличие кавитации).

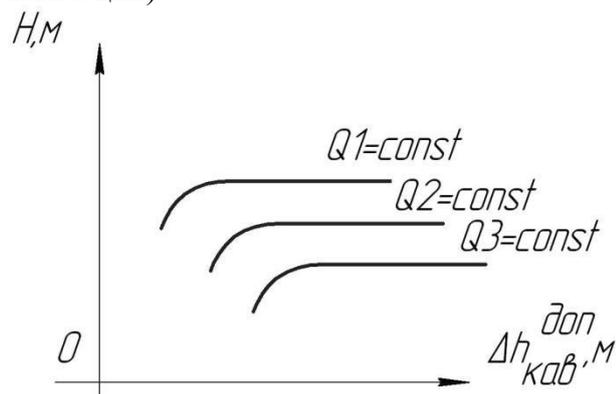


Рис. 10. Пример набора кавитационных характеристик НК, получаемых в результате изменения режима работы

Для учета измеряемых информационных параметров вводятся *прецедентные диаграммы* (рис. 11), которые представляют собой массив данных в пространстве состояний, связывающий частоту вращения, давление, вязкость, плотность, температуру и другие информационные параметры с целью определения наличия кавитации.

Прецедентные диаграммы представляют собой инструмент, служащий для определения кавитации наряду с ММ. Создание базы знаний для прецедентных диаграмм происходит на основе моделирования в среде Turbomachinery CFD [5, 6].

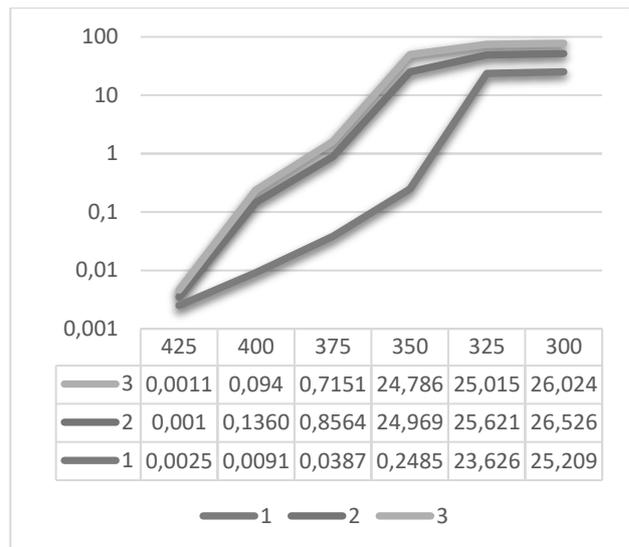


Рис. 11. Прецедентная диаграмма

ОБУЧЕНИЕ НЕЙРОННОЙ СЕТИ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ЭКСПЕРИМЕНТОВ В TURBOMACHINERY CFD

Прецедентная диаграмма получается в результате численного моделирования методом конечных элементов течения жидкости в центробежном насосе в программе Turbomachinery CFD. Динамика течения жидкости моделируется точно, в качестве оптимального количества точек было выбрано 7.

Рассмотрим результаты исследования [5] зависимости изменения кавитационного объема (величины высвобождаемого газа в процессе работы НК) на примере изменения:

- точечного расхода;
- исходного давления.

По результатам практической реализации были выбраны следующие наборы прецедентных диаграмм:

- при исходных значениях давления 425 и 400 кР (рис. 12);
- при исходных значениях давления 375 и 350 кР (рис. 13);
- при исходных значениях давления 325 и 300 кР (рис. 14).

В результате значения кавитационного объема для каждого из представленных случаев изменяются по нелинейному закону, определение которого является затруднительной задачей не только для отдельного исходного набора значений.

