

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования

**«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АРХИТЕКТУРНО-  
СТРОИТЕЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

*На правах рукописи*

**БАРБУЛ Михаил Леонидович**

**ОПТИМИЗАЦИЯ РАБОТЫ МНОГОНАСОСНЫХ СТАНЦИЙ  
ПОВЫШЕНИЯ ДАВЛЕНИЯ СИСТЕМ ВОДОСНАБЖЕНИЯ  
С УЧЕТОМ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ВОДОПОТРЕБЛЕНИЯ  
В РЕЖИМЕ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ**

Специальность 2.1.4 – Водоснабжение, канализация, строительные системы охра-  
ны водных ресурсов

**Диссертация**

на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор

**ВАСИЛЬЕВ Виктор Михайлович**

Санкт-Петербург – 2021г.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1 МНОГОНАСОСНЫЕ СТАНЦИИ ПОВЫШЕНИЯ ДАВЛЕНИЯ.	
АЛГОРИТМЫ УПРАВЛЕНИЯ СОВРЕМЕННЫМИ МНОГОНАСОСНЫМИ СТАНЦИЯМИ ПОВЫШЕНИЯ ДАВЛЕНИЯ .....	11
1.1 Назначение насосных станций. Классификация.....	11
1.2 Способы регулирования работы насосов при повышенном напоре .	13
1.3 Современные методы изменения параметров насоса .....	16
1.4 Регулирование скорости и совместная работа насосов .....	21
1.5 Современные алгоритмы управления многонасосными станциями .	29
1.6 Выводы по главе 1 .....	39
2 МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ	
ВОДОПОТРЕБЛЕНИЯ .....	41
2.1 Способы описания режимов водопотребления.....	41
2.2 Современные методы прогнозирования .....	46
2.3 Модель прогнозирования водопотребления .....	49
2.4 Адаптивный способ прогнозирования изменения водопотребления с учетом изменения параметров сети водоснабжения .....	55
2.5 Выводы по главе 2 .....	58
3 АДАПТИВНЫЙ АЛГОРИТМ УПРАВЛЕНИЯ МНОГОНАСОСНЫМИ	
СТАНЦИЯМИ С УЧЕТОМ ТЕКУЩЕГО ВОДОПОТРЕБЛЕНИЯ .....	60
3.1 Определение рабочей точки насосного агрегата .....	61
3.2 Определение минимума энергетических затрат при работе нескольких насосных агрегатов в одной общей сети.....	71
3.3 Определение КПД двигателя .....	76
3.4 Определение КПД насоса.....	80
3.5 Работа насосной станции с учетом водопотребления.....	82
3.6 Выводы по главе 3 .....	85

4 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ В НАСОСНЫХ СТАНЦИЯХ .....	86
4.1 Описание экспериментального объекта .....	86
4.2 Методика проведения экспериментальных исследований.....	92
4.3 Обработка результатов эксперимента.....	93
4.4 Выводы по главе 4 .....	98
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	99
СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ И СОКРАЩЕНИЙ.....	101
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ .....	105
Приложение А Требования к аппаратной части насосных станций.....	116
Приложение Б Параметры и характеристики контрольно измерительных приборов .....	118
Приложение В Акты о внедрении результатов диссертационной работы.....	120

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность выбранной темы.** Система водоснабжения – это комплекс взаимосвязанных сооружений, обеспечивающих потребителей водой в требуемом количестве и заданного качества. Одними из основных элементов системы водоснабжения являются многонасосные станции повышения давления, предназначенные для передачи требуемого количества (объема) воды с необходимым напором (давлением) потребителю. Энергопотребление насосного оборудования является одним из основных составляющих эксплуатационных затрат ЖКХ [49].

К настоящему времени имеется достаточное количество литературы [12, 14, 18, 22, 25, 29, 36, 40, 46, 51, 58, 92], в которой излагаются методы и алгоритмы управления современными многонасосными станциями повышения давления. Современный метод управления многонасосными станциями повышения давления (МНСПД) базируются на поддержании постоянного давления на выходе МНСПД при изменении водопотребления [70]. Постоянство давления на выходе МНСПД в настоящее время обеспечивается, в основном, применением частотного электропривода на двигателях насосного агрегата. Как показывает практика, параметры работы станции (станций) управления могут быть настроены некорректно, и привести не только к возникновению дополнительных гидроударов в системе водоснабжения [3], но и к неэффективному режиму работы системы водоснабжения, в том числе и к перерасходу электроэнергии. При этом, данный метод управления не учитывает изменение водопотребления в течении дня, недели и т.д., что напрямую влияет не только на режим работы МНСПД (а именно на рабочую точку и на количество одновременно работающих насосных агрегатов), но и на КПД МНСПД.

В работах [40, 66] показано, что превышение напора на выходе МНСПД является одной из причин возникновения излишних затрат на электроэнергию в насосных станциях. Поэтому целесообразно поддерживать такую частоту вращения насосного агрегата, при которой обеспечивается поддержание минимально

допустимого значения напора на выходе МНСПД во всем диапазоне изменения его подачи.

Одной из основных задач экономического и социального развития Российской Федерации является разработка и осуществление мероприятий по рациональному и эффективному использованию всех видов ресурсов [84, 85], поэтому необходимость совершенствования существующих алгоритмов управления МНСПД (в реальных условиях эксплуатации) для увеличения ее КПД (повышения энергетической эффективности) определяет актуальность данной работы.

**Степень разработанности темы исследования.** К настоящему времени имеется достаточное количество работ российских и зарубежных авторов, в которых излагаются методы управления современными МНСПД: Васильева В.М., Кима А.Н., Али М.С., Баженова В.И., Журбы М.Г., Соколова Л.И., Лезнова Б.С., Николенко И.В., Воробьева С.В., Гильманова А.Г., Пинчука С.В., Чебанова В.Б., Фащиленко В.Н., Штейнмиллера О.А., Черносвитова М.Д., С.Ф. LeónCeli, P.L.Iglesias-Rey, F.J. Martínez Solano и др.

Проведенный аналитический обзор показал, что современные методы управления в своих алгоритмах управления учитывают только значение текущего давления на выходе МНСПД и текущую частоту вращения насосного агрегата. Но, не принимая во внимание дальнейшее водопотребление, невозможно определить рабочую точку насосной станции в последующие моменты времени, и заранее вывести на эффективный режим работы с более высоким КПД.

**Целью исследования** является разработка способа прогнозирования текущего водопотребления за счет статистической обработки накопленных данных водопотребления за прошлый период времени, а также разработка алгоритма управления МНСПД с учетом спрогнозированного водопотребления с уменьшенным энергопотреблением по сравнению с существующими методами управления.

**Задачи исследования:**

- разработать математическую модель функции водопотребления на основе анализа статистических данных водопотребления, полученных в результате многочисленных экспериментов;

- определить параметры работы группы МНСПД, при которых обеспечивается снижение энергопотребления МНСПД;

- разработать адаптивный алгоритм управления многонасосными станциями повышения давления, позволяющий снизить энергопотребление МНСПД.

**Объект исследования** – многонасосные станции повышения давления (МНСПД).

**Предмет исследования** – алгоритмы управления многонасосными станциями повышения давления.

**Научная новизна** результатов диссертационного исследования, полученных лично автором, заключается в следующем:

- с использованием регрессионной математической модели прогнозирования, на основе анализа статистических данных водопотребления, разработан способ прогнозирования водопотребления на последующие промежутки времени;

- на основе (обрабатываемых в режиме реального времени) данных разработан адаптивный способ прогнозирования изменения водопотребления с учетом изменения параметров гидравлической сети, времени года и т.д.;

- определены оптимальные величины давлений на выходе МНСПД (нескольких МНСПД, работающих в одной общей сети), при которых обеспечивается минимум энергетических затрат;

- для управления МНСПД на основе спрогнозированного водопотребления предложен адаптивный алгоритм управления МНСПД, который позволяет вывести МНСПД на режим работы с более высоким КПД.

**Теоретическая значимость работы** заключается в разработке способа прогнозирования водопотребления в режиме реального времени на основе статистической обработки накопленных данных за прошедший промежуток времени. Получены уравнения, математически описывающие водопотребление жилых домов, районов и т.д. за конкретный промежуток времени.

**Практическая значимость** состоит в следующем:

- полученные результаты могут использоваться при разработке и совершенствовании существующих алгоритмов управления МНСПД с целью увеличения КПД МНСПД;

- на основании спрогнозированного водопотребления всех жилых домов, входящих в систему водоснабжения города (района), появляется возможность (с помощью программных средств расчета систем водоснабжения) прогнозирования поведения данной системы водоснабжения в конкретный промежуток времени [5, 6].

**Внедрение результатов.** Разработанные алгоритмы внедрены на предприятиях (приложение В): ОАО «Водоканал-Мытищи», г. Мытищи; ООО «Водоканал», г. Королёв; РЭП «Голицыно», г. Голицыно; ООО «Тепловые сети Балашихи», г. Балашиха и др.

**Методология и методы исследования.** В диссертации использованы теоретические и экспериментальные методы исследований. Теоретические исследования базируются на применении методов решения линейных систем уравнений, методов вычислительной математики и математического программирования, а также методов анализа и синтеза известных и полученных данных во время написания диссертационной работы. При экспериментальных исследованиях на реальных объектах проводилась проверка результатов теоретических исследований.

**Положения, выносимые на защиту:**

- способ прогнозирования водопотребления на последующие промежутки времени на основе регрессионной математической модели прогнозирования;

- адаптивный способ прогнозирования изменения водопотребления с учетом изменения параметров гидравлической сети, времени года и т.д.;

- алгоритм определения оптимальных величин давлений на выходе МНСПД (групп МНСПД, работающих в одной общей сети), при которых обеспечивается минимум энергетических затрат;

- адаптивный алгоритм управления МНСПД, который позволяет вывести МНСПД на режим работы с более высоким КПД.

**Область исследования** соответствует паспорту научной специальности 2.1.4 «Водоснабжение, канализация, строительные системы охраны водных ресурсов», а именно п. 1 «Создание научных основ и математическое моделирование систем водоснабжения и водоотведения населенных пунктов, промышленных предприятий, объектов энергетики и сельского хозяйства с разработкой и реализацией методов оптимизации систем по экономическим, технологическим и экологическим критериям оптимальности» и п. 15 «Использование средств автоматического контроля и управления для повышения эффективности работы сооружений и устройств систем водного хозяйства».

**Степень достоверности и обоснованности** полученных результатов обоснована применением классических положений анализа, моделированием изучаемых процессов. При постановке экспериментов применялись отработанные методики в составе насосных станций, на которых проводились эксперименты, использовались сертифицированные и прошедшие аттестацию приборы и оборудование. Полученные в работе теоретические положения обоснованы строгостью исходных посылок и корректным использованием математического аппарата при выводе аналитических выражений.

**Апробация результатов.** Основные результаты работы были доложены и обсуждались на следующих научно-технических конференциях и семинарах: Научно-техническая конференция профессорско-преподавательского состава и аспирантов университета по итогам научно-исследовательских работ за 2012-2016 года; Годовая конференция аспирантов и молодых ученых «Круглый стол», г. Мытищи, МГУ Леса, за май 2013-2015 года; Международная научно-техническая конференция «Энергетические системы», 2017 г., г. Белгород, БГТУ им. В.Г. Шухова.

**Публикации.** Основные научные результаты по теме диссертации опубликованы в 11 научных работах, автор имеет 8 научных трудов в изданиях, выпускаемых в РФ и рекомендуемых ВАК для публикации основных результатов диссертации.

**Структура и объем диссертационной работы.** Диссертация содержит введение, 4 главы, заключение, акты об использовании результатов работы, изложенные на 121 стр. В работу включены 40 рисунков, список литературы из 103 наименований.

*Во введении* обоснована актуальность темы, определены цель и задачи исследований, сформулирована научная новизна и практическая значимость работы, а также отражены основные положения диссертации, вынесенные на защиту.

*В первой главе* проведен анализ алгоритмов работы существующих многонасосных станций повышения давления. Рассмотрены основные методы управления многонасосными станциями, указаны достоинства и недостатки каждого из них. На основании проведенного анализа сделан вывод, что существующие алгоритмы не учитывают всего многообразия возможных вариантов работы насосной станции в реальном времени, что существенно сказывается на КПД насосной станции, и поэтому требует проведения исследований по поиску новых алгоритмов управления многонасосными станциями с целью уменьшения энергопотребления. В заключении главы поставлены задачи исследования.

*Во второй главе* рассмотрен способ описания процесса водопотребления в течение суток. На основе анализа существующих математических моделей прогнозирования и методов анализа данных разработан адаптивный способ прогнозирования изменения дневного водопотребления, основанный на применении регрессионной математической модели прогнозирования.

*В третьей главе* предложен алгоритм определения текущего расхода воды на насосном агрегате, необходимый для вычисления спрогнозированного водопотребления всей МНСПД. Разработан адаптивный алгоритм управления МНСПД, который позволяет оптимизировать работу МНСПД за счёт работы насосных агрегатов в зоне с более высоким КПД. Указаны принципиальные отличия известных алгоритмов управления насосными агрегатами по сравнению с разработанным.

*Четвёртая глава* посвящена экспериментальному исследованию разработанного алгоритма управления МНСПД. Проверена адекватность модели прогно-

зирования водопотребления с экспериментальными значениями. Проведено сравнение энергопотребления МНСЦД, работающей по известным алгоритмам и разработанному. В результате энергопотребление станции управления с разработанным алгоритмом оказалось меньше на 7%. Представлено описание проведения экспериментального исследования и методики обработки результатов.

*В заключении* работы приведены основные выводы по результатам диссертации.

# **1 МНОГОНАСОСНЫЕ СТАНЦИИ ПОВЫШЕНИЯ ДАВЛЕНИЯ. АЛГОРИТМЫ УПРАВЛЕНИЯ СОВРЕМЕННЫМИ МНОГОНАСОСНЫМИ СТАНЦИЯМИ ПОВЫШЕНИЯ ДАВЛЕНИЯ**

## **1.1 Назначение насосных станций. Классификация**

Система водоснабжения – это комплекс сооружений и инженерных систем, предназначенных для передачи воды из водозаборного источника, ее подготовки, очистки и подачи потребителям [60]. Одним из основных элементов системы водоснабжения являются насосные станции (НС). НС предназначены для передачи требуемого количества воды с необходимым напором (давлением) потребителю. Характеристики оборудования, входящего в состав НС, а также его количество и конструкция определяются в зависимости от назначения НС.

По своему назначению и расположению в общей схеме водоснабжения насосные станции могут быть подразделены на следующие типы [29]:

- насосные станции I подъема (НС Iп);
- насосные станции II подъема (НС IIп);
- повысительные насосные станции (ПНС);
- циркуляционные насосные станции (ЦНС).

ЦНС используются на промышленных предприятиях и тепловых электростанциях, при этом одни НС данных предприятий подают отработавшую воду на охлаждающие или очистные устройства, а другие НС возвращают подготовленную воду к технологическим установкам.

НС Iп забирают воду из источника водоснабжения и подают ее, как правило, в резервуары чистой воды (РЧВ). В случае необходимости очистки воды, она до попадания в РЧВ предварительно подается на очистные сооружения. Из РЧВ с помощью НС IIп вода далее подается потребителю в требуемом количестве (объеме) и с необходимым напором (давлением). В случае нехватки давления непосредственно у конечного потребителя дополнительно устанавливают ПНС. В этом случае вода забирается из одной сети (участка водовода) и под повышенным

напором подается в другую сеть (дома, отдельного цеха предприятия, другого района и т.д.). Т.е. требуемый напор у конечного потребителя в сетях водоснабжения обеспечивают НС IIп и ПНС. В редких случаях для этих целей используют и НС Iп. Для снижения расходов на строительство и эксплуатацию (например, в случае близкого расположении источника водоснабжения и РЧВ) экономически целесообразно производить строительство НС Iп и IIп в одном здании.

Пример одной из систем водоснабжения микрорайона (города) показан на рисунке 1.1.

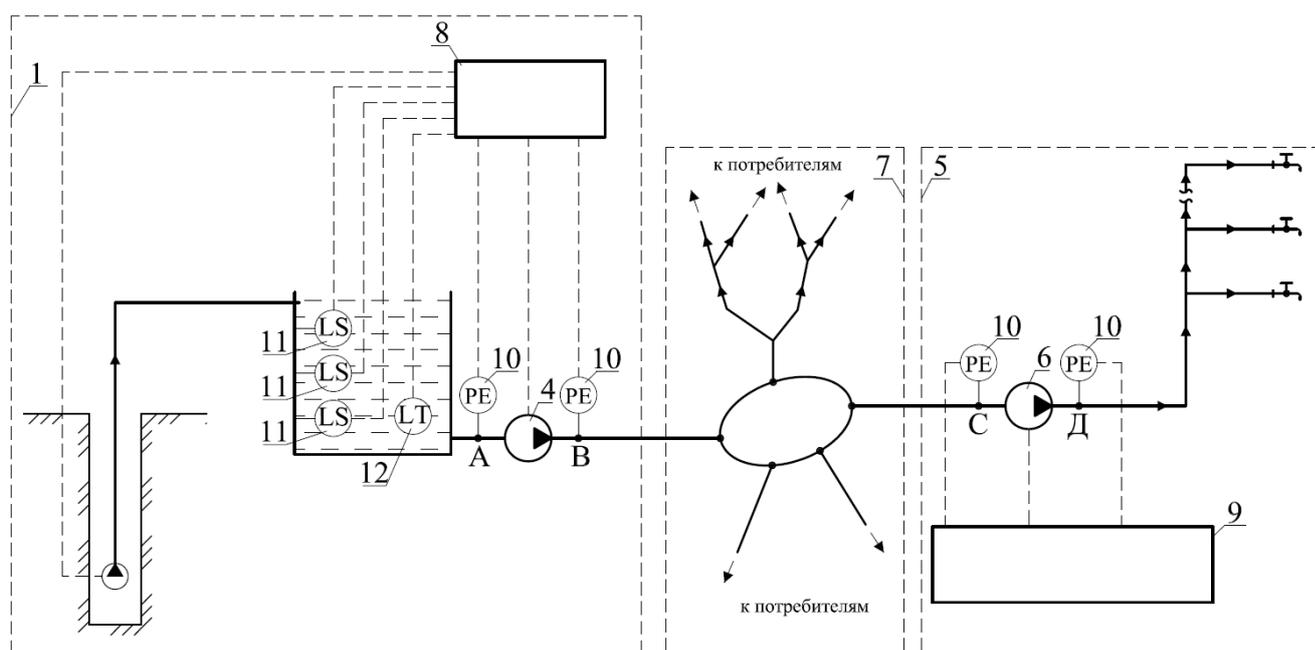


Рисунок 1.1 – Схема подачи воды потребителям

1 – водозаборный узел (ВЗУ); 2 – скважина с установленным в ней глубинным насосным агрегатом (НС Iп); 3 – РЧВ; 4 – насосная станция подачи воды потребителям (НС IIп); 5 – конечный потребитель (дом, цех и т.д.); 6 – ПНС; 7 – сети водоснабжения; 8 – система управления ВЗУ; 9 – система управления ПНС; 10 – аналоговые датчики давления; 11 – сигнализатор наличия уровня в РЧВ; 12 – аналоговый датчик уровня в РЧВ

В работе [71] показано, что основным потребителем электроэнергии при подаче воды потребителям в дома высотой выше 5 этажей являются ПНС (рисунок 1.2).

Поскольку одной из основных задач экономического и социального развития Российской Федерации является разработка и осуществление мероприятий по

рациональному и эффективному использованию всех видов ресурсов [84], то повышение энергетической эффективности ПНС, рассматриваемых в данной работе, является одной из главных задач по снижению энергопотребления всей системы водоснабжения.

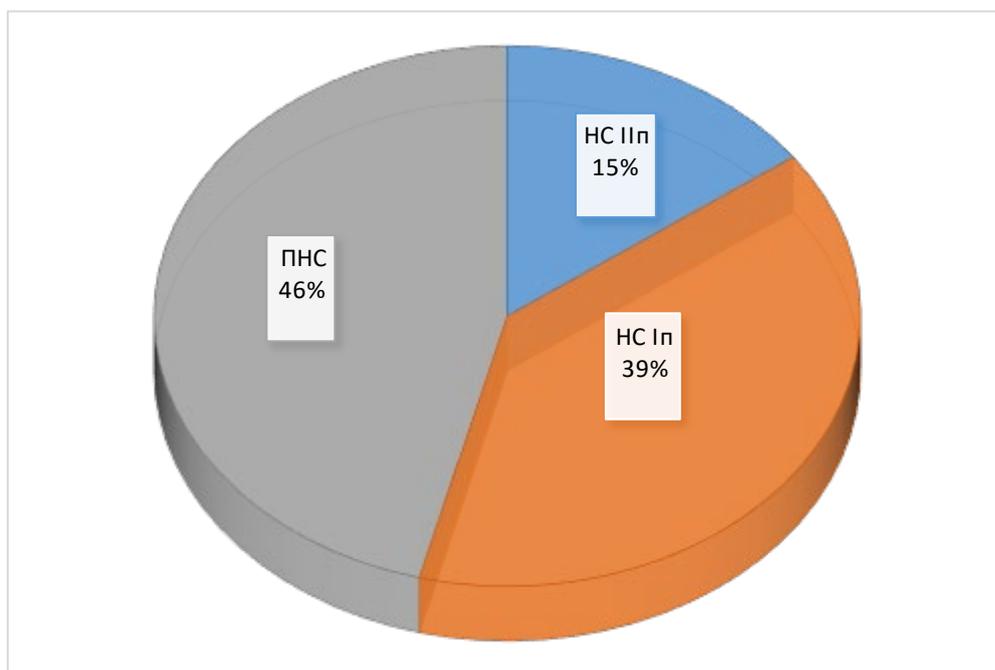


Рисунок 1.2 – Энергопотребление НС при подаче 1м<sup>3</sup> воды потребителям  
 ВЫСОТНЫХ ДОМОВ

## 1.2 Способы регулирования работы насосов при повышенном напоре

Вне зависимости от назначения, расположения и схемы водоснабжения, как правило, контролируемым параметром в НС является напор [14, 23].

При подборе насоса с характеристикой Q-H требуется учитывать все потери напора на каждом участке сети. Суммарные потери напоров зависят от применяемых элементов на рассматриваемом участке сети и расходов воды, проходящих через эти элементы. Используя уравнение (1.1), которое показывает зависимость потерь давления (напора) между узлами  $i$  и  $j$  от режима течения воды и параметрами трубопровода, входящего в данную систему, определяют потери на каждом участке сети (трубопровода)

$$H_i - H_j = h_{ij} = r \cdot Q_{ij}^n + m \cdot Q_{ij}^2, \quad (1.1)$$

где  $H_i, H_j$  – напор в начале и в конце участка сети;

$h_{ij}$  – потери напора на участке сети;

$r$  – коэффициент гидравлического сопротивления;

$Q_{ij}$  – расход воды на участке сети;  $n$  – показатель степени, зависящий от режима течения;

$m$  – коэффициент местного сопротивления.

Уравнение (1.1) используется для всех узлов и отрезков сети. В итоге суммарные потери сети определяют из следующего уравнения

$$\Delta H = \sum h_{ij}, \quad (1.2)$$

где  $\Delta H$  – потери напора всей сети;

$h_{ij}$  – потери напора на участке сети.

Зависимость гидравлического сопротивления от расхода является характеристикой системы. При совместной работе насоса на сеть, точка пересечения графика характеристики насоса с графиком характеристики системы показывает рабочую точку насоса с координатами  $Q_1, H_1$  (рисунок 1.3).

Гидравлические системы делятся на закрытые (замкнутые) и открытые [27, 61, 62]. При замкнутой системе объем жидкости не меняется, насос необходим для создания напора, который преодолевает гидравлическое сопротивление всего участка сети (от выходного до входного патрубка насоса). Для компенсации протечек в закрытых системах предусматривается ее подпитка. Характеристика системы – парабола с вершиной  $(Q, H) = (0, 0)$ .

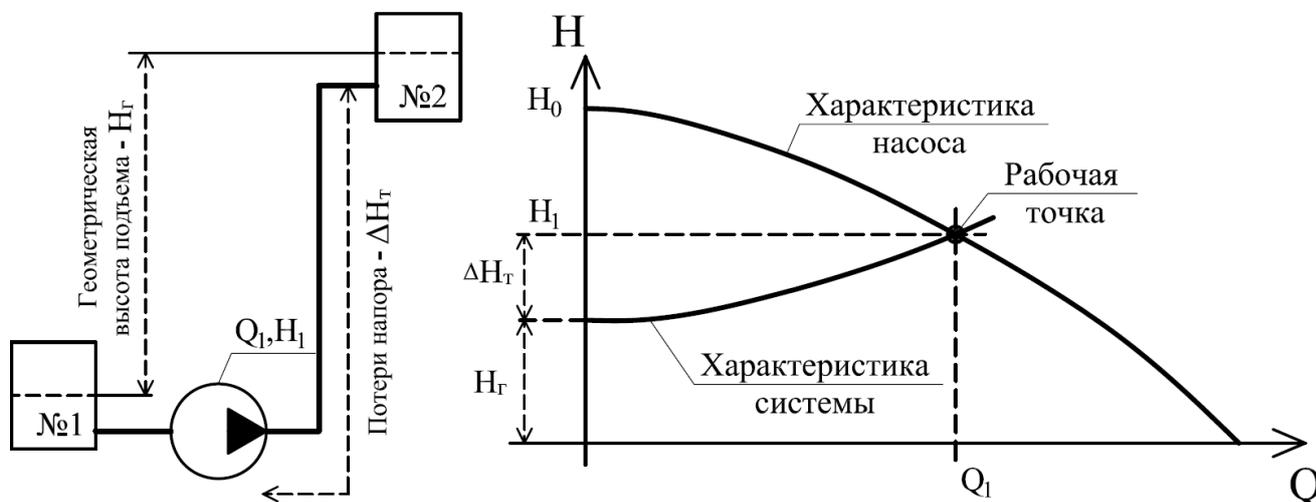


Рисунок 1.3 – Характеристика открытой системы с насосом ниже точки разбора

В системах водоснабжения используют открытые системы [76]. Насосы транспортируют воду в нужном объеме из одной точки до требуемой точки водоразбора, преодолевая гидравлические потери напора во всей системе. Различают два типа открытых систем:

- системы с насосом ниже точки разбора;
- системы с насосом выше точки разбора.

Система открытого типа с насосом ниже точки разбора показана на рисунке 1.3. В данном случае резервуар №1 располагается на нулевой отметке, резервуар №2 на уровне выше, чем резервуар №1. Для подачи воды в резервуар №2 насос должен преодолеть, как геометрическую высоту подъема, так и потери напора на трение на всем участке в сети.

Как видно из рисунка 1.3 характеристика системы открытого типа с насосом ниже точки разбора представляет собой параболу с начальными координатами  $(0; H_T)$  и при увеличении водопотребления в таких системах вырастают потери на трение  $\Delta H_T$ , что ведет и к увеличению потребляемой мощности насоса.

В открытой системе с насосом выше точки разбора (рисунок 1.4) вода под действием силы тяжести доставляется потребителю без насоса. Для случая, изображенного на рисунке 1.4, высота текущего уровня жидкости в резервуаре без применения насоса обеспечивает в точке водоразбора расход  $Q_T$ .

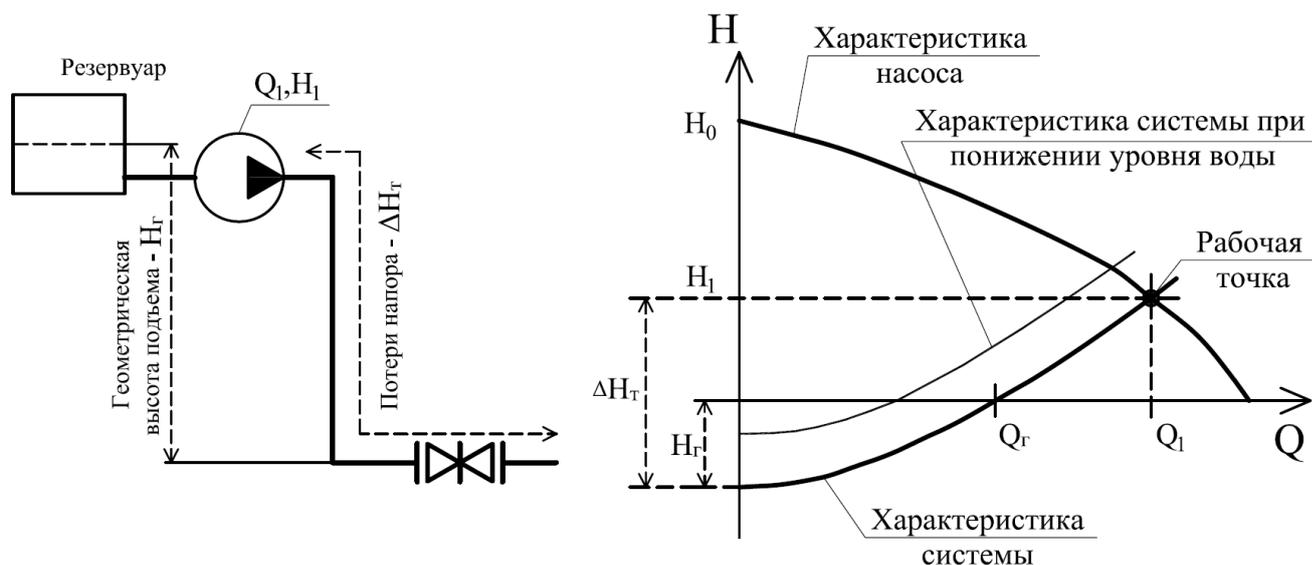


Рисунок 1.4 – Характеристика открытой системы с насосом выше точки разбора

Для обеспечения необходимо расхода  $Q$ , дополнительно устанавливается насос, который должен добавить напор  $H_1$ , чтобы полностью преодолеть все потери на трение на всем участке сети. Характеристика системы с насосом выше точки разбора показана на рисунке 1.4. Как видно из рисунка 1.4 при снижении уровня воды в резервуаре уменьшается и расход, который может обеспечить данный насос (характеристика системы сдвигается вверх). Для данной системы водоснабжения насос выступает в роли ПНС жилого дома (цеха), у которой входным напором является напор  $H_r$ . В этом случае ПНС обеспечивает конечных потребителей требуемым напором  $H_1$ . Как для системы водоснабжения с насосом ниже точки разбора, так и для данного вида систем видно, что при увеличении водопотребления вырастают и потери на трение.

