

**Министерство по развитию информационных технологий и
коммуникаций Республики Узбекистан**

**ТАШКЕНТСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ИНФОРМАЦИОННЫХ
ТЕХНОЛОГИЙ**

На правах рукописи

УДК 004. 658.011.56

РАХИМОВ ДАВРОН АЗИЗОВИЧ

**МОДЕЛИ ЧАСТОТНО-КАСКАДНОГО УПРАВЛЕНИЯ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ НА ПРИМЕРЕ НАСОСНЫХ
СТАНЦИЙ**

5А330500 – Компьютерный инжиниринг

Диссертация на соискание академической степени магистра

**Научный руководитель
к.т.н., Умеров Х.У.**

Ташкент – 2015

**МИНИСТЕРСТВО ПО РАЗВИТИЮ ИНФОРМАЦИОННЫХ
ТЕХНОЛОГИЙ И КОММУНИКАЦИЙ РЕСПУБЛИКИ УЗБЕКИСТАН**

**ТАШКЕНТСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ИНФОРМАЦИОННЫХ
ТЕХНОЛОГИЙ**

Факультет «Компьютерный инжиниринг» Студент магистратуры Рахимов Д.А.

Кафедра «Компьютерные системы»

Научный руководитель Умеров Х.У.

Учебный год – 2013 - 2015

Специальность «Компьютерный инжиниринг»

АННОТАЦИЯ МАГИСТЕРСКОЙ ДИССЕРТАЦИИ

В настоящее время наблюдается устойчивый рост спроса на современные энергоэффективные инструменты интенсификации и автоматизации технологических процессов. Среди них можно выделить построение эффективных структур систем управления насосных станций водоснабжение и водоотведения.

Заметим, что большую часть электроэнергии, необходимой для функционирования водопроводной станции и, в частности, насосных отделений, потребляют насосные агрегаты. Поэтому экономичность работы насосов при условии обеспечения достаточного расхода воды, напрямую связана с эффективностью работы насосного отделения и всей водопроводной станции в целом.

Основной задачей управления насосами является стабилизация давления в какой-либо точке распределенной сети (как правило , на выходе из насосного отделения) для обеспечения необходимого для потребителей

расхода воды . Подача насосов в каждый момент времени должна быть равна водопотреблению из сети .

При каскадном способе применяют некоторое множество насосов, которые используются параллельно. Каскадное регулирование производительностью обеспечивается включением и выключением параллельно установленных насосов

Частотный способ использует специальные преобразователи, которые позволяют регулировать частоту вращения. При частотном регулировании, изменение производительности НС достигается за счет изменения частоты вращений насосов с помощью преобразователя частоты (ПЧ).

Кроме того, возможно одновременное использование двух этих принципов – то есть, каскадно-частотное регулирование. Причем, практика показала, что энергоэффективная эксплуатация насосной станции достигается, главным образом, за счет согласованной работы на сеть, то есть, при применении такого комбинированного метода каскадно-частотного регулирования. Применение каскадно-частотного регулирования в автоматизированных НС позволяет обеспечить снижение потребления электроэнергии до 50% по сравнению с использовавшимися ранее традиционными принципами регулирования.

Целью диссертационной работы является исследование вопросов синтеза моделей и алгоритмов для поиска оптимального режима работы насосной станции при каскадно-частотном регулировании. Для этого предлагается производить управление небольшой насосной станцией по следующим направлениям:

- Определение необходимого количества работающих насосов. Поддержание заданного давления в магистрали осуществляется каскадным, т.е. последовательным включением насосов. Количество насосов, необходимых для работы, определяется автоматически по модели насосной станции исходя из ситуационного задания.

- Частотное регулирование последним из включенных насосов для более точного поддержания давления, а также для снижения гидроударов в магистрали и бросков тока в сети.

В диссертационной работе решаются следующие задачи:

- разработка математического описания работы насосной станции
- разработка алгоритма расчета оптимального режима работы насосной станции при каскадно-частотном регулировании;
- разработка алгоритма управления насосной станцией с каскадно-частотным регулированием;
- расчет оптимального режима работы насосной станции по разработанным алгоритмам.

Объектом исследования являются технологические процессы и технические системы с непрерывно-дискретным режимом функционирования на примере насосных станций водообеспечения

Предмет исследования составляют вопросы, относящиеся к синтезу алгоритмов и вычислительных структур для комплексного решения задачи поиска оптимального режима непрерывно-дискретными процессами.

В работе использованы методы теории информационных систем, математического моделирования и методы целочисленного программирования.

Научная новизна и практическая значимость работы. Осуществлен синтез алгоритмов на основе формальной дискретизации диапазона изменения частоты вращения насосного агрегата на n интервалов. Такой подход позволяет унифицировать задачу нахождения оптимального режима водоподдачи вне зависимости от типа регулирования насосных агрегатов (НА), включенных в систему. Разработанные алгоритмы могут найти широкое применение в системах управления технологическими процессами и техническими системами с непрерывно-дискретным режимом функционирования.

Магистерская диссертация состоит из введения, трёх глав и заключения, изложена на 89 страницах машинописного текста, содержит 1 таблицу и 21 рисунок.

Основными результатами работы являются созданная компьютеризированная модель оптимизации работы насосной станции водоподъема при каскадно-частотном регулировании, решенной в классе задач целочисленного программирования, а также предложенный алгоритм управления насосной станцией управления насосной станцией.

Научный руководитель _____ Умеров Х.У.

Студент магистратуры _____ Рахимов Д.А.

**MINISTRY OF DEVELOPMENT OF INFORMATION
TECHNOLOGY AND COMMUNICATIONS OF THE REPUBLIC OF
UZBEKISTAN**

**THE TASHKENT UNIVERSITY OF INFORMATION
TECHNOLOGIES**

Faculty "Computer Engineering"

Department of "Computer Systems"

Academic year - 2012 - 2014

The student of magistracy Rahimov D.A.

The supervisor of studies Umepov H.U.

Specialty " Computer Engineering "

THE SUMMARY OF THE MASTER'S DISSERTATION

Currently, there is a steady increase in demand for modern energy-efficient tools intensification and process automation. Among them are the construction of effective structures of control systems of pumping stations and water drainage. Note that most of the electricity required for the operation of the waterworks and in particular, pump rooms, consume pumps. Therefore, efficiency of the pumps, provided that a sufficient flow of water is directly related to the efficiency of the pump room and the entire waterworks in general.

The main task of the pump control is to stabilize the pressure in any point of the distributed network (typically at the outlet of the pump room) to provide the required water flow for consumers. Feed pumps at each time must be equal to water consumption of the network.

When cascade process uses a set of pumps, which are used in parallel. Cascade performance is provided on and off the pumps installed in parallel Method uses a special frequency converter, which allows to adjust the speed. In frequency regulation, changes in the performance of the National Assembly is achieved by changing the pump speed using a frequency converter (inverter).

Moreover, possible simultaneous use of these two principles - that is, the cascade-frequency regulation. Moreover, experience has shown that the energy-efficient operation of the pumping station is achieved mainly due to coordinated work on the network, that is, the application of this combined method of cascade-frequency regulation. Application of cascade-frequency control in automated NA allows for reduction of energy consumption up to 50% compared to traditional principles used earlier regulation.

The aim of the thesis is a study on the synthesis of models and algorithms to search for optimal operation of the pumping station at the cascade-frequency regulation. To this end, the management offered to produce a small pumping station in the following areas:

- Determining the number of pumps in operation. Maintaining a given line pressure is carried out in stages, ie, Sequential pump circuit. The number of pumps required for the operation, is automatically determined by the model of the pumping station on the basis of situational tasks.
- Frequency regulation included the last of the pump to more accurately maintain the pressure and to reduce water hammer in the pipeline and current surges in the network.

In the thesis the following tasks:

- Development of a mathematical description of the pumping station
- Development of the algorithm for calculating the optimal mode of operation of the pumping station at the cascade-frequency control;
- Development of control algorithm with cascade pumping station frequency regulation;
- calculation of the optimal mode of operation of the pumping station on the developed algorithms.

Object of research are the processes and technical systems with continuous-mode operation of the floppy disk as an example of water supply pumping stations

Subject of research up questions relating to the synthesis of algorithms and computational structures in order to address the problem of finding the optimal mode of continuous-discrete processes.

We used the methods of the theory of information systems, mathematical modeling and methods of integer programming.

Scientific novelty and practical significance of the work. The synthesis algorithms based on formal sampling range of variable speed pump unit for n intervals. This approach allows us to unify the problem of finding the optimal mode of water supply regardless of the type of control of pump units (NA), included in the system. These algorithms can be widely used in process control systems and technical systems with continuous-mode operation of a floppy disk.

Master's thesis consists of an introduction, three chapters and a conclusion, stated on 89 pages of typewritten text, contains 1 table and Figure 21.

The main results are created by a computerized model of optimization of the pumping station at the water lifting cascaded frequency regulation solution in the class of integer programming problems, as well as the proposed control algorithm pump station control pumping station.

The supervisor of studies _____

Umepov H.U.

The student of a magistracy _____

Rahimov D.A.

Содержание

ВВЕДЕНИЕ.....	10
Глава I. Обзор и постановка задачи.....	17
1. Описание методов управления насосной станцией.....	17
2. Управление с каскадно-частотным регулированием.....	27
3. Постановка задачи.....	35
Выводы по главе I.....	41
Глава II. Разработка модели и алгоритмов оптимизации и управления насосной станцией при каскадно-частотном регулировании	
1. Математическое описание работы насосной станции.....	42
2. Алгоритм расчета оптимального режима работы насосной станции при каскадно-частотном регулировании	54
3. Алгоритм управления насосной станцией с каскадно-частотным регулированием.....	57
Выводы по главе II.....	59
Глава III. Расчет оптимального режима работы насосной станции при каскадно-частотном регулировании	
1. Решение задачи целочисленного программирования в среде MatLab	60
2. Расчет оптимального режима работы насосной станцией при каскадно-частотном регулировании.....	71
3. Управление насосной станцией с каскадно-частотным регулированием.....	75

4. Листинг М модуля.....	78
Выводы по главе III.....	80
4. Заключение.....	81
5. Список использованной литературы	82
6. Приложение.....	84

ВВЕДЕНИЕ

Увеличение водопотребления с современном мире напрямую связано с практически всеми отраслями промышленности. В республике Узбекистан уделяется большое внимание эффективности водопотребления. Согласно Постановлению КМ РУз от 19.03.2013 г. N 82 [1], ведется планирование использования вод и установление лимитов водозабора. Поэтому каждое водохозяйственное предприятие как структурное звено экономики должно представляет собой систему, функционирующую на основе научно обоснованных долгосрочных прогнозов в отношении требований, предъявляемых обществом. В настоящее время наблюдается устойчивый рост спроса на современные энергоэффективные инструменты интенсификации и автоматизации технологических процессов. Среди них можно выделить построение эффективных структур систем управления насосных станций водоснабжение и водоотведения [2]

Заметим, что большую часть электроэнергии, необходимой для функционирования водопроводной станции и, в частности, насосных отделений, потребляют насосные агрегаты. Поэтому экономичность работы насосов при условии обеспечения достаточного расхода воды, напрямую связана с эффективностью работы насосного отделения и всей водопроводной станции в целом.

Основной задачей управления насосами является стабилизация давления в какой-либо точке распределенной сети (как правило, на выходе из насосного отделения) для обеспечения необходимого для потребителей расхода воды. Подача насосов в каждый момент времени должна быть равна водопотреблению из сети. Поскольку водопотребление постоянно изменяется, то и развиваемый насосами напор должен колебаться в широких пределах и может превышать требуемый в данный момент времени, что приводит к перерасходу электроэнергии и утечкам воды.

В то же время в экономике Узбекистана сельское хозяйство

преобладает, при этом в условиях жаркого сухого климата основная часть сельхозкультур выращивается на орошаемых площадях в 4,2 млн. гектаров. Причем доля земель с машинным орошением составляет более 1 млн. гектаров, для их водообеспечения используются крупные насосные станции потребляющие 1,2 млн. кВт электроэнергии в год, что составляет более 20 % всей электрической энергии вырабатываемой в республике [3]. А, в условиях засушливого климата и ограниченных водных ресурсах, и здесь особо важное значения приобретают задачи направленные на рационализацию и экономность водопотребления во всех отраслях человеческой деятельности.

Внедрение энергосберегающих технологий сегодня — это не дань моде, а требование времени. Энергосберегающих технологий много, эффективность их зависит от множества факторов. Так, в настоящее время подавляющее большинство управляемых электроприводов строятся на базе асинхронных электродвигателей и преобразователей частоты, где преобразователь частоты выполнен по схеме неуправляемый выпрямитель — автономный управляемый инвертор напряжения; то есть, сначала электрическая энергия сети преобразуется в постоянный ток, а потом инвертор создает трехфазный электрический ток переменной частоты.

Возможности, открывающиеся при использовании преобразователя частоты в качестве регулирующего устройства для электропривода, выполненного на асинхронном электродвигателе, безграничны. Одной из главных тенденций развития современного электропривода является использование его в целях сбережения энергетических ресурсов и экологии. Следует отметить, что использование преобразователей частоты в качестве регулируемого электропривода создает свои преимущества за счет автоматического изменения параметров системы в зависимости от условий работы механизма, и наибольший эффект достигается, когда условия работы часто меняются и пределы изменений достаточно широки. Система регулируемого электропривода управляется микроконтроллером с достаточно солидным программным обеспечением, позволяющим задавать

параметры регулирования в зависимости от необходимых условий работы механизма. В этой связи расширяется область применения регулируемого электропривода не только в сферах высоких технологий, но и там, где до настоящего времени традиционно использовался простой нерегулируемый электропривод с асинхронным двигателем с короткозамкнутым ротором. При этом важным становится повышение энергетической эффективности существующих электроприводов, позволяющих решать технологические задачи при минимальных затратах. Внедрение насосных агрегатов с преобразователем частоты в систему водообеспечения обусловлено более высокой экономической эффективностью частотно управляемых электроприводов, по сравнению с системой «электродвигатель – питательный насос – дроссельная задвижка», когда регулирование подачи воды производилось вручную операторами [2]. В то же время на многих станциях эксплуатируются более дешевые дискретные насосные агрегаты типа вкл/выкл.

Таким образом, задача оптимального управления работой такой комбинированной насосной станции, использующей агрегаты обоих типов, является актуальной.

Целью работы является исследование вопросов синтеза моделей и алгоритмов для поиска оптимального режима работы насосной станции при каскадно-частотном регулировании.

Задачи диссертации включают:

- разработку математического описания работы насосной станции
- разработку алгоритма расчета оптимального режима работы насосной станции при каскадно-частотном регулировании;
- разработку алгоритма управления насосной станцией с каскадно-частотным регулированием;
- расчет оптимального режима работы насосной станции по разработанным алгоритмам.

Объект и предмет исследования. Объектом исследования являются технологические процессы и технические системы с непрерывно-дискретным режимом функционирования на примере насосных станций водообеспечения

Предмет исследования составляют вопросы, относящихся к синтезу алгоритмов и вычислительных структур для комплексного решения задачи поиска оптимального режима непрерывно-дискретными процессами.

Методы исследования. В работе использованы методы теории информационных систем, математического моделирования и методы целочисленного программирования.

Научная новизна и практическая значимость работы. Осуществлен синтез алгоритмов на основе формальной дискретизации диапазона изменения частоты вращения насосного агрегата на n интервалов. Такой подход позволяет унифицировать задачу нахождения оптимального режима водоподдачи вне зависимости от типа регулирования насосных агрегатов (НА), включенных в систему. Разработанные алгоритмы могут найти широкое применение в системах управления технологическими процессами и техническими системами с непрерывно-дискретным режимом функционирования.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались на Республиканской научно-технической конференции «Фан, таълим ва ишлаб чиқариш интеграциясида ахборот-коммуникация технологияларини кўллашнинг ҳозирги замон масалалари», Нукус, 21 апреля 2015 .

Структура работы. Работа состоит из введения, трех глав, описания безопасности жизнедеятельности, экономической части, заключения, списка литература и представлена на 85 листах пояснительной записки, включая 21 рисунок и 1 таблицу.

Во введении обоснованы актуальность работы, выявлены объект и предмет исследования. Поставлены цель, задачи и методы исследования. Отмечены практическая значимость и научная новизна разработки.

В первой главе приведено описание основных методов регулирования насосного агрегата, используемых в современных насосных станциях. Описаны методы управления насосной станцией, основанные на каскадном, частотном и смешанном регулировании, обеспечивающие требуемую в данный момент производительность. На основе проведенного анализа существующих методов регулирования, сделан вывод о том, что управление с каскадно-частотным регулированием позволяет существенно снизить потребление электроэнергии, постоянно поддерживать необходимые параметры в сети, а также снизить аварийность в системах при умеренной стоимости. Приведена постановка задачи синтеза моделей и алгоритмов для поиска оптимального режима работы насосной станции при каскадно-частотном регулировании, позволяющая осуществлять эффективное управление работой насосной станции при обеспечении минимума потребляемой мощности для реализации заданного графика водоподдачи..

Во второй главе приведено математическое описание работы насосной станции на основе совместного решения задачи водоподдачи и водоотведения с задачей энергосбережения. Выбран критерий оптимального функционирования насосной станции и разработан алгоритм расчета оптимального режима работы насосной станции при каскадно-частотном регулировании, основанный на формальной дискретизации диапазона изменения частоты вращения насосного агрегата на n интервалов. Предложен алгоритм управления насосной станцией с каскадно-частотным регулированием, основанный на определении оптимального оперативного плана функционирования насосной станции посредством решения задачи целочисленного программирования с помощью пакета Optimization Toolbox системы MATLAB .

