

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО НАСОСНОГО КОМПЛЕКСА ПРИ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ПРОЦЕССАХ

М.Б. Новоженин¹, А.Г. Лютов¹, М.Ю. Озеров²

¹ Уфимский государственный авиационный технический университет, г. Уфа, Россия,

² ООО «Новая техника», г. Уфа, Россия

Насосные комплексы (НК) часто могут работать в условиях нестационарности, при которых появляются кавитация и автоколебания, уменьшается КПД и срок службы оборудования. Сложность определения наличия нестационарных процессов и автоматизированная диагностика НК в этих условиях обусловлена отсутствием четких информативных параметров, по которым можно однозначно классифицировать наличие данного процесса. В статье на примере реального промышленного НК произведен анализ данной проблемы, рассмотрены методы диагностики и управления режимами работы НК, определена зависимость нестационарных процессов от рабочих характеристик НК.

Ключевые слова: автоматизированный насосный комплекс, нестационарные процессы, кавитация, диагностика, частотное управление.

Введение

Насосные комплексы (НК), под которыми понимается насос (насосы) и прилегающие к нему участки трубопровода, широко применяются в различных отраслях промышленности и народного хозяйства. В настоящее время широкое распространение получили автоматизированные НК с частотно-регулируемыми центробежными насосами [1]. При этом НК часто функционируют в условиях нестационарности, при которых появляются такие явления, как кавитация 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. Наибольшую опасность для НК представляет кавитация. Кавитация ведет к выкрашиванию материала рабочего колеса и входного патрубка, к потере КПД установки и нарушениям в режиме функционирования НК. Диагностика таких нестационарных процессов затруднительна, так как отсутствуют четкие информативные параметры, по которым можно однозначно составить математическое описание режима работы, процедуры классификации и определить наличие данных процессов.

Появление нестационарных процессов при работе НК часто зависит от его конструктивных особенностей, поэтому изменение режимов функционирования целесообразно рассматривать на практических случаях, характеризующихся обобщенными условиями работы для определенного типа НК.

1. Структурная схема НК

В составе НК имеется два центробежных насоса (ЦН) – основной (рабочий) и резервный (вспомогательный) (рис. 1). Вода из накопительного резервуара подается во всасывающую линию к насосам и далее в приемный резервуар. На входе каждого из насосов стоит задвижка, которая обеспечивает аварийное перекрытие линии. Выходные трубопроводы насосов объединены в коллектор, на выходе которого также находится задвижка для регулировки рабочего режима.

Во время эксплуатации НК центробежный насос подвергался эрозионному износу, в связи с чем был произведен ряд технических мероприятий по обнаружению причин и устранению износа.

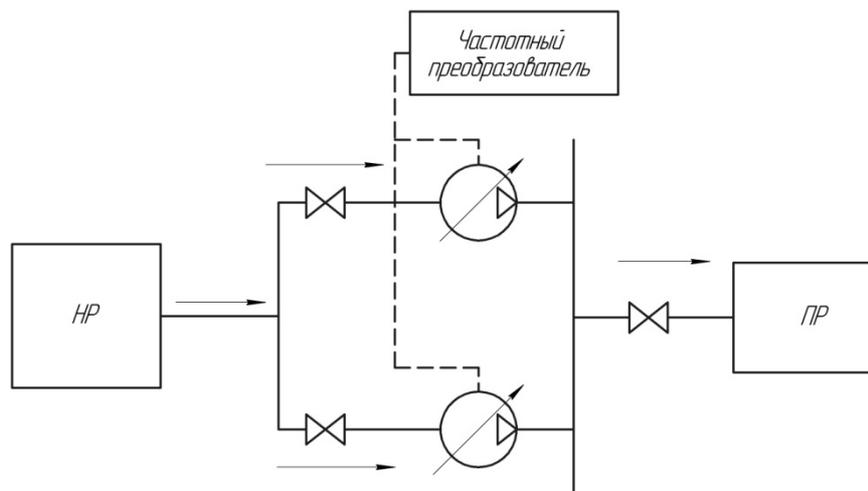


Рис. 1. Структурная схема НК

Изначально в качестве рабочего насоса использовался ЦН Wilo NL-125-200 (характеристики представлены в табл. 1), который эксплуатировался с декабря 2011 г. и подвергался следующим наблюдениям и изменениям:

- декабрь 2012 г. – фиксация кавитационных разрушений после 1767 ч наработки (насос работал по 1–2 ч в сутки), повышения шумовых параметров не наблюдалось, около 60 % поверхности рабочего колеса изношено;
- май 2013 г. – замена рабочего колеса, перемонтаж всасывающей линии с увеличением диаметра до 400 мм, смонтирован эксцентричный конфузор $\varnothing 400$ мм с переходом на $\varnothing 125$ мм;
- январь 2014 г. – через 500 ч работы рабочее колесо имело разрушения на глубине до 2 мм (при толщине лопатки 4 мм);
- апрель 2014 г. – произведены замеры режима работы насоса при измененном угле задвижки на выходе и номинальной частоте вращения, был выбран режим управления с помощью частотного регулятора $f = 50$ Гц;
- апрель 2015 г. – насос Wilo NL-125-200 был заменен ЦН Wilo NP-150-400.