При длительной эксплуатации характеристика системы водоснабжения ухудшается (увеличиваются потери на трение). В этом случае рабочая точка насоса смещается влево и не обеспечивает потребителей требуемым количеством воды. Поэтому появляется необходимость регулирования производительности насоса в случае изменения характеристик системы.

### 1.3 Современные методы изменения параметров насоса

На текущий момент применяются следующие методы изменения параметров насоса:

- дроссельное регулирование;
- байпасный режим работы;
- уменьшение диаметра рабочего колеса;
- регулирование скорости с помощью преобразователя частоты тока.

Для уменьшения производительности насоса при **дроссельном регулировании** задвижка устанавливается последовательно после насоса [55, 73]. В этом случае, закрывая задвижку, уменьшается проходное сечение для потока воды, по сравнению с полностью открытой задвижкой, и тем самым увеличивается сопротивление системы, что приводит к снижению расхода (рисунок 1.5). На рисунке

1.5 расход  $Q_2$  соответствует расходу без применения задвижки, расход  $Q_1$  – расходу системы с последовательно установленной задвижкой. При дросселировании насос создает напор выше необходимого  $H_H = H_3 + H_c$ . В случае применения насоса меньшего типоразмера необходимого расхода  $Q_1$  можно было бы добиться с меньшим энергопотреблением, по сравнению с данным методом регулирования.

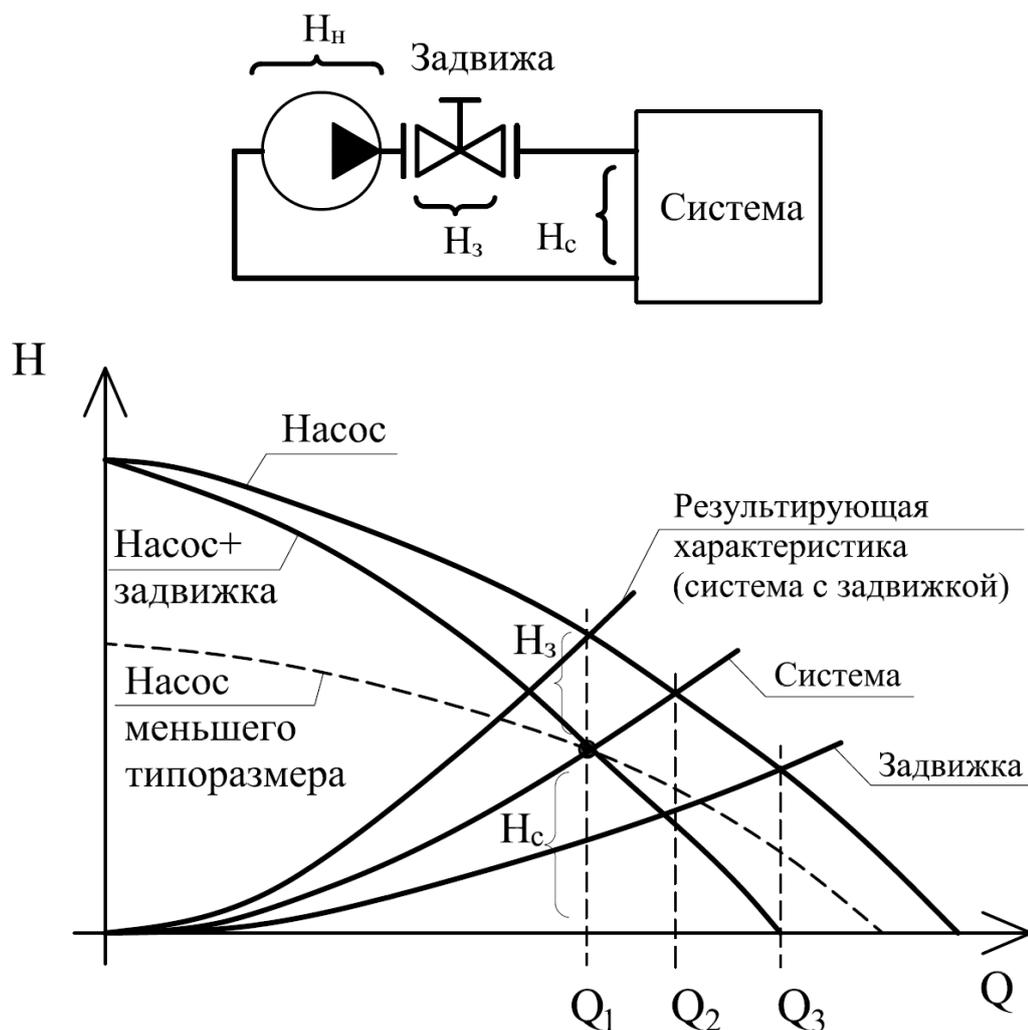


Рисунок 1.5 – Дроссельное регулирование

Для уменьшения производительности насоса при **байпасном методе регулирования** перепускной трубопровод (задвижка) устанавливается параллельно насосу (рисунок 1.6). В этом случае часть воды будет уходить не только в систему водоснабжения, но и в байпасный трубопровод, тем самым уменьшая общий расход, создаваемый насосом, перед потребителем [38]. Таким образом, расход насо-

са равен сумме расходов системы и через байпас  $Q_H = Q_c + Q_{бп}$ . В случае применения насоса меньшего типоразмера необходимого расхода  $Q_c$  можно было бы добиться с меньшим энергопотреблением, по сравнению с энергопотреблением текущего насоса и байпасным методом регулирования.

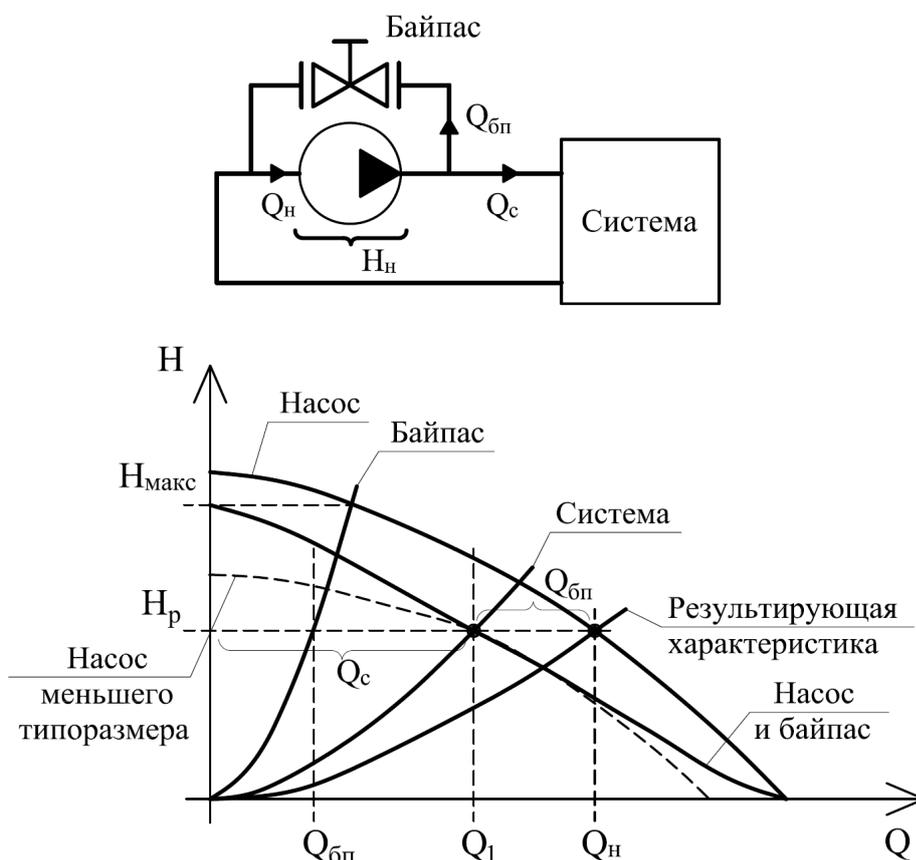


Рисунок 1.6 – Байпасное регулирование

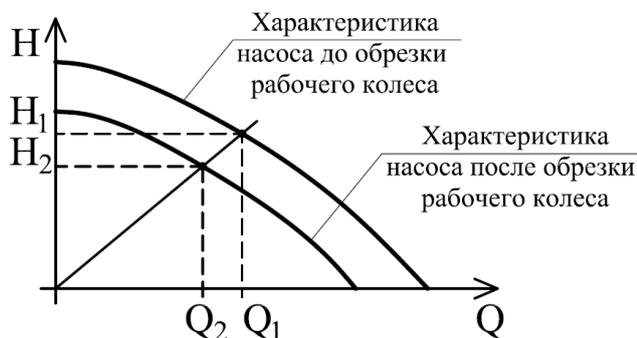


Рисунок 1.7 – Характеристика насоса при уменьшении размера рабочего колеса

Также для изменения рабочей точки насоса прибегают к методу **уменьшения диаметра рабочего колеса**. В этом случае рабочие точки насоса лежат на

прямой в начале координат (рисунок 1.7) и описываются следующим уравнением [18]

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \left(\frac{D_1}{D_2}\right)^3; \quad \frac{H_1}{H_2} = \left(\frac{D_1}{D_2}\right)^2; \quad \frac{N_1}{N_2} = \left(\frac{D_1}{D_2}\right)^5; \quad \frac{\eta_1}{\eta_2} = 1, \quad (1.3)$$

где  $Q_1$  – расход насоса до обрезки рабочего колеса насоса;

$Q_2$  – расход насоса после обрезки рабочего колеса насоса;

$D_1$  – диаметр рабочего колеса насоса до обрезки;

$D_2$  – диаметр рабочего колеса насоса после обрезки;

$H_1$  – напор насоса до обрезки рабочего колеса насоса;

$H_2$  – напор насоса после обрезки рабочего колеса насоса;

$N_1$  – мощность насоса до обрезки рабочего колеса насоса;

$N_2$  – мощность насоса после обрезки рабочего колеса насоса;

$\eta_1$  – КПД насоса до обрезки рабочего колеса насоса;

$\eta_2$  – КПД насоса после обрезки рабочего колеса насоса.

В зависимости от характеристик двигателя центробежного насоса потребляемая мощность при дроссельном регулировании и регулировании байпасом может как снижаться, так и увеличиваться. В двух случаях итоговый КПД (насос + задвижка + электродвигатель) значительно снижается, что приводит к увеличению относительного энергопотребления.

Для систем со стабильной характеристикой метод уменьшения диаметра рабочего колеса, по сравнению с дроссельным регулированием или регулированием байпасом, позволяет вывести насос на оптимальный режим работы с минимальным уменьшением КПД [29]. Однако расходы на обрезку рабочего колеса, включая расходы на разборку и последующую сборку насоса, составляют значительную часть от стоимости нового насоса. Также для открытых систем водоснабжения с переменным расходом применение данного метода является нецелесообразным.

Наиболее эффективным методом изменения параметров насоса является метод регулирования скорости вращения электродвигателя [24, 30], выходной вал которого жестко соединен с валом насоса, с помощью **преобразователя частоты**

**тока (ПЧТ).** Данный метод регулирования целесообразно применять, когда насосная водопроводная станция подает воду непосредственно потребителю (НС Пп, ПНС, и т.п.) [40].

Для построения характеристик насоса на разных частотах вращения применяют уравнения подобия [42]. В этом случае геометрическое место точек, определяющих на различных частотах вращения (скоростях) рабочие точки насоса, соответствующие подобной точке на рабочей характеристике насоса при номинальной частоте вращения  $n$  описывается параболой подобных режимов.

Основываясь на уравнениях подобия и предполагая, что каждая из парабол подобных режимов является линией постоянного КПД насоса, можно по одной характеристике  $Q$ - $H$ , например, для номинальной частоты вращения насоса  $n$ , построить ряд характеристик насоса во всем диапазоне изменения частоты вращения (рисунок 1.8). В этом случае пересчет координат точки  $A$  характеристики  $Q$ - $H$  при номинальной частоте вращения  $n$  для частот  $n_1, n_2, \dots, n_i$  приведет к точкам  $A_1, A_2, \dots, A_i$ , которые удовлетворяют следующему уравнению [42]

$$H = Q^2 \cdot \left( \frac{H_A}{Q_A^2} \right) = const \cdot Q^2, \quad (1.4)$$

где  $H$  – напор насоса при текущей частоте вращения;

$H_A$  – напор насоса при номинальной частоте вращения;

$Q$  – расход насоса при текущей частоте вращения;

$Q_A$  – расход насоса при номинальной частоте вращения.

Аналогичным образом определяются другие подобные точки (рисунок 1.8).

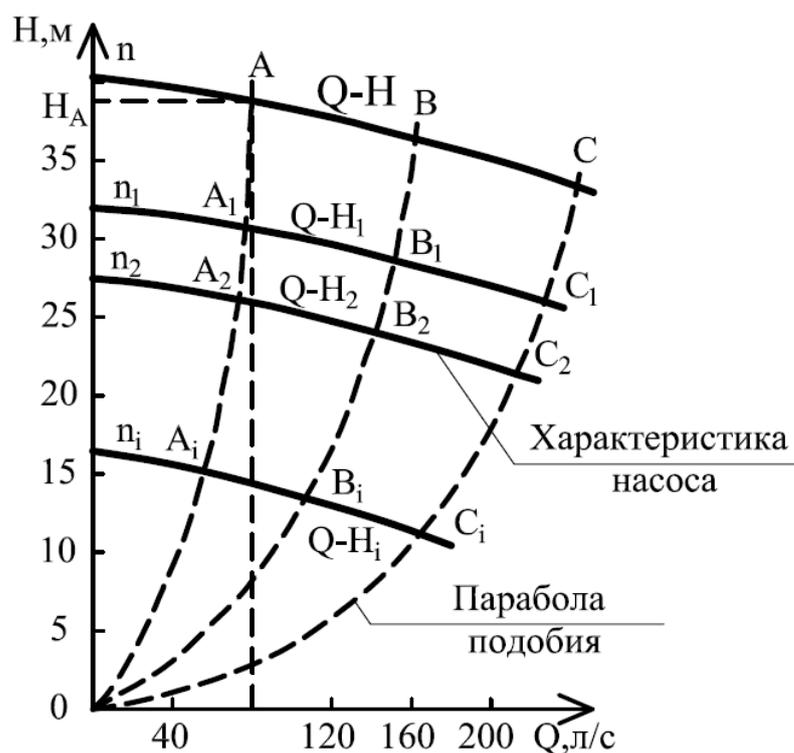


Рисунок 1.8 – Определение характеристик насоса при использовании ПЧТ

#### 1.4 Регулирование скорости и совместная работа насосов

Поскольку в состав насоса входит не только сам насос, но и электродвигатель, а также ПЧТ, то их КПД, при расчете общего КПД насосного агрегата (НА) пренебрегать нельзя. Далее под сокращением НА понимается совокупность: насос + электродвигатель + ПЧТ. При работе двигателя от ПЧТ происходит снижение КПД двигателя вследствие его работы от ПЧТ за счет потерь на гармониках в управляемом электродвигателе ввиду несовершенства синусоидальной волны тока на выходе ПЧТ. Потери в двигателях из-за работы от ПЧТ приводят к нагреву двигателя и соответствующему ухудшению характеристик, в результате КПД двигателя падает еще на 0,5 – 1 % [13].

КПД современного ПЧТ, например, производства компании Schneider Electric, на всем диапазоне частот частоте переменного тока составляет 95 – 98 % [13, 21] и зависит только от частоты широтно-импульсной модуляции (ШИМ) [100].

Итоговая картина КПД насосного агрегата с учетом потерь на насосе, электродвигателе с учетом ПЧТ показана на рисунке 1.9.

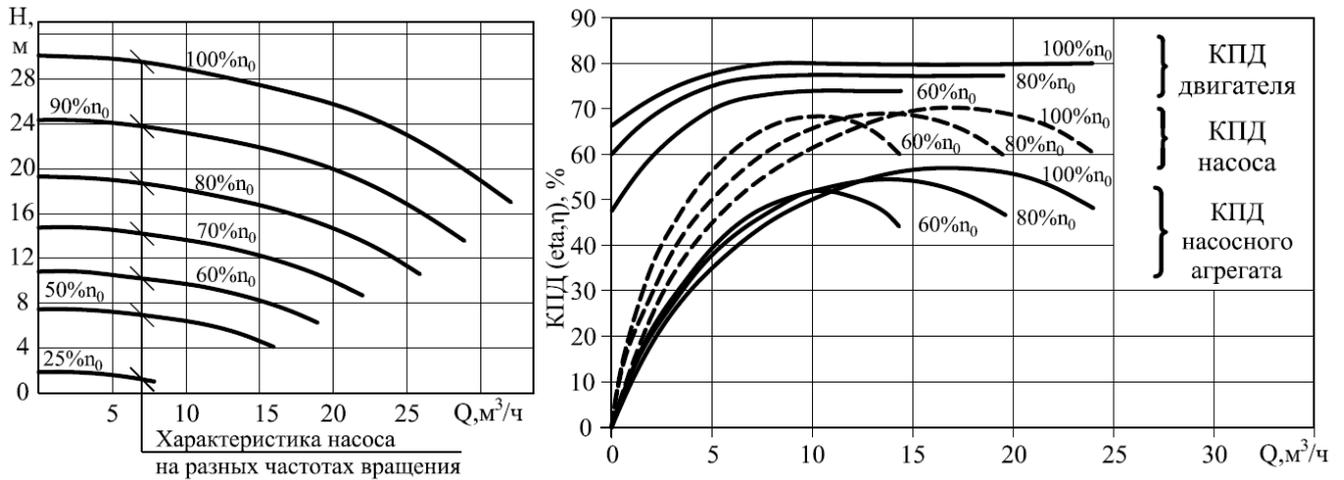


Рисунок 1.9 – Общий график КПД НА при различных частотах вращения

Выбор способа регулирования положения рабочей точки, а, следовательно, и относительные энергозатраты, зависят от условий эксплуатации системы водоснабжения и ее параметров.

Характеристика открытых систем постоянно меняется, как из-за изменения подпора на входе в систему (рисунок 1.10, 1), так и из-за смены положения диктующей рабочей точки, которая описывается новой характеристикой системы с другой кривизной параболы. При этом, из-за различной статической составляющей напора, парабола характеристики системы не всегда выходит из начала координат. В этом случае в системе водоснабжения, которая обеспечивается даже одним НА, затруднительно регулировать положение рабочей точки по параболе подобных режимов, проходящей через точки с максимальным КПД.

В закрытых же системах характеристика системы близка к параболе подобных режимов. В этом случае графики характеристики системы и параболы подобия режимов работы НА выходят из начала координат и проходят через точки с максимальным КПД.

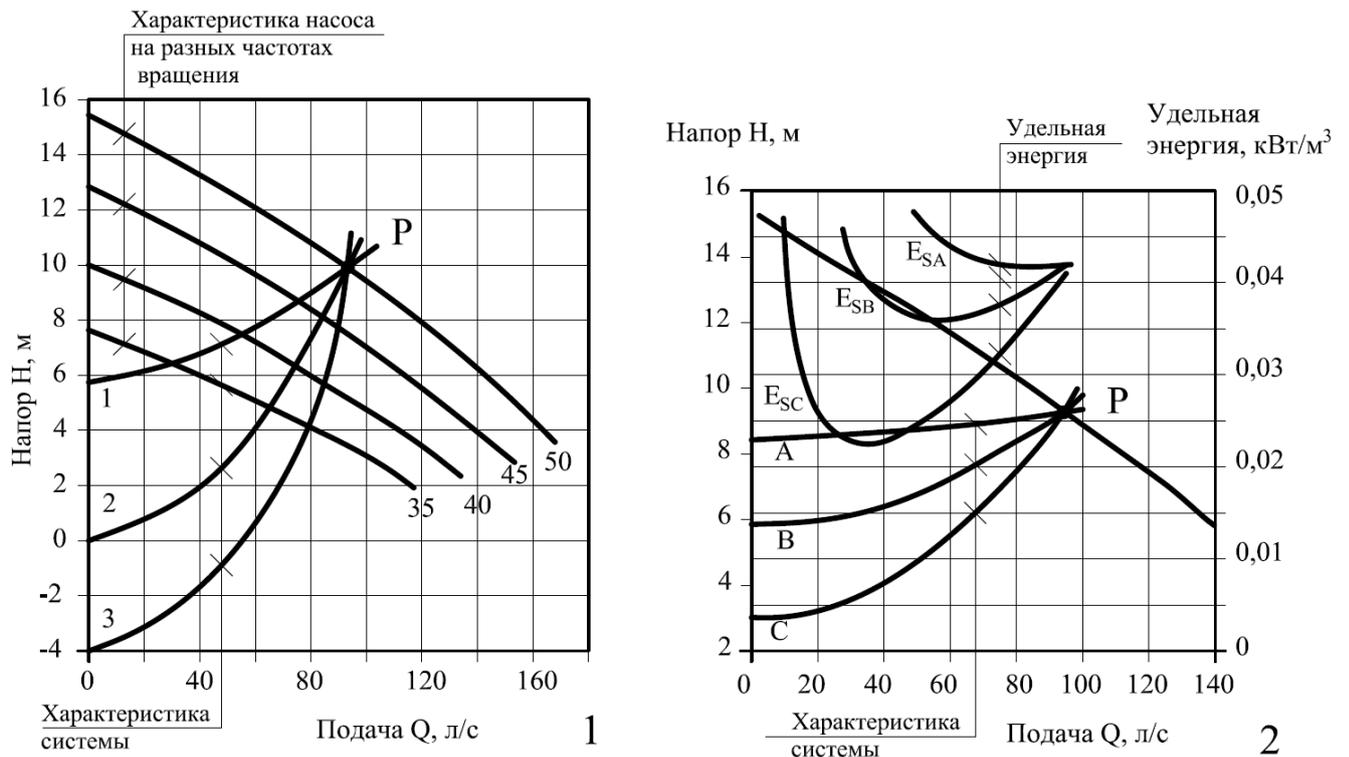


Рисунок 1.10 – Характеристика системы и удельные энергозатраты при регулировании скорости в зависимости от типа открытой системы

Поэтому однозначно сказать, что регулирование положения рабочей точки с применением ПЧТ в открытых системах водоснабжения является энергоэффективным, нельзя [4, 25, 41, 78, 79]. Для системы типа А (рисунок 1.10, 2) (с большой высотой подъема и при линейной характеристике системы или меняющейся менее 20% от требуемого напора) применение ПЧТ (с точки зрения энергетических затрат) нецелесообразно. В этом случае насосы имеют пологую напорно-расходную характеристику, а требуемый напор близок к напору насоса при номинальной частоте вращения рабочего колеса [32]. Для остальных типов В и С (рисунок 1.10, 2) регулирование с применением ПЧТ имеет смысл. При этом для смешанного типа В, у которого регулирование скорости эффективно на определенном интервале подач, рекомендуется так подбирать НА, чтобы обеспечить максимальное время его работы в зоне с максимальным КПД [48].

На текущий момент известно два основных метода управления (насосной станцией (НС), насосным агрегатом) с применением ПЧТ [49]:

- управление по характеристике системы [37, 75];

- по критерию постоянного давления.

Метод управления по характеристике системы, например, интегральное регулирование работы повысительных насосов [75], основан на поддержании значения напора на выходе НА, определяемого по характеристике системы, в зависимости от текущего расхода (рисунок 1.11). Недостатком этого способа регулирования, является то, что за основу применяется некоторая расчетная характеристика водопроводной сети, которая может существенно отличаться от эксплуатационных параметров [49]. Поскольку диктующая точка в каждый момент времени изменяется, как вследствие изменения текущего расхода, так и вследствие изменения количества потребителей сети, а также в виду изменения характеристики системы из-за изменяемого входного напора в наружной водопроводной сети (рисунок 1.12), то данный метод управления применять повсеместно невозможно, а лишь при определенных условиях. Например, ночное водопотребление всегда меньше дневного, в этом случае нет необходимости в ночной промежуток времени держать значение давления на выходе НА равное дневному, поэтому применяют двухпозиционное регулирование: давление дневное и давление ночное [31].

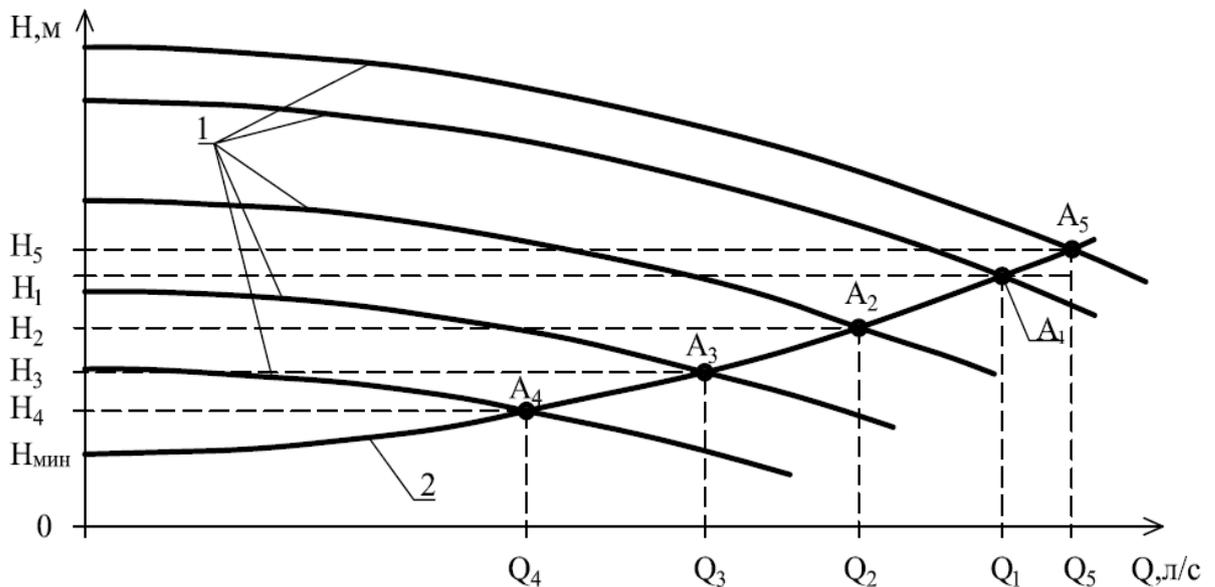


Рисунок 1.11 – Определение величины напора при интегральном регулировании

1 – напорно-расходные характеристики насоса при разной частоте вращения рабочего колеса; 2 – характеристика сети; A1, A2, A3, A4, A5 – рабочие точки при разном водопотреблении

Указанных выше недостатков лишен метод управления по критерию постоянного давления на выходе НА (рисунок 1.13), который учитывает смену положения диктующей рабочей точки в поле  $[Q, H]$  во время работы НА. На сегодняшний день большинство систем управления МНСПД построено на основе данного метода.

В работах [40, 66, 72] показано, что превышение напора является одной из причин возникновения потерь электроэнергии в НС. Следовательно, целесообразно поддерживать такую частоту вращения НА, при которой геометрическое место рабочих точек насосного НА лежало бы на рабочей характеристике трубопровода, что при данном способе управления не всегда осуществимо.