В третьей главе приведен анализ особенностей программной реализации задачи целочисленного программирования методом ветвей и границ в системе MATLAB. Проведен расчет модели определения оптимального режима функционирования насосной станцией. Предложен

алгоритм адаптивного управления насосной станцией с каскадно-частотным регулированием на основе поддержания квазиоптимального режима функционирования на основе предложенной модели. Приведен расчет модели оптимизации работы насосной станцией с частотно-каскадным регулированием с помощью функции `bintprog` пакета Optimization Toolbox системы MATLAB.

1. ОБЗОР И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

1.1 Описание методов регулирования насосного агрегата.

Насосные агрегаты(НА) представляют собой гидравлические машины, предназначенные для перемещения жидкостей под напором. Преобразуя механическую энергию приводного двигателя в механическую энергию движущейся жидкости, насосы поднимают жидкость на определенную высоту, подают ее на необходимое расстояние в горизонтальной плоскости или заставляют циркулировать в какой-либо замкнутой системе.

Потребляя значительное количество электроэнергии, режимы работы этих агрегатов формируют графики электрических нагрузок, определяют энергетическую составляющую затрат в структуре себестоимости продукции, обладают наибольшими потенциальными возможностями для сокращения удельного расхода электроэнергии.

Схема насосного агрегата в составе насосной станции изображена на рис 1.1. Основными параметрами насосов, определяющих режим работы насосной станции (НС). и её конструктивные особенности являются напор, подача, мощность и коэффициент полезного действия [4.5].

Напор- разность удельных энергий жидкости в сечениях после и до насоса, выраженную в метрах. Напором определяется максимальная высота подъема и (или) дальность перекачки жидкости (H , см. рис 1.1).

Водоподача - объем жидкости, подаваемой насосом в единицу времени, выраженной в $м^3/час$ (кубометров в час) или $л/сек$, (литров в секунду)объем жидкости подаваемый насосом в напорный трубопровод в единицу времени (Q , см. рис 1.1).

Мощность- измеряемая в кВт, мощность насоса определяет мощность приводного двигателя и суммарную мощность насосной станции. Мощность необходима для создания нужного напора и преодоления всех видов потерь

возникающих при преобразовании подводимой к насосу механической энергии в энергию движения.

Коэффициент полезного действия является величиной учитывающей все виды потерь и определяющей целесообразность эксплуатации насоса при изменении параметров его работы. Разброс КПД насосных агрегатов велик (от 20 до 98%). Столь существенный разброс определяется разным характером взаимодействия рабочего органа с жидкостью. Общая закономерность: динамические насосы значительно уступают по этому параметру насосам объемного типа. Значимость этого параметра для больших насосов велика.

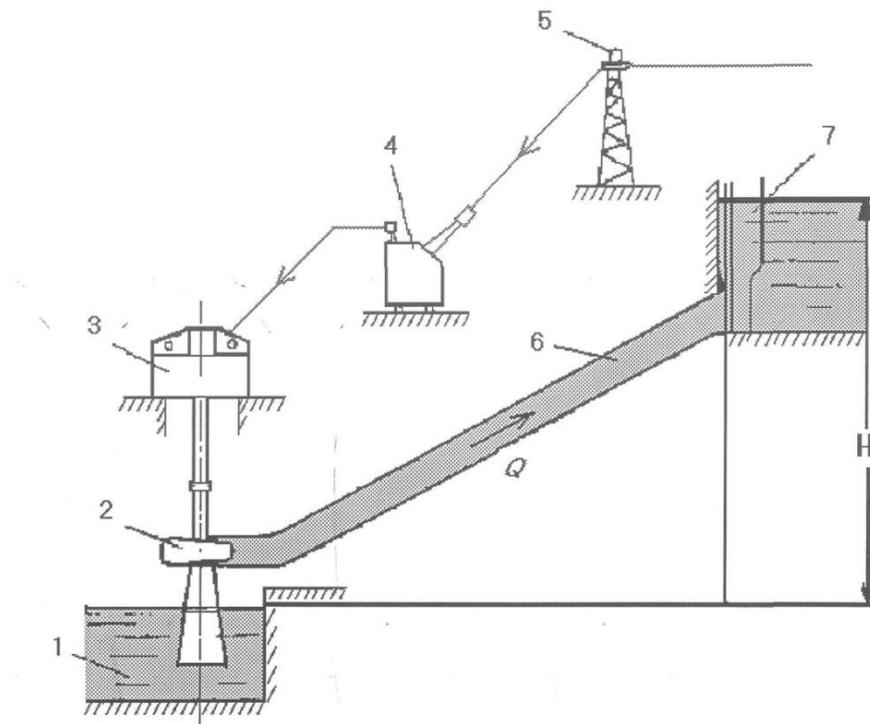


Рис 1.1 Схема насосного агрегата в составе насосной станции:

1 - водозабор; 2 -насосный агрегат; 3- приводной электродвигатель; 4 - понизительная подстанция; 5 - линия электропередачи; 6 - напорный трубопровод; 7 - водовыпускное сооружение.

Основная трудность в получении рабочих характеристик насосов

расчетным путем заключается в учете потерь, влияющих на подачу и напор насоса. Поэтому при расчете режимов работы насосного агрегата используются табличные характеристики, полученные опытным путем.

Рассмотрим обобщенную технологическую схему системы, обеспечивающей подачу воды в сеть потребителей с постоянным заданным давлением (рис. 1.2). Аналогичный подход можно применить и в других технологических схемах, где в качестве транспортируемого вещества может быть жидкость или газ.

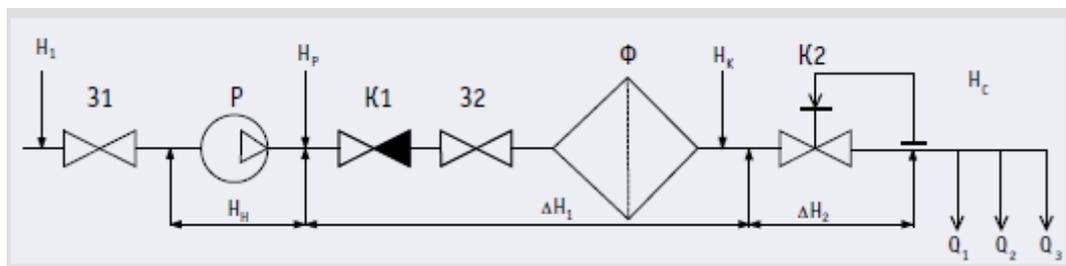


Рис. 1.2 Пример упрощенной технологической схемы с насосным агрегатом
31, 32 — запорные технологические задвижки; P — насосный агрегат;
K1 — обратный клапан; Ф — фильтр; K2 — регулирующий клапан.

При дросселировании регулирование расхода осуществляется за счет изменения эффективного сечения трубопровода с помощью заслонки. В этом случае насос, так же как и при отсутствии регулирования, тратит энергию на преодоление противодействия заслонки, а повышенное давление вызывает утечки жидкости и износ оборудования. Соответственно, уменьшается полезная мощность насоса. Добавим также, что описанный метод неэффективен, так как изменения давления подкачка воды тоже меняется. Этот способ связан с повышенным энергопотреблением, невысокой точностью регулирования технологических параметров, а также повышенным износом электрического, механического и гидравлического оборудования. Прямые пуски двигателей большой мощности вызывают ударные нагрузки в передаточных механизмах, недопустимые посадки напряжения в системах электроснабжения.

Основными элементами схемы являются запорные технологические задвижки 31 и 32 , насосный агрегат P , обратный клапан $K1$, фильтр воды Φ и регулирующий клапан $K2$. Основные технологические параметры: $H1$ — напор, создаваемый источником подачи воды; H_p — напор, получаемый после насосного агрегата; H_k — напор перед регулирующим клапаном; H_c — напор в сети потребителей; Q_1, Q_2, Q_3 — расходы воды потребителей сети; H_n — напор, развиваемый насосным агрегатом, а также потери напора на элементах системы, расположенных между насосным агрегатом P и сетью потребителей; $\Delta H1$ — потери напора на задвижке 32 и водяном фильтре и $\Delta H2$ — потери напора на регулирующем клапане. Рассматривая энергетические характеристики технологического процесса объекта, можно написать, что требуемая энергия для подачи воды потребителям может быть рассчитана по формуле: $W_c = H_c \cdot (Q_1 + Q_2 + Q_3)$. Для нормальной работы сети чаще всего необходимо создание постоянного значения напора H_c . Величины расходов Q_1, Q_2, Q_3 определяются потребителями и с течением времени могут меняться. Гидравлическая энергия, развиваемая насосным агрегатом, может быть получена как $W_n = H_n \cdot (Q_1 + Q_2 + Q_3)$, где сумма расходов представляет собой общий сетевой расход воды Q_c . В идеальном варианте желательно, чтобы сохранялось равенство W_c и W_n . На самом деле между насосным агрегатом и сетью установлены элементы со своими гидравлическими сопротивлениями, на которых теряется часть напора, развиваемого насосным агрегатом, $\Delta H_n = \Delta H1 + \Delta H2$. Таким образом, потери энергии на технологическое обеспечение параметров перекачиваемой жидкости можно определить как $\Delta W_n = \Delta H_n \cdot Q_c$. Тогда, для поддержания заданных технологических параметров сети насос должен развивать гидравлическую мощность, равную $W_n = H_c \cdot (Q_1 + Q_2 + Q_3) + \Delta H_n \cdot (Q_1 + Q_2 + Q_3)$.

Последнее выражение показывает, что потери энергии в технологическом процессе зависят от расхода сети (технологической нагрузки), определяемого потребителем, и потерь напора на оборудовании насосной станции ΔH_n , которые определяются гидравлическим сопротивлением элементов схемы.

В общем случае оценить эти потери напора можно, сравнив показания манометров перед напорной задвижкой 32 и манометра в сетевом трубопроводе.

Чем больше разница в их показаниях, тем больше потерь энергии имеет система. Для минимизации энергетических потерь при функционировании технологического процесса с необходимо, в первую очередь, снизить потери напора между трубопроводом насосного агрегата и сетью потребителей — ΔH_n .

Рассмотрим работу системы, с точки зрения изменения параметров нагрузки сети Q_c . Для этого воспользуемся известными Q/H характеристиками для насосных агрегатов и сети (рис. 1.3).

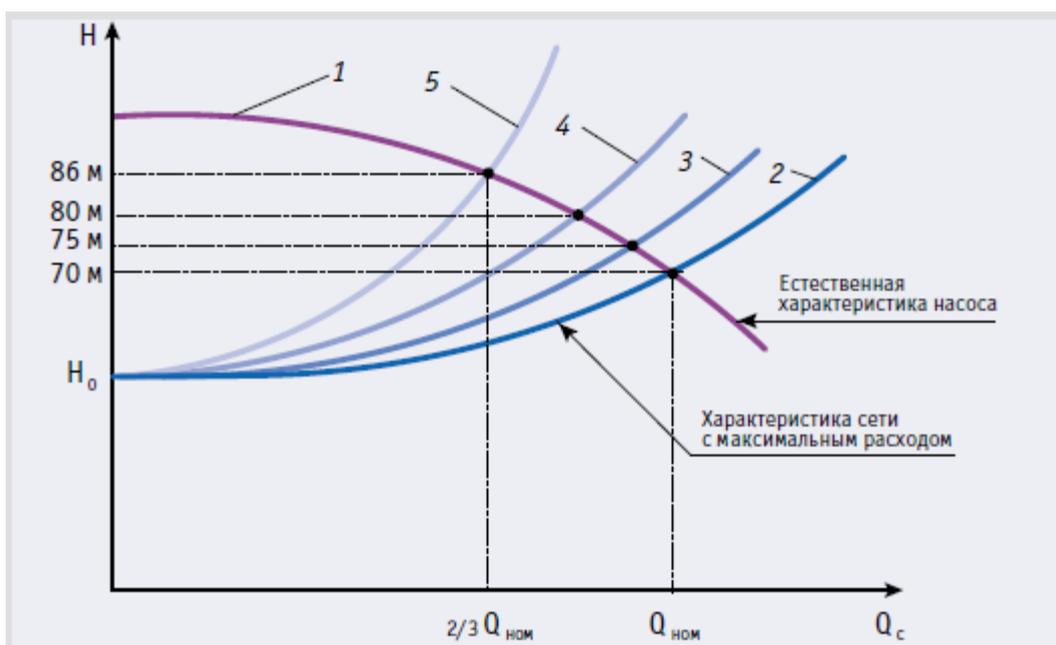


Рис. 1.3 Характеристики насосного агрегата и сети без регулирования давления

Кривая 1 соответствует напорной характеристике насосного агрегата, а кривая 2 — гидравлической характеристике сети, где H_0 — требуемый статический напор сети. Точка пересечения этих характеристик является идеальной расчетной точкой совместной работы насосного агрегата и сети

($Q_{ном}$). При изменении расхода в сети меняется и её гидравлическая характеристика — линии 3_5.

Соответственно будут сдвигаться точки пересечения характеристик. Как видно из рисунка, с уменьшением расхода увеличивается давление в сети. Кроме того, в процессе функционирования в зависимости от режимов работы системы может меняться давление перед насосом, создаваемое источником водоснабжения. Изменения этого давления также отражаются на величине давления в сети потребителей.

Такой характер взаимосвязи параметров требует установки в системе дроссельных регулирующих элементов — регулирующих клапанов (иногда их роль выполняют напорные задвижки агрегатов)[2]. Эти элементы создают дополнительное гидравлическое сопротивление и позволяют обеспечить стабильное давление в сетевом трубопроводе. При использовании дроссельных элементов происходит распределение напора на элементах системы. Это распределение напора показано на рис. 1.4, где ΔH_d — падение напора на дроссельном элементе.

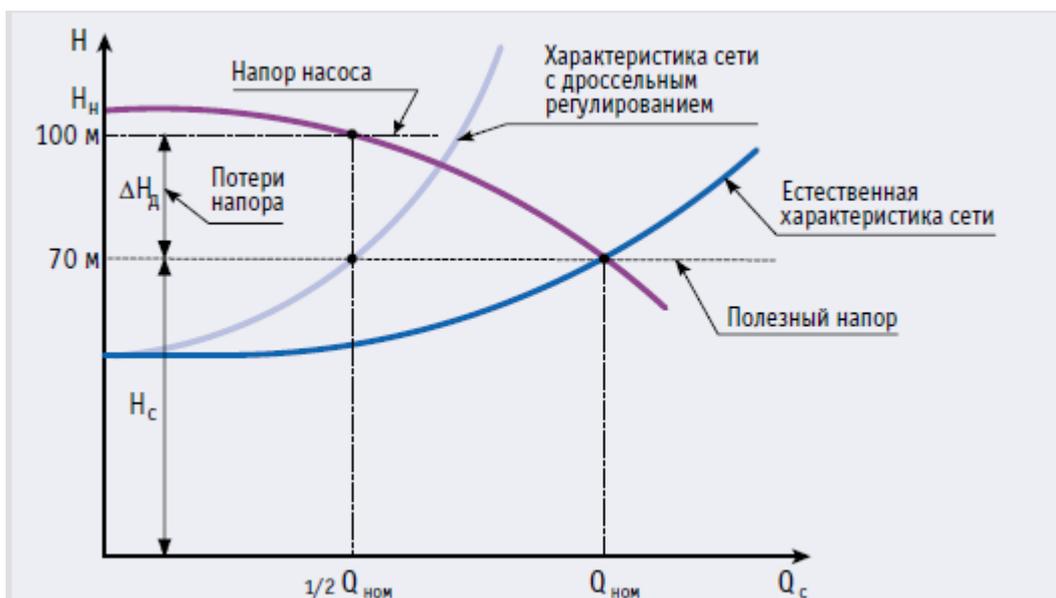


Рис. 1.4 Характеристики насосного агрегата и сети с дроссельным регулированием

Для поддержания заданного давления в сетевом трубопроводе при изменении расхода жидкости приходится изменять гидравлическое сопротивление регулирующего элемента. При этом общая гидравлическая характеристика будет иметь более крутой вид.

Величина ΔH_0 с таким регулированием неуклонно увеличивается. То есть, чем сильнее производится дросселирование регулирующим элементом, тем больше энергетических потерь имеет весь технологический процесс. На величину потерь при дроссельном регулировании влияет не только регулирующийся элемент, но и несколько завышенные напорные характеристики. Кроме того, диапазон изменения входных давлений (перед всасывающим патрубком насосного агрегата) оказывает влияние на величину давления за насосным агрегатом. Все эти обстоятельства приводят к тому, что потери энергии в ходе технологического процесса становятся достаточно большими, достигающими 45 и более процентов от номинальной мощности агрегата.

Для решения задачи минимизации потерь, связанных с регулированием давления в сети, необходимо исключить дополнительные гидравлические сопротивления на участке от насосного агрегата до сетевого трубопровода, то есть необходимо полностью открыть всю запорно-регулирующую арматуру. Это можно сделать передачей функции регулирования давления насосному агрегату. Теория работы насосов показывает, что изменение частоты вращения привода нагнетателя изменяет его напорные характеристики. При этом, напор, создаваемый нагнетателем, пропорционален квадрату частоты вращения агрегата. Изменение напорных характеристик насосного агрегата при изменении частоты вращения иллюстрирует рис. 1.5, на котором кривая 1 соответствует номинальной (при номинальной частоте вращения привода) напорной характеристике, а кривые 2-4 — напорным характеристикам при пониженной частоте вращения. Если при работе привода насосного агрегата изменение параметров технологического процесса (расхода в сети и давления на входе агрегата)

будет изменяться частота вращения, то можно без существенных потерь энергии стабилизировать давление в сети потребителей. При таком способе регулирования исключаются потери напора (нет дроссельных элементов), а значит, и потери гидравлической энергии.