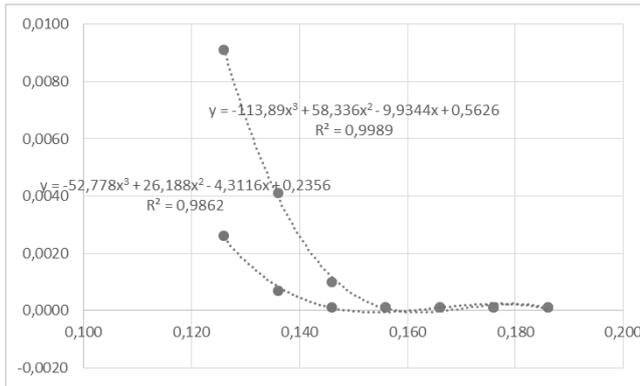


Рис. 12. Кривые кавитационного объема при давлении 425 и 400 кР

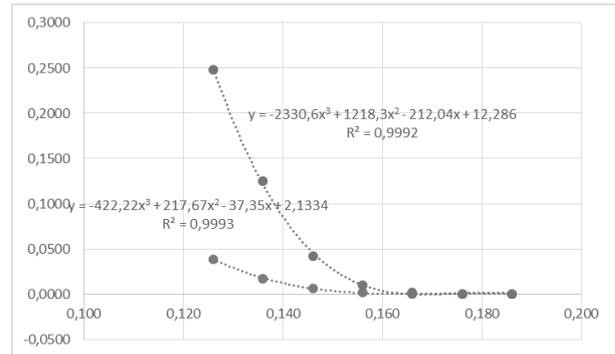


Рис. 13. Кривые кавитационного объема при давлении 375 и 350 кР

Нелинейные зависимости изменения кавитационного объема трудно аналитически определить по значениям давления.

Для аппроксимации полученных результатов и создания базы данных прецедентных диаграмм целесообразно воспользоваться нейросетевым инструментарием.

В пакете Statistica значения весов нейронов при различных структурах нейронных сетей будут выглядеть следующим образом (табл. 1):

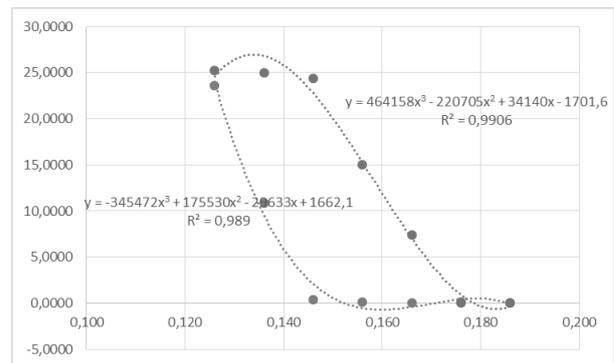


Рис. 14. Кривые кавитационного объема при давлении 325 и 300 кР

Таблица 1

Фрагмент результата настройки весов нейронной сети для поиска кавитационного объема