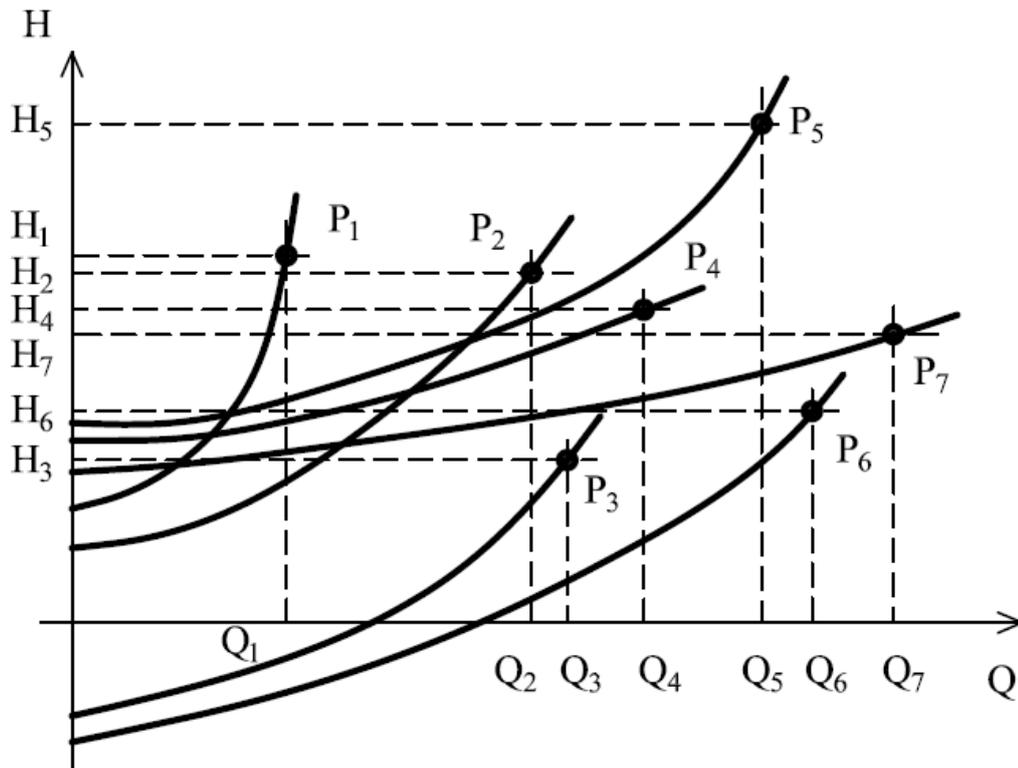


Рисунок 1.12 – Характеристики системы и рабочие точки в реальных условиях эксплуатации

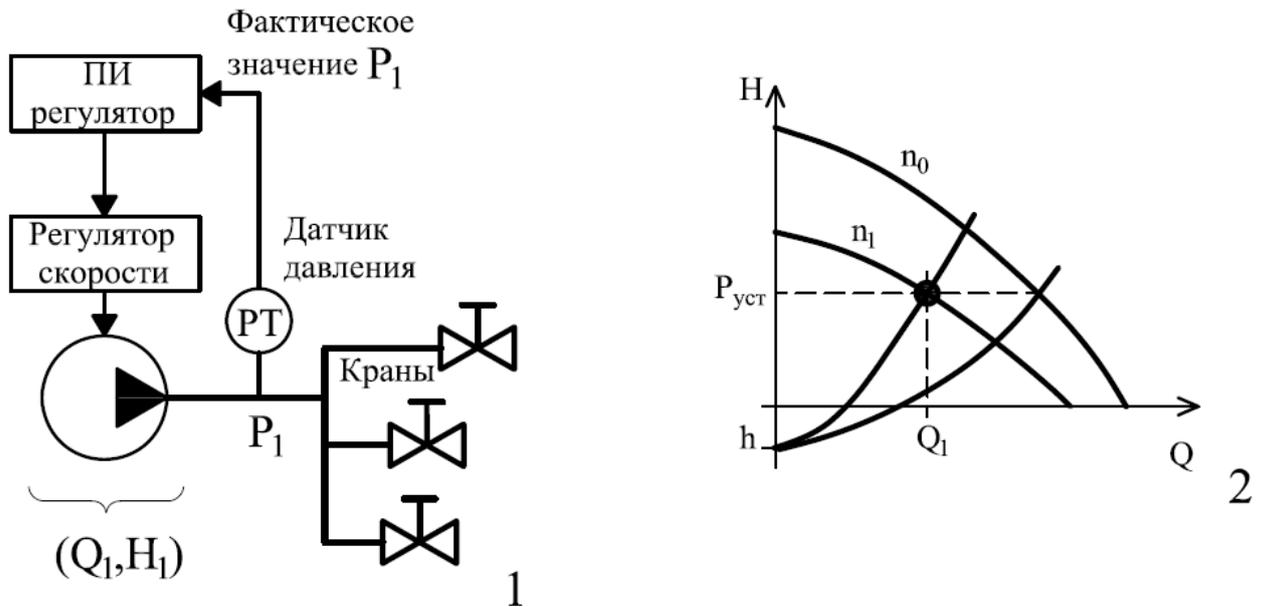


Рисунок 1.13 – Схема регулирования скорости насоса и рабочие точки по критерию постоянного давления

Для обеспечения значительного числа рабочих точек в широком диапазоне напоров и расходов, а также для увеличения эффективности работы НА с ПЧТ для конкретной системы, применяют методы последовательного и/или параллельного соединения насосов (рисунок 1.14) [18, 40].

Последовательная установка насосов используется для создания в системе больших напоров в случаях перекачки жидкости на значительные расстояния или на большую высоту. При последовательной работе на рисунке 1.14, 1 первый насос подает перекачиваемую жидкость во всасывающий патрубок второго насоса, после чего жидкость подается в напорный трубопровод к потребителю. Характеристика последовательного подключения двух неодинаковых насосов показана на рисунке 1.15.

Параллельное подключение насосных агрегатов применяется в тех случаях, когда необходимо достичь повышения расхода перекачиваемой среды при незначительном увеличении напора. При параллельной работе несколько насосов одновременно подают перекачиваемую жидкость в общий напорный коллектор (рисунок 1.14, 2 и 1.14, 3). Характеристика параллельного подключения двух одинаковых насосов показана на рисунке 1.16.

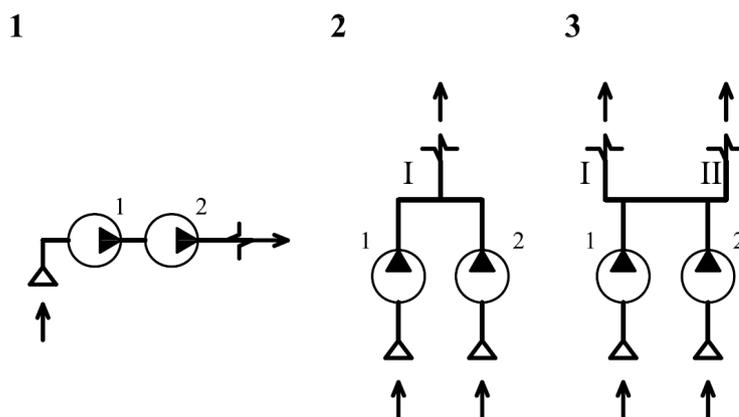


Рисунок 1.14 – Схемы соединения насосов

1 – последовательная схема соединения; 2 – параллельная схема соединения с подачей в один напорный водовод; 3 – параллельная схема соединения с подачей в два напорных водовода

Для параллельной работы целесообразно применять насосы с пологими характеристиками. Желательно подбирать однотипные насосы, в крайнем случае, с незначительно отличающимися характеристиками. Если один из насосов имеет большую подачу и напор, то второй насос, имеющий меньшие характеристики, может быть задавлен первым насосом во время работ, и его подача на общий коллектор будет равна нулю.

В настоящее время все большее количество насосных станций оснащают ПЧТ по следующим причинам:

- увеличивается возможное пространство расположения рабочих точек для НА (НС) [36, 58, 77];

- КПД одного НА, обеспечивающего в конкретной сети широкий диапазон подач, в части случаев (например, насос подобран ошибочно) меньше КПД двух параллельно установленных таких же НА на меньшей частоте вращения [56, 79]. Если подбор НА выполнен корректно, то на большей части рабочей зоны обеспечивается максимальный КПД большинства НА и НС;

- для компенсации возможных пульсаций входного давления, поскольку значение давления на входе НА (НС) непостоянно и может изменяться в широком

диапазоне. В этом случае ПЧТ дает несомненное преимущество для станций с гарантированным напором.

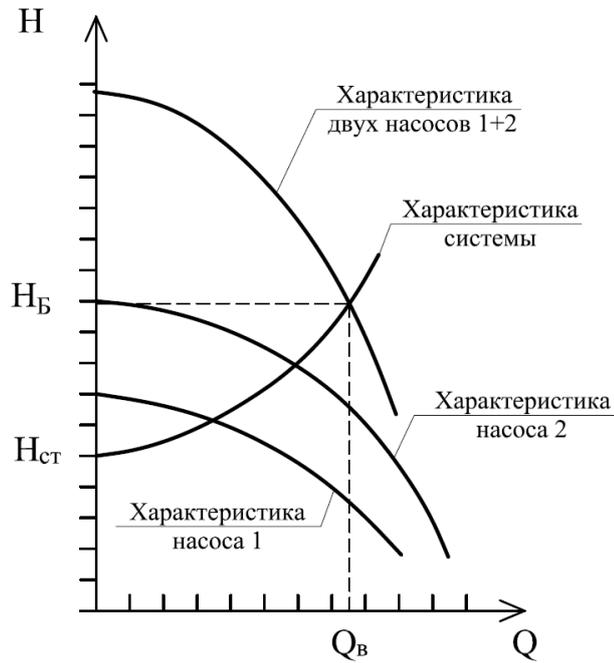


Рисунок 1.15 – Характеристика последовательного подключения двух неодинаковых насосов

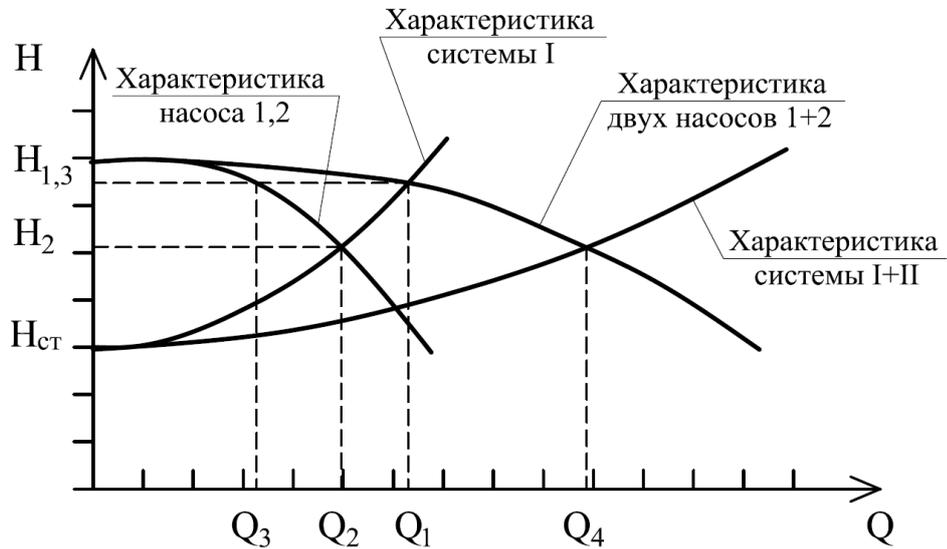


Рисунок 1.16 – Характеристика параллельного подключения двух одинаковых насосов

## 1.5 Современные алгоритмы управления многонасосными станциями

Для создания требуемого напора и обеспечения подачи на насосную станцию устанавливается несколько НА. В современных МНСПД применяют три основных способа регулирования подачи [51]:

- количественное,
- качественное,
- комбинированное.

Одним из наиболее распространенных методов качественного регулирования является изменение частоты вращения рабочего колеса НА [49]. К комбинированным способам регулирования относится ступенчатое регулирование, рассматриваемое в данной работе, которое состоит во включении и выключении параллельно установленных насосов [51].

Пример многонасосной станции показан на рисунке 1.17.

Данная многонасосная станция представляет собой систему из трех параллельных участков с расположенными на них насосными агрегатами (поз. 1). Насосные агрегаты (насосный агрегат включает в себя: насос, электродвигатель и преобразователь частоты (при наличии)) подают воду из подающего коллектора (в нашем случае ввод водопровода) в напорный (в нашем случае к потребителю). После каждого насосного агрегата установлены обратные клапаны (поз. 2), препятствующие перетеканию жидкости из напорного коллектора в подающий. Для защиты насосных агрегатов от отсутствия воды в системе на подающем коллекторе установлено реле давления (поз. 5). Контроль давления на выходе насосной станции производится с помощью датчика давления, установленного на напорном коллекторе (поз. 6).

Большинство современных станций управления насосными агрегатами имеют следующий алгоритм работы: с помощью частотного электропривода регулируется частота вращения вала электродвигателя насоса, поддерживая необходимое давление на выходе насосной станции [39, 70].

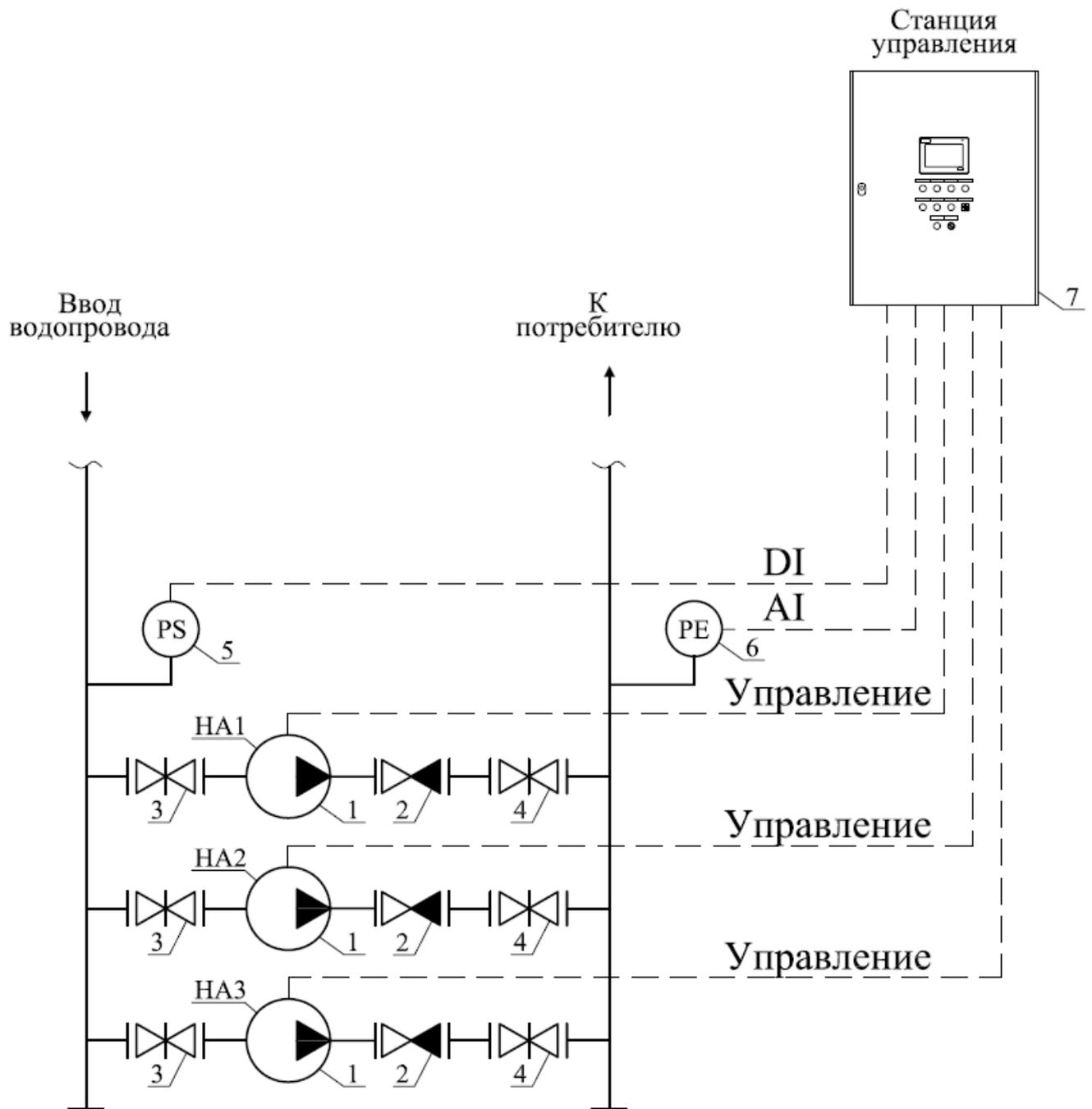


Рисунок 1.17 – Схема многонасосной станции

1 – насосные агрегаты (HA1, HA2 и HA3); 2 – обратный клапан; 3 – запорные устройства (задвижки) на входе насосного агрегата; 4 – запорные устройства (задвижки) на выходе насосного агрегата; 5 – реле давления на входе насосной станции; 6 – датчик давления на выходе насосной станции; 7 – станция управления

Рассмотрим основные режимы работы многонасосной станции [2, 12, 39, 51, 54, 70, 95, 103].

### 1.5.1 Подключение дополнительного насосного агрегата

На рисунке 1.18 показана временная диаграмма подключения дополнительного насосного агрегата. При увеличении водопотребления уровень сигнала от датчика давления (текущее давление), установленного на выходном коллекторе НС (поз. 6, рисунок 1.17), падает, в результате чего частота вращения насосного агрегата начинает увеличиваться, чтобы вернуть давление на выходе НС к необходимому значению. В моменты времени с максимальным водопотреблением, когда частота вращения насосного агрегата становится выше «частоты подключения» (рисунок 1.18), начинается отсчет времени, по окончании которого частота вращения работающего насосного агрегата снижается (для уменьшения гидравлического удара в системе), и далее подается команда на подключение дополнительного насосного агрегата. После запуска дополнительного насосного агрегата частота вращения насосного агрегата, работающего от преобразователя частоты, начинает изменяться с целью поддержания необходимого давления на выходе насосной станции.

Данный вариант работы насосной станции имеет следующие недостатки:

- перед и (особенно) в момент подключения дополнительного насосного агрегата происходит падение давления относительно требуемого значения (рисунок 1.18);
- в случае кратковременного увеличения водопотребления, возможны кратковременные включения дополнительного насосного агрегата, что приводит к гидравлическим ударам в системе водоснабжения (для многонасосных станций с одним преобразователем частоты).

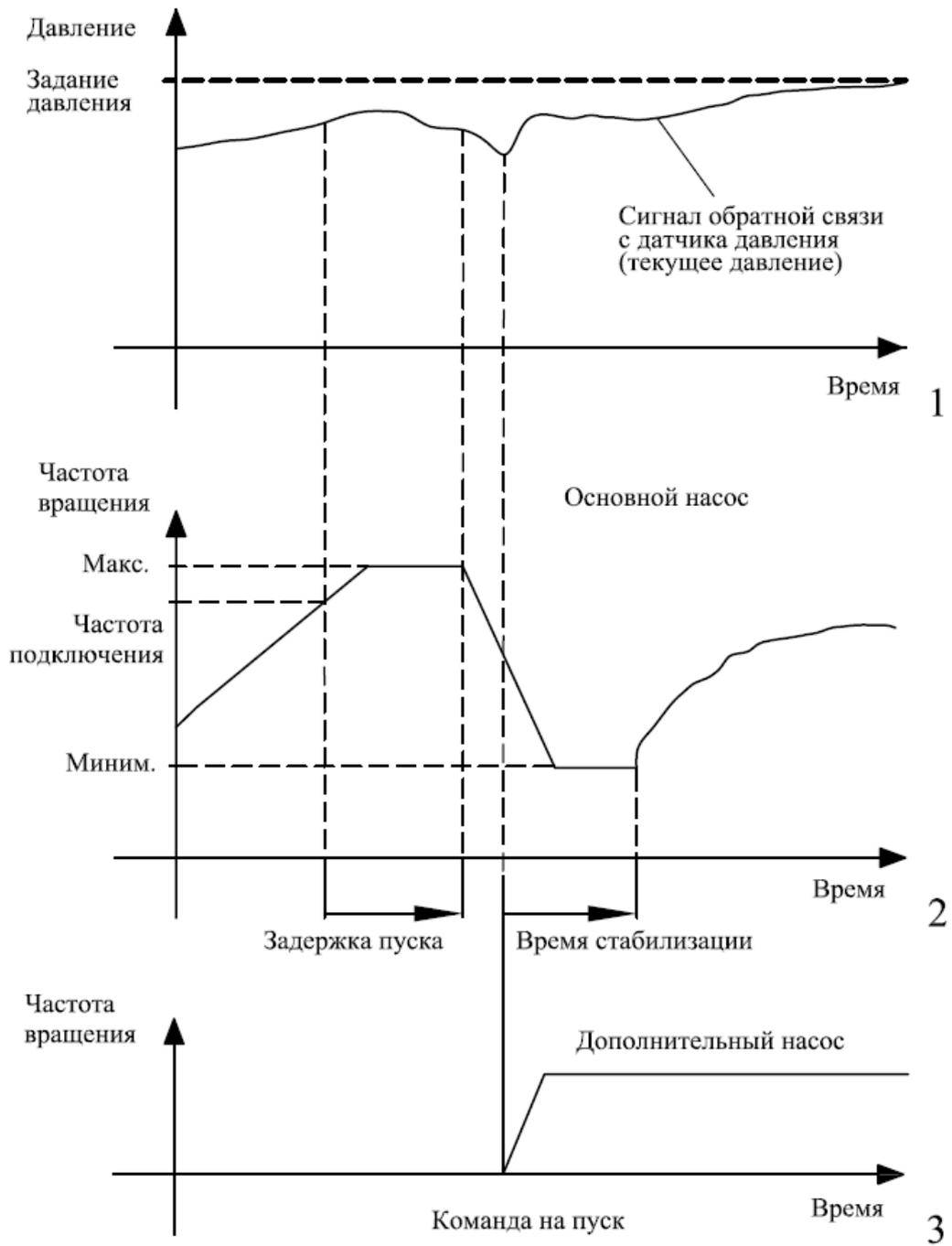


Рисунок 1.18 – Временная диаграмма подключения дополнительного насосного агрегата на станциях с одним ПЧТ

1 – график изменения давления; 2 – временная диаграмма работы основного насосного агрегата; 3 – временная диаграмма работы дополнительного насосного агрегата

### 1.5.2 Отключение дополнительного насосного агрегата

На рисунке 1.19 показана временная диаграмма отключения дополнительного насосного агрегата.

При уменьшении водопотребления уровень сигнала от датчика давления, установленного на выходном коллекторе НС (поз. 6, рисунок 1.17), увеличивается, в результате чего частота вращения насосного агрегата уменьшается. В момент времени, когда частота вращения насосного агрегата становится ниже «частоты отключения» (рисунок 1.19), начинается отсчет времени, по окончании которого подается команда на отключение дополнительного насосного агрегата.

Рассмотрим рабочие характеристики насосного агрегата при параллельной работе двух насосных агрегатов. Для простого восприятия рассмотрим процесс работы многонасосной станции, у которой все насосные агрегаты могут работать от соответствующего преобразователя частоты.

На рисунке 1.20 показаны две рабочие характеристики одного насосного агрегата для двух разных рабочих точек. Для данного примера параллельная работа двух насосных агрегатов с меньшей частотой вращения обеспечивает ту же самую рабочую точку, что и при максимальной частоте вращения этого же насосного агрегата. При этом КПД двух параллельно работающих насосных агрегатов значительно меньше КПД одного насосного агрегата, работающего на большей частоте вращения. Поэтому совместное время работы двух и более параллельно работающих насосных агрегатов необходимо свести к минимуму. Но поскольку водопотребление изменяется с течением времени в широком диапазоне, то без необходимых задержек времени данный режим управления сложно реализовать.

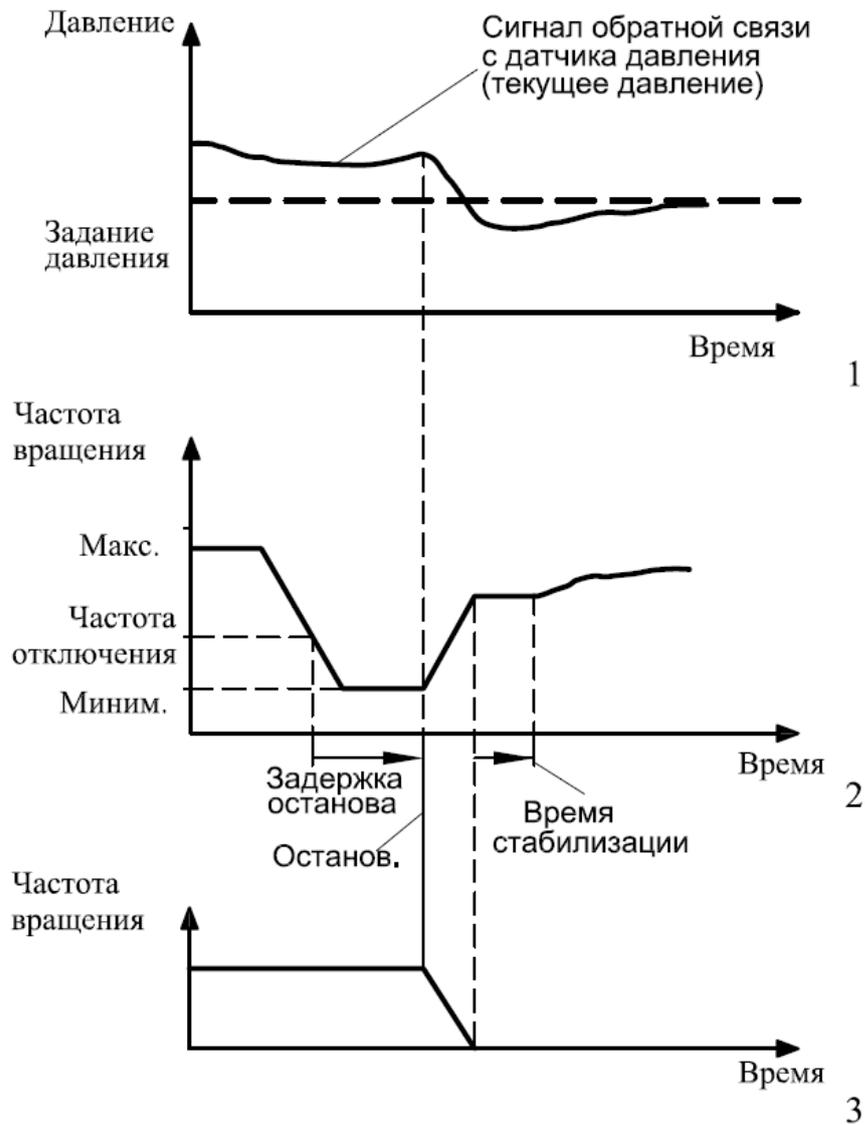


Рисунок 1.19 – Временная диаграмма отключения дополнительного насосного агрегата на станции с одним частотным электроприводом

1 – график изменения давления; 2 – временная диаграмма работы основного насосного агрегата; 3 – временная диаграмма работы дополнительного насосного агрегата

Противоположная ситуация показана на рисунке 1.21. Для данного примера параллельная работа двух насосных агрегатов с меньшей частотой вращения также обеспечивают ту же самую рабочую точку, что и при максимальной частоте вращения этого же насосного агрегата. Однако КПД двух параллельно работаю-

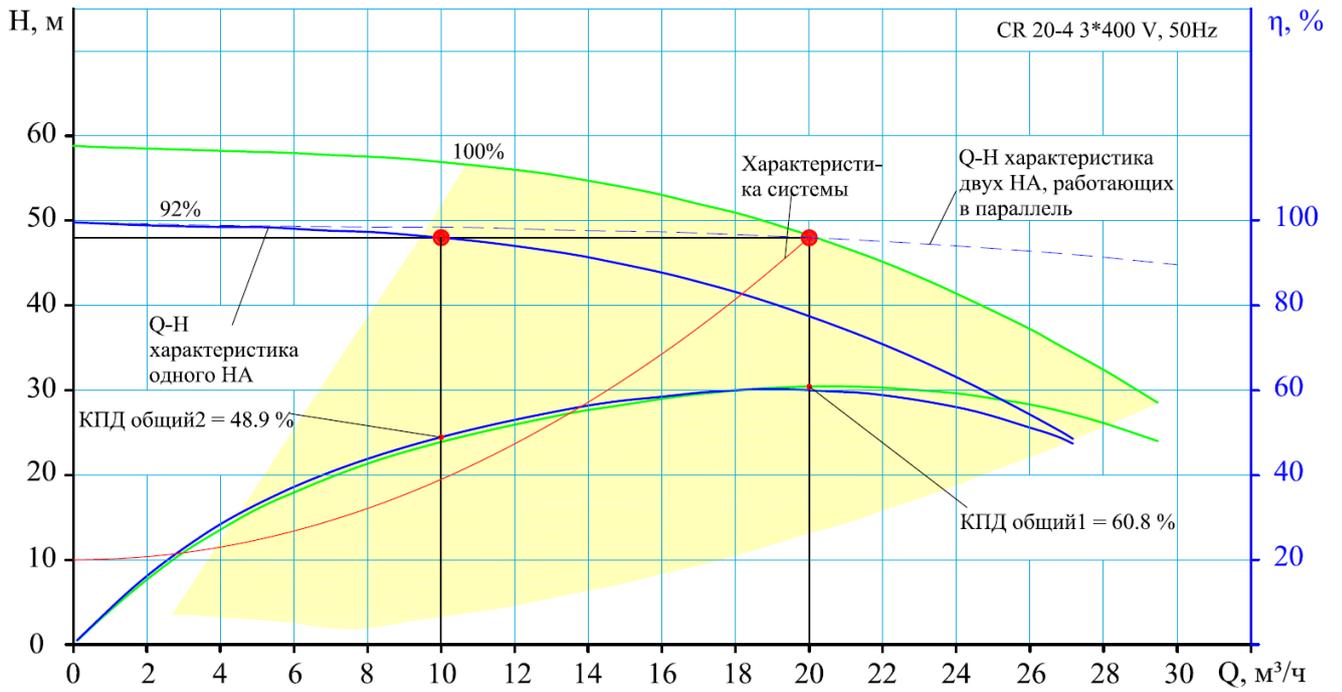


Рисунок 1.20 – Рабочие характеристики центробежного насоса при двух частотах вращения насосного агрегата

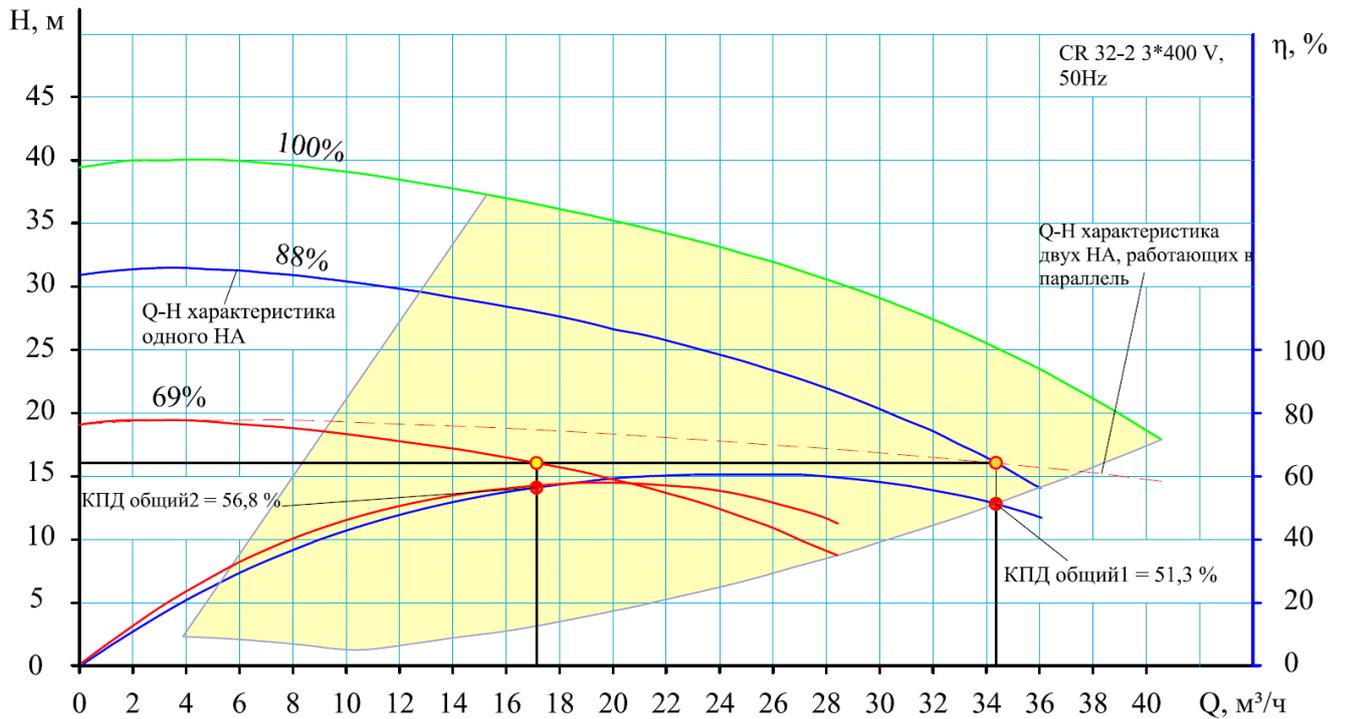


Рисунок 1.21 – Рабочие характеристики центробежного насоса при двух частотах вращения насосного агрегата

щих насосных агрегатов выше КПД одного насосного агрегата, работающего на большей частоте вращения. Поэтому для данной рабочей точки желательно обеспечить совместную работу двух параллельно работающих насосных агрегатов.