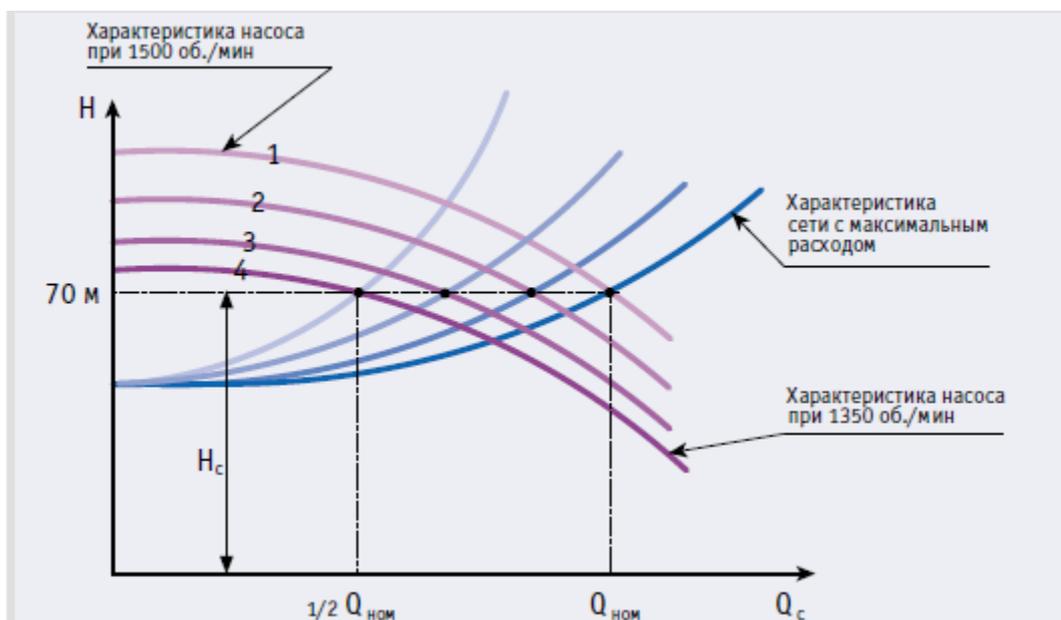


Рис. 1.5 Характеристики насосного агрегата и сети с частотным регулированием

Способ регулирования давления в сети путем изменения частоты вращения привода насосного агрегата снижает энергопотребление ещё и по другой причине. Собственно насос как устройство преобразования энергии имеет свой коэффициент полезного действия — отношение механической энергии, приложенной к валу, к гидравлической энергии, получаемой в напорном трубопроводе насосного агрегата. Характер изменения коэффициента полезного действия насоса η в зависимости от расхода жидкости Q при различных частотах вращения представлен на рис. 1.6.

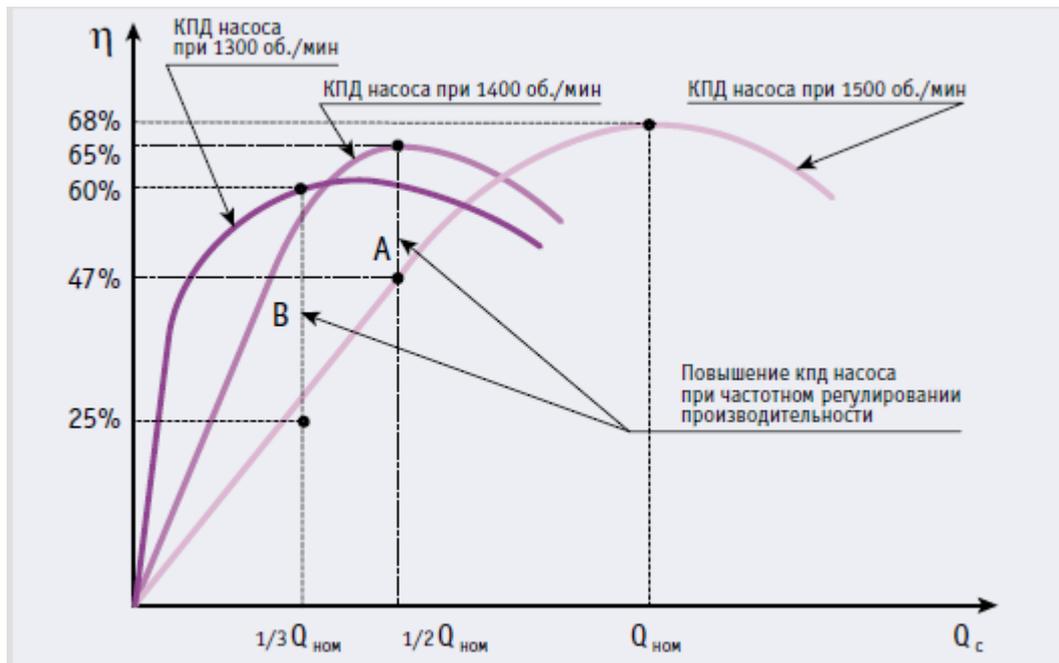


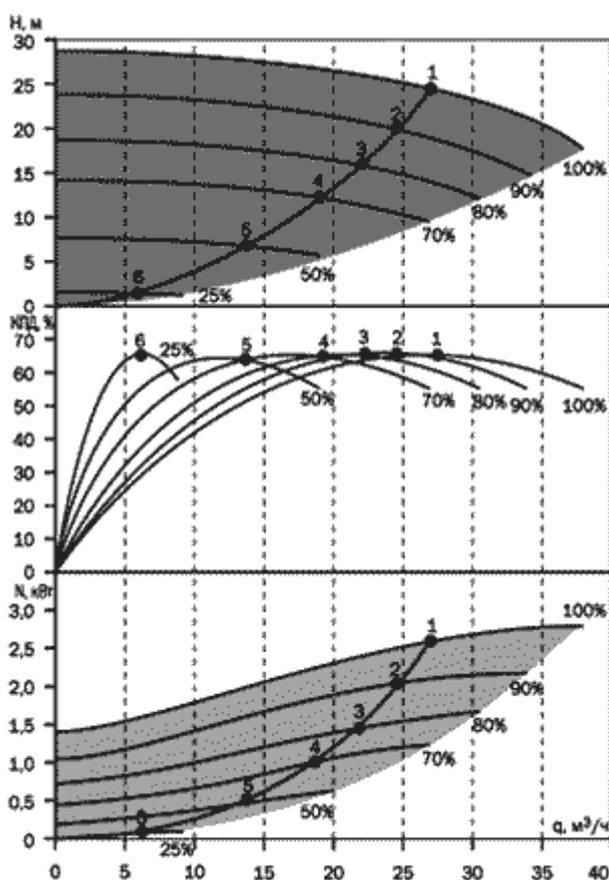
Рис. 1.6 Изменение кпд насосного агрегата с частотным регулированием при изменении производительности

Заметим, что применение частотного регулирования приводов позволяет существенно уменьшить и эксплуатационные затраты, связанные с обслуживанием насосных агрегатов и систем. Например, снижение перепада давления между всасывающим и напорным патрубками насосного агрегата увеличивает срок службы сальниковых уплотнений, практически исключает гидроудары и обеспечивает стабильность давлений в трубопроводах сетей, а также минимизирует затраты на их обслуживание.

Представленные результаты теоретических и практических исследований могут служить рекомендацией для широкого внедрения частотно-регулируемых приводов в технологических системах управления насосами. Об эффективности регулирования режимов работы центробежных насосов изменением угловой скорости рабочих колес известно давно. Характеристики центробежных насосов пересчитываются по законам геометрического и гидродинамического подобия. Согласно этим законам, при изменении частоты вращения подача насоса изменяется пропорционально первой степени, напор – пропорционально второй степени,

мощность – пропорционально третьей степени частоты вращения, коэффициент полезного действия практически не зависит от частоты вращения. Таким образом, если при номинальной частоте вращения n_n насос при подаче Q_n развивает напор H_n и потребляет мощность N_n , то при частоте вращения на новой характеристике этой точке будет соответствовать точка с подачей $Q = Q_n (n/n_n)$, напором $H = H_n (n/n_n)^2$, мощностью на валу $N = N_n (n/n_n)^3$.

На рис. 1 изображены характеристики насоса при переменной частоте [2].



Точка 1 лежит на характеристике насоса, работающего с номинальной частотой вращения, принятой за 100 %. Точки 2, 3, 4, 5, 6 на графиках напора, КПД и мощности соответствуют частотам вращения 90, 80, 70, 50 и 25 % номинальной. Область допустимых режимов работы насоса при частотном регулировании выделена цветом.

Степенная зависимость мощности, потребляемой насосом от частоты вращения, позволяет значительно экономить электроэнергию. Например,

снижение частоты вращения на 20 % сопровождается снижением потребляемой мощности на 49 %.

1.2. Описание методов управления насосной станцией.

Насосная станция (НС) – установка, состоящая из двух или более насосов, запорной и регулирующей арматуры, а также системы управления её производительностью. В системах управления насосными станциями, в основном, используются два способа реализации: каскадный и частотный.

При **каскадном** способе применяют некоторое множество насосов, которые используются параллельно [6,7]. Каскадное регулирование производительностью обеспечивается включением и выключением параллельно установленных насосов (обычно от 2 - 4). Когда для первого насоса достигается наибольшая мощность, то включается другой насос и далее по цепочке. Для такой системы коэффициент полезного действия является высоким в том случае, если насосов применяется много. При увеличении ширины полосы требуемого расхода использование групп параллельно установленных насосов вместо одного большого значительно эффективнее. В этом случае, подключая и отключая необходимое количество насосов, можно обеспечить требуемый уровень расхода в определённый период времени. Насосы при этом чаще работают в зонах высокого гидравлического КПД, а система в целом обладает большей надёжностью с позиции резервирования. Недостатком этого способа является появление всплесков напряжения и возможных гидравлических ударов, которые могут возникнуть при пусковых токах с включением дополнительных насосов. Кроме того, износ первого насоса происходит быстрее других.

Частотный способ использует специальные преобразователи, которые позволяют регулировать частоту вращения. При частотном регулировании, изменение производительности НС достигается за счет изменения частоты вращений насосов с помощью преобразователя частоты (ПЧ). Применение

частотного регулирования позволяет значительно увеличить эффективность работы за счет оптимизации работы насосов в режиме неполной производительности. Принцип частотного метода регулирования скорости асинхронного двигателя заключается в том, что, изменяя частоту f_1 питающего напряжения, можно в соответствии с выражением

$$\omega_0 = \frac{2\pi \times f_1}{p},$$

при неизменном числе пар полюсов p , изменять угловую скорость магнитного поля статора ω_0 . Частотное регулирование обеспечивает плавность изменения производительности и уменьшает вероятность возникновения гидроударов, что повышает ресурс и надежность работы как самой НС, так и трубопроводов и арматуры. Особенно эффективность работы системы повышается в режиме минимальной нагрузки.

Этот способ обеспечивает плавное регулирование скорости в широком диапазоне, а механические характеристики обладают высокой жесткостью. Чаще всего частотные преобразователи используются на насосных станциях с высокой производительностью. В таких системах, нагрузки на насосы происходят достаточно равномерно и позволяют предотвратить износ механизмов насоса. Внедрение частотных преобразователей в промышленный процесс позволяют обеспечить до 60% экономии электроэнергии. Поэтому построение полноценной системы управления насосами на крупных предприятиях начинается с автоматизации приводов.

При принятии решения о применении того или иного способа регулирования необходимо учитывать, что каждый из этих способов регулирования также следует применять, отталкиваясь от параметров сети, на которую работает насос, в частности, доля статической и динамической составляющих [9].

Как видно из первого графика на рис.1.7 при работе насоса на сеть с преимущественной статической составляющей снижение частоты вращения насоса до 83% от номинала приводит к снижению к.п.д. с 60 до 35% и выходу

рабочей точки за пределы рабочего диапазона. Поэтому при работе насоса на сеть с преимущественной статической составляющей применение частотного привода нерационально и требует более тщательного анализа)[14].

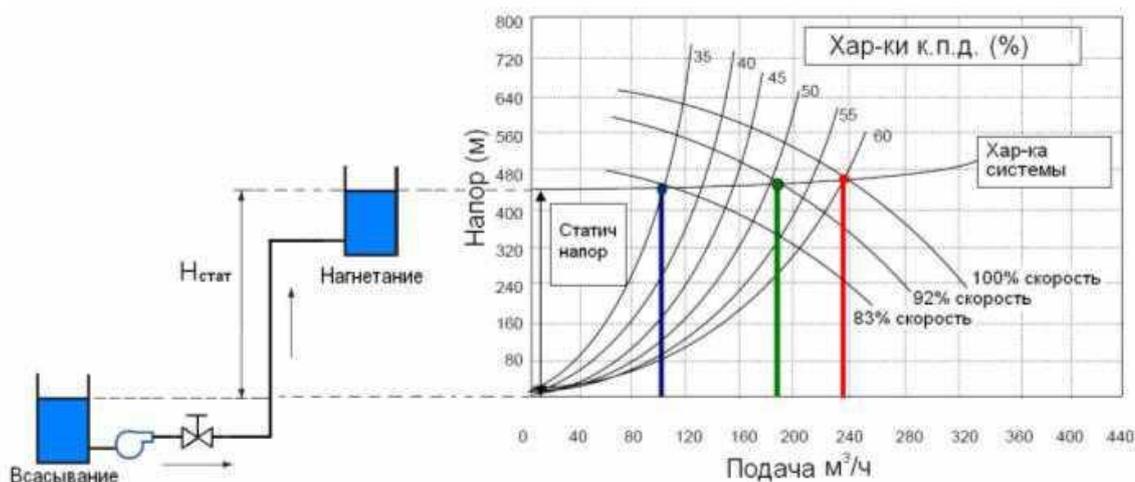


Рис.1.8 Работа насоса с частотным регулированием на сеть с преимущественной статической составляющей.

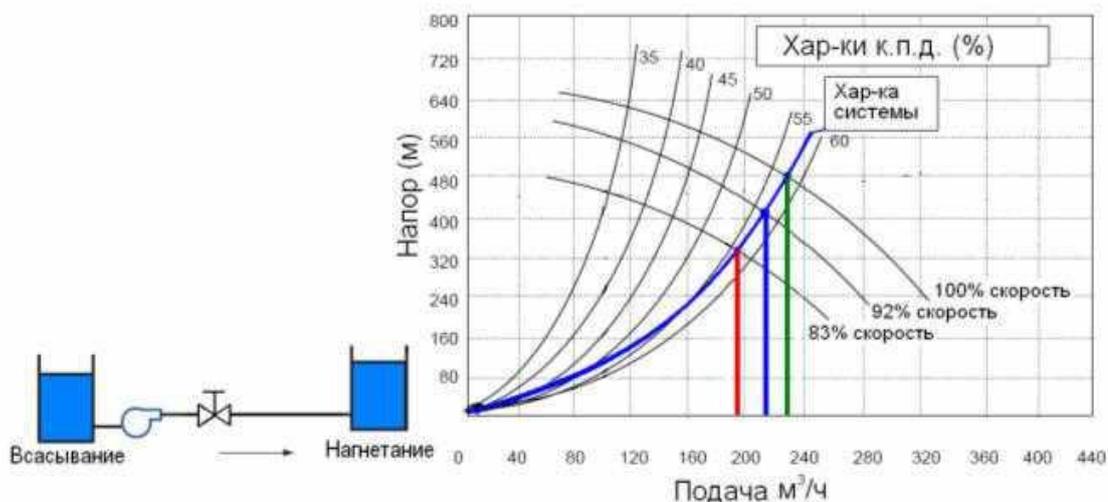


Рис.1.9. Работа насоса с частотным регулированием на сеть с преимущественными потерями на трение.

С другой стороны, работа того же насоса при различных частотах вращения на сеть с преимущественными потерями на трение (рис.1.9), приводит к тому, что рабочая точка смещается вдоль линии максимального к.п.д., и насос

работает в оптимальном режиме на всех частотах. Поэтому применение частотного привода насосов в системах с преимущественными потерями на трение является наиболее рациональным и приводит к значительному сокращению энергопотребления.

Как видно из графиков на рис.1.10, при каскадном регулировании режима работы насосной станции при помощи включения и выключения необходимого количества насосов, установленных параллельно при работе на сеть с преимущественно статической составляющей, суммарная подача увеличивается примерно на одну и ту же константу.



Рис.1.10. Каскадное регулирование режима работы насосной станции при работе на сеть с преимущественно статической составляющей.