Весы (disser4 в disser4)										
	Соединения - 1.MLP 6-6-1	Значения весов - 1.MLP 6-6-1	Соединения - 2.MLP 6-5-1	Значения весов - 2.MLP 6-5-1	Соединения - 3.MLP 6-8-1	Значения весов - 3.MLP 6-8-1	Соединения - 4.MLP 6-8-1	Значения весов - 4.MLP 6-8-1	Соединения - 5.MLP 6-4-1	Значения весов - 5.MLP 6-4-1
1	Point --> скрытый нейрон 1	-2,8238	Point --> скрытый нейрон 1	-3,36933	Point --> скрытый нейрон 1	-4,0596	Point --> скрытый нейрон 1	3,0667	Point --> скрытый нейрон 1	6,5425
2	kP --> скрытый нейрон 1	-7,3379	kP --> скрытый нейрон 1	-5,54113	kP --> скрытый нейрон 1	-6,8864	kP --> скрытый нейрон 1	8,8828	kP --> скрытый нейрон 1	10,4670
3	FreqofRot --> скрытый нейрон 1	6,6435	FreqofRot --> скрытый нейрон 1	7,59491	FreqofRot --> скрытый нейрон 1	4,7168	FreqofRot --> скрытый нейрон 1	-8,3893	FreqofRot --> скрытый нейрон 1	-11,3327
4	T --> скрытый нейрон 1	2,4143	T --> скрытый нейрон 1	1,71782	T --> скрытый нейрон 1	-0,9555	T --> скрытый нейрон 1	-1,9006	T --> скрытый нейрон 1	-2,4092
5	v --> скрытый нейрон 1	-0,6751	v --> скрытый нейрон 1	0,25319	v --> скрытый нейрон 1	-1,6572	v --> скрытый нейрон 1	0,8792	v --> скрытый нейрон 1	1,2743
6	го --> скрытый нейрон 1	2,2351	го --> скрытый нейрон 1	1,48798	го --> скрытый нейрон 1	0,7849	го --> скрытый нейрон 1	-1,4971	го --> скрытый нейрон 1	-1,7372
7	Point --> скрытый нейрон 2	-0,5005	Point --> скрытый нейрон 2	1,15028	Point --> скрытый нейрон 2	0,6048	Point --> скрытый нейрон 2	1,6427	Point --> скрытый нейрон 2	7,7702
8	kP --> скрытый нейрон 2	-1,2934	kP --> скрытый нейрон 2	3,31115	kP --> скрытый нейрон 2	0,2243	kP --> скрытый нейрон 2	4,0552	kP --> скрытый нейрон 2	12,4119

Классификация режима с помощью прецедентных диаграмм:

- при наличии точек с кавитационным запасом (в диаграммах это процент высвободившегося газа) больше 3 – 2-й кавитационный режим;

- при отсутствии точек с кавитационным запасом больше 3 и наличием в пределах 1 – 3 – 1-й кавитационный режим;

- при отсутствии точек с кавитационным запасом больше 1 – безкавитационный режим.

НК допустимо эксплуатировать в 1-м кавитационном режиме, но это приводит к уменьшению КПД.

Определение разделения ролей между оператором и экспертной системой (рис. 15) можно реализовать с помощью use-case диаграммы, которое будет выглядеть следующим образом [7].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Интеграция и обеспечение взаимодействия между процессами диагностики и управления НК с использованием интеллектуальных технологий позволяет построить эффективную автоматизированную систему ДиУ НК.

Использование прецедентного подхода с использованием нейросетевого инструментария позволяет не только сохранять ранее принятые решения, вырабатывать текущие управляющие воздействия, но и формировать новые стратегии управления НК на основе ранее известных данных.

Использование предлагаемой системы диагностики и управления режимами работы насосного комплекса позволяет обеспечить поддержку принятия решений при управлении автоматизированными НК в условиях нестационарных процессов и устранение нежелательного явления кавитации.