Данный вариант работы насосной станции имеет следующие недостатки:

- в момент отключения дополнительного насосного агрегата происходит падение давления относительно требуемого значения (для многонасосных станций с одним преобразователем частоты);

- как указывалось выше, режим работы насосной станции (количество параллельно работающих насосов в данный момент времени) зависит не только от верности подбора насосного оборудования, но и от текущей рабочей точки. Поэтому однозначно определить, какой режим управления в данный момент энергоэффективен, по одному значению текущей частоты вращения насоса невозможно.

### 1.5.3 «Спящий режим»

В периоды времени с минимальным водопотреблением (как правило, данная ситуация возникает в ночное время) для уменьшения энергопотребления насосные станции отключают (станция "засыпает"). На текущий момент имеются два алгоритма перехода в данный режим.

На рисунке 1.22, 1 показан первый вариант перехода в спящий режим. Данный режим основан на отключении насосной станции после снижения частоты вращения насосного агрегата ниже частоты «спящего режима» (на рисунке 1.22 данная частота называется минимальной скоростью). После снижения текущей частоты вращения насосного агрегата ниже частоты «спящего режима» начинается отсчет времени, по окончании которого станция отключается.

Данный алгоритм отключения насосной станции имеет один большой недостаток. В случае наличия обратного клапана на насосном агрегате (поз. 2 на рисунке 1.17) и при выравнивании давления до обратного клапана и после, обратный клапан плавно закроется. При этом уровень сигнала от датчика давления сравнивается с требуемым и дальнейшего снижения частоты вращения насосного

агрегата не будет, т.е. частота вращения насосного агрегата не опустится ниже частоты «спящего режима», и станция продолжит свою работу. Что приведет к перерасходу электроэнергии, а также к перегреву самого насоса.

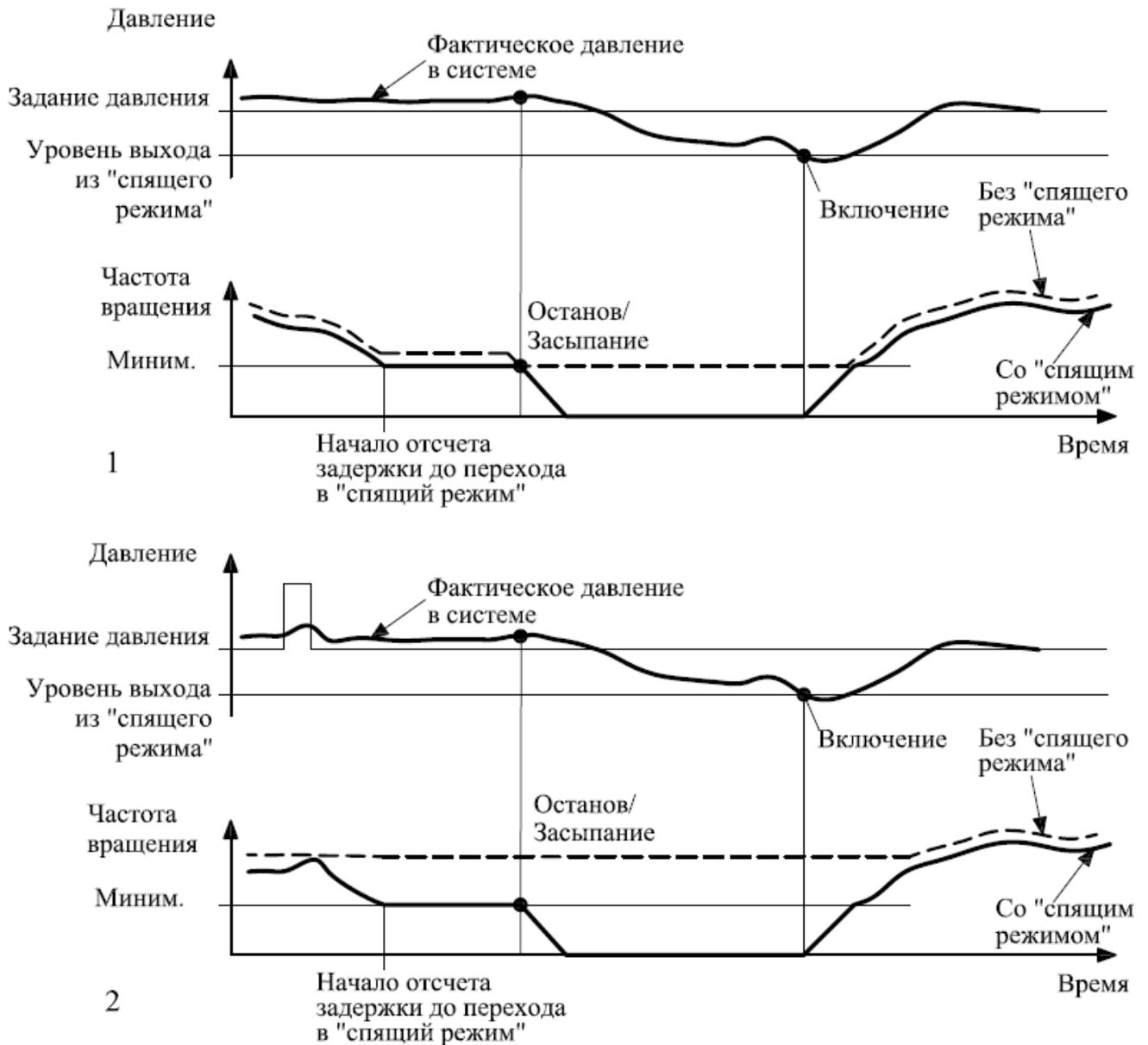


Рисунок 1.22 – Временная диаграмма полного отключения насосной станции («Спящий режим»)

1 – вариант перехода в «спящий режим» №1; 2 – вариант перехода в «спящий режим» №2

Данных недостатков лишён второй алгоритм перехода в «спящий режим». Данный алгоритм основан на периодическом увеличении требуемого значения давления на выходе насосной станции на небольшую величину (рисунок 1.22, 2).

В этом случае выравнивание давления (до обратного клапана и после) никогда не произойдет, что приведет к снижению частоты вращения насосного агрегата ниже частоты «спящего режима». Далее процесс перехода в «спящий режим» аналогичен алгоритму по первому варианту.

Данный алгоритм перехода в спящий режим также имеет один недостаток: в связи с частыми повышениями давления на выходе насосной станции энергопотребление всей насосной станции также возрастает.

#### **1.5.4 Работа МНСПД в режиме изменяющегося водопотребления**

Режим работы МНСПД, подающих воду потребителям, существенно зависит от режима водопотребления, который является случайным процессом [50, 53]. На основе анализа реального водопотребления, используя метод математического программирования, определены оптимальные параметры работы МНСПД в плане минимизации суточных расходов на оплату электроэнергии, минимизации количества НА, входящих в состав МНСПД, и увеличении КПД МНСПД [52].

При нахождении оптимальных параметров работы МНСПД предполагалось, что эксперимент в пределах суток допускает повторения при статически идентичных условиях, т.е. пренебрегается возможное влияние сезонного изменения водопотребления, различие водопотребления по отдельным дням и т.д. [52].

На рисунке 1.23 показан график изменения водопотребления жилого дома города Балашихи в течении года. Из данного графика видно, что водопотребление в течении года изменяется в широком диапазоне, что свидетельствует о невозможности применения для управления МНСПД в условиях реальной эксплуатации описанного выше метода.

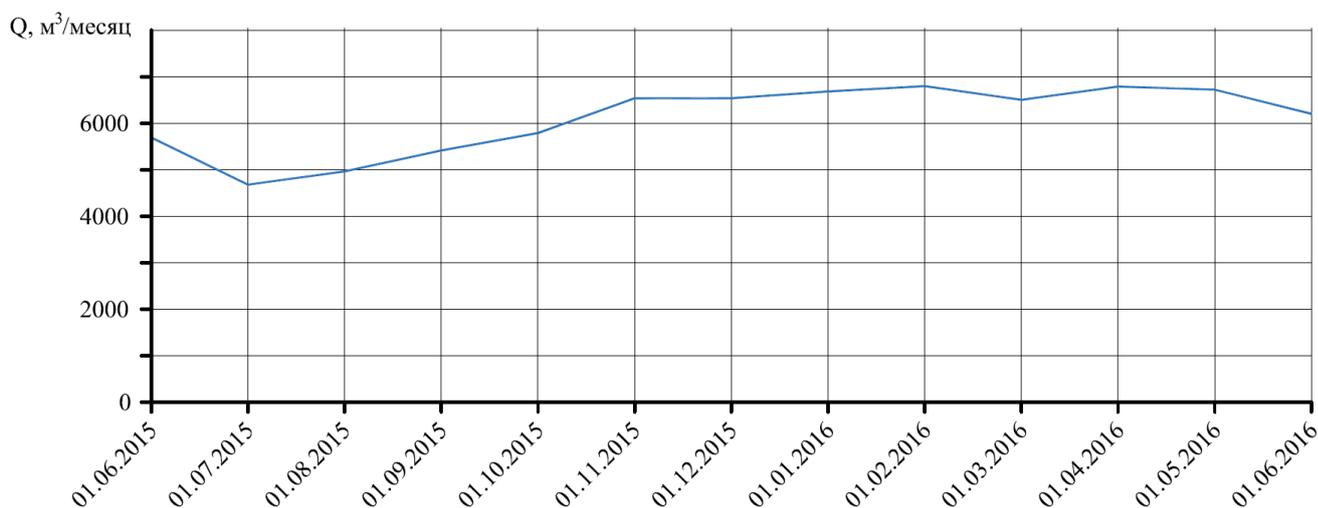


Рисунок 1.23 – Изменение водопотребления в течении года

## 1.6 Выводы по главе 1

1. Проведен анализ современных методов изменения положения рабочей точки НА. Анализ показал, что наиболее эффективным методом регулирования рабочей точки насосного агрегата является применение частотного электропривода.

2. Проведен анализ современных алгоритмов управления насосными агрегатами с применением частотного электропривода, показавший, что современные алгоритмы управления многонасосными станциями основываются только на частоте вращения насосного агрегата. И далее, на основании текущей частоты вращения, производится формирование команд по управлению насосной станцией (подключение дополнительного насосного агрегата, отключение дополнительного насосного агрегата, режим «сна»).

3. Насосный агрегат (насосная станция) во время работы не всегда находится в зоне с оптимальным КПД. Для увеличения КПД насосной станции необходимо выбирать такой режим работы насосных агрегатов, при котором общий КПД насосной станции будет максимальным, а также необходимо сводить время работы насосной станции с минимальным КПД к минимуму.

4. Учитывая только значение текущего давления на выходе насосной станции, и не принимая во внимание дальнейшее водопотребление, невозможно

определить рабочую точку насосной станции в последующие моменты времени, что непосредственно влияет на режим работы насосной станции и на ее КПД.

5. Управление НС по стандартному алгоритму работы может привести к перерасходу электроэнергии, к возникновению дополнительных гидроударов в системе водоснабжения и т.д. Поэтому необходимо разработать такие алгоритмы управления МНСПД, которые заранее перестраивали бы работу НС (с учетом спрогнозированного водопотребления) с уменьшенным энергопотреблением по сравнению с существующими алгоритмами управления.

Для решения поставленной задачи необходимо решить следующие вопросы:

- разработать математическую модель функции водопотребления на основе анализа статистических данных водопотребления;
- определить параметры работы нескольких МНСПД, при которых обеспечивается снижение энергопотребления МНСПД;
- разработать адаптивный алгоритм управления многонасосными станциями повышения давления, позволяющий снизить энергопотребление МНСПД.

## 2 МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ВОДОПОТРЕБЛЕНИЯ

Основные результаты по данной главе опубликованы автором в статье [10].

### 2.1 Способы описания режимов водопотребления

Одним из основных параметров, которые характеризуют работу насосной станции в текущее время, является объем водопотребления. Изучение и мониторинг водопотребления рассматривается ниже.

При проектировании (подборе) насосных станций жилых домов согласно СП 30.13330.2020 «Внутренний водопровод и канализация зданий» производительность хозяйственно-питьевых и производственных насосных установок при отсутствии регулирующей емкости следует принимать не менее максимального секундного расхода воды.

Напор (давление), развиваемый МНСПД для систем водоснабжения, в этом случае определяют по следующей формуле [83]

$$H_p = H_{\text{geom}} + \Sigma H_{l,tot} + H_{\text{пр}} - H_{\text{гар}}, \quad (2.1)$$

где  $H_{\text{geom}}$  – геометрическая высота подачи воды от оси насоса до диктующего санитарно-технического прибора (пожарного крана), м;

$\Sigma H_{l,tot}$  – сумма потерь напора (давления) в сети водоснабжения по диктующему направлению до диктующего санитарно-технического прибора (пожарного крана), м вод. ст.;

$H_{\text{пр}}$  – напор (давление) перед прибором, м вод. ст., принимаемый 20 м вод. ст.;

$H_{\text{гар}}$  – минимальный гарантированный напор (давление) в наружной водопроводной сети, м вод. ст.

Максимальный расчетный секунднй расход воды на расчетном участке сети  $q$  следует определять по формуле [83]

$$q = 5 \cdot q_0 \cdot \alpha, \quad (2.2)$$

где  $q_0$  – расход воды санитарно-техническим прибором (арматурой), л/с;

$\alpha$  – коэффициент, зависящий от общего числа приборов  $N$  на расчетном участке сети и вероятности их действия  $P$ .

Расход воды  $q_0$  различных санитарно-технических приборов для одинаковых водопотребителей на участке тупиковой сети определяют по соответствующим таблицам. Например, для жилых домов значения  $q_0$  указаны в таблице 2.1 [83].

Таким образом при подборе насосных станций для жилых домов проектировщики не учитывают изменение водопотребления в течении дня, что непосредственно влияет на режим работы МНСПД [52].

На рисунке 2.1 показан пример графика водопотребления дома в течении суток, на котором видно, что водопотребление жителями жилых домов непостоянно и напрямую зависит от времени суток.

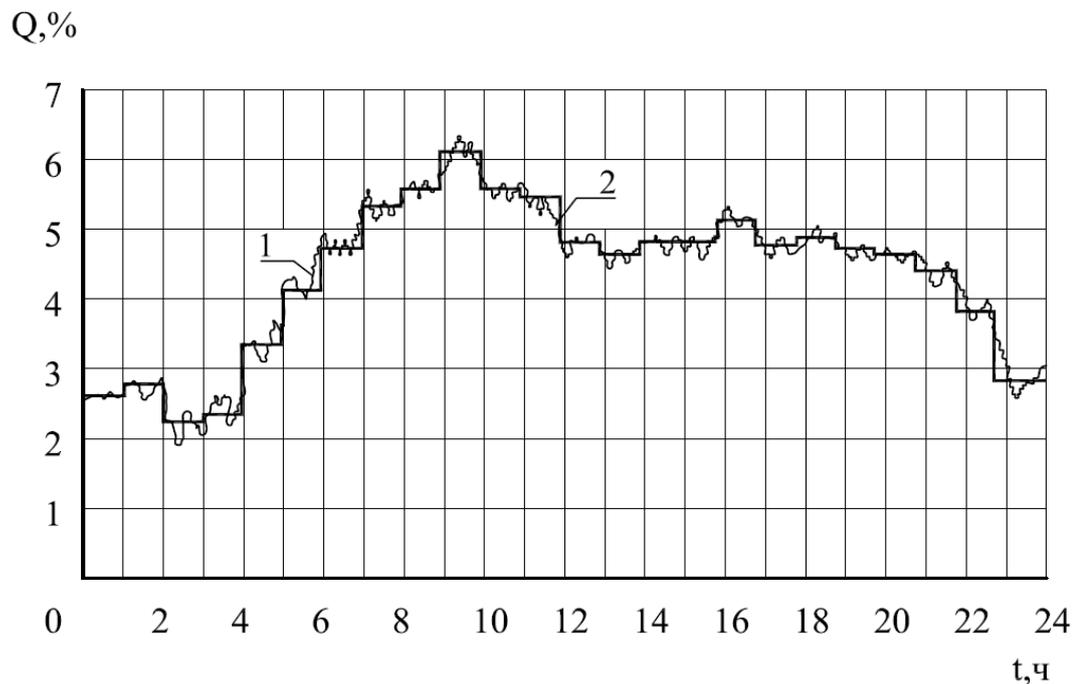


Рисунок 2.1 – Графики режима водопотребления

1 – фактический (случайный); 2 – расчетный ступенчатый

Таблица 2.1 – Расчетные расходы воды потребителями жилых домов

Водопотребители	Расчетные расходы воды на 1 жителя, л				Расход воды прибором на 1 жителя, л/с (л/ч)	
	среднесуточные		в час наибольшего водопотребления		общий (холодной и горячей) $q_0^{tot}$ ( $q_{0,hr}^{tot}$ )	холодной или горячей $q_0^c, q_0^h$ ( $q_{0,hr}^c, q_{0,hr}^h$ )
	общий $q_{u,m}^{tot}$	горячей $q_{u,m}^h$	общий $q_{hr,u}^{tot}$	горячей $q_{hr,u}^h$		
<b>1 Жилые дома</b> квартирного типа: – с водопроводом и канализацией без ванн	70	–	5,0	–	0,2 (50)	0,2 (50)
– с водопроводом, канализацией и ваннами с водонагревателями, работающими на твердом топливе	110	–	8,1	–	0,3 (300)	0,3 (300)
– с водопроводом, канализацией и ваннами с газовыми водонагревателями	120	–	8,7	–	0,3 (300)	0,3 (300)
– с централизованным горячим водоснабжением, оборудованные умывальниками, мойками и душами	130	50	8,2	4,5	0,2 (100)	0,14 (60)
– с сидячими ваннами, оборудованными душами	160	65	10,3	5,7	0,3 (300)	0,2 (200)
– с ваннами длиной от 1500 мм, оборудованными душами	180	70	11,6	6,5	0,3 (300)	0,2 (200)

Процесс водопотребления в течение часа также является неравномерным. Однако на практике установлено, что изменение водопотребления в течение часа,

как правило, не оказывает заметного влияния на обеспечение водой потребителей [22]. Это позволяет при проведении инженерных расчетов перейти от фактических непрерывных случайных графиков водопотребления (рисунок 2.1, линия 1) к расчетным ступенчатым графикам потребления воды, условно приняв равномерным режим водопотребления в течение часа (рисунок 2.1 линия 2).

Поскольку ситуация водопотребления постоянно изменяется (при смене времени года, при появлении новых потребителей (жильцов) и т.д.), то данным способом определения водопотребления для управления МНСПД становится невозможным.

Проведенные во время написания работы исследования и наблюдения водопотребления одной из новостроек г. Мытищи (в зависимости от дня недели и времени суток) показали значительные колебания часового водопотребления в течение дня (рисунок 2.2).

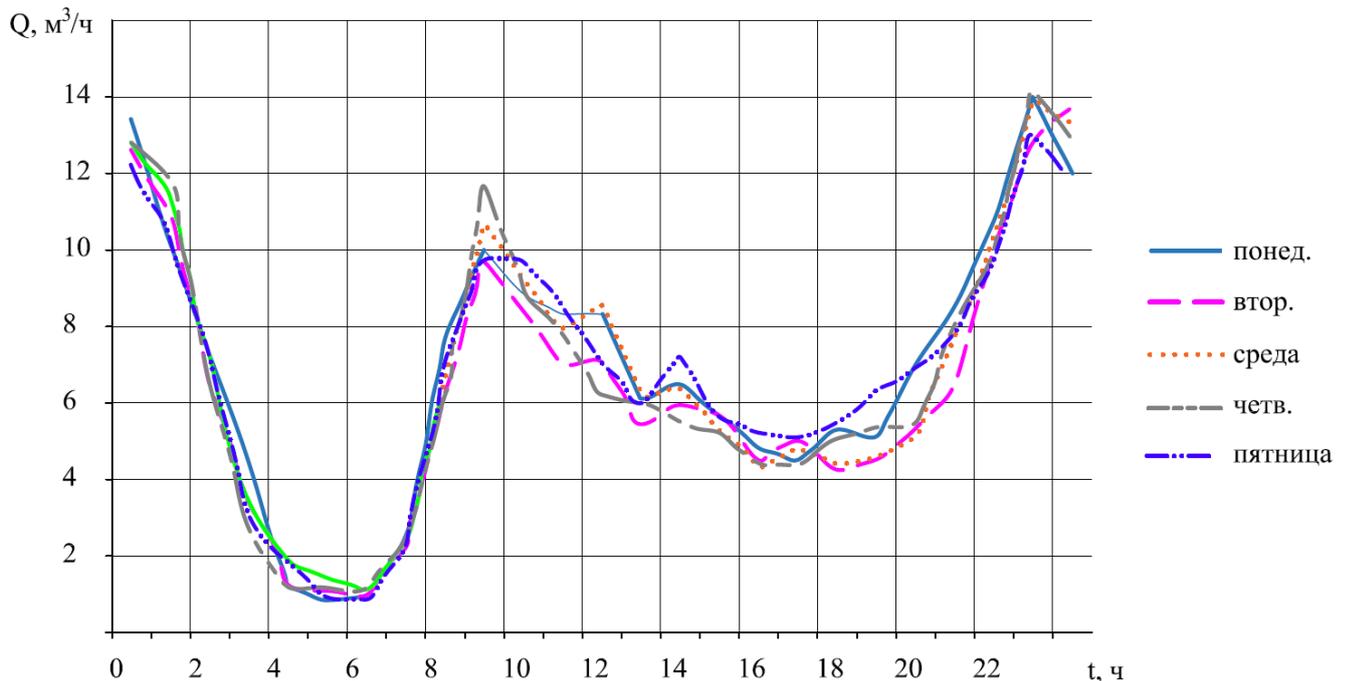


Рисунок 2.2а – График изменения водопотребления в течении рабочей недели июля 2017 года одного из жилых домов

Во время проведенных наблюдений и измерений в конкретный период времени в домах городов Московской области было выявлено, что ситуация измене-

ния водопотребления в течении дня за рассматриваемый промежуток времени повторяет вид графиков, указанных на рисунке 2.2.

На основании характера поведения полученных графиков водопотребления за конкретный промежуток времени можно сделать следующие выводы:

- форма графика суточного водопотребления изменяется циклично, т.е. водопотребление одного дня недели повторяет водопотребление другого дня недели. Особенно это видно для рабочих дней;

- форма графика суточного водопотребления выходных дней также циклична, но отличается от формы поведения водопотребления будних дней недели;

- для рабочих дней недели пики минимального и максимального водопотребления приходятся примерно на одно и то же время;

- отличительной чертой выходных дней недели, относительно рабочих дней, является сдвиг по времени момента возникновения пиков максимального и минимального водопотребления.