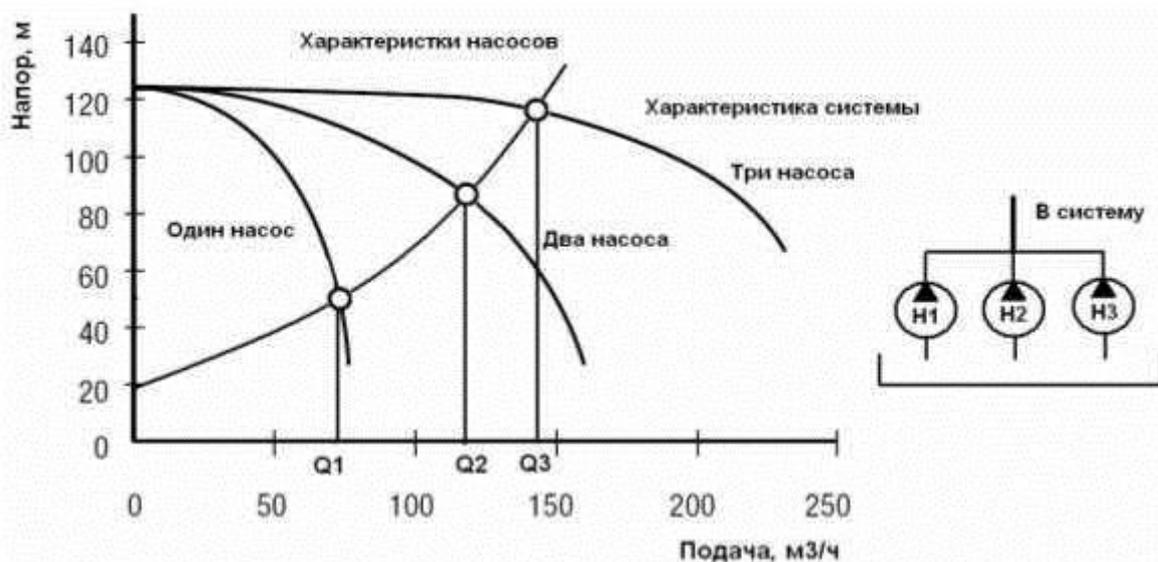


Рис.1.11. Каскадное регулирование режима работы насосной станции при работе на сеть с преимущественно динамической составляющей.

При работе той же насосной станции на сеть с преимущественными потерями на трение, рис. 1.11, подключение каждого последующего насоса приводит к непропорциональному увеличению суммарной подачи. Причем, подключение каждого последующего насоса увеличивает подачу на меньшее значение.

В связи с этим, применение каскадного регулирования приносит эффект в системах с преимущественной статической составляющей, а применение частотного привода рекомендуется для систем с преимущественными потерями на трение.

Кроме того, возможно одновременное использование двух этих принципов – то есть, каскадно-частотное регулирование. Причем, практика показала [14], что энергоэффективная эксплуатация насосной станции достигается, главным образом, за счет согласованной работы на сеть, то есть, при применении такого комбинированного метода каскадно-частотного регулирования. Применение каскадно-частотного регулирования в автоматизированных НС позволяет обеспечить снижение потребления электроэнергии до 50% по сравнению с использовавшимися ранее традиционными принципами регулирования.

На насосных установках используются устройства плавного пуска и преобразователи частоты, осуществляющие частотное регулирование со скалярным или векторным управлением.

При осуществлении прямого пуска электродвигателя от сети возникает бросок тока, который может значительно превышать номинальное значение тока электродвигателя. Воздействие такой ударной нагрузки на проводники лобовых частей обмотки электродвигателя приводит к механическому разрушению изоляции, межвитковым коротким замыканиям. Длительность такого воздействия при пуске электродвигателя зависит от момента сопротивления на его валу и при частых и тяжелых пусках приводит к превышению допустимого уровня температуры обмоток, снижению электрической прочности изоляции и, соответственно, к межвитковым коротким замыканиям. Кроме того, ударная механическая нагрузка на электродвигатель, насосный агрегат при прямом пуске ведет к увеличению зазоров в механических соединениях между двигателем и механизмом, преждевременному износу муфт, редукторов, подшипников.

Большие пусковые токи приводят к просадке напряжения в сети, что ведет к нестабильной работе всего подключенного к ней оборудования.

Удачным техническим решением указанной проблемы является применение для осуществления пуска электродвигателей устройств плавного пуска (УПП). УПП обеспечивает мягкий, с заданным темпом плавный пуск электродвигателя с ограничением тока, существенно снижает среднее значение пускового тока. Это позволяет устранить все вышеуказанные проблемы, возникающие при прямом пуске электродвигателей от сети. Основной задачей применения УПП является предотвращение преждевременного выхода из строя и увеличения ресурса электродвигателей и нагружаемых механизмов, коммутационной аппаратуры, обеспечения возможности управления электроприводом с использованием современных средств автоматизации.

Несмотря на существенные преимущества и положительный эффект при использовании УПП, есть ограничения, сужающие область его использования для решения не свойственных его возможностям задач.

Установка преобразователя частоты является предпочтительной по сравнению с УПП, что не уменьшает существенного положительного эффекта использования УПП по сравнению с прямым пуском. УПП позволяет произвести без перегрузки электродвигателя пуск дополнительного насосного агрегата на полностью открытую задвижку и заполненный трубопровод. Особенно актуально это техническое решение для станций управления группой насосных агрегатов с автоматическим, каскадным включением насосных агрегатов мощностью более 45 кВт

Более подробно вопросы обоснования вариантов применения того или иного способа регулирования приведены в [2, 7,11].

Необходимо отметить, что у каскадно-частотного метода регулирования группы насосов есть ряд сложностей, требующих решения [9]:

- в виду того, что процесс изменения водопотребления не всегда идет монотонно, часто при достижении граничного значения подачи возникает ситуация, в которой дополнительный насос будет многократно включаться и отключаться;
- качество управления сильно зависит от настройки коэффициентов ПИД регулятора, которые подбираются индивидуально;
- алгоритм должен по возможности управлять и использовать насосы в режимах, где их КПД наивысший;

При организации параллельной работы любых насосных агрегатов необходимо решить три основные задачи:

- определить условия, при которых должен включаться НА;
- разработать алгоритм распределения нагрузки между параллельно работающими НА;
- определить условия, при которых НА целесообразно отключить.

Для реализации всех описанных выше функций, в составе современной

автоматизированной НС, помимо преобразователя частоты, должно присутствовать некое интеллектуальное устройство (например, ПЛК), которое будет осуществлять опрос датчиков состояния оборудования и технологических параметров (давления), и выдавать сигналы управления на частотный электропривод. Существует несколько типовых решений в области построения таких автоматизированных НС. В связи с относительно высокой стоимостью частотных преобразователей, сейчас широко распространен упрощенный способ каскадно-частотного регулирования, при котором преобразователь частоты управляет только одним насосом, а остальным по мере необходимости подает команды на пуск и останов. При пуске дополнительных насосов, их электродвигатели подключаются напрямую к сети.

Достоинствами такого способа являются – простота и надежность, а также минимальное количество оборудования для создания автоматизированной НС. Вместе с тем данному способу также присущи серьезные недостатки, такие как:

- появление гидроударов при пуске/останове дополнительных насосов;
- появление в электросети бросков напряжения, связанных с переходными процессами при пуске двигателей;
- невозможность поддержания точного давления в системе, флуктуации давления при включении или выключении дополнительных насосов.

Однако влияние описанных недостатков можно снизить. Так, во избежание гидроударов и бросков напряжения, можно применять устройства плавного пуска, однако это экономически целесообразно лишь при относительно больших мощностях двигателей. Качество регулирования давления также можно улучшить за счет усложнения алгоритма управления, реализуемого вычислителем данной системы. Однако все эти мероприятия связаны с дополнительными финансовыми затратами, что нивелирует привлекательность самой идеи.

Заметим, что данных недостатков лишен такой способ управления, когда

при невозможности обеспечить требуемую в данный момент производительность НС одним насосом, в работу включается следующий, при этом первый насосный двигатель переключается напрямую на сеть, а вступающий в работу – выводится на рабочую частоту под управлением преобразователя частоты, по заданной пользователем кривой разгона.

Сказанное иллюстрируется рисунком, на котором показаны – преобразователь частоты, устанавливаемая в него (при необходимости) дополнительная плата релейных выходов, и два двигателя, каждый из которых может в любой момент времени быть переключен на работу как от питающей сети, так и от частотного преобразователя. Данная схема является упрощенной, и приведена здесь лишь для пояснения сути идеи.

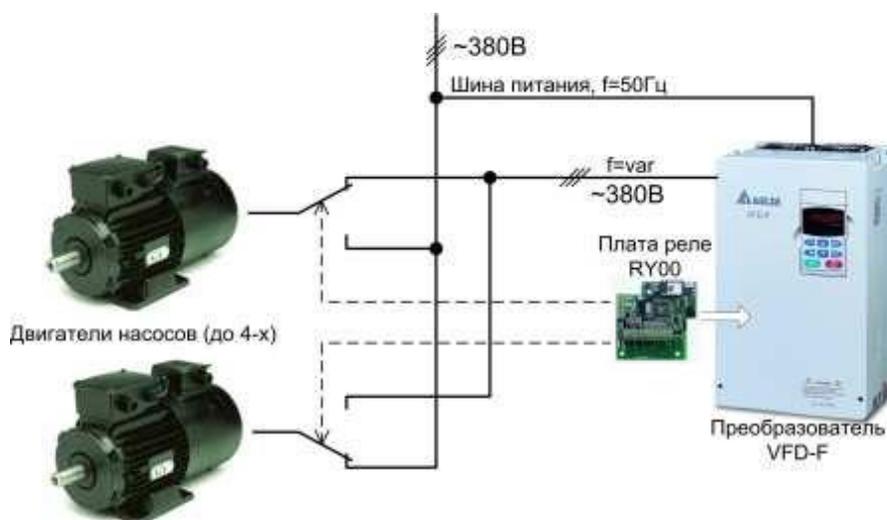


Рис.1.12. Схема использования преобразователя частоты при управлении

Использование в данной схеме специализированного преобразователя частоты, способного заменить описанный выше «вычислитель» или ПЛК, реализующий дополнительные сервисные функции – защиты, регулирование подачи по графику или по заданному расходу, позволяет существенно снизить затраты на модернизацию существующих НС, а также упрощает и удешевляет сервисное обслуживание уже работающей НС.

Также возможен способ управления, при котором все насосы снабжены своим собственным преобразователем частоты – это обеспечивает абсолютное отсутствие указанных выше недостатков, но требует

существенных материальных затрат.

1.3. Постановка задачи

На сегодняшний день, под стандартными способами регулирования производительности насосов понимаются:

- применение задвижек;
- изменение количества работающих насосов.

Основной минус таких способов заключается в том, что в любом случае насосы продолжают работать на полную (номинальную) мощность, при этом расходуя часть электроэнергии «впустую». Для примера можно привести жилой дом, в котором в ночные часы потребление воды намного меньше, чем в часы пик (утром и вечером).

Регулирование насосов с помощью частотно-регулируемого привода (ЧРП), позволяет существенно снизить потребление электроэнергии, при этом, используя обратную связь, можно постоянно поддерживать необходимые параметры в сети, например, давление в магистрали.

Кроме этого, использование ЧРП существенно снижает аварийность в системах, т.к. частотное регулирование позволяет исключить гидроудары и снизить нагрузки.

Преобразователи частоты выпускаются с высокой степенью защиты, что позволяет их использовать не только в коммунальных, но и в нефте и газодобывающих отраслях, а также на химических производствах.

В системах стабилизации напоров в сети, необходимо предусматривать включение дополнительных нерегулируемых насосов при существенных увеличениях притока или водопотребления и отключение их при уменьшении.

Регулируемым приводом должны оснащаться наиболее крупные насосные агрегаты с наиболее пологой характеристикой. В случае

использования одноступенчатых насосов во избежание образования мертвых зон рабочие колеса нерегулируемых насосов должны иметь диаметры, меньшие регулируемых. При равенстве диаметров и работе регулируемого насоса в режиме максимальных подач с повышенной частотой вращения он должен быть укомплектован двигателем повышенной мощности в соответствии с рекомендациями.

Использование ЧРП при регулировании производительности насосов позволит:

- существенно сэкономить потребляемую электроэнергию;
- значительно снизить затраты расходы на ремонт и обслуживание оборудования из-за уменьшения аварийных ситуаций, которые возникают при стандартных способах регулирования;
- увеличить срок службы оборудования;
- более точно и оперативно поддерживать необходимые технологические параметры в норме;
- автоматизировать процесс регулирования, как путем внедрения локальной станции управления, так и с возможностью ее подключения к АСУ ТП предприятия;
- перейти на старую схему регулирования, при возникновении внештатной или аварийной ситуации;
- снизить нагрузку на обслуживающий персонал

В настоящей работе предлагается производить управление небольшой насосной станцией по следующим направлениям:

- Определение необходимого количества работающих насосов. Поддержание заданного давления в магистрали осуществляется каскадным, т.е. последовательным включением насосов. Количество насосов, необходимых для работы, определяется автоматически по модели насосной станции исходя из ситуационного задания.
- Частотное регулирование последним из включенных насосов для более

точного поддержания давления, а также для снижения гидроударов в магистрали и бросков тока в сети.

При этом, управление работой насосной станции осуществляется следующим образом. Данные о уровне воды в нижнем бьефе V через датчик $D_{\text{НБ}}$ поступают на управляющее устройство $УУ$, туда же задаются плановые задания на управление $Q_{\text{пл}}$.

Управляющее устройство по заданному алгоритму A , рассчитывает рабочее положение для каждого насосного агрегата и посредством сигнала управления X воздействует на насосную станцию. Получаемая в результате общая водоподача контролируется посредством выходного сигнала Q генерируемого датчиком верхнего бьефа $D_{\text{ВБ}}$.

С учетом вышесказанного сформулируем задачу оптимального управления работой насосной станции [10,11]. Схема системы управления работой насосной станции показана на рис. 1.13.

Объектом управления являются насосные агрегаты расположенные на станции, неуправляемым входом V -исходные данные о насосных агрегатах, а управляемым X - ом положение на данный момент времени.

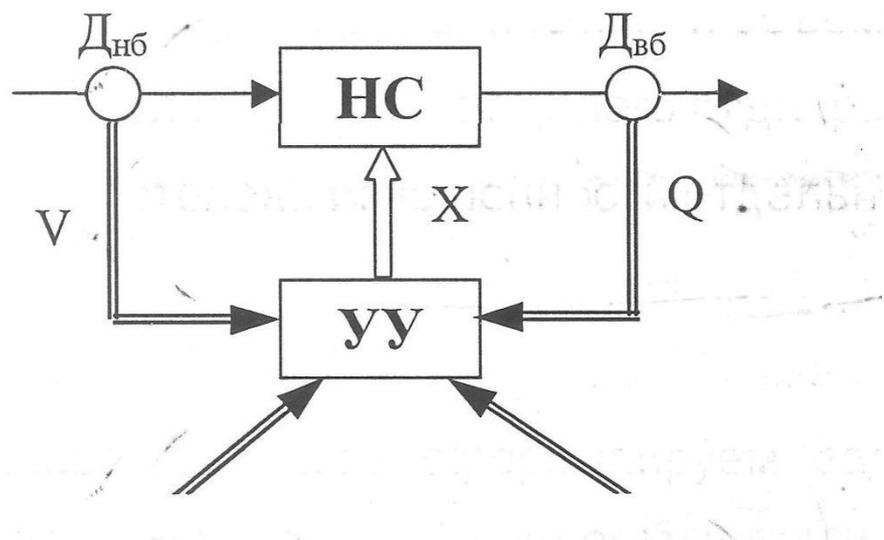


Рис. 1.13 Схема системы управления работой насосной станции

Рассмотрим работу насосной станции и определим ее основные управляющие параметры.

При определении производительности насосных агрегатов необходимо иметь сведения о количестве и частоте вращения работающих насосов.

Исходными данными для вышеописанной системы управления являются количество насосных агрегатов, частота вращения и соответствующие этим параметрам значения вододачи и энергопотребления насосного агрегата. Выходом $Q = \{q_1, q_2, \dots, q_n\}$ - является обеспечиваемая насосной станцией вододача.

Эффективное управление работой насосной станции должно обеспечивать минимум потребляемой мощности для реализации заданного графика вододачи [8,12].

Наиболее современным на сегодняшний день является регулирование частоты вращения роторов приводных двигателей [5], соответственно и рабочих колес насосов, с помощью преобразователей частоты, которые позволяют плавно регулировать скорость электродвигателя насоса, и, тем самым, поддерживать давление в магистрали при разных расходах перекачиваемой жидкости. При малых расходах жидкости двигатель насоса вращается с малой скоростью, необходимой только для поддержания номинального давления и не расходует лишней энергии. При увеличении расхода жидкости преобразователь увеличивает частоту вращения электродвигателя, повышая производительность насоса при сохранении заданного давления.

Если расчетную вододачу всей насосной станции выразить как функционал $Q \langle Q_j, \omega_j \mid j = \overline{1, n} \rangle$, где ω_j - частота вращения, соответствующая j -ому режиму; n - количество допустимых режимов, плановую потребность в воде – как Q_{pb} , то задачу оптимального управления насосной станцией можно сформулировать следующим образом;

При изменения задания на подачу воды с некоторого показателя Q^* на новый Q_{pb} , необходимо адаптировать расходные характеристики НС в новой

ситуации, т.е. скорректировать оптимальный режим работы подбором количества работающих насосных агрегатов m_p из общего числа имеющихся насосных агрегатов m и установкой частоты вращения включенных насосных агрегатов таким образом, чтобы суммарная водоподача станции отклонялась от заданного значения $Q_{pl.}$, на величину не превышающую некое допустимое значение.

Причем такое управление должно быть эффективно с экономической точки зрения и учитывать технологические ограничения оборудования.

Выводы по главе 1

1. Приведено описание основных методов регулирования насосного агрегата, используемых в современных насосных станциях.
2. Описаны методы управления насосной станцией, основанные на каскадном, частотном и смешанном регулировании, обеспечивающие требуемую в данный момент производительность.
3. На основе проведенного анализа существующих методов регулирования, сделан вывод о том, что управление с каскадно-частотным регулированием позволяет существенно снизить потребление электроэнергии, постоянно поддерживать необходимые параметры в сети, а также снизить аварийность в системах при умеренной стоимости.
4. Приведена постановка задачи синтеза моделей и алгоритмов для поиска оптимального режима работы насосной станции при каскадно-частотном регулировании, позволяющая осуществлять эффективное управление работой насосной станции при обеспечении минимума потребляемой мощности для реализации заданного графика водоподачи.

2. РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ И АЛГОРИТМОВ ОПТИМИЗАЦИИ И УПРАВЛЕНИЯ НАСОСНОЙ СТАНЦИЕЙ ПРИ КАСКАДНО-ЧАСТОТНОМ РЕГУЛИРОВАНИИ

2.1 Математическое описание работы насосной станции

Современное водоснабжение и водоотведение характеризуются интенсивным использованием насосного оборудования, причем, доля электроэнергии потребляемой насосами составляет более 50% от общего энергопотребления. Поэтому задачи водоподачи и водоотведения решаются только совместно с задачей энергосбережения. Системы водоснабжения и водоотведения обладают весьма сложной структурой, основными элементами которой являются трубопроводная сеть и насосные установки. Традиционные способы регулирования подачи насосных установок (НУ) состоят в дросселировании (изменении крутизны характеристики трубопровода для уменьшения или увеличения подачи путем открытия или закрытия задвижки) напорных линий насосов и изменении общего числа работающих агрегатов по одному из технологических параметров – давлению на коллекторе или в диктующей точке сети, уровню в приемном или регулирующем резервуаре и др. Эти способы регулирования направлены на решение технологических задач и практически не учитывают энергетических аспектов транспорта воды. Поэтому вопрос эффективного использования насосного оборудования весьма актуален в связи с ростом тарифов на электрическую энергию, расходы на которую в общей структуре затрат могут быть очень значительными.

Анализ режима работы НУ выполняется с использованием характеристик насосов и трубопроводов. На рис. 2.1[15] представлены, к примеру, рабочие характеристики насоса СА120/33 при частоте вращения 2850 об/мин.

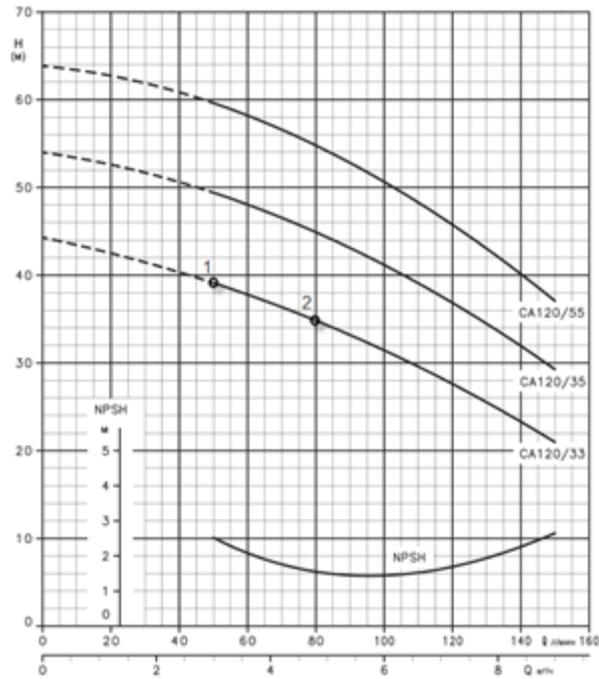


Рис. 2.1. Рабочие характеристики центробежного насоса.

Подача, напор и мощность насоса меняются в зависимости от изменения частоты вращения его рабочего колеса согласно законам пропорциональности [13,16]. Для выяснения зависимости между частотой вращения, подачей, напором и мощностью, потребляемой насосом, рассмотрим параллелограммы скоростей на выходе из рабочего колеса (рис. 2.2). Эти параллелограммы построены для скоростей u_2 , v_2 , v_{2r} и w_2 , соответствующих частоте вращения n , и скоростей u'_2 , v'_2 , v'_{2r} и w'_2 , соответствующих частоте вращения n_1 .

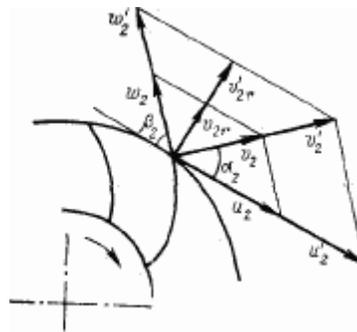


Рис. 2.2. Диаграмма скоростей на выходе из рабочего колеса центробежного насоса

Как видно из рис. 2.2, эти параллелограммы подобны. Следовательно,

$$u_2 / u_2' = v_2 / v_2' = w_2 / w_2' = v_{2r} / v_{2r}'$$

В то же время

$$u_2 / u_2' = (\pi D_2 n / 60)(60 / \pi D_2 n_1) = n / n_1$$

Поддача насоса изменяется пропорционально радиальной составляющей скорости на выходе из рабочего колеса

$$Q / Q_1 = (v_{2r} / v_{2r}')(\eta_o / \eta_o')$$

где η_o и η_o' —объемные КПД насоса при частоте вращения соответственно n и n_1 т. е.

$$Q / Q_1 = (n / n_1)(\eta_o / \eta_o')$$

Так как при изменении частоты вращения менее чем на 50 % объемный КПД можно принимать постоянным, то

$$Q / Q_1 = (n / n_1)$$

т. е. подача центробежного насоса изменяется пропорционально частоте вращения рабочего колеса. Напор, развиваемый насосом, выражается уравнением

$$H = \eta_r k \frac{u_2 v_2 \cos \alpha_2}{g}$$

При изменении частоты вращения напор H_1 будет пропорционален произведению величин u_2' , v_2' , η_r' и, следовательно,

$$\frac{H}{H_1} = \frac{k u_2 v_2 \cos \alpha_2 \eta_r}{k u_2' v_2' \cos \alpha_2 \eta_r'} = \frac{u_2 v_2 \eta_r}{u_2' v_2' \eta_r'}$$

но так как

$$u_2 / u_2' = n / n_1 \quad v_2 / v_2' = n / n_1$$

то

$$H / H_1 = (n^2 / n_1^2)(\eta_r / \eta_r')$$

При изменении частоты вращения менее чем на 50 % можно принимать $\eta_r = \eta_r'$ тогда

$$H / H_1 = (n / n_1)^2$$

т. е. напор, развиваемый насосом, изменяется пропорционально квадрату частоты вращения рабочего колеса.

Соотношения, описывающие зависимость расхода, напора и мощности от частоты вращения рабочего колеса насоса, называются законом пропорциональности.

Характеристики центробежных насосов (подача Q / напор H) в пределах рекомендуемых подач описываются уравнением квадратичной параболы[16]:

$$H_i = H_\delta - S_\delta Q^2 \quad (2.1),$$

где H_δ - фиктивный напор, при нулевой подаче, м; S_δ -гидравлическое фиктивное сопротивление насоса, $S_\delta Q^2$ -потери напора в самом насосе, зависящие от множества факторов (тип жидкости, конструкция насоса, скорость вращения и т.д.). Здесь потери в насосе вычисляются упрощенно через коэффициент S_δ . Фиктивные параметры могут быть определены по каталожным или экспериментальным данным. Для этого необходимо определить координаты двух точек рабочей части напорной характеристики. Используя т.1 и т.2 на рис.2.1 определим параметры насоса СА120/33:

$$S_\delta = \frac{I_1 - I_2}{Q_2^2 - Q_1^2} = \frac{39.1 - 34.8}{4.8^2 - 3^2} = 0.306 \frac{\text{м}}{\text{л}^2};$$

$$H_\delta = H_1 + S_\delta Q_1^2 = 39.1 + 0.306 * 3^2 = 41.86 \text{ (м)}$$

Характеристика насоса СА120/33, построенная по формуле (2.1) представлена на рис.2.3. Видно, что из-за принятых допущений, характеристика несколько отличается от приведенной на рис.2.2, однако близка к ней в области рекомендуемых подач.

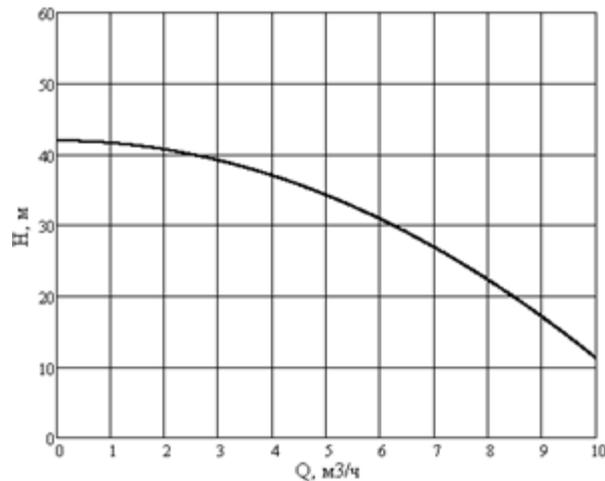


Рис. 2.3. Характеристика насоса по формуле (2.1).

Изменение частоты вращения рабочего колеса насоса ведет к изменению всех его рабочих параметров. При этом напорная характеристика центробежного насоса, работающего с переменной частотой вращения, описывается следующим уравнением[16]:

$$H_i = H_o \left(\frac{\omega}{\omega_i} \right)^2 - S_o Q^2 \quad (2.2),$$

где ω -частота вращения рабочего колеса, об/сек; ω_i -номинальная частота вращения, об/сек. Из (2.2) видно, что гидравлические потери в насосе при одной и той же подаче не зависят от частоты вращения. Это значит, что при ее изменении напорные характеристики насоса остаются подобными друг другу и только изменяют свое положение по вертикали в координатах Q и H на графике (рис.2.4)

При параллельной работе насосы подают воду в одну систему трубопроводов. Суммарная характеристика Q-H параллельно работающих насосов строится сложением абсцисс их характеристик при одном и том же значении ординаты (напора), т.к. их общая подача равна сумме подач каждого насоса (рис.2.5.).

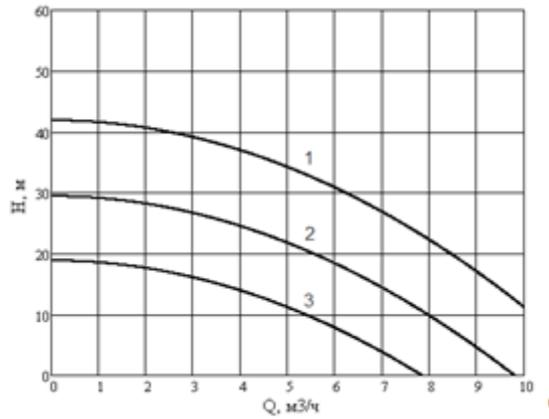


Рис. 2.4. График насоса СА120/33, работающего с переменной частотой вращения: 1-3-напорные характеристики насоса на разных частотах,

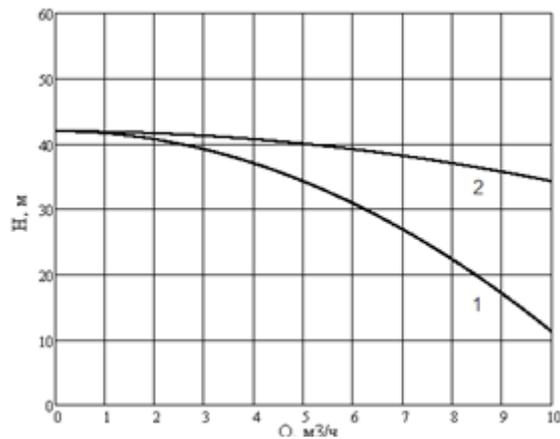


Рис. 2.5. График параллельной работы двух одинаковых центробежных насосов: 1-хар-ка одного насоса; 2-результатирующая характеристика. Используя формулы потребляемой электроэнергии, можно определить ее экономию ΔN .

$$N_1 = \frac{H_1 \cdot Q_1}{1000 \cdot \eta_{нас1} \cdot \eta_{двиг1}}$$

где

N_1 - потребляемая насосом электроэнергия, кВт;

H_1 - напор насоса, Па;

Q_1 - расход (подача насоса) воды, м³/сек;

$\eta_{нас1}$ - к.п.д. насосной части, доли единицы.

$\eta_{двиг1}$ - к.п.д. двигателя, доли единицы.

Эффективное управление работой насосной станции должно обеспечивать минимум потребляемой мощности для реализации заданного графика водоподачи. Мощность насосной станции, т.е. количество потребляемой при работы станции электроэнергии, может быть определена как алгебраическая сумма мощностей каждого работающего насосного агрегата:

$$C_{НС} = \sum_{i \in M_p} C_i \quad (2.3)$$

где $C_i = \frac{k \times H_i \times Q_i}{\eta_i}$ - мощность, потребляемая i -м насосным агрегатом, кВт;

H_i - напор, м; Q_i - расход i -го насосного агрегата, м³ /с; η_i - КПД i -го насосного агрегата;

k -коэффициент, полученный из умножения удельного веса воды $\gamma = 9806,65$ н/м³ на 10^{-3} , $k=9,81$ [17,18].

Наиболее оптимальным, с точки зрения технико-экономических показателей, является способ управления, когда при невозможности обеспечить одним насосом требуемой производительности НС, в работу включается следующий. При этом первый двигатель подключается напрямую к питающей сети, а вступающий в работу – выводится на рабочую частоту с помощью ПЧ. Производительность второго насоса будет определяться выражением:

$$Q_2 = Q_c - Q_{1Н} + \Delta Q_{П}$$

где $Q_{1Н}$ – номинальная производительность первого насосного агрегата; Q_c – потребление в сети в текущий момент; $\Delta Q_{П}$ – потери в гидравлической сети, учитываемые в параметре η - КПД соответствующего насосного агрегата

Для моделирования работы насосной станции и насосных агрегатов основными параметрами являются гидроэнергетические и расходные

характеристики.

Для обеспечения устойчивой работы электродвигателя, ограничения его перегрузки по току и магнитному потоку, поддержанию высоких энергетических показателей, частотный преобразователь должен поддерживать определенное соотношение между входными и выходными параметрами, зависящее от вида механической характеристики насоса. Зависимость напряжения питания от частоты определяется характером нагрузки на валу электрического двигателя.

Эти соотношения получают из уравнения частотного регулирования [19]

$$U_1 / U_2 = f_1 / f_2 \sqrt{M_1 / M_2}$$

Для насосов, работающих без статического напора, т.е. тех, чья механическая характеристика описывается уравнением квадратичной параболы, должно соблюдаться соотношение

$$U_1 / f_1^2 = U_2 / f_2^2 = const$$

Гидроэнергетические характеристики приведены в каталога насосных агрегатов [16]. Расходная характеристика насосного агрегата Q - объём водоподачи, зависит от высоты подъема - напора H и от частоты вращения ω насосного агрегата [20]. В насосных агрегатах расходная характеристика осевого насосного агрегата по каталогу задается в виде семейства кривых при различных частотах вращения

$$Q_j(H) = Q(H, \omega_j), j = \overline{1, n}$$

где ω_j - частота вращения, соответствующая j -ой кривой; n - количество кривых, H - напор насосного агрегата .

Таким образом, главную функциональную характеристику насосного агрегата - водоподачу можно определить двойкой $\langle Q_j(H), \omega_j \mid j = \overline{1, n} \rangle$

При этом рабочий режим насосной станции определяется количеством работающих насосных агрегатов m_p из общего числа насосных агрегатов m и

установкой значений частот вращения каждого включенного насосного агрегата $\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_{m_p}$

Тогда формальную постановку задачи оптимизации можно представить следующим образом [22].

Пусть рассматривается насосная станция описываемая с предельными характеристиками, описываемыми областью D :

$$D = \begin{cases} \omega_{\min} \leq \omega \leq \omega_{\max}, \\ \underline{H}_{kp} \leq H \leq \overline{H}_{kp} \end{cases} \quad (2.4)$$

где: $\omega_{\min}, \omega_{\max}$ - минимальное и максимальное допустимые значения частот вращения насосных агрегатов; $\overline{H}_{kp}, \underline{H}_{kp}$ - критические значения либо напора (для водоподачи прямого потребления) либо уровней верхнего и нижнего бьефов насосных станций, при которых требуется минимизировать некий функционал J , характеризующий качество протекания процесса

$$J(C_{HC}) = \sum_{i \in M_p} C_i \rightarrow \min \quad (2.5)$$

при выполнении следующего условия:

$$\left| \sum Q_i - Q_{pl} \right| \leq \varepsilon \quad (2.6)$$

где: Q_{pl} - плановый уровень водоподачи; ε - допустимая погрешность управления.

Условие (2.6) можно задать другим образом:

$$\underline{Q} \leq \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{n_j} q_{ij} x_{ij} \leq \overline{Q} \quad (2.7)$$

здесь: \underline{Q}, \bar{Q} - допустимые нижний и верхний пределы технологической расходной характеристики насосной станции.

Оптимальное функционирование насосной станции включает следующие условия :

1. суммарное потребление электроэнергии насосной станцией на подачу воды должна быть минимально;
2. насосная станция должна обеспечивать плановый уровень водоподачи с учетом допустимого отклонения;
3. в процессе функционирования насосной станции должны быть учтены технологические ограничения имеющихся насосных агрегатов.

Предлагается решение этой задачи путем подбора количества работающих насосов, и определенного рабочего режима (выбора частоты вращения двигателя насоса) для каждого работающего насосного агрегата.