Рис. 15. Use-case диаграмма работы оператора и экспертной системы

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Лезнов Б. С.** Энергосбережение и регулируемый привод в насосных и воздушных установках. М.: Энергоатомиздат, 2006. 360 с. [B. S. Leznov, *Energy saving and adjustable drive in pumping and blowing plants*, (in Russian). Moscow: Energoatomizdat, 2006.]
2. **Новоженин М. Б., Лютов А. Г., Озеров М. Ю.** Экспериментальное исследование режимов работы автоматизированного насосного комплекса при нестационарных процессах // Вестник ЮУрГУ. 2018. Т. 18, № 1. С. 110–116. [M. B. Novozhenin, A. G. Lutov, M. J. Ozerov, "Experimental study of the operation modes of the automated pumping complex for nonstationary processes" (in Russian), in *Vestnik JuUrGU*, vol. 18, no. 1, pp. 110-116, 2018.]
3. **Лютов А. Г., Новоженин М. Б., Хуснутдинов Д. З.** Метод диагностики насосного комплекса на основе моделирования режимов работы в условиях возникновения кавитации // Нефтегазовое дело. 2017. Т. 15. № 1. С. 160–164. [A. G. Lutov, M. B. Novozhenin, D. Z. Khusnutdinov, "The method of diagnostics of a pumping complex on the basis of modeling of operating modes in the conditions of occurrence of cavitation" (in Russian), in *Neftegazovoe delo*, vol. 15, no. 1, pp. 160-164, 2017.]
4. **Химмельблау Д.** Прикладное нелинейное программирование / Пер. с англ. И. Н. Быховской и Б. Т. Вавилова; Под ред. М. Л. Быховского. Москва: Мир, 1975. 534 с. [David Himmelblau, *Applied nonlinear programming* (in Russian). Moscow: Mir, 1975.]
5. **Лютов А. Г., Новоженин М. Б.** Моделирование и диагностика нестационарных режимов автоматизированных насосных комплексов // Вестник УГАТУ. 2018. Т. 22. № 1. С. 113–120. [A. G. Lutov, M. B. Novozhenin, "Modeling and diagnostics of non-stationary modes of automated pumping systems" (in Russian), in *Vestnik UGATU*, vol. 22, no. 1, pp. 113-120, 2018.]
6. **TCFD 17.10** - Manual.Э. URL: [https://www.cfdsupport.com/download/TCFD manual v17.10.pdf](https://www.cfdsupport.com/download/TCFD%20manual%20v17.10.pdf) (дата обращения: 23.07.2018) [*TCFD* (2018, 23 Jul.). *17.10 – Manual*[Online]. Available: [https://www.cfdsupport.com/download/TCFD-manual v17.10.pdf](https://www.cfdsupport.com/download/TCFD-manual%20v17.10.pdf)]
7. **Джарратано Дж., Райли Г.** Экспертные системы: принципы разработки и программирование. 4-е изд. / пер. с англ. М.: ООО «И. Д. Вильямс», 2007. 1152 с. [J. Jarratano, G. Riley, *Expert systems: principles of development and programming*. Moscow, ООО «I.D. Vil'yams», 2007.]

ОБ АВТОРАХ

ЛЮТОВ Алексей Германович, зав. каф. Автоматизации технологических процессов. Дипл. инж. электрон. техн. (УАИ, 1985). Д-р техн. наук по сист. анализу, упр. и обр. информ. (УГАТУ, 2005). Иссл. в обл. управления слож. техн. объектами.

НОВОЖЕНИН Максим Борисович, асп. каф. Автоматизации технологических процессов. Дипл. инженер (УГАТУ, 2011). Готовит дисс. о диагностике и управлении насосными комплексами при нестационарных режимах.

METADATA

Title: Automated diagnostic and control system works of the pump complex under non-stationary processes.

Authors: A.G. Lutov¹, M.B. Novozhenin²

Affiliation:

Ufa State Aviation Technical University (UGATU), Russia.

Email: ¹lutov1@mail.ru, ²novozhenin.maxim@yandex.ru

Language: Russian.

Source: Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), vol. 22, no. 3 (81), pp. 114-123, 2018. ISSN 2225-2789 (Online), ISSN 1992-6502 (Print).

Abstract: The questions of construction of the automated system of diagnostics and control of the operation modes of the pump complex under non-stationary processes are considered. A block diagram of the algorithm for the operation of an automated system is proposed. The procedure for setting up a neural network for finding the cavitation volume in the diagnostics of the nonstationary regime is considered. The scheme of use-case of interaction model of the operator and the system of diagnostics and control of the operating modes of the pump complex is proposed. The use of the proposed automated system makes it possible to provide a choice of unconditional operating modes of the pump complex.

Key words: pumping complex; nonstationary regimes; cavitation; centrifugal pump; automated system; diagnostics of the regime; intellectual management; precedent.

About authors:

LUTOV, Alexey Germanovich, Prof. Head of Dept. of Automation of Technological Processes, Dipl. Electronics Engineer (USATU, 1985). Dr. of Thec. Sci. (UGATU, 2005).

NOVOZHENIN, Maxim Borisovich, Postgrad. (PhD) Student, Dept. of Automation of Technological Processes, Dipl. Engineer of Automation of Technological Processes (UGATU, 2011).