Таким образом, при эксплуатации ЦН с декабря 2011 по апрель 2015 г. было заменено два рабочих колеса, однако кавитационные разрушения продолжались. Только замена насоса и корректировка рабочего режима способствовали устранению кавитации на регламентированном интервале регулирования.

2. Сравнительные характеристики насосов NP-150-400 и NL-125-200

Параметры эксплуатируемых насосов представлены в табл. 1

Таблица 1

Параметры насоса NP-150-400 и NL-125-200

Параметр	Значение	
	NL-125-200	NP-150-400
Расход (Capacity)	350 м ³ /ч	380 м ³ /ч
Напор (Head)	60 м	56,5 м
Плотность (Density)	1 г/см ³	
КПД (Pump Eff.)	81,1 %	85 %
Мощность в рабочей точке (Power at Duty Point)	72,7 кВт	70,8 кВт
Максимальная мощность (Max.Power)	88 кВт	80,2 кВт
Максимальный напор (Shut off Head)	64,5 м	63,3 м
Кавитационный запас (NPSHR)	5,72 м	4,3 м
Мощность двигателя (Motor Power)	90 кВт	90 кВт
Скорость вращения (Speed)	2975 об/мин	1480 об/мин
Частота сети (Frequency)	50 Гц	

Краткие сообщения

Напорно-расходные характеристики насосов NP-150-400 и NL-125-200 представлены на рис. 2. Насосы имеют следующие основные отличия:

- при одинаковых значениях напора и расхода КПД у второго насоса выше, т. е. рабочая область ограниченная минимально допустимым КПД;
- при малых значениях подачи второй насос имеет более крутую напорно-расходную характеристику, а первый – более пологую.