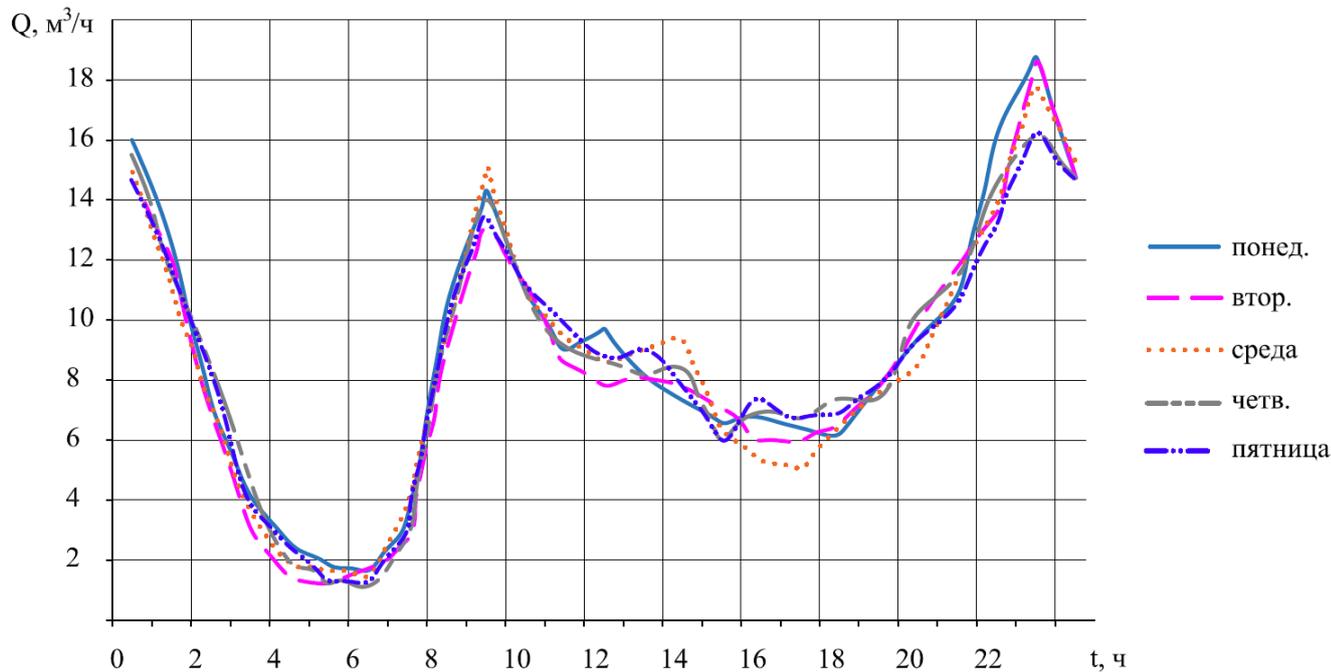


Рисунок 2.2б – График изменения водопотребления в течении рабочей недели октября

2017 года того же дома

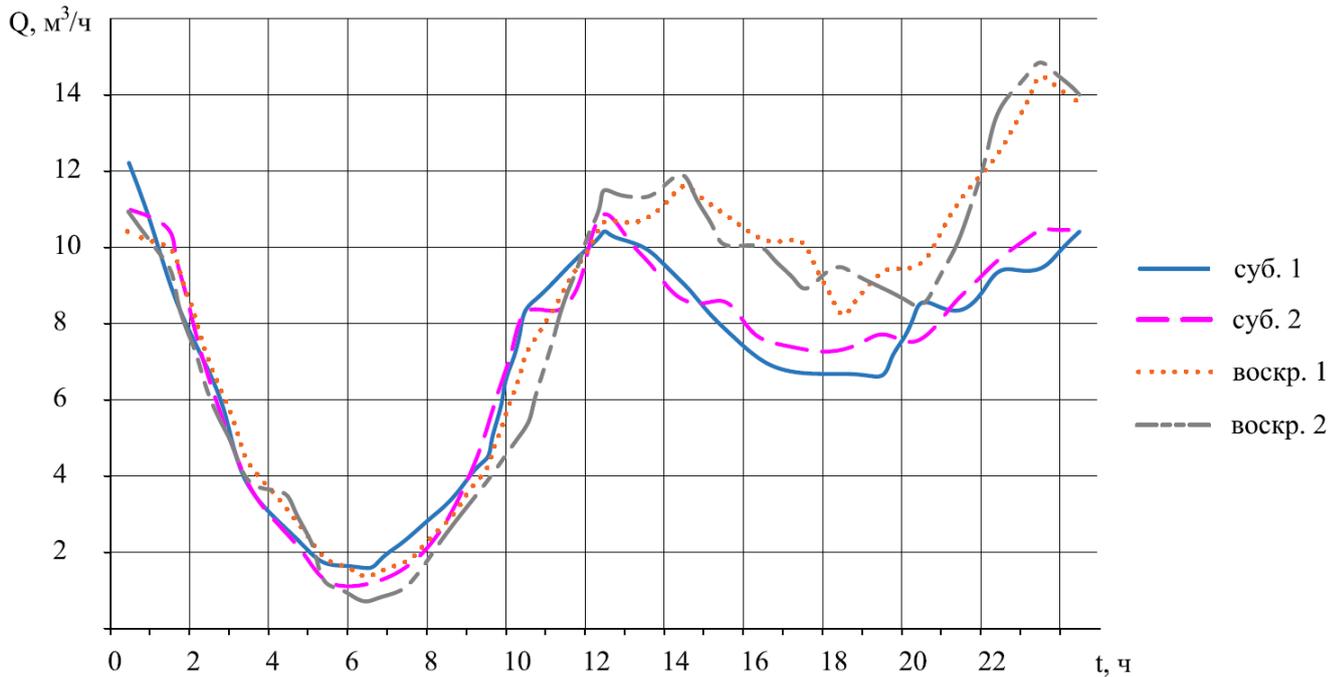


Рисунок 2.2в – График изменения водопотребления выходных дней июля 2017 года

Поскольку картина водопотребления одного дня недели повторяет водопотребление другого дня недели (см. выше), то, в этом случае, возможно произвести прогнозирование водопотребления на последующий, как рабочий день недели, так и выходной день недели.

## 2.2 Современные методы прогнозирования

В настоящее время существует огромное число печатных изданий с описанием методов и схем прогнозирования. По степени формализации все методы прогнозирования делятся на интуитивные и формализованные [63].

Метод интуитивного прогнозирования применяют в тех случаях, когда невозможно учесть аналитически все возможные факторы. В таких ситуациях привлекают опытных специалистов в данной области для оценки перспектив развития процесса [87]. Интуитивные методы основаны на профессионализме и большом опыте эксперта. Такие методы применяются при невозможности использования математических формул. К таким методам относятся методы: экспертных оценок, исторических аналогий, предвидения по образцу [47].

Формализованное прогнозирование — это прогнозирование на основании математической модели, которая, улавливая закономерности процесса, на своем выходе имеет будущие значения исследуемого процесса. В настоящее время насчитывается свыше 100 моделей прогнозирования. К основным можно отнести следующие [74]:

- регрессионные модели (regression model);
- авторегрессионные модели (auto regressive model, AR);
- модели экспоненциального сглаживания (exponential smoothing, ES);
- модели на базе цепей Маркова (Markov chain);
- нейросетевые модели (artificial neural network, ANN);
- классификационно-регрессионные деревья (classification and regression trees, CART).

Достоинства и недостатки каждого из методов прогнозирования указаны в таблице 2.2 [16, 69, 74, 91, 94, 98, 99].

На основании анализа таблицы 2.2 можно сделать следующие выводы:

- модели прогнозирования на базе цепей Маркова и регрессионные модели предполагают, что будущее состояние процесса зависит только от его текущего состояния процесса и не зависит от предыдущих, что в нашем случае прогнозирования водопотребления не применимо;
- модели прогнозирования на основе экспоненциального сглаживания прогнозирование осуществляют на долгосрочный период и на основе большого количества данных, что в нашем случае является нецелесообразным;
- модели на базе классификационно-регрессионных деревьев мало изучены в литературе и не имеют единообразия их анализа и проектирования;
- модели на базе нейронных сетей являются наиболее популярными и достаточно изучены в литературе, но сложны в выборе архитектуры построения и требуют ресурсоемкости при процессе их обучения. При применении программируемых логических контроллеров (ПЛК) в составе НС данный пункт также сложно реализовать (см. приложение А);

- авторегрессионные модели прогнозирования на сегодняшний день являются наиболее широко применяемыми при прогнозировании различных процессов, как и модели на базе нейронных сетей, но простоты и прозрачны при моделировании. Еще одним достоинством является единообразие анализа и проектирования. При всех своих достоинствах авторегрессионные модели прогнозирования имеют свои недостатки: большое число параметров в модели, идентификация которых неоднозначна, и низкая адаптивность моделей.

Таблица 2.2 – Сравнительная таблица методов прогнозирования

№ п/п	Модель прогнозирования	Достоинства	Недостатки
1	Регрессионная модель	- простоту; - гибкость; - единообразие анализа и проектирования.	- для вычисления будущего значения процесса необходимо знать будущие значения всех факторов; - трудоемкость определение параметров модели.
2	Авторегрессионная модель	- хорошо изучена; - применяется единообразие анализа и проектирования.	- большое число параметров в модели, идентификация которых неоднозначна; - низкая адаптивность моделей.
3	Модель экспоненциального сглаживания	- простота; - единообразие анализа и проектирования; - используется для долгосрочного прогнозирования.	- отсутствие гибкости.
4	Модель прогнозирования на базе цепей Маркова	- простота; - единообразие анализа и проектирования.	- отсутствие возможности моделирования процессов с длинной памятью

Продолжение таблицы 2.2

№ п/п	Модель прогнозирования	Достоинства	Недостатки
5	Модель на базе классификационно-регрессионных деревьев	<ul style="list-style-type: none"> <li>- масштабируемость;</li> <li>- быстрота и однозначность процесса обучения дерева;</li> <li>- возможность использовать категориальные внешние факторы.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- неоднозначность алгоритма построения структуры дерева;</li> <li>- сложность вопроса останова ветвления дерева;</li> <li>- отсутствие единообразия их анализа и проектирования.</li> </ul>
6	Нейросетевая модель	<ul style="list-style-type: none"> <li>- способность устанавливать нелинейные зависимости между будущими и фактическими значениями процессов;</li> <li>- адаптивность;</li> <li>- масштабируемость;</li> <li>- единообразие анализа и проектирования.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- отсутствие прозрачности моделирования;</li> <li>- сложность выбора архитектуры;</li> <li>- сложность выбора алгоритма обучения;</li> <li>- ресурсоемкость процесса обучения.</li> </ul>

Далее прогнозирование водопотребления строим на основе авторегрессионной модели, поскольку данная модель проста и прозрачна при моделировании, а также при описании данных моделей применяются общие методы анализа и проектирования.

### 2.3 Модель прогнозирования водопотребления

В основу **авторегрессионных моделей** заложено предположение о том, что значение процесса  $Z(t)$  линейно зависит от некоторого количества предыдущих значений того же процесса  $Z(t-1)$ , ...,  $Z(t-p)$ . Авторегрессию порядка  $p$  можно описать следующим уравнением (в литературе часто обозначается AR(p) [74])

$$Z(t) = C + \varphi_1 Z(t-1) + \varphi_2 Z(t-2) + \dots + \varphi_p Z(t-p) + \varepsilon_t, \quad (2.3)$$

где  $Z(t)$  – прогнозируемый процесс;

$C$  – вещественная константа;

$\varphi_p$  – коэффициенты регрессии;

$Z(t-p)$  – предыдущие значения процесса;

$p$  – порядок авторегрессии;

$\varepsilon_t$  – ошибка прогнозирования.

Также довольно часто в описании временных рядов применяется другая модель авторегрессии – модель скользящего среднего порядка  $q$ . Данную модель можно описать следующим уравнением (в литературе часто обозначается  $MA(q)$  [74])

$$Z(t) = C + \frac{1}{q}(Z(t-1) + Z(t-2) + \dots + Z(t-q)) + \varepsilon_t, \quad (2.4)$$

где  $Z(t)$  – прогнозируемый процесс;

$C$  – вещественная константа;

$q$  – порядок скользящего среднего;

$Z(t-q)$  – предыдущие значения процесса;

$\varepsilon_t$  – ошибка прогнозирования.

Для задачи прогнозирования водопотребления предположим, что у нас имеется временной ряд водопотребления  $Q(t)$ . Для времени  $(t+1)$ , согласно модели авторегрессии (2.3), можно написать следующее уравнение прогнозирования

$$Q(t+1) = \varphi_0 + \varphi_1 Q(t-1) + \varphi_2 Q(t-2) + \dots + \varphi_p Q(t+1-p), \quad (2.5)$$

где  $Q(t+1)$  – прогнозируемое водопотребление;

$p$  – порядок авторегрессии;

$\varphi_p$  – коэффициенты регрессии;

$Q(t-p)$  – предыдущие значения водопотребления.

Если для  $Q(t+1)$  работает такая зависимость, значит, она работает и для предыдущих точек, т.е. мы можем получить следующую систему уравнений

$$\begin{cases} Q(t+1) = \varphi_0 + \varphi_1 Q(t) + \varphi_2 Q(t-1) + \dots + \varphi_p Q(t-p+1); \\ Q(t) = \varphi_0 + \varphi_1 Q(t-1) + \varphi_2 Q(t-2) + \dots + \varphi_p Q(t-p); \\ Q(t-1) = \varphi_0 + \varphi_1 Q(t-1) + \varphi_2 Q(t-2) + \dots + \varphi_p Q(t-1-p); \\ \dots \\ Q(t-k) = \varphi_0 + \varphi_1 Q(t-1) + \varphi_2 Q(t-2) + \dots + \varphi_p Q(t-k-p). \end{cases}, \quad (2.6)$$

Для этой системы уравнений мы знаем все значения водопотребления  $Q(t)$ , поэтому, используя метод наименьших квадратов [15, 99] или метод максималь-

ного правдоподобия [97], легко определить коэффициенты  $\varphi_p$  и далее определить прогнозируемое водопотребление  $Q(t+1)$ .

Для использования модели авторегрессии необходимо определить следующие два параметра:

- определить порядок авторегрессии  $p$ ;
- определить необходимое число уравнений  $k$  в системе уравнений (2.6).

На текущий момент однозначного ответа по определению данных параметров нет, и они определяются эмпирическим путем. Поэтому задача прогнозирования водопотребления сводится к определению параметров  $p$  и  $k$ , при которых ошибка аппроксимации была бы не больше допустимой.

В настоящее время точность моделирования временных рядов принято оценивать при помощи двух показателей [88]:

- средняя абсолютная ошибка

$$\varepsilon = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{t+n-1} |Q_{\phi}(i) - Q_{\pi}(i)|, \quad (2.7)$$

где  $Q_{\phi}(i)$  – фактическое значение водопотребления в  $i$ -ый момент времени;

$Q_{\pi}(i)$  – спрогнозированное значение водопотребления в  $i$ -ый момент времени;

$n$  – длина выборки.

- средняя абсолютная ошибка в процентах

$$\varepsilon_{\%} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{t+n-1} \frac{|Q_{\phi}(i) - Q_{\pi}(i)|}{Q_{\phi}(i)} \cdot 100\%, \quad (2.8)$$

где  $Q_{\phi}(i)$  – фактическое значение водопотребления в  $i$ -ый момент времени;

$Q_{\pi}(i)$  – спрогнозированное значение водопотребления в  $i$ -ый момент времени;

$n$  – длина выборки.

На практике установлено, что изменение водопотребления в течение часа, как правило, не оказывает заметного влияния на обеспечение водой потребителей, поэтому прогнозирование водопотребления производим с интервалом в один час [22].

В таблице 2.3 показаны ошибки прогнозирования при различных вариантах значений параметров  $p$  и  $k$ .

На основании проведенных вычислений было выявлено, что увеличение количества уравнений в системе  $k$  не оказывают увеличения точности прогнозирования, а главным образом точность прогнозирования зависит от порядка регрессии  $p$ . В результате оптимальное значение порядка авторегрессии  $p=72$  и необходимое число уравнений в системе уравнений (2.6)  $k=12$ . Дальнейшее увеличение порядка регрессии  $p$  и количество уравнений  $k$  в системе уравнений к резкому уменьшению ошибки прогнозирования не приводят. При этом ошибка прогнозирования суточного водопотребления в установившихся режимах водопотребления не превышает 8%.

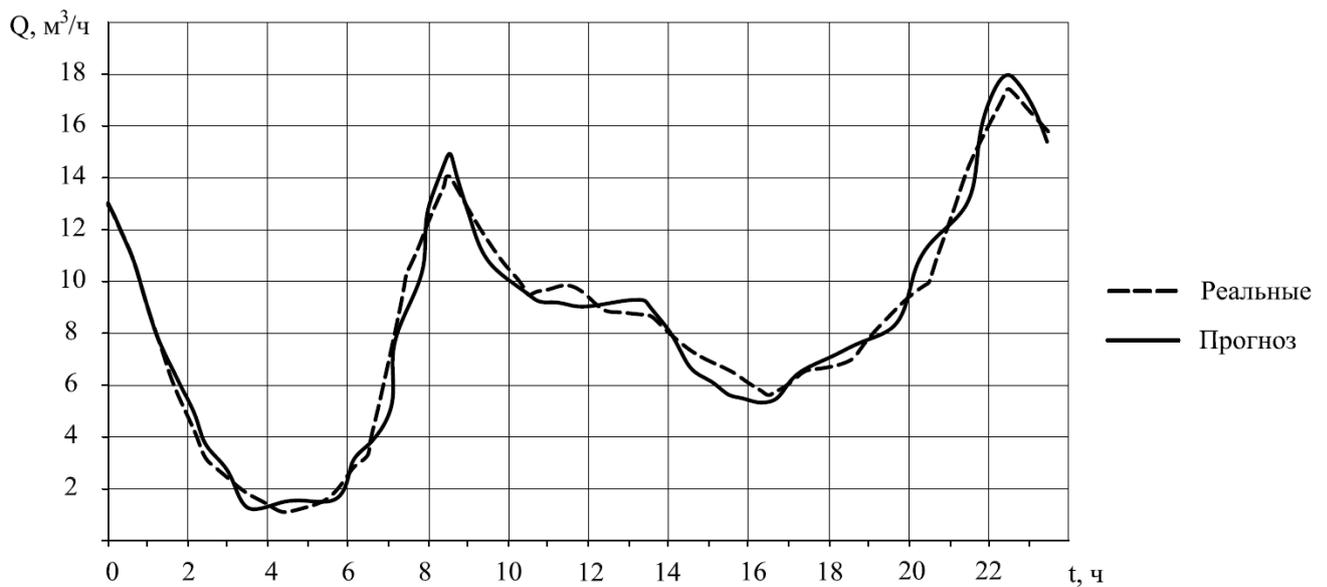


Рисунок 2.3 – График изменения водопотребления в течении дня: реальные значения и спрогнозированные

Дополнительно для сглаживания пиков водопотребления, которые спрогнозировать достаточно сложно, дополняем нашу модель авторегрессии в моменты пиков моделью скользящего среднего порядка  $q=2$ .

Таблица 2.3 – Результаты определения средней ошибки прогнозирования

№ п/п	Порядок авторегрессии $p$	Число уравнений $k$ в системе уравнений	Максимальная средняя абсолютная ошибка прогнозирования в течении дня, %
1	6	2	40
2	6	4	34
3	6	6	35
4	12	6	25
5	24	6	23
6	48	6	18
7	72	6	15
8	12	12	25
9	24	12	20
10	36	12	15
11	48	12	10
12	<b>72</b>	<b>12</b>	<b>8</b>
13	96	12	7.6
14	24	24	40
15	36	24	35
16	48	24	26
17	72	24	16
18	96	24	8
19	120	24	7

Реальные значения водопотребления и значения водопотребления, полученные на основании разработанного метода, за один день недели показаны на рисунке 2.3.

В случае невозможности ПЛК в составе НС (см. приложение А) выполнять вычисления, необходимые для прогнозирования водопотребления на основе авторегрессионной модели, предлагается упрощенный способ определения водопотребления. Если посмотреть на графики водопотребления (см. рисунок 2.2), то можно заметить, что значения мгновенных расходов попадают в область размером  $\pm 5\%Q_T$ , где  $Q_T$  – накопленное значение расхода за определенный промежуток времени.

ток времени. В связи с этим можно сказать – чем большее количество раз значение водопотребления попадает в определенную область значений, тем больше вероятность, что значение водопотребления из этой области и есть искомое водопотребление.

**Механизм определения диапазона водопотребления:**

а) предположим, что на одно и тоже время  $X$  пяти последних дней определено водопотребление  $A, B, C, D$  и  $F$ , соответственно;

б) для каждого значения водопотребления определяется однопроцентный диапазон значений, т.е.  $[0.99A;1.01A]$ ,  $[0.99B;1.01B]$ , ...,  $[0.99F;1.01F]$ ;

в) затем проверяется сколько раз каждое из значений водопотребления  $A, B, C, D$  и  $F$  попадает в диапазон, определенные в пункте б);

1) если количество попаданий в любой из диапазонов  $\geq 3$ , то диапазон значений определен;

2) в противном случае процесс повторяется с пункта б), при этом диапазон значений увеличивается на 1 %.

г) пункты с а) по в) проделываются для остальных значений времени суток с периодом раз в 15 минут;

д) далее полученный диапазон значений отфильтровывается путем нахождения среднего значения по трем точкам.

На рисунке 2.4 показан пример диапазона водопотребления (жирными линиями показана отфильтрованная область значений водопотребления) рабочей недели по часам суток. Зависимость представлена в виде диапазона водопотребления, по оси ординат которой указан диапазон расходов в каждый момент времени  $t$ .

Поскольку графики водопотребления в будние дни повторяют друг друга, то строим три графика диапазона водопотребления:

а) для будних дней недели;

б) для субботы;

в) для воскресенья.

Для выходных дней при определении диапазона водопотребления количество попаданий в область (см. п. в.1) принимаем  $\geq 2$ .

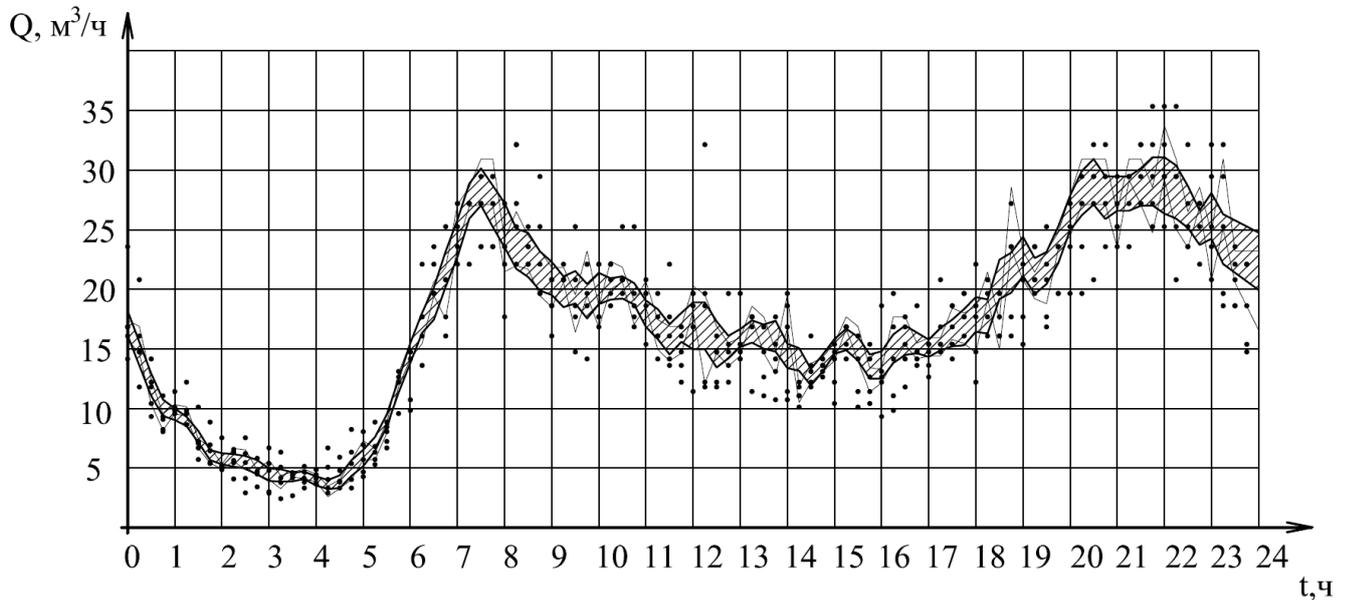


Рисунок 2.4 – Пример диапазона водопотребления рабочей недели по часам суток

Для определения предполагаемого значения расхода в определенный момент времени берём диапазон значений, соответствующий необходимому моменту времени, и далее, в зависимости от выполняемых расчетов, определяем значение предполагаемого расхода:

- при управлении НС берётся максимальное значение диапазона;
- во всех остальных случаях – среднее значение диапазона.

## 2.4 Адаптивный способ прогнозирования изменения водопотребления с учетом изменения параметров сети водоснабжения

Эффективность работы предложенного способа прогнозирования водопотребления на основе авторегрессионной модели с использованием модели скользящего среднего будет зависеть от того, насколько полученная функция водопотребления, выражающая неоднозначность значений, согласуются с реальной жизненной ситуацией. Более того, эта ситуация постоянно изменяется при смене времени года, при появлении новых потребителей, при изменении параметров гид-

равлической сети и т.д. Поэтому данная система должна быть наделена способностью адаптации.

Процесс адаптации водопотребления показан на рисунке 2.5.

На основе статистических данных в системе управления накапливаются данные от датчиков за несколько последних дней. Ежедневно данные извлекаются и из них удаляются недостоверные данные, а именно:

- а) рабочий день недели соответствует выходному дню и, наоборот, выходной день недели соответствует рабочему дню. Определяется по времени возникновения пика максимального водоразбора (в выходные дни время наступления максимального водоразбора позже, чем в рабочие дни (см. рисунок 2.2));
- б) при остановке станции управления насосными агрегатами;
- в) случайные величины (на основании практического опыта было установлено, что значения, отличающиеся от текущего среднего значения более 30% принимаются случайными).

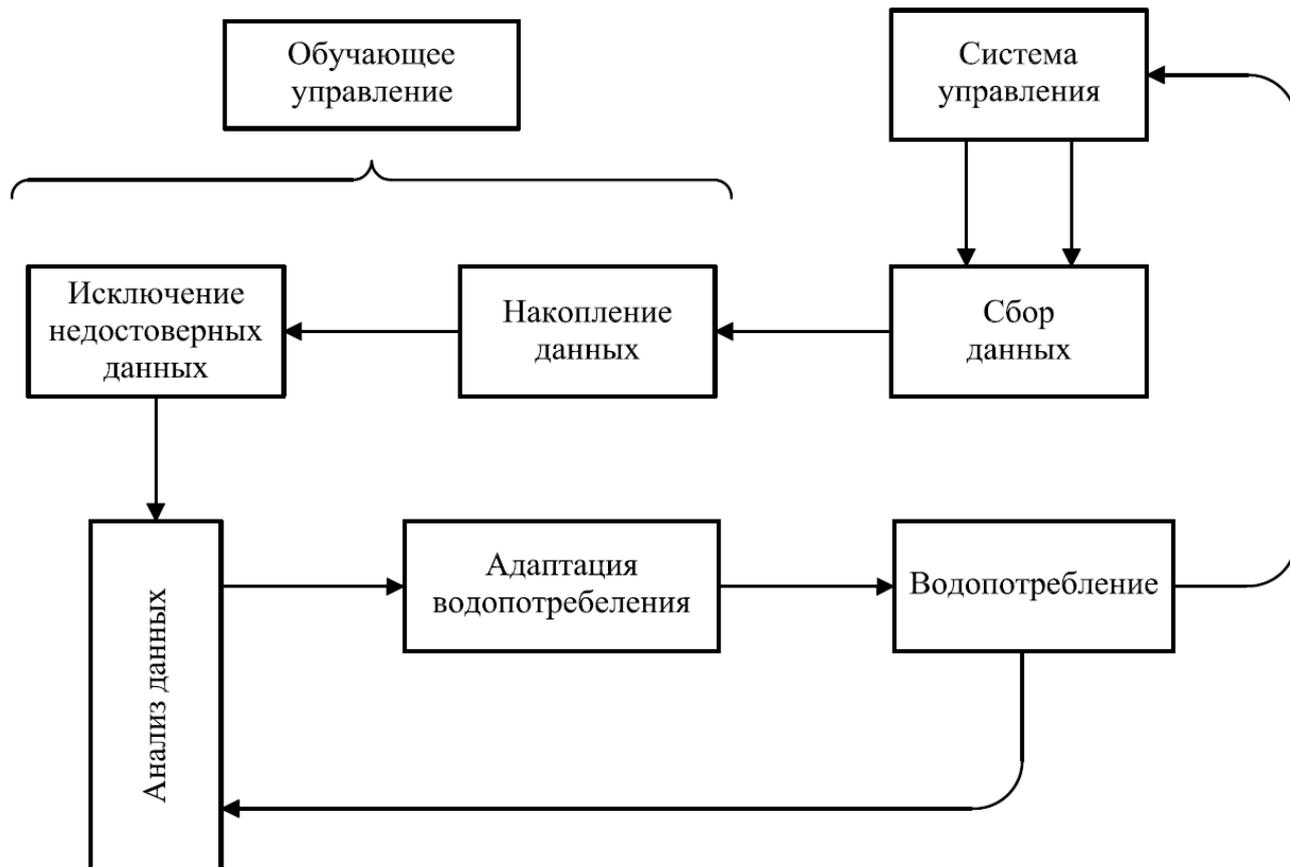


Рисунок 2.5 – Адаптация водопотребления

Прогнозирование будних дней недели строится на основании значений водопотребления последних трех будних дней недели с помощью авторегрессионной модели прогнозирования с использованием модели скользящего среднего. В случае отклонения среднеквадратичного отклонения реального значения от спрогнозированного более чем на 7%, для дальнейшего прогнозирования выбирается спрогнозированное значение (реальное значение считается ошибочным и эти данные исключаются). При повторении ситуации в следующие дни недели – в расчет берутся реальные значения (идёт смена режима водопотребления, происходит процесс адаптации).

Для выходных и праздничных дней прогнозирование водопотребления ведётся аналогично будним дням недели с учетом, что в первый выходной день в максимальное время водоразбора значение водопотребления принимается, как среднее значение максимальных водопотреблений в первой половине дня предыдущих трех дней недели. Прогнозирование последующих выходных дней ведётся на основании фактических данных предыдущих выходных дней.

Использование спрогнозированных или полученных экспериментальным способом значений водопотребления предпочтительно в какой-либо функциональной зависимости. Поскольку график водопотребления напоминает вид парабол со впадинами в промежутках времени с минимальным водопотреблением, то для аппроксимации значений водопотребления и дальнейших исследований используется многочлен минимум второго порядка, коэффициенты которого определяются методом наименьших квадратов. В случае погрешности аппроксимации более 5% относительно спрогнозированного значения, порядок многочлена увеличиваем.