Пусть насосная станция состоит из m насосных агрегатов: P_1, P_2, \dots, P_m . Для решения примем формальную дискретизацию диапазона изменения частоты вращения насосного агрегата на произвольное количество интервалов n . Такой подход позволяет унифицировать задачу нахождения оптимального режима водоподачи вне зависимости от типа регулирования насосных агрегатов (НА), включенных в систему. Нерегулируемые НА можно будет считать регулируемым по типу включения/отключения, т.е. имеющими только два дискретных значения частоты, соответствующими состояниям включено/отключено. Насосные агрегаты с частотным регулированием могут иметь различное количество уровней дискретизации в зависимости от типовых суточных изменений в требованиях водоподачи, конструктивных особенностей самого насосного агрегата и всей системы в целом.

Тогда для каждого насосного агрегата $P_i, i = \overline{1, m}$ можно считать существенным n_i уровней, соответствующих выбранным интервалам, и определяющим частоты вращения насоса на выбранный момент, при этом каждый агрегат в любой момент времени может находиться только на одном из n_i уровней: $\omega_{i1}, \omega_{i2}, \dots, \omega_{in_i}, i = \overline{1, m}$, где n_i - количество уровней (интервалов) частот вращения i -го насосного агрегата. Причем количество интервалов дискретизации ограничивается только вычислительной мощностью компьютера и может легко варьироваться от 0 до 100 и более, что обеспечивает практически любую точность управления. Величина интервала дискретизации зависит от требуемой точности расчета. Различные насосные агрегаты, установленные на насосной станции, могут иметь различное количество уровней частот вращения, т.е. могут быть разнотипными.

Производительная или расходная характеристика i -го насосного агрегата (водоподача) определяется как алгебраическая сумма значений мощностей работающего насосного агрегата при каждом возможном уровне значения частоты вращения по формулам:

$$Q_i = \sum_{j=1}^{n_i} q_{ij} \cdot x_{ij}, \quad x_{ij} \in \{0,1\}, \quad j = \overline{1, n_i}, \quad \sum_{j=1}^{n_i} x_{ij} = 1 \quad (2.8)$$

где q_{ij} - расходная характеристика i -го насосного агрегата при j -ом уровне частоты вращения, т.е. количество жидкости, обеспечиваемое агрегатом i при значении частоты на уровне j ; причем очевидно, что одновременно агрегат может быть только на одном уровне.

Таким образом, поиск оптимального режима работы насосной станции может быть сведен к задаче целочисленного программирования [20,21].

Пусть рабочие режимы функционирования каждого насосного агрегата характеризуются следующими параметрами:

1. водоподача

$$Q_i = \{q_{i1}, q_{i2}, \dots, q_{in_i}\}, i = \overline{1, m}$$

где q_{ij} - расходная характеристика i -го насосного агрегата при j -ом значении частот вращения ω_j , т.е. количество подаваемой воды, обеспечиваемое i -ым агрегатом при j -ом значении частоты;

2. энергопотребление

$$C_i = \{c_{i1}, c_{i2}, \dots, c_{in_i}\}, i = \overline{1, m}$$

где C_{ij} - количество затрачиваемой электроэнергии (потребляемая мощность) i -го насосного агрегата при j -ом интервале частоты вращения, $j = \overline{1, n_i}$:

Вводим целочисленные переменные, характеризующие фактическую работу конкретного насоса:

$$x_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{если } i\text{-й насос работает при } j\text{-ом значении частоты } \omega_j; \\ 0, & \text{в противном случае} \end{cases} \quad (2.9)$$

Тогда задачу нахождения оптимального режима работы станции (3)-(5) можно свести к задаче целочисленного программирования в следующей постановке:

Необходимо найти минимум функционала J :

$$J(C, X) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{n_i} c_{ij} x_{ij} \rightarrow \min_{x_{ij} \in \{0,1\}} \quad (2.10)$$

При выполнении следующих условий:

$$\left| \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{n_j} q_{ij} x_{ij} - Q_{pl} \right| \leq \varepsilon \quad (2.11)$$

$$\sum_{j=1}^{n_j} x_{ij} \leq 1, \quad i = \overline{1, m} \quad (2.12)$$

где: Q_{pl} - заданный плановый объем водоподдачи; ε - допустимая погрешность отклонения от планового объема водоподдачи.

Ограничение (2.12) характеризует работу каждого насосного агрегата только в одном из возможных значений $\omega_{ij}, i = \overline{1, m}; j = \overline{1, n_j}$.

2.2. Алгоритм расчета оптимального режима работы насосной станции при каскадно-частотном регулировании

Приведенная общая математическая модель задачи (2.3) - (2.12), относится к классу оптимизационных задач целочисленного линейного программирования (ЗЦЛП) с целевыми функциями (2.10) и ограничениями (2.11 – 2.12).

Решением задачи (2.3) - (2.12) является количество и номера работающих насосных агрегатов, а также таблица частот вращения для каждого из работающих агрегатов, позволяющие достичь заданного уровня водоподдачи с наименьшими затратами на электроэнергию.

Общее количество включенных насосных агрегатов можно определить как

$$m_p = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{n_j} x_{ij}^*$$

где $x_{ij}^* \quad i = \overline{1, m}; j = \overline{1, n_j}$ - решение задачи (2.9) - (2.11). То есть, если

$x_{ij}^* = 1, j = \overline{1, n_j}$, то i -й насосный агрегат работает в j -ом режиме $\omega_{ij}, i = \overline{1, m}; j = \overline{1, n_j}$ (задается номер работающего насосного агрегата и его частота вращения).

Шаг дискретизации $\Delta\omega$ определялся из условия по формуле

$$\Delta\omega = \text{int}\left(\frac{\omega_{\max} - \omega_{\min}}{k}\right),$$

по следующему алгоритму:

$$\begin{cases} \omega_1 = \omega_{\min} \\ \omega_n = \omega_{n-1} + \Delta\omega, n = \overline{2, k-1} \\ \omega_k = \omega_{\max} - \omega_{k-1} \end{cases}$$

где $\omega_{\max}, \omega_{\min}$ - допустимый диапазон изменения частоты НА;

k – количество интервалов дискретизации подготовка данных

По шагу дискретизации производится формирование матриц, заключающееся в определении матриц водоподачи и энергопотребления, соответствующих каждому значению частоты [24].

В блоке Анализ решения определяется достижение оптимального решения задачи. При необходимости уменьшаем шаг дискретизации $\Delta\omega$ путем увеличения количества интервалов дискретизации k и повторяем этап формирования матриц.

На рисунке 2.6 приведена укрупненная блок схема алгоритма [25] поиска оптимального режима работы насосной станции, основанная на решении задачи целочисленного программирования с помощью функции *bintprog* пакета Optimization Toolbox системы MATLAB. Подробнее этот вопрос будет рассмотрен ниже.

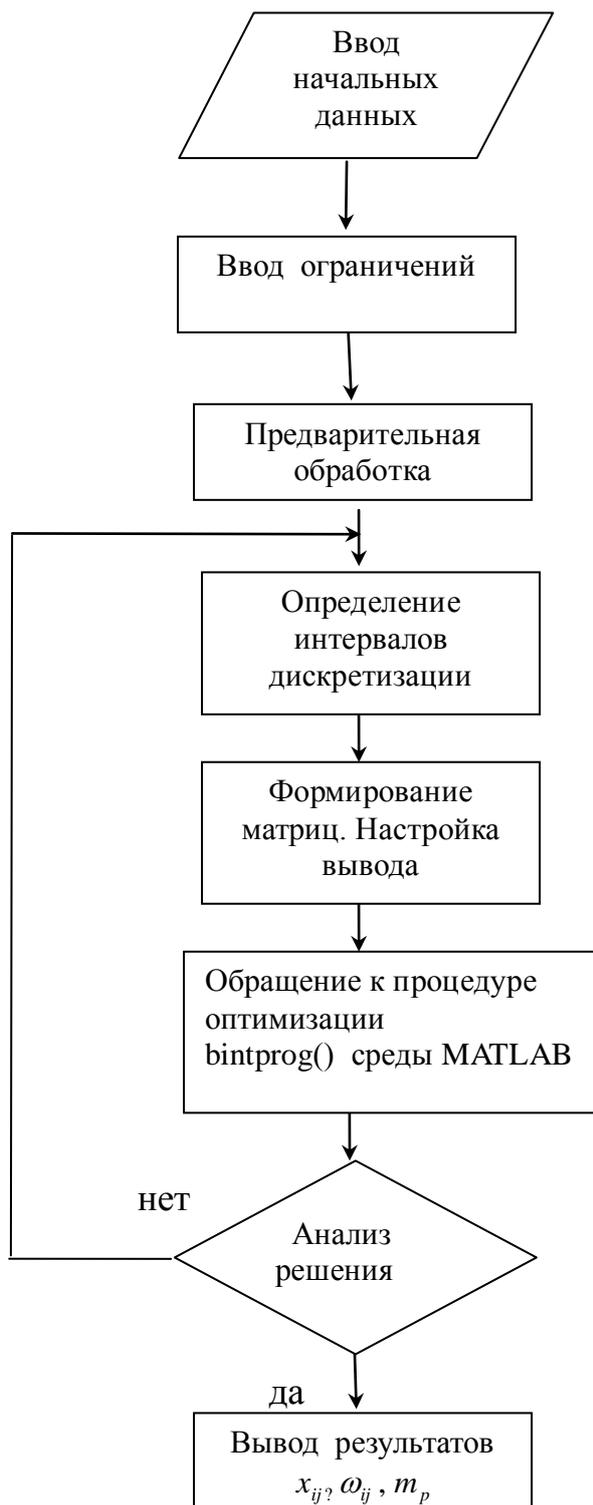


Рис.2.6. Блок-схема алгоритма расчета оптимального режима работы насосной станции

2.3. Алгоритм управления насосной станцией с каскадно-частотным регулированием

Теперь рассмотрим пошаговый алгоритм выработки рекомендаций по оптимальному управлению работой насосной станции в предлагаемой постановке;

- 1) Выбор имени и открытие файла данных;
- 2) Загрузка целых m, n_j и вещественных $C_{ij}, q_{ij}, \varepsilon$;
- 3) Перевести двухмерные C_{ij}, q_{ij} матрицы в одномерные вектора f_k, A_k, b_k построчно

$$k = \overline{1, p}; p = \sum_{i=1}^m n_i$$

- 4) Получение планового задания Q_{pl} . Проверить полученные значения исходя из следующих неравенств:

$$Q_{pl} (1 - \varepsilon) \leq Q_{\max}$$

$$Q_{pl} (1 + \varepsilon) \geq Q_{\min}$$

где Q_{\max} и Q_{\min} - соответственно максимальное и минимальное значение водоподачи, которое может быть обеспечено насосной станцией, т.е. проверка возможности выполнения нового планового объема водоподачи. Если новый режим невозможен, выдать сообщение об этом и вернуть переменным Q_{pl} и ε старые значения;

- 5) Определение оптимального оперативного плана функционирования насосной станции посредством решения задачи целочисленного программирования (2.10)-(2.12) с помощью функции `bintprog()` пакета Optimization Toolbox системы MATLAB [23]. Вначале сохраняются значения p и вектора x^* ;
- 6) Проверка выполнения условия `exitflag = 1`. Если оно выполняется

перейти на шаг 7, т.е. решение найдено. Если условие не выполняется, изменить количество итераций;

7) Если в результате многократного изменения количества итераций флаг успешности поиска решения $exitflag$ не стал равен 1, то это означает, что при заданной относительной погрешности ε выполнение объёма планового водообеспечения O_p для данных характеристик насосной станции физически невозможно. Поэтому увеличить ε на небольшой шаг, восстановить исходные значения p и вектора x^* и перейти на шаг 4;

8) Если величина ε превышает уровень технологической целесообразности, и $exitflag = 2$, то уменьшаем шаг дискретизации $\Delta\omega$ путем увеличения количества интервалов дискретизации k , пересчитываем вектора f и A и переходим к шагу 5;

9) Вывести рекомендации по оптимальному управлению работой насосной станции, состоящие из номеров включенных насосных агрегатов и частот вращения регулируемых насосных агрегатов x_{ij}, ω_{ij}, m_p , а также суммарных энергозатрат и объема водообеспечения;

Выводы по главе 2

2.1 Приведено математическое описание работы насосной станции на основе совместного решения задачи водоподачи и водоотведения с задачей энергосбережения.

2.2 Выбран критерий оптимального функционирования насосной станции и разработан алгоритм расчета оптимального режима работы насосной станции при каскадно-частотном регулировании, основанный на формальной дискретизации диапазона изменения частоты вращения насосного агрегата на n интервалов.

2.3. Предложен алгоритм управления насосной станцией с каскадно-частотным регулированием, основанный на определении оптимального оперативного плана функционирования насосной станции посредством решения задачи целочисленного программирования с помощью пакета Optimization Toolbox системы MATLAB .

3. РАСЧЕТ ОПТИМАЛЬНОГО РЕЖИМА РАБОТЫ НАСОСНОЙ СТАНЦИИ ПРИ КАСКАДНО-ЧАСТОТНОМ РЕГУЛИРОВАНИИ

3.1. Решение задачи целочисленного программирования в среде MatLab

Задачи адаптивного управления работой насосной станции с оптимизацией по расходу электроэнергии, как видно из п.2.2. свелась к **решению** задачи целочисленного программирования.

Одним из самых эффективных методов решения такой задачи является метод ветвей и границ. Данный метод составляет основу решения большинства задач целочисленного программирования [22]. Название метода ветвей и границ связано с его естественной графической интерпретацией, поскольку основу метода составляет некое многоуровневое дерево, на нижнем уровне которого располагаются элементы множества, ветви которого ведут к определенному оптимуму.

Впервые этот метод был предложен в 1960 году для решения задачи целочисленного линейного программирования.

Для всей группы алгоритмов, вписывающихся в общую схему метода ветвей и границ, характерным является применение в их вычислительной схеме следующей основной идеи: последовательное использование конечности множества вариантов решений задачи и замена полного перебора сокращенным, направленным перебором.

Полного перебора удастся избежать за счет отбрасывания “неперспективных” множеств вариантов, т.е. таких, которые заведомо не

могут содержать решения “лучшего”, чем решения, оставшиеся в не отброшенном множестве.

В общей схеме метода эта идея реализуется путем последовательного разбиения всего множества допустимых решений на подмножества и построения оценок, позволяющих сделать вывод о том, какое из полученных подмножеств может быть отброшено без потери оптимального решения исходной задачи.

Основные понятия метода ветвей и границ.

Релаксация (переход в равновесное состояние) задачи - переход от исходной задачи к задаче с той же целевой функцией, но с другой областью допустимых решений, включающей в себя в качестве собственного подмножества множество допустимых решений исходной задачи.

Свойства, связывающие исходную задачу с ее релаксацией:

- если релаксация задачи не имеет решения, то и исходная задача решения не имеет,

- если оптимальное решение релаксационной задачи принадлежит множеству допустимых решений исходной задачи, то это решение является оптимальным и для исходной задачи,

- значение оптимума (значение критерия на оптимальном решении) исходной задачи на минимум (максимум) не меньше (не больше) значения оптимума релаксационной задачи.

Ветвление - разбиение всего множества допустимых решений на непересекающиеся подмножества.

Кандидат - задача, для которой необходимо провести процедуру ветвления.

Потомок - подзадача, полученная в результате ветвления кандидата.

Стратегия - порядок выбора задач кандидатов.

Рекорд - значение критерия, соответствующее наилучшему решению, полученному к данному этапу вычислений.

Общая схема метода ветвей и границ Джеффриона-Марстена включает в себя следующие шаги:

Шаг 1.

Открыть список задач кандидатов, включив в него исходную задачу. Присвоить рекорду большое число (малое число) для задачи на минимум (для задачи на максимум).

Шаг 2.

Провести анализ задач кандидатов с целью выяснения его не пустоты.

- если список не пуст, то перейти на следующий шаг 3,

- если список пуст, то решение задачи завершено: если

значение рекорда не изменилось по сравнению с

первоначальным, то задача не имеет решения, в противном случае - задача решена.

Шаг 3.

Выбрать, используя принятую стратегию, текущую задачу кандидата из списка всех кандидатов.

Шаг 4.

Выбрать релаксацию задачи кандидата.

Шаг 5.

Провести анализ задачи кандидата с целью выяснения наличия у неё допустимых решений:

- если множество допустимых решений задачи кандидата

пусто, то перейти к шагу 2, исключив из списка

рассматриваемую задачу кандидата.

- в противном случае проверить, есть ли у кандидата

допустимое решение, лучше рекорда. Если есть, то перейти

на шаг 6, если нет, то исключить эту задачу из списка и

перейти к шагу 2.

Шаг 6.

Выяснить, получено ли оптимальное решение кандидата:

- если нет, то перейти к шагу 7.
- если да, то пересчитать значение нового рекорда, запомнить рекордное решение и перейти на шаг 2.

Шаг 7.

Продолжать поиск оптимального решения задачи кандидата

?

- если нет, то перейти к шагу 8,
- если да, то модифицировать релаксацию рассматриваемого кандидата и перейти к шагу 5.

Шаг 8.

Разветвить кандидата и включить его потомки в список кандидатов, исключив из списка самого кандидата. Перейти на шаг 2.

Замечание 1.

В рассматриваемой схеме есть два блока, которые могут быть реализованы различными способами:

- выбор очередного кандидата с использованием стратегии (шаг 3),
- модернизация релаксации (блок 7).

Конкретная реализация этих блоков зависит от специфики исходной задачи.

Замечание 2.

Основным преимуществом метода ветвей и границ по отношению к другим универсальным методам, является возможность из-за ограниченного времени решения задачи, в любой момент прервать решение, выбрав в качестве приближенного решения исходной задачи то решение, которое соответствует рекорду, найденному к моменту прекращения вычислений.