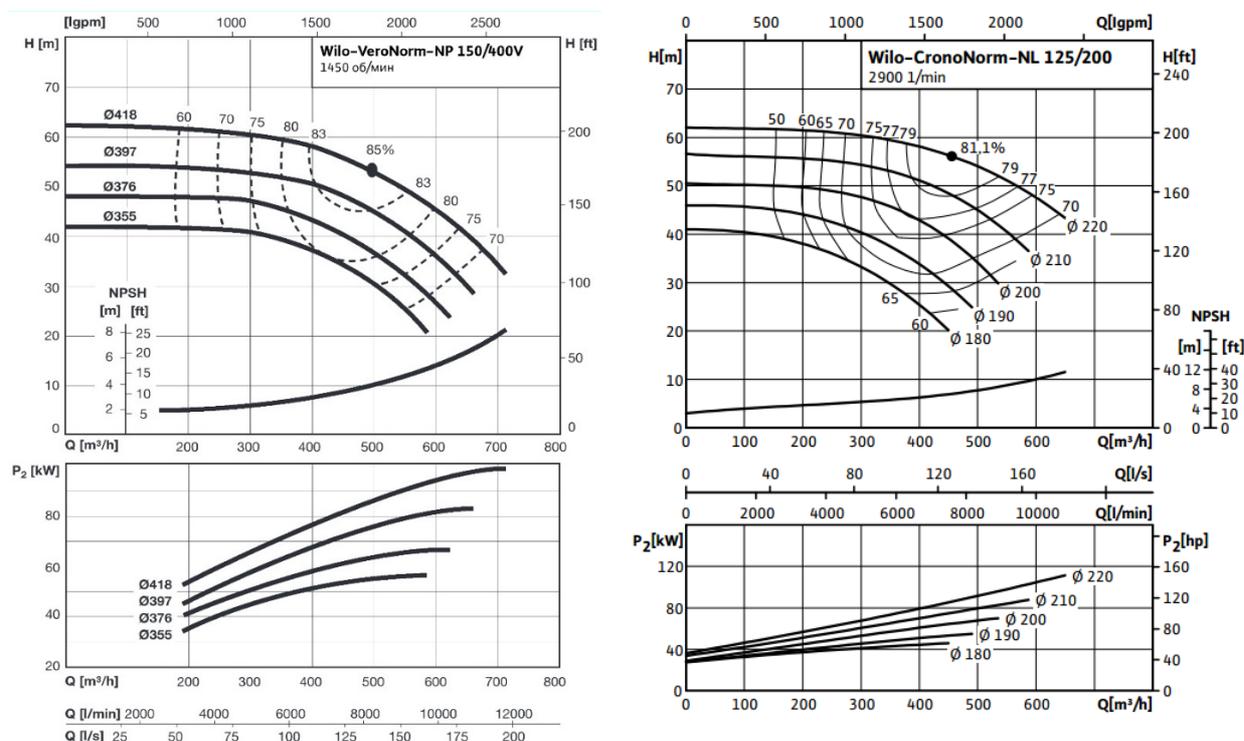


Рис. 2. Напорно-расходные характеристики насосов NP-150-400 и NL-125-200

Для данного НК предусмотрено частотное регулирование ЦН с помощью частотного преобразователя. С целью определения границ предела регулирования частотного преобразователя был проведен эксперимент с измерением рабочих параметров насоса и сети.

3. Изменение режимов работы ЦН частотным регулированием

Результаты опытного изменения частоты вращения (угол задвижки на входе и угол задвижки на выходе оставались неизменными) представлены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты экспериментов

№ опыта	f , Гц	I , А	V , В	P_1 , кгс/м ³	P_2 , кгс/м ³	Q , м ³ /ч	v , м/с ²
1	50	148	447	0,03	5,6	384	0,843
2	47	113	419		5,5	295	0,65
3	45	90	402		5,2	232	0,5
4	40	54	357,5		4	17,4	0,033

В результате экспериментов также были произведены замеры вольтамперной характеристики частотного преобразователя. В связи с тем, что вольтамперная характеристика частотного преобразователя носит практически линейный характер, воспользуемся ее линейной аппроксимацией (рис. 3), которую будем использовать, чтобы ввести новые ограничения на выбор значения частоты вращения как управляющего воздействия.

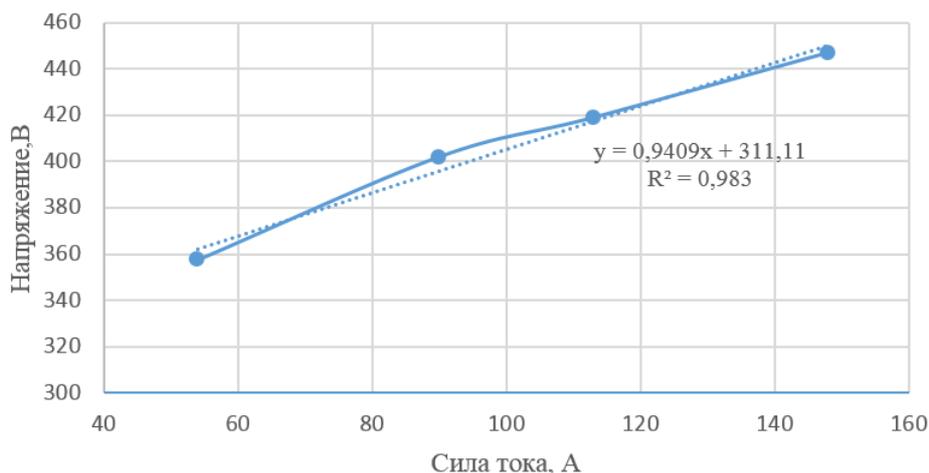


Рис. 3. Линейная аппроксимация вольтамперной характеристики частотного преобразователя ЦН

Границы регулирования частоты вращения ЦН определяются величиной падения напряжения в сети. При понижении тока и напряжения в цепи мощность частотного регулятора должна быть не меньше рабочей мощности электропривода НК.

Таким образом, при частотном регулировании имеются следующие границы регулирования:

- верхняя граница ограничена промышленной частотой в 50 Гц;
- нижняя граница обусловлена минимальной частотой, при которой мощность, вырабатываемая частотным регулятором, соответствует минимальной мощности электропривода.

Кроме того, в результате экспериментов было выявлено, что при малом значении частоты вращения КПД насоса падает настолько, что смещает рабочую точку в область недопустимых значений. Это приводит к появлению такого нестационарного процесса, как автоколебательный режим.

4. Наблюдение автоколебательного режима

Ограничения рабочих областей формируются по требованиям обеспечения эксплуатационных режимов работы. В соответствии с результатами опыта № 4 (см. табл. 2), видно, что в данном случае не обеспечивается совпадение напорно-расходных характеристик ЦН и сети в допустимой рабочей точке.