Количество участков, на которые разбивается график водопотребления, равно количеству точек с максимальным водоразбором (как правило (см. рисунок 2.2) это количество не превышает двух). На рисунке 2.6 показан пример функции водопотребления для одного дня недели. Как видно из рисунка, график водопотребления разбит на два участка. Левая часть графика водопотребления (с 0 часов

ночи до 11 часов дня) описывается многочленом третьего порядка, правая часть графика водопотребления (после 11 часов дня) описывается многочленом четвертого порядка. При этом погрешность аппроксимации не превышает 5 %.



Рисунок 2.6 – Функциональная зависимость водопотребления

## 2.5 Выводы по главе 2

1. Проведен анализ существующих методов описания процессов водопотребления в течение суток для управления МНСПД. Анализ показал, что производительность хозяйственно-питьевых и производственных насосных установок определяется на основании соответствующих коэффициентов, которые являются величинами постоянными и не учитывают всего многообразия процессов водопотребления.

2. На основе авторегрессионной модели разработана математическая модель прогнозирования водопотребления с учетом трех предыдущих дней недели. Ошибка прогнозирования при этом не превышает 8%.

3. Разработан адаптивный способ прогнозирования изменения водопотребления, учитывающий сезонное изменение водопотребления, количество потребителей и т.д.

### 3 АДАПТИВНЫЙ АЛГОРИТМ УПРАВЛЕНИЯ МНОГОНАСОСНЫМИ СТАНЦИЯМИ С УЧЕТОМ ТЕКУЩЕГО ВОДОПОТРЕБЛЕНИЯ

Основные результаты по данной главе опубликованы автором в статьях [7, 9, 11].

Как указывалось в 1 главе, существующие методы управления станциями водоснабжения и повышения давления не всегда обеспечивают работу насосных станций с максимально возможным КПД, и для увеличения КПД насосной станции необходимо выбирать такой режим работы насосного агрегата, в котором КПД насосной станции будет максимальным или сводить время работы насосной станции с минимальным КПД к минимуму.

Для решения данной задачи необходимо в каждый момент времени определить параметры работы насосной станции и в зависимости от этого выбрать необходимый режим работы насосной станции.

Процесс нахождения оптимального режима работы насосной станции показан на рисунке 3.1.

На рисунке 3.1 видно, что для определения режима работы насосной станции необходимо:

- определить возможные режимы работы насосной станции (количество дополнительных НА, частота вращения дополнительных НА и т.д.);
- определить рабочую точку насосной станции (расход  $Q$  и необходимый перепад  $H$ , который должен создать каждый насосный агрегат, входящий в состав НС, на всех ее режимах работы), а также частоту вращения каждого насосного агрегата, при которой данные значения будут достигнуты;
- определить КПД насосной станции для каждого режима работы;
- выбрать более экономичный режим работы.

Решению данных задач посвящена данная глава.



Рисунок 3.1 – Алгоритм выбора оптимального режима работы насосной станции

### 3.1 Определение рабочей точки насосного агрегата

Рабочую точку насосного агрегата определяют три параметра:

а) Расход  $Q_{НА}$ , который должен создать насосный агрегат в момент времени  $t$ .

В нашем случае расходом является спрогнозированное водопотребление (определено во 2 главе) в момент времени  $t$ .

б) Перепад давления  $p_{НА}$ , на насосном агрегате в момент времени  $t$ .

Давление на выходе насосной станции  $p_{\text{ВЫХ}}$ , изображенной на рисунке 1.12, можно найти из следующего уравнения [34, 45]

$$\rho \cdot g \cdot h_A + p_{\text{ВХ}} + p_{\text{НА}} = p_{\text{ВЫХ}} + \rho \cdot g \cdot h_C + f(Q), \quad (3.1)$$

где  $h_A = h_C$  – высота над уровнем моря точек А и С;

$p_{\text{ВХ}}$  – давление перед насосным агрегатом;

$p_{\text{НА}}$  – перепад давлений, который создает насосный агрегат;

$p_{\text{ВЫХ}}$  – давление на выходе насосного агрегата;

$f(Q)$  – гидравлические потери.

Поскольку датчик давления в контролируемой точке находится на выходе насосной станции, то значение гидравлических потерь мало и ими можно пренебречь.

В итоге уравнение примет вид

$$p_{\text{ВЫХ}} = p_{\text{ВХ}} + p_{\text{НА}}, \quad (3.2)$$

Т.е. давление на выходе станции зависит только от давления воды на входе и перепада давления, создаваемого насосным агрегатом.

Поскольку давление на выходе насосной станции поддерживается постоянным, то перепад давления на насосном агрегате в каждый момент времени из уравнения (3.2) можно определить следующим образом

$$p_{\text{НА}} = p_{\text{ВЫХ}} - p_{\text{ВХ}}, \quad (3.3)$$

Если предположить, что давление воды на входе в насосную станцию будет постоянным, то по уравнению (3.3) можно определить необходимый перепад, который должен создавать насосный агрегат.

*с) Частота вращения насосного агрегата для обеспечения расхода  $Q_{\text{НА}}$  и перепада давлений  $p_{\text{НА}}$  в момент времени  $t$ .*

Расход (подача) и перепад (напор) насосного агрегата зависит не только от частоты вращения, как утверждается во многих источниках [22, 28, 38, 46], но

также от статической составляющей напора или противодействия  $H_{\Pi}$ , обусловленного работой других насосных агрегатов, и напора, создаваемого при нулевой подаче (фиктивный напор)  $H_{\Phi}$  [40, 66]. В этом случае зависимость расхода (подачи) и перепада (напора) насосного агрегата, в зависимости от частоты вращения, принимает вид [40, 66]

$$Q = Q_B \sqrt{\frac{\left(\frac{n}{n_{ном}}\right)^2 - \frac{H_{\Pi}}{H_{\Phi}}}{1 - \frac{H_{\Pi}}{H_{\Phi}}}}; \quad (3.4)$$

$$H = H_{\Pi} + (H_B + H_{\Pi}) \left[ \frac{\left(\frac{n}{n_{ном}}\right)^2 - \frac{H_{\Pi}}{H_{\Phi}}}{1 - \frac{H_{\Pi}}{H_{\Phi}}} \right], \quad (3.5)$$

где  $Q$  – подача (расход), создаваемый насосным агрегатом при текущей частоте вращения;

$Q_B$  – подача (расход), создаваемый насосным агрегатом при номинальной частоте вращения (рисунок 3.3);

$n$  – текущая частота вращения насосного агрегата;

$n_{ном}$  – номинальная частота вращения насосного агрегата;

$H_{\Pi}$  – статическая составляющая напора или противодействие, обусловленное работой других насосных агрегатов;

$H$  – перепад (напор), создаваемый насосным агрегатом при текущей частоте вращения;

$H_{\Phi}$  – напор, создаваемый при нулевой подаче (фиктивный напор);

$H_B$  – перепад (напор), создаваемый насосным агрегатом при номинальной частоте вращения (рисунок 3.3).

В результате, для определения расхода, создаваемого насосным агрегатом, необходимо определить:

- фиктивный напор  $H_\phi$ ;
- противодействие  $H_\Pi$ ;
- напор  $H_B$ , создаваемый насосным агрегатом при номинальной частоте вращения;
- расход  $Q_B$ , создаваемый насосным агрегатом при номинальной частоте вращения.

Фиктивный напор  $H_\phi$  для каждого насосного агрегата известен и определяется по каталожным характеристикам насоса. Например, для вертикального многоступенчатого центробежного насоса производства Grundfos марки CR 32-2 с характеристикой, изображенной на рисунке 3.9, фиктивный напор составляет 39 м.

Противодействие  $H_\Pi$  найдем из уравнения (3.5), решив данное уравнение относительно  $H_\Pi$ . В результате получим

$$H_\Pi = \frac{H + H_\phi \cdot \left(1 + \left(\frac{n}{n_{ном}}\right)^2\right) - H_B}{4} - \frac{\sqrt{\left(H_B - H - H_\phi \cdot \left(1 + \left(\frac{n}{n_{ном}}\right)^2\right)\right)^2 - 8 \cdot H_\phi \cdot \left(H - \left(\frac{n}{n_{ном}}\right)^2 \cdot H_B\right)}}{4}, \quad (3.6)$$

Неизвестными в уравнении (3.6) являются напор  $H$ , создаваемый насосным агрегатом при текущей частоте вращения, и напор  $H_B$ , создаваемый насосным агрегатом при номинальной частоте вращения.

**Напор  $H$** , создаваемый насосным агрегатом при текущей частоте вращения, определяем по уравнению (3.3), как разницу перепадов между выходом и входом насосного агрегата.

**Напор  $H_B$** , создаваемый насосным агрегатом при номинальной частоте вращения, можно определить тремя возможными вариантами:

- а) насосный агрегат достигает номинальной скорости вращения  $n_{ном}$ . В этом случае создаваемый напор является искомой величиной;
- б) насосный агрегат не достигает номинальной частоты вращения, но подобран для своей номинальной рабочей точки. В этом случае  $H_B = H_{ном}$ ,  $H_{ном}$  определяется по каталожным характеристикам насосного агрегата;
- в) насосный агрегат не достигает номинальной частоты вращения и нет информации для какой рабочей точки подобран данный насосный агрегат. В этом случае можно воспользоваться следующим разработанным алгоритмом:
- 1) за весь промежуток работы насосной станции выбирается период времени с максимальной и минимальной частотой вращения насосного агрегата  $n_{T.MAX}$  и  $n_{T.MIN}$ . Для данного промежутка времени определяются напоры, которые создает насосный агрегат  $H_{T.MAX}$  и  $H_{T.MIN}$ ;
  - 2) для рабочей точки насосного агрегата с максимальной частотой вращения определяем потребляемую двигателем из сети мощность  $P_{1T}$ .

Поскольку двигателем насосного агрегата мы управляем с помощью частотного преобразователя, то потребляемую двигателем из сети мощность  $P_{1T}$ , в данный момент времени, можно определить, «прочитав» соответствующий параметр в преобразователе частоты («прочитать» означает посмотреть на пульте управления, «прочитать» определённый регистр памяти ПЧТ по соответствующему интерфейсу и т.д.). Данная величина может выдаваться либо в процентах, либо в реальных физических величинах [89, 90, 100, 101, 102]. В этом случае имеем следующую формулу определения мощности на валу электродвигателя

$$P_{1T} = P_{1T\%} \cdot \frac{P_{ном}}{100}, \quad (3.7)$$

где  $P_{1T\%}$  – текущая потребляемая двигателем из сети мощность, % (величина берется из преобразователя частоты);

$P_{ном}$  – номинальная мощность электродвигателя, Вт (величина берется из каталога).

- 3) определение полезной механической мощности на валу двигателя.

Полезную механическую мощность на валу двигателя  $P_{2T}$  находим из графика характеристик двигателя (рисунок 3.2) (*построение характеристик двигателя см. главу. 3.3. «Определение КПД двигателя»*).

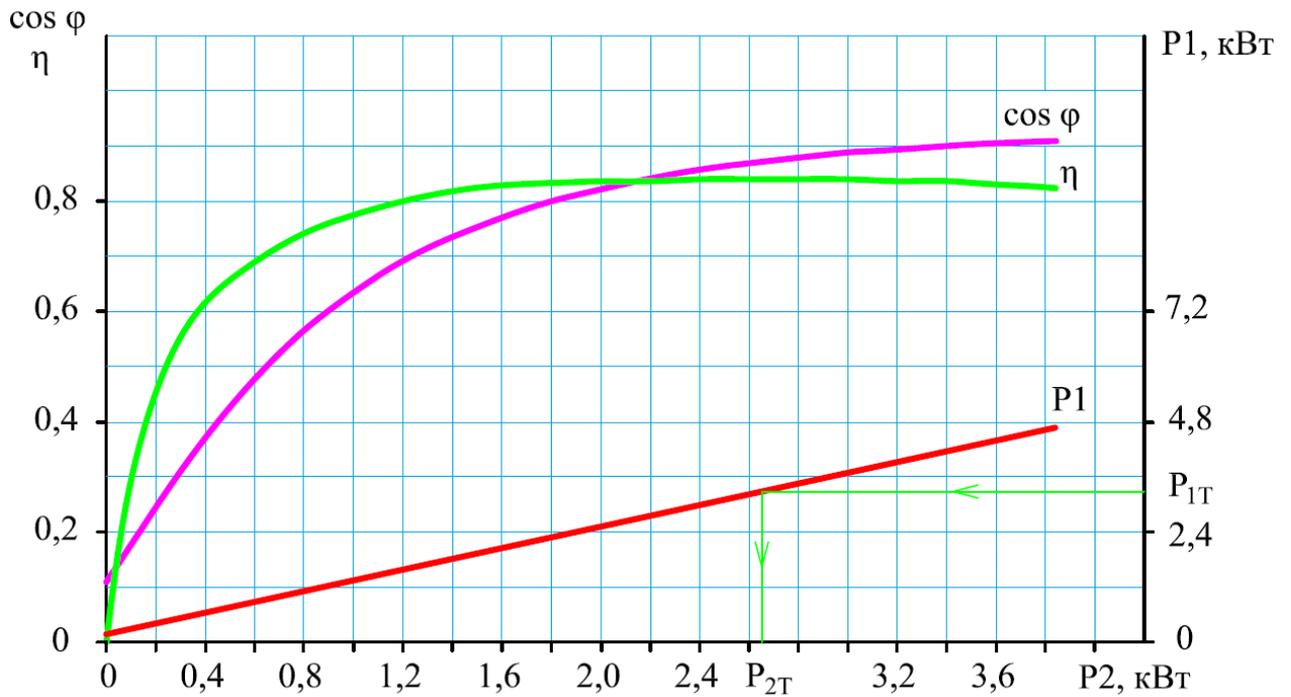


Рисунок 3.2 – График характеристик асинхронного электродвигателя  
для частоты вращения  $n_{T.MAX}$

4) определение КПД насосного агрегата при частоте вращения насоса

$n_{T.MAX}$ .

Изменение КПД в зависимости от частоты вращения насосного агрегата определяем с помощью формулы Муди, преобразованной для насоса [64, 65]

$$\eta_H = 1 - \frac{1 - \eta_{НОМ}}{\left(\frac{n}{n_{НОМ}}\right)^{0,36}}, \quad (3.8)$$

где  $\eta_{НОМ}$  – КПД насоса при номинальной частоте вращения;

$n$  – текущая частота вращения насоса;

$n_{НОМ}$  – номинальная частота вращения насоса.

5) определение расхода (водопотребления) при частоте вращения насоса

$n_{T.MAX}$ .

Мощность на валу электродвигателя  $P_{2T}$  связана с гидравлической мощностью насоса  $P_{ГИДР}$  через КПД насоса [66], а именно

$$\eta_H = \frac{P_{ГИДР}}{P_{2T}} = \frac{\rho \cdot g \cdot H \cdot Q}{P_{2T}}, \quad (3.9)$$

где  $\rho$  – плотность жидкости, кг/м<sup>3</sup>;

$g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;

$H$  – перепад (напор), создаваемый насосом, м;

$Q$  – расход (водопотребление), м<sup>3</sup>/с.

Из формулы (3.9) определим водопотребление  $Q_{T.MAX}$ , соответствующее максимальной частоте вращения  $n_{T.MAX}$ , получим

$$Q_{T.MAX} = \frac{\eta_H \cdot P_{2T}}{\rho \cdot g \cdot H}, \quad (3.10)$$

б) аналогичные действия, начиная с пункта в.2, проводим для рабочей точки насосного агрегата с минимальной частотой вращения. Определяем  $Q_{T.MIN}$ ;

7) определение напора  $H_B$  и расхода  $Q_B$ , создаваемых насосным агрегатом при номинальной частоте вращения.

Во многих литературных источниках [28, 40, 66] указывается, что гидравлическое сопротивление трубопровода имеет квадратичный характер (турбулентный режим течения) в зависимости от текущего расхода, т.е.

$$f(Q_i) = k \cdot Q_i^2, \quad (3.11)$$

где  $k$  – эквивалентный коэффициент гидравлических потерь;

$Q_i$  – водопотребление на каждом участке.

Для рабочих точек, определенных в пункте в.1, на основании уравнения (3.11) строим график сопротивления трубопровода. Точка пересечения напорно-

расходной характеристики насоса при номинальном количестве оборотов с гидравлическим сопротивлением трубопровода определяет рабочую точку насосного агрегата для текущей гидравлической системы (рисунок 3.3). Величина напора и расхода в этой точке определяет напор  $H_B$  и  $Q_B$ , создаваемый насосным агрегатом при номинальной частоте вращения.

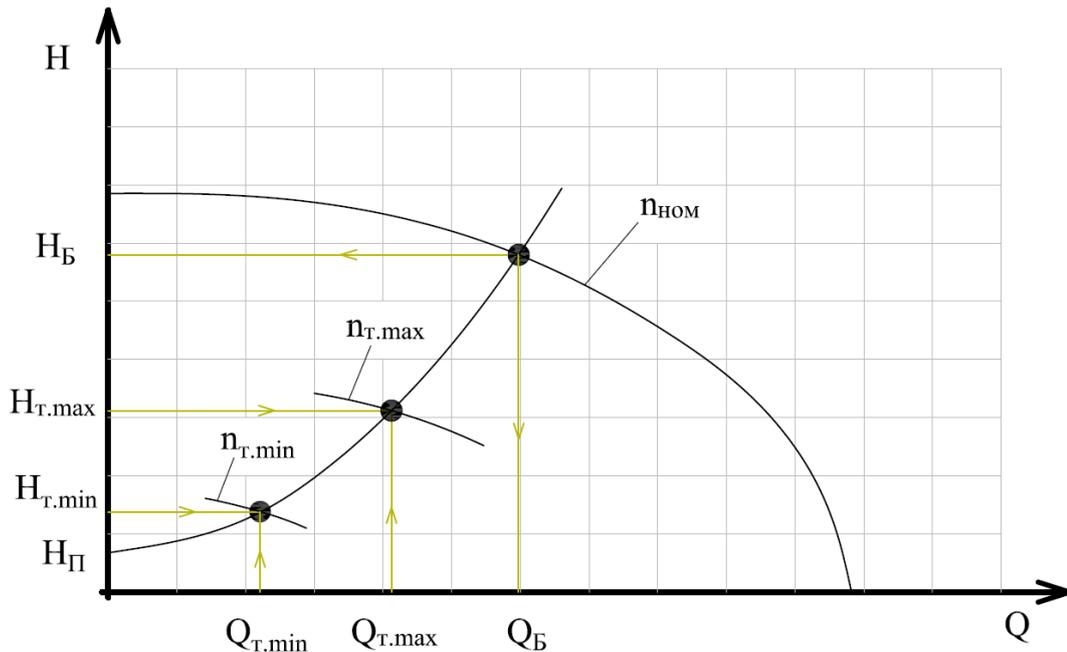


Рисунок 3.3 – Определение напора насоса, создаваемого насосным агрегатом, при номинальной частоте вращения, с учетом гидравлического сопротивления трубопровода

Далее на основании уравнений (3.4) и (3.5) строится новая рабочая характеристика насосного агрегата, соответствующая частоте вращения  $n$ , и, в соответствии с текущим перепадом (напором)  $H$ , определяется текущий расход (подача)  $Q$  (рисунок 3.4, на котором  $n_{ном} = n_1$ ,  $n = n_2$ ,  $H = H_{тр}$  и  $Q = Q_{тр}$ ).

В работах [40, 66] показано, что превышение напора является одной из причин возникновения потерь электроэнергии в насосных станциях. Следовательно, целесообразно поддерживать такую частоту вращения насоса, при которой геометрическое место рабочих точек насосного агрегата лежало бы на рабочей характеристике трубопровода. В этом случае оптимальная частота вращения насосного агрегата имеет вид [40]

$$n = n_{ном} \sqrt{\frac{H_{\Pi}}{H_{\phi}} + \left(1 - \frac{H_{\Pi}}{H_{\phi}}\right) \cdot \left(\frac{Q}{Q_B}\right)^2}, \quad (3.12)$$

где  $n$  – частота вращения насосного агрегата;

$n_{ном}$  – номинальная частота вращения насосного агрегата;

$H_{\Pi}$  – статическая составляющая напора или противодействие, обусловленное работой других насосных агрегатов;

$H_{\phi}$  – напор, создаваемый при нулевой подаче (фиктивный напор);

$Q$  – необходимая подача насоса;

$Q_B$  – наибольшая для данной системы подача насоса.

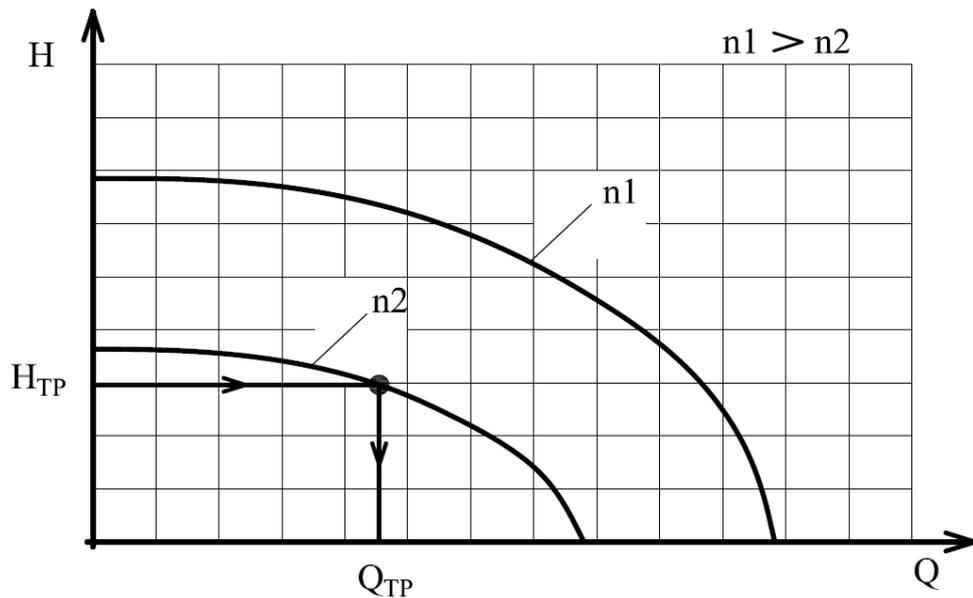


Рисунок 3.4 – Определение расхода воды по известному перепаду давлений на насосном агрегате

Работа насоса с частотой вращения, определяемой уравнением (3.12), обеспечивает поддержание минимальных и достаточных значений напора на выходе насосной станции во всем диапазоне работы. Благодаря ликвидации превышения напора энергопотребление насоса уменьшается до возможного минимума [40].

Блок-схема определения оптимальной частоты вращения насосного агрегата в зависимости от текущего водопотребления (при наличии противодействия) показана на рисунке 3.5.

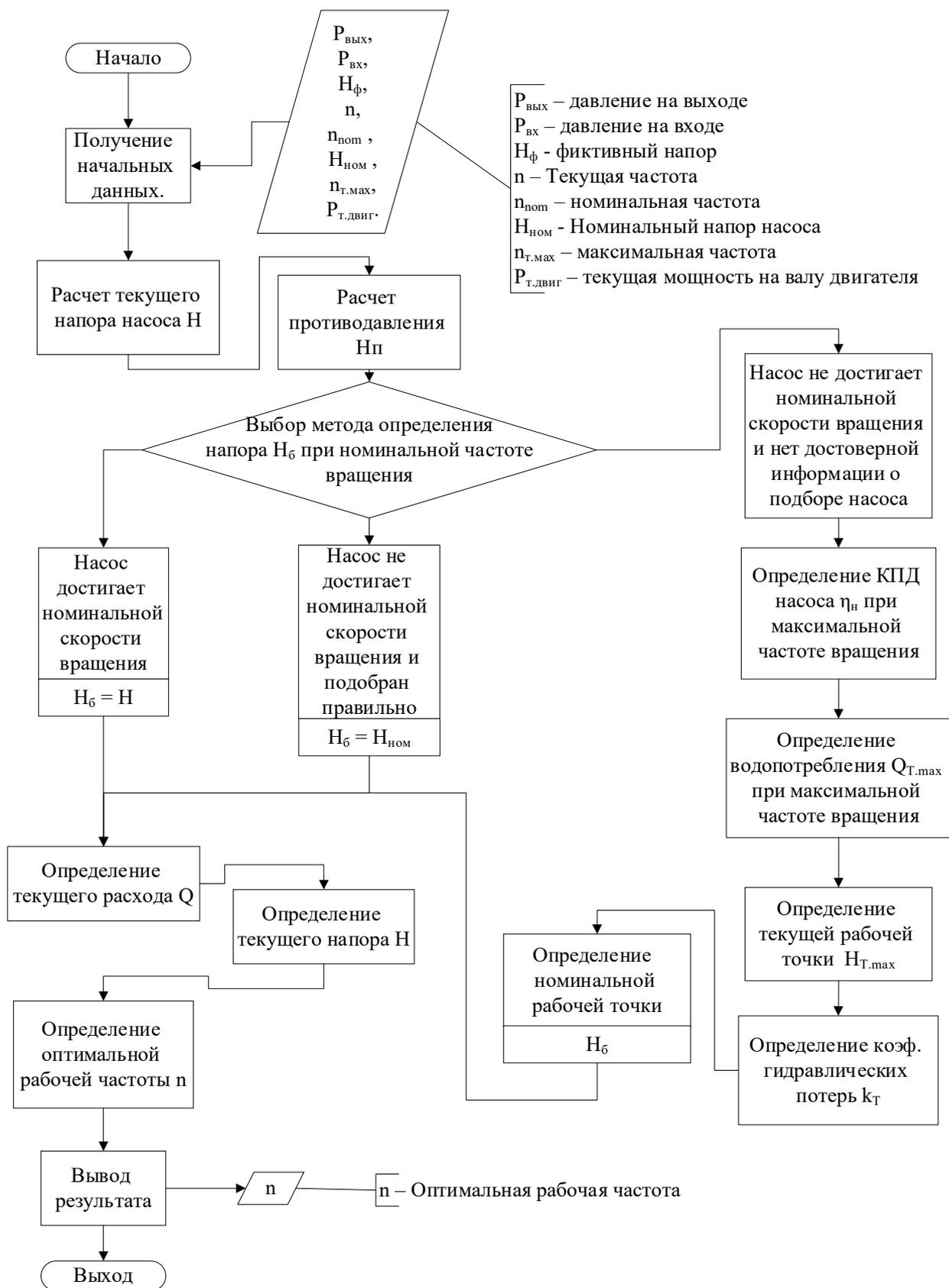


Рисунок 3.5 – Блок-схема определения оптимальной частоты вращения НА  
 (в круглых скобках указаны номера соответствующих формул)

### 3.2 Определение минимума энергетических затрат при работе нескольких насосных агрегатов в одной общей сети

На рисунке 3.6 показана группа насосных агрегатов НА1, НА2 и НА3 (поз. 1), расположенных в одной общей сети, которые подают воду потребителю (поз. 2). Предположим, что для данного примера диктующей точкой является точка G, в которой установлен датчик давления поз. 9.