Известно, что в составе пакета *Optimization Toolbox* системы MATLAB имеется функция *bintprog*, предназначенная для реализации метода ветвей и границ [23].

Описание программной функции *bintprog*.

Функция ***bintprog*** предназначена для решения задачи целочисленного программирования вида

$$\underset{x}{\text{minimize}} f(x)$$

при условии

$$A \cdot x \leq b$$

$$A_{ed} \cdot x = b_{ed}$$

где f , b и b_{ed} являются векторами, A и A_{ed} - матрицы, а x есть целочисленный вектор решения, то есть его компоненты должны принимать значения 0 или 1.

Синтаксис функции ***bintprog***:

· $x = \text{bintprog}(f)$ - решает задачу целочисленного программирования

$$\underset{x}{\text{minimize}} f(x).$$

· $x = \text{bintprog}(f, A, b)$ - решает задачу целочисленного программирования

$$\underset{x}{\text{minimize}} f(x)$$

при условии $A \cdot x \leq b$.

· $x = \text{bintprog}(f, A, b, A_{eq}, b_{eq})$ - решает предыдущую задачу при

дополнительных условиях типа равенств $A_{ed} \cdot x = b_{ed}$.

· $x = \text{bintprog}(f, A, b, A_{eq}, b_{eq}, x_0)$ - устанавливает начальную точку поиска в x_0 . Если точка x_0 находится в недопустимой области, то команда ***bintprog*** принимает произвольную начальную точку.

· $x = \text{bintprog}(f, A, b, A_{eq}, b_{eq}, x_0, options)$ - при оптимизации используется принимаемая по умолчанию опция из структуры *options*, которую можно задать с помощью функции *optimset*.

· $[x, fval] = \text{bintprog}(\dots)$ - возвращает *fval* как значение целевой функции в точке x .

· $[x, fval, exitflag] = \text{bintprog}(\dots)$ - возвращает параметр *exitflag* с описанием выходных условий команды ***bintprog***.

· $[x, fval, exitflag, output] = \text{bintprog}(\dots)$ - возвращает структуру *output*, которая содержит информацию о данных результатах оптимизации.

Входные аргументы функции *bintprog*:

Входные аргументов команды *bintprog* включает в себя следующие переменные:

f	Вектор с коэффициентами линейной целевой функции.
A	Матрица с коэффициентами линейных ограничений типа неравенств $A \cdot x \leq b$
b	Вектор правой части линейных ограничений типа неравенств.
Aeq	Матрица с коэффициентами линейных ограничений типа равенств $A_{ed} \cdot x = b_{ed}$
beq	Вектор правой части линейных ограничений типа равенств.
x0	Начальная точка поиска по данному алгоритму.
options	Структура опций для данного алгоритма.

Выходные данные функции *bintprog*

Выходные параметры *exitflag* и *output* имеет ряд следующих особенностей:

exitflag	Некое целое число, идентифицирующее причину остановки алгоритма. Далее приводится перечень принимаемых значений и соответствующих причин останова алгоритма.	
	1	Функция сошлась к некому решению x .
	0	Число итераций превысило значение <code>options.MaxIter</code> .
	-2	Данная задача не имеет решения.
	-4	Число перебранных узлов

		превышает значение options.MaxNodes.
	-5	Время перебора превышает значение options.MaxTime.
	-6	Число итераций решателя LP для некоего узла при решении задачи LP-релаксации превысило значение options.MaxRLP.
output	Структура с информацией о результатах оптимизации. Поле данной структуры имеет вид.	
	iterations	Число выполненных итераций.
	nodes	Число узлов перебора.
	time	Превышение времени работы алгоритма.
	algorithm	Используемый алгоритм.
	message	Причина остановки работы алгоритма

Структура опций функции *bintprog*

Для установки или изменения значений поля данной структуры используется команда *optimset*. Предусмотрено использование следующих опций:

BranchStrategy	<p>Тип алгоритма, используемого при выборе переменной ветвления в дереве поиска:</p> <p>'mininfeas' - Выбор переменной с минимальной целочисленной недостижимостью, т.е. выбираются переменные со значением, близким к 0 или 1, но не</p>
----------------	---

	<p>равным 0 или 1.</p> <p>'maxinfeas' -- Выбор переменной с максимальной целочисленной недостижимостью, т.е. выбираются переменные со значением близким к 0,5 (принимается по умолчанию).</p>
Diagnostics	Отображение диагностической информации о данной функции
Display	Уровень отображения. 'off' нет вывода отображения; 'iter' отображения выводится на каждой итерации; 'final' (принимается по умолчанию) - отображение только при окончательном выводе.
DispNodeInterval	Интервал отображений узлов.
MaxIter	Максимальное число допустимых итераций.
MaxNodes	Максимальное число решений (или узлов) функции перебора.
MaxRLPiter	Максимальное число итераций решателя LP для некоего узла при решении задачи LP-релаксации.
MaxTime	Максимальное количество времени в секундах для выполнения заданной функции.
NodeSearchStrategy	<p>Стратегия алгоритма, используемого для отбора следующего узла при переборе в дереве поиска:</p> <p>'df' - стратегия первого поиска в зависимости от положения уровня.</p> <p>'bn' - Наилучшая стратегия перебора узлов, при которой отбирается узел с наименьшим предельным значением целевой функции.</p>
TolCon	Конечный допустимый предел на нарушение заданного

	ограничения
TolFun	Конечный допустимый предел для значения функции.
TolXInteger	Допустимый предел значений переменных
TolRLPFun	Конечный допустимый предел на значение функции задачи релаксации линейного программирования.

В функции *bintprog* для решения задачи целочисленного программирования используется алгоритм линейного программирования (*LP*) на основе метода ветвей и границ. Название метода ветвей и границ связано с естественной графической интерпретацией. Идея метода может быть интерпретирована некое многоуровневое дерево, ветви которого составляют направление поиска определенного оптимума.

Алгоритм ветвей и границ основан на следующих построениях, позволяющих уменьшить объем перебора.

На каждом шаге метода элементы разбиения подвергаются проверке для выяснения, содержит данное подмножество оптимальное решение или нет. Проверка осуществляется посредством вычисления оценки снизу для целевой функции на данном подмножестве. Если оценка снизу не меньше оптимума - наилучшего из найденных решений, то подмножество может быть отброшено. Проверяемое подмножество может быть отброшено еще и в том случае, когда в нем удается найти наилучшее решение. Если значение целевой функции на найденном решении меньше оптимума, то происходит его смена.

В алгоритме функции *bintprog* проводится перебор оптимальных решений задачи целочисленного программирования путем решения набора задач линейного программирования, аналогичных исходной задаче, но в котором требование целочисленности переменных заменяется на более слабое ограничение $0 \leq x \leq 1$ (т.н. задачи *LP-релаксации*).

Данный алгоритм включает в себя следующие этапы:

- Перебор целочисленных допустимых решений.
- Корректировка наилучшей целочисленной допустимой точки по мере продвижения по дереву поиска.
- Проверка невозможности достижения более лучших целочисленных решений посредством решения ряда задач линейного программирования.

Предложенный алгоритм образует дерево поиска путем многократного добавления ограничений на данную задачу, т.е. <ветвления>. На этапе ветвления в алгоритме проводится выбор некой переменной x , чье текущее значение не является целым и далее накладываются ограничение $x_j = 0$ для формирования одной ветви и ограничение $x_j = 1$ для формирования другой ветви. Весь этот процесс может быть представлен в виде некоего двоичного дерева, узлы которого представляют дополнительно налагаемые ограничения. На рисунке 3,1 приводится иллюстрация законченного бинарного дерева для задачи с тремя переменными x_1 , x_2 и x_3 . Следует отметить, что в общем случае порядок переменных при снижении уровней дерева может не соответствовать обычному порядку индексов переменных.

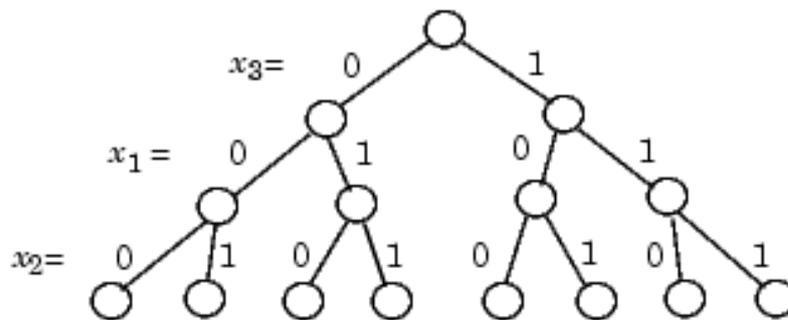


Рис. 3.1. Бинарное дерево для задачи с тремя переменными x_1 , x_2 и x_3

На каждом узле в данном алгоритме проводится решение задачи *LP-релаксации* с учетом ограничений для данного узла и принимается решение о необходимости или ветвления или движения к другому узлу в зависимости от полученного результата.

Имеются три возможности:

- ✓ Если задача *LP-релаксации* для данной текущей точки является недопустимой или ее оптимальное значение больше, чем это значение в наилучшей точке целых значений, то алгоритм удаляет эту точку из данного дерева, после чего не проводится никаких переборов в ветвях ниже данного узла. Далее алгоритм переходит к анализу нового узла согласно методу, заданного опцией *NodeSearchStrategy*.
- ✓ Если алгоритм определяет новую допустимую целочисленную точку с меньшим значением целевой функции, чем это было найдено раньше, то он корректирует наилучшую целевую точку и переходит к анализу следующего узла.
- ✓ Если задача *LP-релаксации* является оптимальной, но не целочисленной, то значение оптимальной целевой функции задачи *LP-релаксации* является меньшим, чем в наилучшей целой точке, а алгоритм переходит на новую ветвь согласно методу, заданному опцией *BranchStrategy*.

Искомое решение задачи *LP-релаксации* определяет нижнюю границу для задачи бинарного целочисленного программирования. Если решение задачи *LP-релаксации* уже является бинарным целым вектором, то это решение определяет верхнюю границу задачи бинарного целочисленного программирования.

По мере прохождения все большего числа узлов в дереве поиска в данном алгоритме проводится корректировка нижней и верхней границ целевой функции с учетом данных полученных на этапе границ. Граница для целевой функции служит в качестве пороговой величины для отсекаания излишних ненужных ветвей.

Алгоритм функции *bintprog* потенциально может перебрать все 2^n бинарных целых векторов, где n есть число переменных. Поскольку для реализации полного алгоритма может потребоваться чрезмерно много

времени, то, возможно, наложить некое ограничение на процедуры перебора с помощью следующих опций:

MaxNodes - Максимальное число узлов в алгоритме перебора.

MaxRLPIter - Максимальное число итераций решателя LP для некоего узла при решении задачи *LP-релаксации*..

MaxTime -- Максимальное количество времени в секундах для выполнения заданной функции.

3.2. Расчет оптимального режима работы насосной станции при каскадно-частотном регулировании

Все реальные процессы протекают во времени непрерывно, быстро или медленно, но их представление математическими моделями может быть как непрерывным, так и дискретным в зависимости от методов исследования и способов реализации. При исследовании сложных нелинейных систем математическими методами процедура дискретизации может позволить использовать хорошо развитый аппарат дискретной математики для решения реальных задач без излишних упрощений обходящих нелинейности, которые имеют важное значение для адекватного описания процессов.

Рассмотрим насосную станцию, состоящую из m насосных агрегатов: P_1, P_2, \dots, P_m . Для решения задачи нахождения оптимального режима работы насосной станции, примем формальную дискретизацию диапазона изменения частоты вращения насосного агрегата на произвольное количество интервалов n . Такой подход позволяет унифицировать задачу нахождения оптимального режима водоподачи вне зависимости от типа регулирования насосных агрегатов (НА), включенных в систему. Нерегулируемые НА можно будет считать регулируемым по типу включения/отключения. НА с частотным регулированием могут иметь различное количество уровней

дискретизации.

Тогда для каждого насосного агрегата $P_i, i = \overline{1, m}$ можно считать существенным n_i уровней, соответствующих выбранным интервалам, и определяющим частоты вращения насоса на выбранный момент, при этом каждый агрегат в любой момент времени может находиться только на одном из n_i уровней: $\omega_{i1}, \omega_{i2}, \dots, \omega_{in_i}, i = \overline{1, m}$, где n_i - количество уровней (интервалов) частот вращения i -го насосного агрегата. Причем количество интервалов дискретизации ограничивается только вычислительной мощностью компьютера и может легко варьироваться от 0 до 100 и более, что обеспечивает практически любую точность управления. Величина интервала дискретизации зависит от требуемой точности расчета. Различные насосные агрегаты, установленные на насосной станции, могут иметь различное количество уровней частот вращения, т.е. могут быть разнотипными.

Экономичность работы насосов при условии обеспечения достаточной подачи воды, напрямую связана с эффективностью работы насосного отделения и всей водопроводной станции в целом [1]. Задачу нахождения оптимального режима работы насосной станции можно свести к задаче целочисленного программирования в следующей постановке:

Необходимо найти минимум функционала J :

$$J(E, X) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{n_j} E_{ij} x_{ij} \rightarrow \min_{x_{ij} \in \{0,1\}} \quad (3,1)$$

где

$$x_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{если } i - \text{й насос работает при } j - \text{ом значении частоты } \omega_j; \\ 0, & \text{в противном случае} \end{cases}$$

$E_i = \{E_{i1}, E_{i2}, \dots, E_{in_i}\}, i = \overline{1, m}$ - энергопотребление, E_{ij} - количество затрачиваемой электроэнергии (потребляемая мощность) i -го насосного агрегата при j -ом

интервале частоты вращения, $j = \overline{1, n_i}$:

При выполнении следующих условий:

$$\left| \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{n_j} q_{ij} x_{ij} - Q_{pl} \right| \leq \varepsilon \quad (3,2)$$

$$\sum_{j=1}^{n_j} x_{ij} \leq 1, \quad i = \overline{1, m} \quad (3,3)$$

где: Q_{pl} - заданный плановый объем водоподачи; ε - допустимая погрешность отклонения от планового объема водоподачи. $Q_i = \{q_{i1}, q_{i2}, \dots, q_{in}\}$, $i = \overline{1, m}$ - водоподача, q_{ij} - расходная характеристика i -го насосного агрегата при j -ом значении частот вращения ω_j , т.е. количество подаваемой воды, обеспечиваемое i -ым агрегатом при j -ом значении частоты;

Приведенная общая математическая модель задачи (3.1) - (3.3), относится к классу оптимизационных задач целочисленного линейного программирования (ЗЦЛП) с целевыми функциями (3.1) и ограничениями (3,2 – 3.3). Для ее решения предлагается использовать метод ветвей и границ, рассмотренный в п.3.1. Этот метод реализован в функции `bintprog` пакета Optimization Toolbox системы MATLAB.

Решением задачи является количество и номера работающих насосных агрегатов, а также таблица частот вращения для каждого из работающих агрегатов, позволяющие достичь заданного уровня водоподачи с наименьшими затратами на электроэнергию.

Задача оптимального функционирования насосной станции (3.1) - (3.3) решалась в следующих условиях [24]:

Насосная станция состоит из 2 насосных агрегатов $m=2$, первый может обеспечить водоподачу от 0 м³/ч до 28,4 м³/ч. Второй снабжен частотным

регулятором и может обеспечивать водоподачу от 0 м³/ч до 42,4 м³/ч.

Первый насосный агрегат может функционировать в 2-х режимах вкл/выкл $n_1=1$. Диапазон регулирования второго насосного агрегата разбивался на 79 интервалов частот вращения от 12 до 120Гц $n_2=79$. Каждому значению частоты соответствует уровень водоподачи:

3.6 4.1 4.6 5.1 5.6 6.1 6.6 7.1 7.6 8.1 8.6 9.1 9.6 10.1 10.6 11.1 11.6 12.1
12.6 13.1 13.6 14.1 14.6 15.1 15.6 16.1 16.6 17.1 17.6 18.1 18.6 19.1 19.6 20.1
20.6 21.1 21.6 22.1 22.6 23.1 23.6 24.1 24.6 25.1 25.6 26.1 26.6 27.1 27.6 28.1
28.6 29.1 29.6 30.1 30.6 31.1 31.6 32.1 32.6 33.1 33.6 34.1 34.6 35.1 35.6 36.1
36.6 37.1 37.6 38.1 38.6 39.1 39.6 40.1 40.6 41.1 41.6 42.0 42.4;

Мощность, потребляемая насосом, пропорциональна подаче и напору насоса, следовательно,

$$E / E_1 = (\omega / \omega_1)^3$$

т. е. мощность, потребляемая насосом, изменяется пропорционально кубу частоты вращения рабочего колеса.

Отсюда по выделенным значениям частоты определяем матрицы водоподачи $Q = \{q_{ij}\}$ и матрицу потребляемой мощности $E = \{e_{ij}\}$. Допустимая погрешность водоподачи принималась $\varepsilon = 0,5$ м³/ч. Плановый объем водоподачи менялся от 28,4 м³/ч до 70,8 м³/ч шагом ε .

Количество итераций – 100

Вызов процедуры оптимизации:

$$[x, fval, exitflag] = bintprog(f, A, b, [], [], [], options)$$

Здесь слева - параметры решения(значения приведены в п.3.3):

x – искомая переменная; $Fval$ – значения критерия оптимальности; $Exitflag$ – флаг завершения процедуры оптимизации («1» - признак нахождения оптимального решения).