Таким образом, при выходе на рабочий режим из опыта № 4 можно утверждать, что насос не обеспечивает сеть нужными параметрами напора и расхода и происходит переход в автоколебательный режим.

Автоколебательный режим служит также причиной кавитации, так как насос обладает неустойчивыми напорно-расходными характеристиками, и при работе НК происходит завоздушивание внутренней области ЦН [2]. Также для данного режима характерно наличие двух рабочих точек (рис. 4). Неустойчивая характеристика насоса может пересекаться с характеристикой трубопровода в двух точках: 1 и 1'. При этом насос работает попеременно с рабочими параметрами, соответствующими точкам 1 и 1', а весь НК работает неустойчиво, возникают гидравлические удары и местная эрозия. Определить, в какой конкретно из рабочих точек находится НК невозможно, так как быстрое действие расходомера НК не позволяет регистрировать данные процессы.

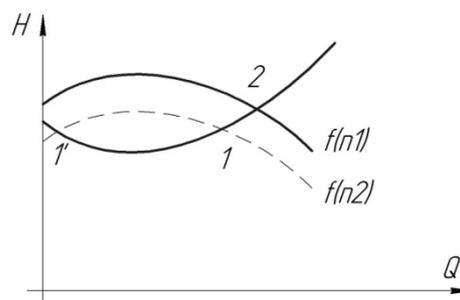


Рис. 4. Изменение напорно-расходной характеристики при переходе в автоколебательный режим

Для того чтобы перевести НК в рабочую точку 2, нужно воспользоваться математической моделью режима работы НК и напорно-расходными характеристиками, которые будут производить ее настройку.

5. Формирование способа управления НК на основе математической модели

Для того чтобы обеспечить управление режимами работы НК с целью устранения нестационарных процессов, целесообразно воспользоваться математической моделью режимов работы НК, основанной на подобию режимов работы ЦН и поршневого насоса в процессе втягивания поршня [3].

Применительно к рассматриваемой задаче необходимо использование обратной модели режимов работы НК (рис. 5), отражающей взаимосвязь напора от расхода при различных возмущениях f , значения которого зависят от изменения:

- частоты вращения ЦН;
- угла поворота задвижки на входе в НК;
- угла поворота задвижки на выходе из НК (дресселирование);
- угла поворота задвижки на перепускном канале (байпасирование).

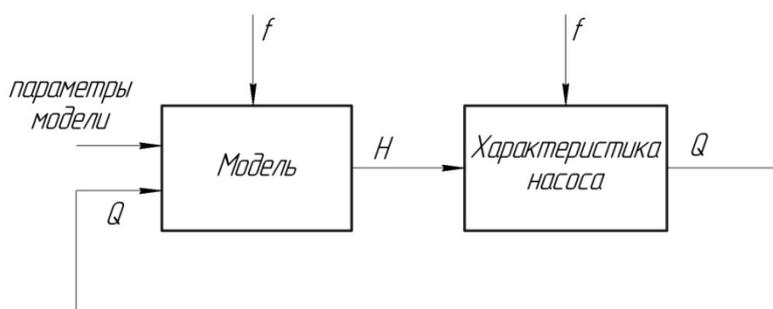


Рис. 5. Структурная схема системы настройки математической модели

Настройка системы происходит следующим образом. Математическая модель по вводимым параметрам производит расчет напора на выходе H . Этот параметр является входным для характеристики насоса, с помощью которой будет определен расход Q . Обратная связь по расходу позволяет учитывать изменения возмущений f , которые переносятся с характеристики насоса на модель. Также вводимые параметры математической модели определяются характеристиками конкретного НК.

6. Формирование дополнительного условия для управления режимами НК

В связи с вышеизложенным, для корректировки границ регулирования ЦН в аппарат принятия решения при управлении режимами работы НК по прецедентам необходимо добавить условие, которое учитывает электромеханические особенности привода ЦН (1):

$$W_{\min} < (W = 0,9409 \cdot I^2 + 311,11 \cdot I).$$

Для предотвращения возникновения автоколебаний и кавитации при работе НК данное условие необходимо учитывать при регулировании частоты вращения ЦН при помощи частотного регулятора.

Заключение

В результате проведенных исследований можно сформулировать следующие выводы:

- при эксплуатации НК имеют место нестационарные процессы (автоколебания, кавитация), которые приводят к изменению режима его работы, снижению КПД, уменьшению срока службы оборудования. Определение этих режимов часто бывает затруднительным, особенно в оперативном режиме во время эксплуатации оборудования;
- в НК, обеспечивающих подъем жидкости на большую высоту, имеет место проблема возникновения автоколебательных режимов. Это связано с тем, что развиваемая НК мощность не обеспечивает требуемые показатели сети и происходит завоздушивание корпуса ЦН;
- применение частотного регулирования НК возможно на участке допустимого регулирования, причем введение нижнего предела регулирования обусловлено предотвращением автоколебательного процесса и кавитации. Данная граница определяется по значению мощности сети и электропривода.