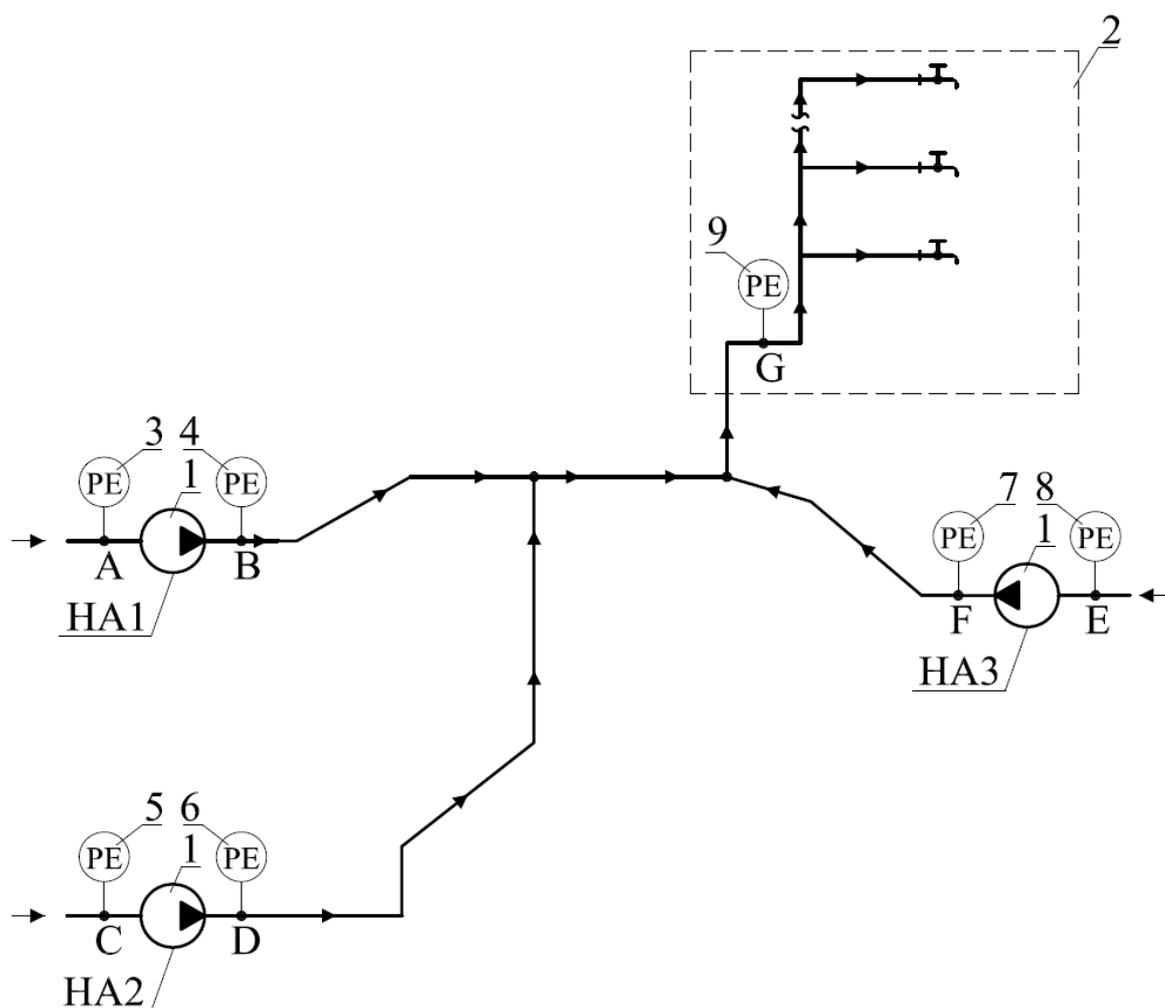


Рисунок 3.6 – Схема МНСПД с тремя удаленно расположенными насосными агрегатами  
 1 – насосные агрегаты подачи воды потребителям (НА1, НА2 и НА3); 2 – конечный потребитель; 4, 6, 8 – аналоговые датчики давления, установленные перед насосными агрегатами поз. 1; 5, 7, 9 – аналоговые датчики давления, установленные после насосных агрегатов поз. 1; 9 – аналоговый датчик давления, установленный в диктующей точке G

В этом случае для ветви А-В-G можно записать следующее уравнение

$$\rho \cdot g \cdot h_A + p_A + p_{HA1} = \rho \cdot g \cdot h_G + p_G + f(Q_1), \quad (3.13)$$

где  $h_A$  и  $h_G$  – высота над уровнем моря в точке А и G, соответственно;

$p_A$  и  $p_G$  – давление воды в точке А и G, соответственно;

$p_{HA1}$  – перепад давления (напор), который создаёт насосный агрегат №1;

$f(Q_1)$  – гидравлические потери на участке от точки А до точки G;

$Q_1$  – водопотребление в определённый момент времени на участке А-В-G.

Для ветви С-D-G можно записать следующее уравнение

$$\rho \cdot g \cdot h_C + p_C + p_{HA2} = \rho \cdot g \cdot h_G + p_G + f(Q_2), \quad (3.14)$$

где  $h_C$  и  $h_G$  – высота над уровнем моря в точке С и G, соответственно;

$p_C$  и  $p_G$  – давление воды в точке А и G, соответственно;

$p_{HA2}$  – перепад давления, который создаёт насосный агрегат №2;

$f(Q_2)$  – гидравлические потери на участке от точки С до точки G;

$Q_2$  – водопотребление в определённый момент времени на данном участке.

Для ветви Е-F-G

$$\rho \cdot g \cdot h_E + p_E + p_{HA3} = \rho \cdot g \cdot h_G + p_G + f(Q_3), \quad (3.15)$$

где  $h_E$  и  $h_G$  – высота над уровнем моря в точке Е и G, соответственно;

$p_E$  и  $p_G$  – давление воды в точке Е и G, соответственно;

$p_{HA3}$  – перепад давления, который создаёт насосный агрегат №3;

$f(Q_3)$  – гидравлические потери на участке от точки Е до точки G;

$Q_2$  – водопотребление в определённый момент времени на участке Е-F-G.

Из уравнений (3.13) – (3.15) определим напор, который создает насосный агрегат  $p_{HAi}$ . Получим

$$\begin{cases} p_{HA1} = p_G - p_A + \rho \cdot g \cdot (h_G - h_A) + f(Q_1); \\ p_{HA2} = p_G - p_C + \rho \cdot g \cdot (h_G - h_C) + f(Q_2); \\ p_{HA3} = p_G - p_E + \rho \cdot g \cdot (h_G - h_E) + f(Q_3). \end{cases} \quad (3.16)$$

Умножим каждое из уравнений системы (3.16) на водопотребление на каждом из трех участков  $Q_i$ , получим

$$\begin{cases} p_{HA1} \cdot Q_1 = (p_G - p_A + \rho \cdot g \cdot (h_G - h_A)) \cdot Q_1 + f(Q_1) \cdot Q_1; \\ p_{HA2} \cdot Q_2 = (p_G - p_C + \rho \cdot g \cdot (h_G - h_C)) \cdot Q_2 + f(Q_2) \cdot Q_2; \\ p_{HA3} \cdot Q_3 = (p_G - p_E + \rho \cdot g \cdot (h_G - h_E)) \cdot Q_3 + f(Q_3) \cdot Q_3. \end{cases} \quad (3.17)$$

В левой части системы уравнений записана гидравлическая мощность каждого из насосных агрегатов  $N_r$ . Определим суммарную гидравлическую мощность всей системы. Для этого сложим левую и правую части системы уравнений (3.17). Получим

$$\begin{aligned} N_\Sigma &= N_1 + N_2 + N_3 = p_{HA1} \cdot Q_1 + p_{HA2} \cdot Q_2 + p_{HA3} \cdot Q_3 = \\ &= (p_G - p_A + \rho \cdot g \cdot (h_G - h_A)) \cdot Q_1 + f(Q_1) \cdot Q_1 + \\ &+ (p_G - p_C + \rho \cdot g \cdot (h_G - h_C)) \cdot Q_2 + f(Q_2) \cdot Q_2 + \\ &+ (p_G - p_E + \rho \cdot g \cdot (h_G - h_E)) \cdot Q_3 + f(Q_3) \cdot Q_3 \end{aligned} \quad (3.18)$$

В состав уравнения (3.18) входит неизвестный параметр гидравлических потерь  $f(Q_i)$ , который, как указывалось в первой главе, зависит от режима течения жидкости. Предположим, что гидравлическое сопротивление трубопровода имеет квадратичный характер (турбулентный режим течения) в зависимости от текущего расхода и удовлетворяет уравнению (3.11).

Для определения минимума энергетических затрат определим условие минимума гидравлической мощности. Для этого найдем частные производные суммарной гидравлической мощности от расходов в каждой ветви (3.18) и приравняем нулю. С учетом уравнения (3.11) получим

$$\begin{cases} \frac{\partial N_\Sigma}{\partial Q_1} = (p_G - p_A + \rho \cdot g \cdot (h_G - h_A)) + 3 \cdot k \cdot Q_1^2 = 0 \\ \frac{\partial N_\Sigma}{\partial Q_2} = (p_G - p_C + \rho \cdot g \cdot (h_G - h_C)) + 3 \cdot k \cdot Q_2^2 = 0 \\ \frac{\partial N_\Sigma}{\partial Q_3} = (p_G - p_E + \rho \cdot g \cdot (h_G - h_E)) + 3 \cdot k \cdot Q_3^2 = 0 \end{cases}$$

ИЛИ

$$\begin{cases} p_G - p_A + \rho \cdot g \cdot (h_G - h_A) + 3 \cdot f(Q_1) = 0 \\ p_G - p_C + \rho \cdot g \cdot (h_G - h_C) + 3 \cdot f(Q_2) = 0 \\ p_G - p_E + \rho \cdot g \cdot (h_G - h_E) + 3 \cdot f(Q_3) = 0 \end{cases} \quad (3.19)$$

Из уравнений (3.13) - (3.15) определим гидравлические потери на каждом участке  $f(Q_i)$  и подставим в уравнение (3.19), получим

$$\begin{cases} 2p_G - 2p_A + 2 \cdot \rho \cdot g \cdot (h_G - h_A) - 3 \cdot p_{HA1} = 0 \\ 2p_G - 2p_C + 2 \cdot \rho \cdot g \cdot (h_G - h_C) - 3 \cdot p_{HA2} = 0 \\ 2p_G - 2p_E + 2 \cdot \rho \cdot g \cdot (h_G - h_E) - 3 \cdot p_{HA3} = 0 \end{cases} \quad (3.20)$$

Из первого уравнения системы определим напор, который должен создавать насосный агрегат №1  $p_{HA1}$ . Вместо второго уравнения системы запишем разность между первым и вторым уравнением системы и выразим из него напор, который должен создавать насосный агрегат №2  $p_{HA2}$ . Третье уравнение напишем как разность первого и третьего уравнения системы и выразим из него напор, который должен создавать насосный агрегат №3  $p_{HA3}$ , получим

$$\begin{cases} p_{HA1} = \frac{2}{3}[p_G - p_A + \rho \cdot g \cdot (h_G - h_A)], \\ p_{HA2} = p_{HA1} + \frac{2}{3}[p_A - p_C + \rho \cdot g \cdot (h_A - h_C)], \\ p_{HA3} = p_{HA1} + \frac{2}{3}[p_A - p_E + \rho \cdot g \cdot (h_A - h_E)]. \end{cases} \quad (3.21)$$

С учетом того, что напор насосного агрегата – это разность напоров между выходом и входом насосного агрегата, т.е.  $p_{HA1} = p_B - p_A$ ,  $p_{HA2} = p_D - p_C$  и  $p_{HA3} = p_F - p_E$ , то систему уравнений (3.26) можно переписать в следующем виде

$$\begin{cases} p_B = \frac{1}{3} p_A + \frac{2}{3} [p_G + \rho \cdot g \cdot (h_G - h_A)], \\ p_D = p_B + \frac{1}{3} (p_C - p_A) + \frac{2}{3} \cdot \rho \cdot g \cdot (h_A - h_C), \\ p_F = p_B + \frac{1}{3} (p_E - p_A) + \frac{2}{3} \cdot \rho \cdot g \cdot (h_A - h_E). \end{cases} \quad (3.21')$$

где  $p_A$  и  $p_B$  – давление воды до и после насосного агрегата НА1, соответственно;

$p_G$  – давление воды в диктующей точки;

$h_A$ ,  $h_C$ ,  $h_E$  и  $h_G$  – высота над уровнем моря в точке А, С, Е и G, соответственно;

$p_C$  и  $p_D$  – давление воды до и после насосного агрегата НА2, соответственно;

$p_E$  и  $p_F$  – давление воды до и после насосного агрегата НА3, соответственно.

Решение системы уравнений (3.21) или (3.21') определяет оптимальные величины давлений, которые должны создать насосные агрегаты, при которых гидравлическая мощность, а соответственно и потребляемая электрическая мощность будут минимальны!

Для нашего примера было предположено, что насосный агрегат НА1 является ведущим – он поддерживает давление в диктующей точке G, а остальные станции «подстраиваются» под давление на выходе насосного агрегата НА1, т.е. насосные агрегаты НА2 и НА3 являются ведомыми – давление на выходе насосных станций зависит от давления в точке В  $p_B$ , создаваемого насосным агрегатом НА1.

Аналогичные уравнения можно получить для систем с большим количеством насосных агрегатов (насосных станций), установленных в гидравлической сети и в которых ведущий насосный агрегат отличен от первого.

Для многонасосной станции повышения давления, изображенной на рисунке 1.13, у которой все насосные агрегаты расположены на одном уровне (на одной раме), а также давление на входе насосных агрегатов одинаково (все насосные аг-

регаты объединены общим коллектором), то в соответствии с системой уравнений (3.21) получим следующую систему уравнений для определения оптимальных величин перепада давлений, которые должны создавать насосные агрегаты:

$$\begin{cases} p_{HA1} = \frac{2}{3}[p_G - p_A], \\ p_{HAi} = p_{HA1}. \end{cases} \quad (3.22)$$

где  $p_{HA1}$  – перепад давления, который создаёт ведущий НА;

$p_G$  – давление воды в диктующей точке;

$p_A$  – давление воды перед ведущим НА;

$p_{HAi}$  – перепад давлений, который создают ведомые НА.

Из уравнения (3.22) видно, что перепад всех насосных агрегатов многонасосной станции должен быть одинаковым. Данный вывод можно получить и простыми логическими размышлениями: потери в насосном агрегате тем меньше, чем меньше перетекания жидкости из одного насосного агрегата в другой, которые возникают в большинстве случаев при неравномерной нагрузке насосных агрегатов.

### 3.3 Определение КПД двигателя

КПД двигателя можно определить двумя способами:

- график (таблица значений) КПД может быть запрошена у производителя для разных частот вращения двигателя;
- с помощью электрической схемы замещения.

Для анализа характеристик асинхронного двигателя в установившихся режимах пользуются его электрической схемой замещения [20, 33, 57, 59]. На рисунке 3.7 изображена Г - образная схема замещения асинхронного двигателя. Она представляет собой составленную из идеализированных элементов электрическую схему замещения одной фазы электродвигателя, в которой магнитная связь между статором и ротором заменена электрической.

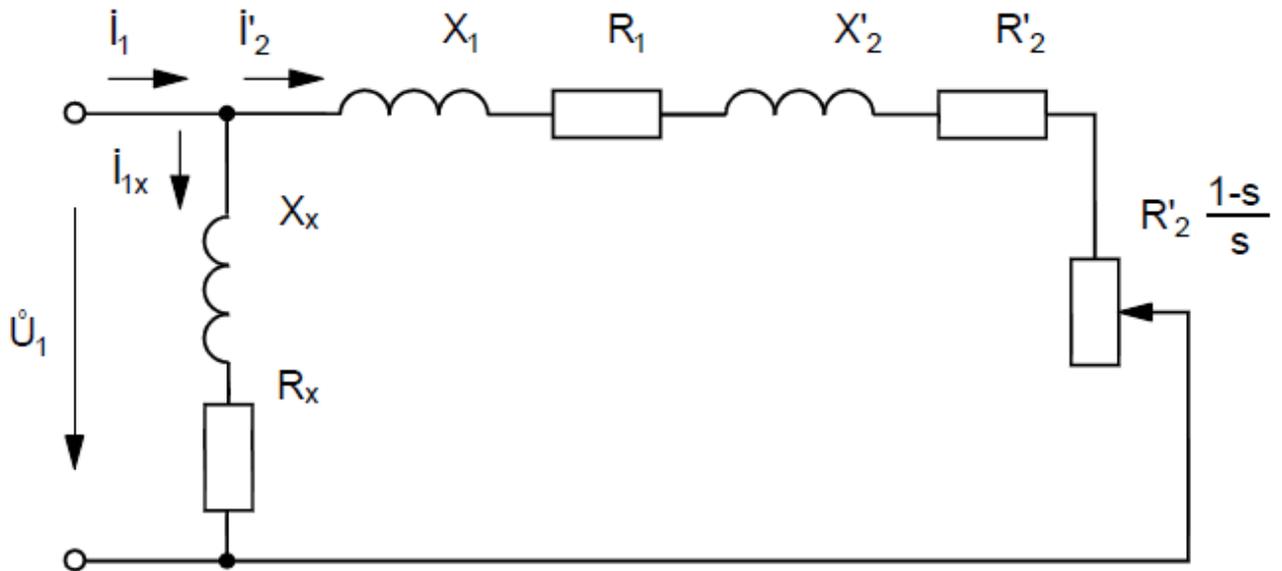


Рисунок 3.7 – Г - образная схема замещения асинхронного двигателя

В этом случае исходными данными для определения КПД двигателя должны быть не только основные параметры двигателя (номинальное фазное напряжение двигателя, номинальная частота сети, номинальная мощность двигателя), но также и параметры схемы замещения электродвигателя, т.е. исходными данными для определения КПД двигателя являются:

- $U_n$  - номинальное фазное напряжение двигателя, В;
- $f_n$  - номинальная частота сети, Гц;
- $P_n$  - номинальная мощность двигателя, кВт;
- $R_x$ ,  $X_x$  - активное и индуктивное сопротивления цепи намагничивания электродвигателя, Ом;
- $R_1$ ,  $X_1$  - активное и индуктивное сопротивления фазной обмотки статора, Ом;
- $R_2'$ ,  $X_2'$  - приведённые к обмотке статора активное и индуктивное сопротивления фазной обмотки ротора, Ом.

Расчет КПД двигателя можно разбить на 5 этапов.

**а) определение потребляемой двигателем из сети мощности [86]**

$$P_{1T} = 3U_1 I_1 \cos \varphi, \quad (3.23)$$

где  $U_1$  - подводимое напряжение к статору двигателя, В;

$I_1$  - действующее значение фазного тока, А;

$\cos \varphi$  - коэффициент мощности асинхронного двигателя.

1) *Определение подводимого напряжения к статору двигателя.*

Подводимое напряжение к статору двигателя определяем по закону управления двигателем [17, 26]. Рассматриваем только скалярное управление двигателем. В этом случае  $\frac{U}{f} = const$ . Тогда

$$U_1 = \frac{U_n}{f_n} \cdot f_1 \text{ или } U_1 = \frac{U_n}{f_n^2} \cdot f_1^2 \text{ и т.д.}, \quad (3.24)$$

где  $U_n$  - номинальное фазное напряжение двигателя, В;

$f_n$  - номинальная частота напряжения двигателя, Гц;

$f_1$  - текущая частота напряжения двигателя, Гц.

2) *Определение действующего значения фазного тока.*

$$I_1 = I_{1x} + I_2', \quad (3.25)$$

где  $I_{1x}$  - ток намагничивания электродвигателя;

$I_2'$  - приведённый к обмотке статора ток обмотки ротора электродвигателя.

$$I_{1x} = \frac{U_1}{R_x + jX_x}, \quad (3.26)$$

$$I_2' = \frac{U_1}{\left(R_1 + \frac{R_2'}{s}\right) + j(X_1 + X_2')}, \quad (3.27)$$

где  $R_x$ ,  $X_x$  - активное и индуктивное сопротивления цепи намагничивания электродвигателя, Ом;

$R_1$ ,  $X_1$  - активное и индуктивное сопротивления фазной обмотки статора, Ом;

$R_2'$ ,  $X_2'$  - приведённые к обмотке статора активное и индуктивное сопротивления фазной обмотки ротора, Ом;

$s$  - скольжение;

$j$  - мнимая единица.

3) *Определение коэффициента мощности асинхронного двигателя.*

$$\cos(\varphi) = \frac{\operatorname{Re}(I_1)}{I_1}, \quad (3.28)$$

где  $\operatorname{Re}(I_1)$  - значение действительной части фазного тока;

$I_1$  - действующее значение фазного тока.

**б) определение развиваемой механической мощности двигателем**

$$P_{\text{мех}} = 3(I_2')^2 R_2' \frac{1-s}{s}, \quad (3.29)$$

где  $I_2'$  - приведённый к обмотке статора ток обмотки ротора электродвигателя, А;

$R_2'$  - приведённое к обмотке статора активное сопротивление фазной обмотки ротора, Ом;

$s$  - скольжение.

**с) определение мощности механических потерь**

$$\Delta P_{\text{мех}} = \Delta P_n - (\Delta P_{\sigma 1} + \Delta P_{\sigma 2} + \Delta P_{\text{ст}}), \quad (3.30)$$

где  $\Delta P_n$  - номинальная мощность потерь, Вт;

$\Delta P_{\sigma 1}$  - мощности потерь в обмотке статора двигателя, Вт;

$\Delta P_{\sigma 2}$  - мощности потерь в обмотке ротора двигателя, Вт;

$\Delta P_{\text{ст}}$  - мощность потерь в стали двигателя, Вт.

*1) определение мощности потерь в стали двигателя*

$$\Delta P_{\text{ст}} = 3R_x I_{1x}^2, \quad (3.31)$$

где  $R_x$  - активное сопротивления цепи намагничивания электродвигателя, Ом;

$I_{1x}$  - ток намагничивания электродвигателя.

*2) определение мощности потерь в обмотке статора двигателя*

$$\Delta P_{\sigma 1} = 3R_1 (I_2')^2, \quad (3.32)$$

где  $R_1$  - активное сопротивление фазной обмотки статора, Ом;

$I_2'$  - приведённый к обмотке статора ток обмотки ротора электродвигателя, А.

*3) определение мощности потерь в обмотке ротора двигателя*

$$\Delta P_{\sigma 2} = 3R_2' (I_2')^2, \quad (3.33)$$

где  $R_2'$ , - приведённое к обмотке статора активное сопротивление фазной обмотки ротора, Ом;

**d) определение полезной механической мощности на валу двигателя**

$$P_{2T} = P_{\text{мех}} - \Delta P_{\text{мех}}, \quad (3.34)$$

где  $P_{\text{мех}}$  - развиваемая механическая мощность двигателя, Вт;

$\Delta P_{\text{мех}}$  - мощности механических потерь, Вт.

**e) определение КПД асинхронного двигателя [82]**

$$\eta = \frac{P_{2T}}{P_{1T}}, \quad (3.35)$$

где  $P_{2T}$  - полезная механическая мощность на валу двигателя, Вт;

$P_{1T}$  - потребляемая двигателем из сети мощность, Вт.

Алгоритм определения КПД двигателя показан на рисунке 3.8.

### 3.4 Определение КПД насоса

КПД насоса можно определить двумя способами:

- график (таблица значений) КПД может быть запрошена у производителя для разных частот вращения насоса;

- на основании формулы Мууди, преобразованной для насоса (3.8). В этом случае должен быть известен график КПД насоса при номинальной частоте вращения.

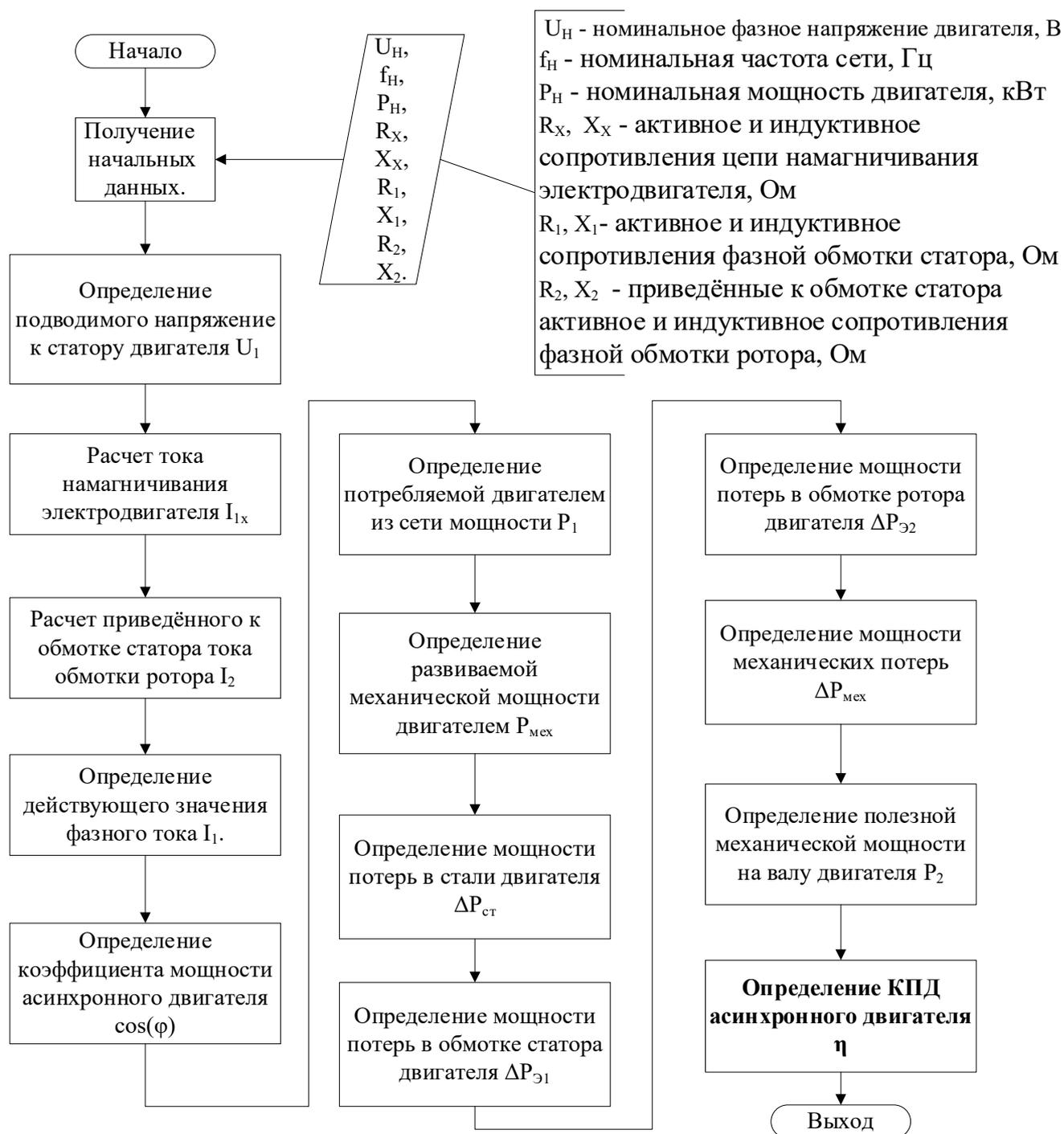


Рисунок 3.8 – Алгоритм определения КПД двигателя

Во втором случае КПД насоса определяется следующим образом:

- строится рабочая характеристика насоса для требуемой частоты вращения (см. главу 3.1);
- для полученной рабочей характеристике находится точка с максимальным произведением  $Q \cdot H$  (точка с максимальной гидравлической мощностью);

в) по формуле Муди (3.8) определяется КПД для данной точки (при этом номинальное значение КПД берётся равным максимальному КПД насосного агрегата при номинальной частоте вращения);

г) для остальных точек КПД определяется аналогично (точка КПД при номинальной частоте вращения берется пропорционально гидравлической мощности).

Пример графика КПД насоса при двух частотах вращения показан на рисунке 3.9.

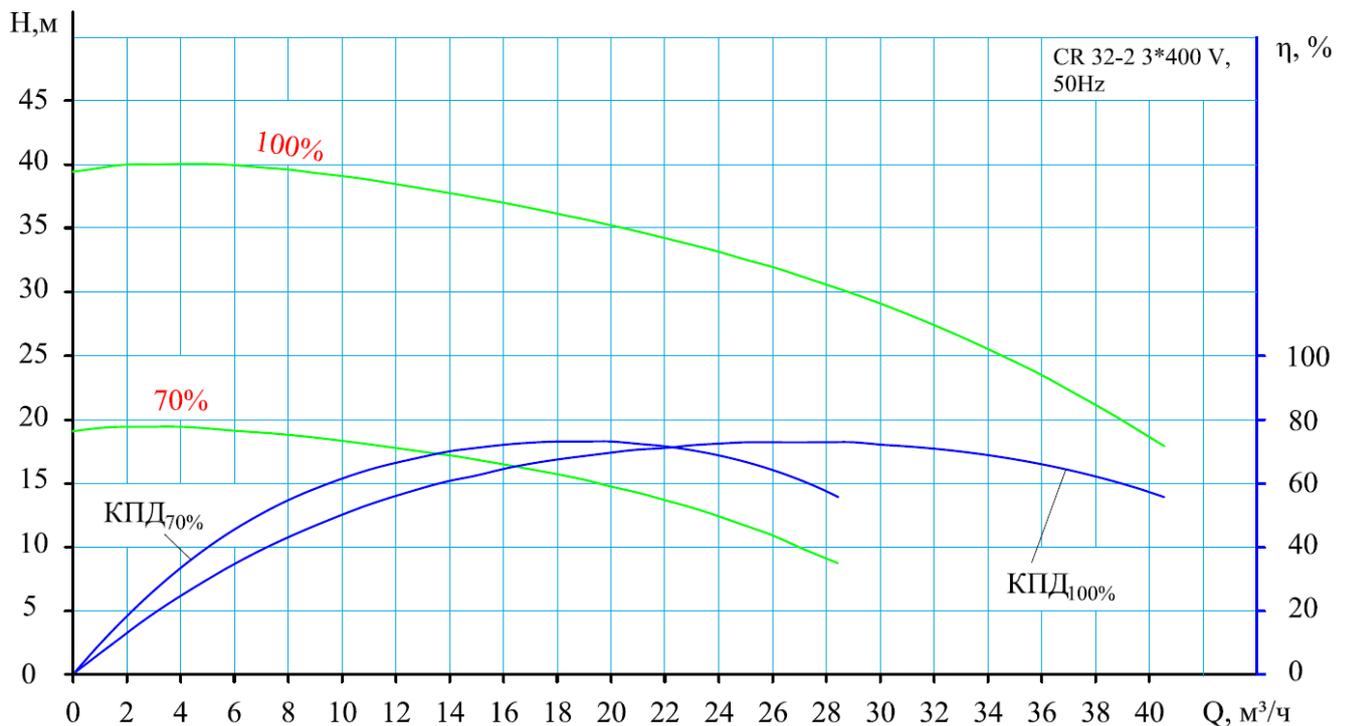


Рисунок 3.9 – График КПД насоса при двух частотах вращения

### 3.5 Работа насосной станции с учетом водопотребления

На основании выше сказанного разработан оптимизированный алгоритм управления многонасосной станцией, который включает в себя следующие действия:

а) ввод основных параметров насосного агрегата: номинальная мощность

двигателя  $N_{НОМ}$ , номинальный ток электродвигателя  $I_{НОМ}$ , коэффициент мощности  $\cos \varphi$ , номинальный КПД электродвигателя  $\eta_{ДВ.НОМ}$ , номинальная подача насосного агрегата  $Q_{НОМ}$ , номинальный напор насосного агрегата  $H_{НОМ}$ , максимальный напор насосного агрегата на закрытую задвижку (фиктивный напор)  $H_{\phi}$ , номинальный КПД насосного агрегата  $\eta_{НА.НОМ}$ ;

б) ввод напорно-расходной характеристики насосного агрегата при номинальной частоте вращения;

в) ввод графика КПД насоса при номинальной частоте вращения;

г) ввод семейств графиков КПД электродвигателя насоса или параметров схемы замещения электродвигателя  $R_x, X_x, R_1, X_1, R_2'$  и  $X_2'$ ;

д) определение ведущего насосного агрегата.