Справа - исходные данные: f – коэффициенты критерия оптимальности

Но помимо этого, у метода каскадно-частотного регулирования группы насосов есть много проблем, требующих решения [18]:

- в виду того, что процесс изменения водопотребления не всегда идет монотонно, часто при достижении граничного значения подачи возникает ситуация, в которой дополнительный насос будет многократно включаться и отключаться;
- качество управления сильно зависит от настройки коэффициентов ПИД регулятора, которые подбираются индивидуально;
- алгоритм должен по возможности управлять и использовать насосы в режимах, где их КПД наивысший;

Для реализации этих требований на основании вышеизложенного предлагается уточненная схема оптимального управления насосной станцией, представленная на рисунке 3.3.

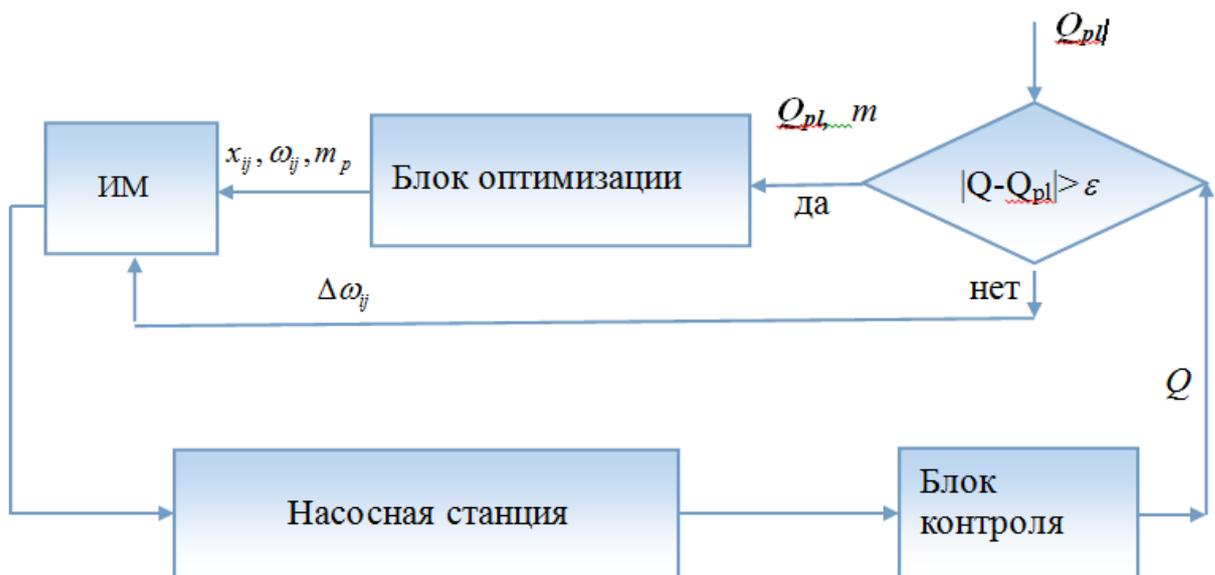


Рис. 3.2 Структурная схема адаптивного управления насосной станцией

При поступлении нового планового задания на водоподачу Q_{pl} в блоке анализа ситуации происходит сравнение поступившего задания с текущей водоподачей, поступающей с выхода насосной станции (блок контроля). Если разница задание-факт превышает некую допустимую величину, то запускается блок поиска оптимального плана работы агрегатов системы под новое задание. Для этого в блоке оптимизации 2 согласно предложенному алгоритму по заданным параметрам рассчитываются параметры оптимального (в смысле расхода электроэнергии) режима работы насосных агрегатов x_{ij}, ω_{ij}, m_p , реализация которых через блок ИМ (исполнительных механизмов) 1 на насосную станцию 4, адаптирует работу системы под поступившее задание. Блок контроля контролирует уровень необходимого потребителям давления в трубопроводе (для конечного потребителя) либо уровень в резервуаре. При незначительном расхождении проводится стабилизация параметров при помощи частотного регулирования. При значительном – принимается решение об адаптации, т.е. о необходимости скорректировать плановое задание и вновь включается блок оптимизации.

Применение регулируемого привода насоса обеспечивает работу НС в зоне оптимальных значений КПД. А каскадно-частотное регулирование производительности НС позволяет оптимизировать эффективность работы насосных агрегатов в режиме неполной производительности, позволяет снизить на 50-70% потребление электроэнергии и способствует износостойкости и долговечности элементной базы системы водоснабжения.

Выводы по главе 3

1. Приведен анализ особенностей программной реализации задачи целочисленного программирования методом ветвей и границ в системе MATLAB.
2. Приведен расчет модели оптимизации работы насосной станцией с частотно-каскадным регулированием с помощью функции `bintprog` пакета Optimization Toolbox системы MATLAB.
3. Предложен алгоритм адаптивного управления насосной станцией с каскадно-частотным регулированием на основе поддержания квазиоптимального режима функционирования на основе предложенной модели.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе были получены следующие результаты .

1. Осуществлен общий анализ методов адаптивного управления на насосных станциях. Выявлены особенности управление с каскадно-частотным регулированием.
2. Осуществлена содержательная постановка задачи управления насосной станции системы водоподъема с каскадно-частотным регулированием.
3. Разработана математическая модель насосной станции водоподъема..
4. Выбран критерий и сформулирована задача оптимизации насосной станции водоподъема при каскадно-частотном регулировании
5. Предложено решение в классе задач целочисленного программирования.
6. На основе оптимизационной модели предложен алгоритм управления насосной станцией управления насосной станцией с каскадно-частотным регулированием
7. Проанализированы особенности программной реализации задачи целочисленного программирования в пакета Optimization Toolbox системы

MATLAB7. Реализован пример расчета модели управления насосной станцией с частотно-каскадным регулированием с помощью функция bintprog

8. Произведен экономический расчет основных технико-экономических показателей разработанного системы адаптивного управления.

5. СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Постановление Кабинета Министров Республики Узбекистан — «Об утверждении Положения о порядке водопользования и водопотребления в Республике Узбекистан» (от 19.03.2013 г.)
2. Лезнов Б.С. Энергосбережение и регулируемый привод в насосных и воздуходувных установках / Б.С. Лезнов. – М. : Энергоатомиздат, 2006. – 360 с. : ил.
3. Рахимов Ш.Х. Управление системами машинного водоподъема. Ташкент; Фан, 1986.- 137 с,
4. Карелин В.Я., Минаев А.В. Насосы и насосные станции; Учеб. для вузов. – 2-е изд., перераб. И доп. М: Стройиздат, 1986. – 320 с.: ил.
5. Залуцкий Э. В., Петрухно А. И. Насосные станции. Курсовое проектирование. - К.: Вицашк., Головное изд-во, 1987. - 167 с
6. Карасев Б.В. Насосы и насосные станции. – Мн.: Выш. школа, 1979. – 288с.
7. Сербин Ю.В., Прокопов А.А., Бугров В.П. Параллельная работа насосных агрегатов при использовании технологии частотного регулирования. - Информационный бюллетень 2007 №2, ИНЖЕНЕРНЫЙ ЦЕНТР "АРТ".
8. Пряжинская В. Г., Ярошевский Д. М., Левит-Гуревич Л. К. Компьютерное моделирование в управлении водными ресурсами. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2002. - 496 с.
9. Красильников А. Автоматизированные насосные установки с

каскадночастотным управлением в системах водоснабжения -Ж.

«Строительный инжиниринг», 2006, №2.

10. Ярошко В.М., Полухин В.А. Оптимальное управление оросительной насосной станцией. Измерит. и выч. техника в управлении процессами в АПК. Мат-лы Всесоюз. конф.– Л.: АФИ, 1988. – с. 198-199.
11. Ярошко В.М, Демченко Б.В. Оптимальное управление оросительной насосной станцией.– М.: Ж. «Мелиорация и водное хозяйство», № 3, 1990.
12. Абуталиев Ф.Б., Рахимов Ш.Х., Бегимов И. Оптимальное управление системами машинного водоподъема. Ташкент, Фан, 1992. - 152 с.
13. Насосы осевые типа "О", "ОП" и центробежные вертикальные типа "В". М.ЦИИНТИХИМНЕФТЕМАШ, 1970. - 30 с.
14. Современная прикладная теория управления: Новые классы регуляторов технических систем. Ч.Ш / Под редакцией А.А.Колесникова.- Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2000
15. Бородацкий Е. Г. Разработка системы управления взаимосвязанным электроприводом центробежных турбомеханизмов станции перекачки жидкости. Автореф. дис... канд. техн. наук. Омск. 1999
16. Карелин В. Я., Минаев А. В. Насосы и насосные станции: Учеб. для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.:Стройиздат, 1986. – 320с.: ил.
17. Лезнов Б.С. Энергосбережение и регулируемый привод в насосных и воздуходушных установках / Б.С. Лезнов. – М. :Энергоатомиздат, 2006. – 360 с. : ил.
18. Сербин Ю.В., Прокопов А.А., Бугров В.П. Параллельная работа насосных агрегатов при использовании технологии частотного регулирования. - Информационный бюллетень 2007 №2, ИНЖЕНЕРНЫЙ ЦЕНТР "АРТ".
19. Проектирование насосных станций и испытание насосных установок/ Чебаевский В.Ф., Вишневский К.П., Накладов Н.Н. – М.: Колос, 2000. –

376с.:

20. Абуталиев Ф.Б., Рахимов Ш.Х., Бегимов И. Оптимальное управление системами машинного водоподъема. Ташкент, Фан, 1992. - 152 с.
21. Кузюрин Н.Н. Задача линейного булева программирования и некоторые комбинаторные проблемы // Компьютер и задачи выбора. М.: Наука, 1989. с. 144-160
22. Методическое пособие по курсу "Математические основы информатики" для студентов факультета ВМК специальности "Прикладная информатика" Часть 3. / Нжег.гос.ун-т, 2004, с.119
23. MATLAB. Optimization Toolbox User's Guide. The MathWorks, Inc. - 2010. -710p.
24. Умеров Х.У., Рахимов Д.А. Оптимизация режима работы насосной станции при каскадно-частотном регулировании//«Узбекский журнал Проблемы информатики и энергетики», Изд-во Фан АН РУз, №6 , 2014, С. 3-9 .
25. Умеров Х.У., Рахимов Д.А. Алгоритм расчета оптимального режима работы при управлении квазинепрерывными процессами//. // Сборник докладов Республиканской научно-технической конференции «Фан, таълим ва ишлаб чиқариш интеграциясида ахборот-коммуникация технологияларини кўллашнинг ҳозирги замон масалалари». Нукус. 2015. Том. 1. с. 257-260

6. ПРИЛОЖЕНИЕ

РАСЧЕТ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАЗРАБОТКИ

Для вычисления экономических показателей необходимы начальные данные, которые перечисляются ниже:

- расходы на технические средства, используемые при разработке темы.
- расходы на основные и вспомогательные материалы, используемые при изготовлении.
- расходы на изготовление.
- сумма амортизированных отчислений основных средств (или сумма аренды).
- сумма фонда заработной платы и отчисления на социальные нужды.

- ставка суммы на предусмотренные расходы.
- ставка прибыли.
- сумма отчислений обязательных налогов.

Экономические показатели исчисляются на основании обязательных и прогнозных ставок. Разница между исчисленными и израсходованными суммами, а также перерасход или экономия непредусмотренных расходов закрывается за счет прибыли.

При расчете была использована таблица, составленная в среде Excel пакета Microsoft Office.

Порядок вычисления экономических показателей

1. Начальные экономические данные:

- количество персонала участвующих при разработке. (I- сумма заработной платы 164000, II- 950000);
- количество отработанных дней I –40 дней, II – 20 дней;
- ставка премиального фонда – 25%;
- технические средства – компьютер Pentium IV (800000 сум), принтер –HP1000 (300000 сум) срок технического старения, морального старения 3 года;
- сумма аренды (сумма амортизации здания мебели и других средств) 16000 сум.

2. Вычисление суммы заработной платы по тарифной сетке

$$S_{зпI} = 164000 \cdot 40/24 = 273333 \text{ сум}$$

$$S_{зпII} = 950000 \cdot 20/24 = 791667 \text{ сум}$$

$$S_{зпобщ} = S_{зпI} + S_{зпII} = 273333 + 791667 = 1065000 \text{ сум}$$

3. Сумма премиального фонда

$$S_{прI} = 220000 \cdot 25\% / 100\% = 68333 \text{ сум}$$

$$S_{прII} = 687500 \cdot 25\% / 100\% = 197917 \text{ сум}$$

$$S_{\text{пр.общ}} = S_{\text{прI}} + S_{\text{прII}} = 68333 + 197917 = 266250 \text{ сум}$$

4. Фонд оплаты труда

$$S = S_{\text{зп.общ}} + S_{\text{пр.общ}} = 1065000 + 197917 = 1331250 \text{ сум}$$

5. Отчисления на социальные нужды – 25% (единый социальный налог)

из них на:

- пенсионный фонд – 24,2%
- профсоюз – 0,3%
- фонд занятости – 0,5%

$$O_{\text{соц}} = S \cdot 25\% / 100\% = 1331250 \cdot 0,25 = 332812.5 \text{ сум}$$

6. Расходы на электроэнергию

$$C_9 = 0,45 \text{ кВтч} \cdot 8 \cdot 40 \cdot 96 \text{ сум} = 13824 \text{ сум}$$

7. Амортизация технических средств

$$A_{\text{тс}} = (800000 + 300000) / 3 \text{ года} / 12 \text{ мес} / 24 \text{ дн} \cdot 40 \text{ дн} \cdot 30\% / 100\% = 15277 \text{ сум}$$

8. Амортизация основных средств

$$A_{\text{ос}} = 25000 \text{ сум}$$

9. Капитальные затраты

$$K_{\text{кап}} = K_{\text{осн}} + K_{\text{всп}} = 25000$$

10. Затраты на изготовление

$$K_{\text{из}} = K_{\text{кап}} \cdot 10\% / 100\% = 2500$$

11. Себестоимость разработки и изготовления

$$C_p = S + O_c + C_9 + A_{\text{тс}} + A_{\text{ос}} + K_{\text{кап}} + K_{\text{из}} = 1745663.5 \text{ сум}$$

12. Сумма непредусмотренных расходов

$$C_{\text{нпр}} = C_p \cdot 5\% / 100\% = 87283.18 \text{ сум}$$

13. Общая себестоимость

$$C_0 = C_p + C_{\text{нпр}} = 1832946.68 \text{ сум}$$

14. Прибыль

$$\Pi = C_0 \cdot 20\% / 100\% = 366589.34 \text{ сум}$$

15. Производственная цена

$$C_{\text{пр}} = C_0 + \Pi = 2199536.01 \text{ сум}$$

16. Налог на добавленную стоимость

$$\text{НДС} = C_{\text{пр}} \cdot 20\% = 439907.20 \text{ сум}$$

17. Оптовая цена

$$C_{\text{опт}} = C_{\text{пр}} + \text{НДС} = 2639443.21 \text{ сум}$$

Исходные данные и результаты экономического расчета систематизированы в таблице 6.1.

Таблица 6.1

№	Экономический показатель	Ед. измерения	Обозначение	Формула исчисления	Сумма (Сум)
1	Количество персонала	чел.			2
2	Сумма з/п	сум	$S_{зп.общ}$	$S_{зпI} + S_{зпII}$	1065000.00
3	Сумма премиального фонда	сум	$S_{пр.общ}$	225250	266250.00
4	Фонд оплаты труда	сум	S	$S_{зп.общ} + S_{пр.общ}$	1331250.00
5	Отчисления на социальные нужды	сум	$O_{соц}$	$S \cdot 25\%$	332812.50
6	Расходы на э/э	сум	C_3	-	13824
7	Амортизация технических средств	сум	$A_{тс}$	-	15277
8	Амортизация основных средств	сум	$A_{ос}$	-	25000
9	Капитальные затраты	сум	$K_{кап}$	$K_{осн} + K_{всп}$	25000
10	Затраты на изготовление	сум	$K_{из}$	$K_{кап} \cdot 10\%$	2500
11	Себестоимость разработки и изготовления	сум	C_p	$S + O_{соц} + C_3 + A_{тс} + A_{ос} + K_{кап} + K_{из}$	1745663.50
12	Сумма непредусмотренных расходов	сум	$C_{нпр}$	$C_p \cdot 5\%$	87283.175
13	Общая себестоимость	сум	C_o	$C_p + C_{нпр}$	1832946.68
14	Прибыль	сум	П	$C_o \cdot 20\%$	366589.34
15	Производственная цена	сум	$\Pi_{пр}$	$C_o + П$	2199536.01
16	НДС	сум	НДС	$\Pi_{пр} \cdot 20\%$	439907.202
17	Оптовая цена	сум	$\Pi_{опт}$	$\Pi_{пр} + НДС$	2639443.21

Экономическая эффективность данной разработки

Эффективность разработки достигается за счёт:

- Понижения потребляемая мощность.
- Более высокого быстродействия.
- Повышенная надёжность.

Понижение потребляемой мощности и увеличения быстродействия достигается за счет применения более совершенной элементной базы. Понижение потребляемой мощности приводит к снижению затрат на электроэнергию. Повышение быстродействия обеспечивает уменьшение времени решения задач, а следовательно, увеличение производительности вычислительной техники.

Повышение надежности обеспечивается за счет применения микросхем, имеющих невысокую интенсивность отказов, и предусмотренных мер по контролю и диагностики устройства. Первое позволяет значительно увеличить вероятность безотказной работы и время наработки на отказ. Второе приводит к улучшению значений коэффициентов готовности и технического использования вычислительной техники. В целом все это обеспечивает снижение затрат на ремонт и обслуживание вычислительной техники.