– при принятии решений при управлении режимами работы НК по прецедентам необходимо учитывать условие, которое учитывает электромеханические особенности привода ЦН при регулировании частоты его вращения при помощи частотного регулятора.

Литература

1. Лезнов, Б.С. Энергосбережение и регулируемый привод в насосных и воздуходушных установках / Б.С. Лезнов. – М.: Энергоатомиздат, 2006. – 360 с.
2. Гидравлика, гидромашины и гидроприводы: учеб. для машиностроит. вузов / Т.М. Баишта, С.С. Руднев, Б.Б. Некрасов и др. – 2-е изд., перераб. – М.: Машиностроение, 1982. – 423 с.
3. Лютов, А.Г. Метод диагностики насосного комплекса на основе моделирования режимов работы в условиях возникновения кавитации / А.Г. Лютов, М.Б. Новоженин, Д.З. Хуснутдинов // Нефтегазовое дело. – 2017. – Т. 15, № 1. – С. 160–164.

Новоженин Максим Борисович, старший преподаватель кафедры теории и технологии механообработки, Уфимский государственный авиационный технический университет, г. Уфа; novozhenin.maxim@yandex.ru.

Лютов Алексей Германович, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой автоматизации технологических процессов, Уфимский государственный авиационный технический университет, г. Уфа; lutov1@mail.ru.

Озеров Михаил Юрьевич, канд. техн. наук, технический директор, ООО «Новая техника», г. Уфа; 9014403649@mail.ru.

Поступила в редакцию 2 ноября 2017 г.

DOI: 10.14529/ctcr180113

EXPERIMENTAL STUDY OF OPERATING MODES OF THE AUTOMATED PUMP COMPLEX UNDER NON-STATIONARY PROCESSES

M.B. Novozhenin¹, novozhenin.maxim@yandex.ru,

A.G. Lyutov¹, lutov1@mail.ru,

M.Yu. Ozerov², 9014403649@mail.ru

¹ Ufa State Aviation Technical University, Ufa, Russian Federation,

² LLC "Novaya tekhnika", Ufa, Russian Federation

Pump systems (PC) can often operate under conditions of non-stationarity, under which cavitation and self-oscillation appear, the efficiency and service life of the equipment decrease. The complexity of determining the presence of non-stationary processes and the automated diagnostics of PC in these conditions is due to the lack of clear informative parameters by which the presence of this process can be uniquely classified. In the article, an analysis of this problem was made using the example of real industrial PC, methods for diagnosing and controlling the operating modes of PC were examined, and the dependence of nonstationary processes on the performance characteristics of PC was determined.

Keywords: automated pumping complex, non-stationary processes, cavitation, diagnostics, frequency control.

References

1. Leznov B.S. *Energoberezhenie i reguliruemyy privod v nasosnykh i vozdukhoduvnykh ustanovkakh* [Energy Saving and Adjustable Drive in Pumping and Air Blowing Installation]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 2006. 360 p.
2. Bashta T.M., Rudnev S.S., Nekrasov B.B. *Gidravlika, gidromashiny i gidroprivody: uchebnik dlya mashinostroitelnykh vuzov* [Hydraulics, Hydraulic Machines and Hydraulic Drives. Textbook for Machine-Building Universities]. Moscow, Mechanical Engineering Publ., 1982. 423 p.
3. Lyutov A.G., Novozhenin M.B., Khusnutdinov D.Z. [Method for Diagnosing the Pumping Complex on the Basis of Simulation of Operating Conditions in the Conditions of Cavitation Origin]. *Oil and Gas Business*, 2017, vol. 15, no. 1, pp. 160–164. (in Russ.)

Received 2 November 2017

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Новоженин, М.Б. Экспериментальное исследование режимов работы автоматизированного насосного комплекса при нестационарных процессах / М.Б. Новоженин, А.Г. Лютов, М.Ю. Озеров // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2018. – Т. 18, № 1. – С. 110–116. DOI: 10.14529/ctcr180113

FOR CITATION

Novozhenin M.B., Lyutov A.G., Ozerov M.Yu. Experimental Study of Operating Modes of the Automated Pump Complex under Non-Stationary Processes. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*, 2018, vol. 18, no. 1, pp. 110–116. (in Russ.) DOI: 10.14529/ctcr180113