Для комплектных насосных станций, выполненных на одной станине (несущей раме) с общим коллектором, ведущим насосным агрегатом может быть любой насосный агрегат;

е) запуск процесса «обучения» системы управления насосной станцией;

**ж) процесс «обучения» НЕ пройден:**

1) ведущий насосный агрегат поддерживает необходимое давление в диктующей точке;

2) при недостаточности одного насосного агрегата (определяется по увеличению частоты ПЧТ выше частоты подключения дополнительного насосного агрегата и отклонению требуемого давления на выходе НС ниже нормы) подключается дополнительный насосный агрегат (см. п. 1.5.1).

На основании системы уравнений (3.21) или (3.22) определяется перепад давления (давление), которое должен создать дополнительный насосный агрегат.

3) при снижении частоты ПЧТ ниже частоты отключения дополнительного насосного агрегата отключается дополнительный насосный агрегат.

**и) процесс «обучения» пройден:**

1) ведущий насосный агрегат поддерживает необходимое давление в диктующей точке;

2) по формуле (3.12) в каждый момент времени вычисляется количество оборотов (частота ПЧТ) насосного агрегата, требуемое для поддержания необходимого напора и расхода в последующий момент времени;

3) определяется КПД насосного агрегата для спрогнозированного водопотребления для различных вариантов работы насосной станции.

Для каждой рабочей точки спрогнозированного водопотребления определяется КПД насосного агрегата [39]

$$\eta_{НА} = \eta_H \cdot \eta_{ДВ} \cdot \eta_{ПЧ}, \quad (3.34)$$

где  $\eta_H$  – КПД насоса (определено в главе 3.4);

$\eta_{ДВ}$  – КПД электродвигателя (определено в главе 3.3);

$\eta_{ПЧ}$  – КПД преобразователя частоты.

КПД современного частотного преобразователя  $\eta_{ПЧ}$  не зависит от частоты вращения, определяется в основном только частотой широтно-импульсной модуляции и нагрузкой на валу электродвигателя, и почти не меняется, поэтому в дальнейших расчетах не учитывается.

КПД насосного агрегата определяется для следующих комбинаций работы насосной станции:

- работает только один насосный агрегат, поддерживая необходимое давление в заданной точке;
- работают несколько насосных агрегатов на одной частоте вращения, поддерживая необходимое давление в заданной точке;
- работают несколько насосных агрегата, при этом один насосный агрегат работает на изменяемой частоте вращения, поддерживая необходимое давление в заданной точке, остальные насосные агрегаты – на фиксированной частоте вращения (для случая с одним ПЧТ на группу НА).

4) выбирается режим работы станции управления с максимальным КПД.

#### **к) переходные процессы.**

Постоянно при работе НС после процесса «обучения» ведется контроль реального значения давления на выходе насосной станции. В случае уменьшения

реального значения давления на выходе НС от требуемого более 10% и недостаточности производительности работающих насосных агрегатов в работу подключается дополнительный НА. Станция переходит на работу по стандартному алгоритму (п. ж) до момента выравнивания спрогнозированного значения давления на выходе НС (определяется по соответствующему перепаду, который должен создать насосный агрегат) фактическому.

Для управления объектами водоснабжения, к которым в большинстве случаев относят насосные станции, используются программируемые логические контроллеры (ПЛК). Основные требования, которым должен соответствовать ПЛК для реализации разработанных автором алгоритмов, указаны в приложении А.

### **3.6 Выводы по главе 3**

1. Разработаны алгоритмы нахождения основных параметров насосного агрегата в каждый момент времени его работы для конкретной рабочей точки.

2. Определена оптимальная частота вращения насосного агрегата в зависимости от текущего водопотребления при наличии противодействия.

3. Определен минимум энергетических затрат насосной станции при работе нескольких насосных агрегатов в одной общей сети. При этом для многонасосной станции, у которой все насосные агрегаты расположены на одном уровне (на одной раме), определено, что в случае работы в параллель нескольких насосных агрегатов минимум энергетических затрат будет в том случае, когда перепад, создаваемый каждым насосным агрегатом, будет одинаковым, т.е. частота вращения насосных агрегатов должна быть одинаковой (для насосных агрегатов с идентичными характеристиками).

4. Разработан адаптивный алгоритм управления насосными агрегатами, учитывающий не только уровень сигнала с датчика давления, но и изменение водопотребления. Данный алгоритм позволяет в режиме реального времени изменять режим работы насосного агрегата с целью снижения энергопотребления насосной станции и системы водоснабжения.

## **4 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ В НАСОСНЫХ СТАНЦИЯХ**

Для проверки правильности разработанных алгоритмов управления насосными станциями, проведены экспериментальные исследования на большом числе реально действующих водозаборных узлов (ВЗУ), водонапорных станциях микрорайонов и домов.

Экспериментальные исследования проводились на объектах города Мытищи, Королева, Балашихи, Голицино и др. Для проведения экспериментов выбирались такие объекты, на которых насосные агрегаты работали во всем диапазоне скоростей и в различных режимах. Полученные экспериментальные данные сопоставлялись с расчетными.

Экспериментальная часть проводилась в два этапа:

- определение рабочих параметров насосной станции во всех режимах ее работы;
- определение оптимальных режимов работы станции повышения давления.

### **4.1 Описание экспериментального объекта**

Эксперимент проводился на насосных станциях, расположенных в г. Мытищи на улице Шараповская, Матросова, Олимпийский пр-т, Щербакова и др.

Насосная станция предназначена для повышения давления в гидравлической системе при подаче чистой воды из накопительных резервуаров или водопроводной сети. В нашем случае чистая вода подавалась из водопроводной сети.

Система управления одной из таких насосных станций представлена на рисунке 4.1.

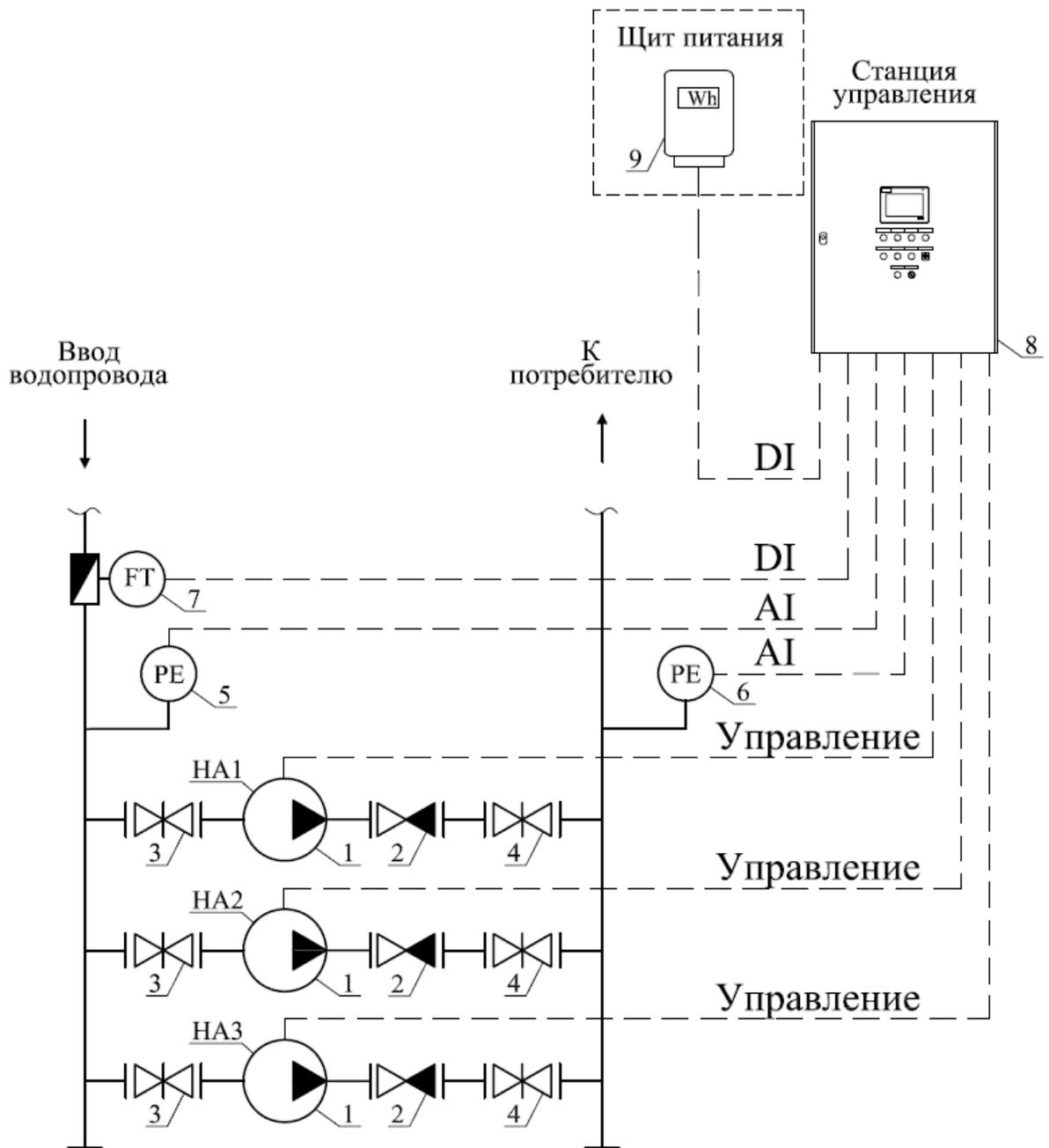


Рисунок 4.1 – Система управления насосной станцией

1 – насосные агрегаты (НА1, НА2 и НА3); 2 – обратный клапан; 3 – запорные устройства (задвижки) на входе насосного агрегата; 4 – запорные устройства (задвижки) на выходе насосного агрегата; 5 – аналоговый датчик давления на входе насосной станции; 6 – аналоговый датчик давления на выходе насосной станции; 7 – импульсный расходомер; 8 – станция управления; 9 – электросчетчик

Насосная станция представляет собой систему из трех параллельных участков с расположенными на них насосными агрегатами (поз 1). Насосные агрегаты подают воду из подающего коллектора (в нашем случае ввод водопровода) в

напорный (в нашем случае к потребителю). После каждого насосного агрегата установлены обратные клапаны (поз. 2), препятствующие перетеканию жидкости из напорного коллектора в подающий. Для возможности работы с определенным насосным агрегатом или исключения его из работы, перед насосным агрегатом и после обратного клапана установлены запорные устройства (поз. 3 и 4). Для защиты насосных агрегатов от отсутствия воды в системе, а также для возможности определения фактического перепада на НА, на подающем коллекторе установлен аналоговый датчик давления (поз. 5). Контроль давления на выходе насосной станции производится с помощью датчика давления, установленного на напорном коллекторе (поз. 6).

Во время экспериментального исследования одновременно снимаются показания по четырем параметрам – давление в подающем коллекторе (поз. 5), давление в напорном трубопроводе (поз. 6), общий расход воды на входе из водопровода (поз. 7) и электропотребление насосной станции (поз. 9).

Статическое давление измеряется с помощью датчиков давления фирмы Schneider Electric, а расход воды при помощи турбинного расходомера с импульсным выходом фирмы Тепловономер. Характеристики датчиков давления, расходомера и электросчетчика показаны в приложении Б.

Все измерения параметров (давление, расход и энергопотребление) проводятся автоматически с помощью системы управления насосной станцией с дальнейшей передачей данных при необходимости на диспетчерский пункт [43].

Упрощенная принципиальная электрическая схема управления насосной станцией показана на рисунке 4.2.

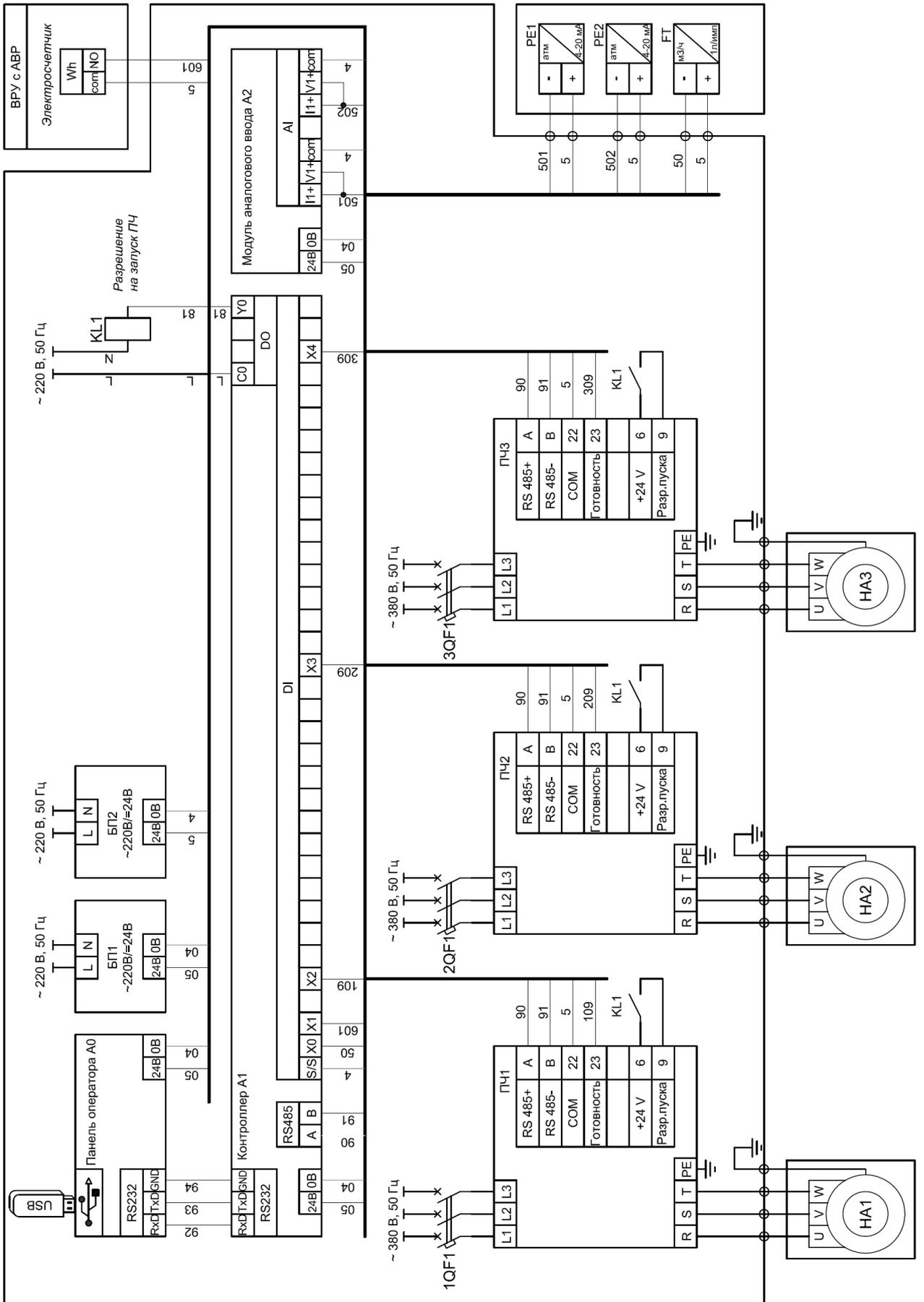


Рисунок 4.2 – Принципиальная электрическая схема управления насосной станцией

**Система управления насосной станцией состоит из следующих частей (рисунок 4.2):**

- программируемый логический контроллер (ПЛК) (поз. А1), который обрабатывает информацию от всех подключённых устройств и выдаёт команды управления на частотные преобразователи, управляющие электродвигателями насосных агрегатов (запуск/останов, задание выходной частоты вращения электродвигателей);

- преобразователи частоты тока (поз. ПЧТ1, ПЧТ2 и ПЧТ3), которые в зависимости от управляющего сигнала, поступившего от контроллера А1, управляют частотой вращения электродвигателя насосного агрегата. Поскольку в каждый момент времени контроллер обменивается с преобразователями частоты большим количеством информации (см. ниже), то передача информации между частотными преобразователями и контроллером осуществляется по определенному промышленному интерфейсу [1, 8, 19, 101]. В нашем случае передача данных от контроллера к преобразователю частоты (и наоборот) происходит по интерфейсу RS-485 протокол ModBus RTU.

*От преобразователей частоты контроллер А1 получает следующую информацию:*

- 1) текущая частота вращения электродвигателя;
- 2) измеренный ток электродвигателя;
- 3) напряжение, подводимое к обмоткам электродвигателя;
- 4) рассчитанный действительный момент на валу электродвигателя;
- 5) мощность на валу электродвигателя;
- 6) состояние преобразователя частоты (работа, авария, код аварии).

*В преобразователи частоты тока контроллер А1 выдает следующие команды:*

- 1) задание частоты вращения электродвигателя;
- 2) управляющие команды (пуск, стоп, сброс аварии).

- модуля аналогового ввода сигналов (поз. А2), который получает информацию от аналоговых датчиков давления и преобразует в цифровой сигнал;

- панели оператора (поз. А0), которая необходима для отображения состояния станции управления, управления станцией и изменения настраиваемых уставок для корректной работы станции управления;

- блока питания (поз. БП1 и БП2), предназначенного для запитывания панели оператора, контроллера, аналогового модуля и контрольно-измерительных приборов (датчиков давления и расходомера);

- для случая аварийной остановки при нештатной ситуации предусмотрено реле разрешения запуска преобразователей частоты (поз. KL1), при размыкании контактов которого происходит останов преобразователей частоты, а соответственно и НА.

Внешний вид одной из насосных станций и шкафа управления показан на рисунке 4.3.

а)



б)



Рисунок 4.3 – Внешний вид насосной станции

а – внешний вид насосной станции и шкафа управления; б – внешний вид шкафа управления с открытой дверью

Для дальнейшей обработки данных панель оператора (поз. А0) имеет возможность подключения USB-накопителя для записи данных, накопленных в памяти станции управления. Данные записываются каждую секунду в формате \*.csv. Окончательная обработка данных проводилась с помощью ПО MS Excel.

#### **4.2 Методика проведения экспериментальных исследований**

Целью эксперимента является определение рабочей точки и электропотребления насосной станции во всех режимах работы насосной станции (первая часть эксперимента), а также проверка разработанного алгоритма работы (вторая часть эксперимента).

Сложность первой части эксперимента заключалась в том, что все измерения проводились на постоянно работающем оборудовании и остановка насосной станции на долгий промежуток времени была невозможна. В связи с этим первая часть эксперимента проводилась в два этапа:

- первый этап проводился на насосных станциях, у которых подключение дополнительного насосного агрегата не производится;
- второй этап проводился на всех остальных станциях.

**На всех этапах эксперимента постоянно вёлся контроль основных параметров насосной станции, а именно:**

- давление воды на входе насосной станции;
- давление воды на выходе насосной станции;
- общий расход воды;
- энергопотребление насосной станции;
- текущая частота вращения электродвигателей насосных агрегатов\*;
- потребляемый ток электродвигателями\*;
- напряжение, подводимое к обмоткам электродвигателей\*;
- рассчитанный действительный момент на валу электродвигателей\*;
- мощность на валу электродвигателей\*.

\* – звездочкой указаны параметры, которые снимались с преобразователя частоты по интерфейсу RS-485 протокол ModBus RTU.

Пример данных, полученных на первом этапе эксперимента, показан в таблице 4.1.

*В таблице 4.1 приняты следующие сокращения:*

- $p_{вх}$  – давление воды на входе насосной станции, бар;
- $p_{вых}$  – давление воды на выходе насосной станции, бар;
- $p_{тр}$  – требуемое давление воды на выходе насосной станции, бар;
- $Q$  – общий расход воды, м<sup>3</sup>;
- $W$  – суммарное энергопотребление насосной станции, кВт ч;
- $n_z$  – текущая частота вращения электродвигателя, Гц;
- $A$  – потребляемый ток электродвигателем, А;
- $U$  – напряжение, подводимое к обмоткам электродвигателя, В;
- $M$  – рассчитанный преобразователем частоты тока действительный момент на валу электродвигателя, %;
- $P$  – мощность на валу электродвигателя, %.

### 4.3 Обработка результатов эксперимента

На основании разработанного алгоритма определения рабочей точки насосного агрегата (см. п. 3.1) в каждый момент времени определено значение расхода, создаваемого насосным агрегатом и сравнено с результатом, выдаваемым расходомером.

Поскольку сигнал от расходомера импульсный, то при выполнении расчетов сделано предположение, что водопотребление между импульсами постоянно.

График изменения водопотребления за одни сутки, полученного от расходомера и вычисленный по описанному выше алгоритму, показан на рисунке 4.4.

Таблица 4.1 – Данные, получаемые в результате эксперимента

Время	Дата	P_вх	P_вых	P_тр	Q	W	Параметры эл/двиг_1					Параметры эл/двиг_2					Параметры эл/двиг_3				
							Hz	A	M	P	U	Hz	A	M	P	U	Hz	A	M	P	U
20:56:14	08.01.16	3,22	4.8	4.8	29,1	23,11	0	0	0	0	0	38,28	4,4	40,6	30,4	307,3	0	0	0	0	0
20:56:15	08.01.16	3,22	4.8	4.8	29,1	23,11	0	0	0	0	0	38,32	4,4	39,5	30,8	307,2	0	0	0	0	0
20:56:16	08.01.16	3,22	4.8	4.8	29,1	23,11	0	0	0	0	0	38,32	4,4	39,4	31,2	307,5	0	0	0	0	0
20:56:17	08.01.16	3,22	4.8	4.8	29,1	23,11	0	0	0	0	0	38,26	4,4	40,7	31,4	307,1	0	0	0	0	0
20:56:18	08.01.16	3,21	4.8	4.8	29,1	23,11	0	0	0	0	0	38,28	4,4	40,6	31,3	307,1	0	0	0	0	0
20:56:19	08.01.16	3,22	4.8	4.8	29,1	23,11	0	0	0	0	0	38,24	4,5	40,1	30,7	306,3	0	0	0	0	0
20:56:20	08.01.16	3,23	4.8	4.8	29,1	23,11	0	0	0	0	0	38,24	4,4	40,8	31,1	306,4	0	0	0	0	0
20:56:21	08.01.16	3,23	4.8	4.8	29,2	23,11	0	0	0	0	0	38,2	4,4	40,7	31,5	306,4	0	0	0	0	0
20:56:23	08.01.16	3,23	4.8	4.8	29,2	23,11	0	0	0	0	0	38,12	4,4	39,6	31,2	305,8	0	0	0	0	0
20:56:24	08.01.16	3,24	4.8	4.8	29,2	23,11	0	0	0	0	0	38,12	4,4	39,6	31,2	305,8	0	0	0	0	0
20:56:25	08.01.16	3,23	4.8	4.8	29,2	23,11	0	0	0	0	0	38,08	4,4	39,9	31,6	305,2	0	0	0	0	0
20:56:26	08.01.16	3,23	4.8	4.8	29,2	23,11	0	0	0	0	0	38,04	4,4	39,2	31,1	304,9	0	0	0	0	0
20:56:27	08.01.16	3,23	4.8	4.8	29,2	23,11	0	0	0	0	0	37,96	4,4	39,3	30,8	304,9	0	0	0	0	0
20:56:28	08.01.16	3,23	4.8	4.8	29,2	23,11	0	0	0	0	0	37,92	4,4	39,6	30,4	304,6	0	0	0	0	0
20:56:29	08.01.16	3,23	4.8	4.8	29,2	23,11	0	0	0	0	0	37,92	4,4	38,7	30,2	304,2	0	0	0	0	0
20:56:30	08.01.16	3,22	4.8	4.8	29,2	23,11	0	0	0	0	0	37,92	4,4	40	30,5	304,2	0	0	0	0	0
20:56:31	08.01.16	3,21	4.8	4.8	29,2	23,11	0	0	0	0	0	37,96	4,4	39,1	30,2	304,2	0	0	0	0	0
20:56:32	08.01.16	3,21	4.8	4.8	29,2	23,12	0	0	0	0	0	38	4,4	39,4	30,7	304,5	0	0	0	0	0
20:56:33	08.01.16	3,21	4.8	4.8	29,2	23,12	0	0	0	0	0	37,96	4,4	38,9	30,7	304,4	0	0	0	0	0

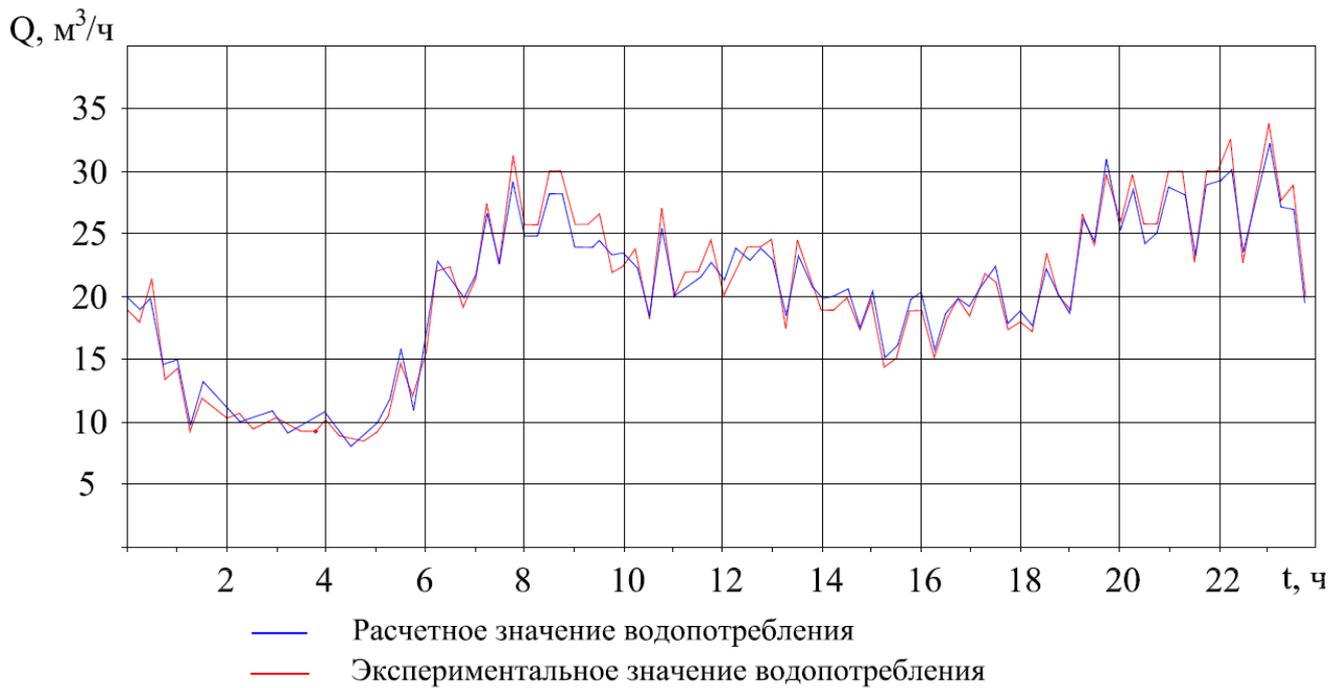


Рисунок 4.4 – График изменения водопотребления

Отклонение расчетных и экспериментальных значений расхода составляет менее 5% для всего возможного диапазона частот вращения насосного агрегата, кроме моментов минимального водоразбора (ночное время), где расхождение значений в некоторых точках достигает до 10%. Расхождение результатов расчетных и экспериментальных исследований связано с предположением, что водопотребление между импульсами, выдаваемыми расходомером, постоянно (расходомер имеет импульсный выход, параметры см. приложение Б).

На рисунках 4.5 и 4.6 показаны графики работы насосной станции с учетом разработанного алгоритма управления (вторая часть эксперимента).

На рисунке 4.5 показан график водопотребления (график  $Q$ ) одного из жилых домов. В отличие от существующих алгоритмов управления, когда для данной гидравлической системы в промежуток времени с 21 до 24 часов будет работать только один насосный агрегат, то по новому алгоритму управления в данный промежуток времени в работе будут находиться два насосных агрегата, работающие на одинаковой частоте вращения, поскольку КПД двух параллельно работающих насосов (график  $\eta_2$ ) в промежуток времени с 21 до 24 больше, чем КПД одного насосного агрегата (график  $\eta_1$ ).

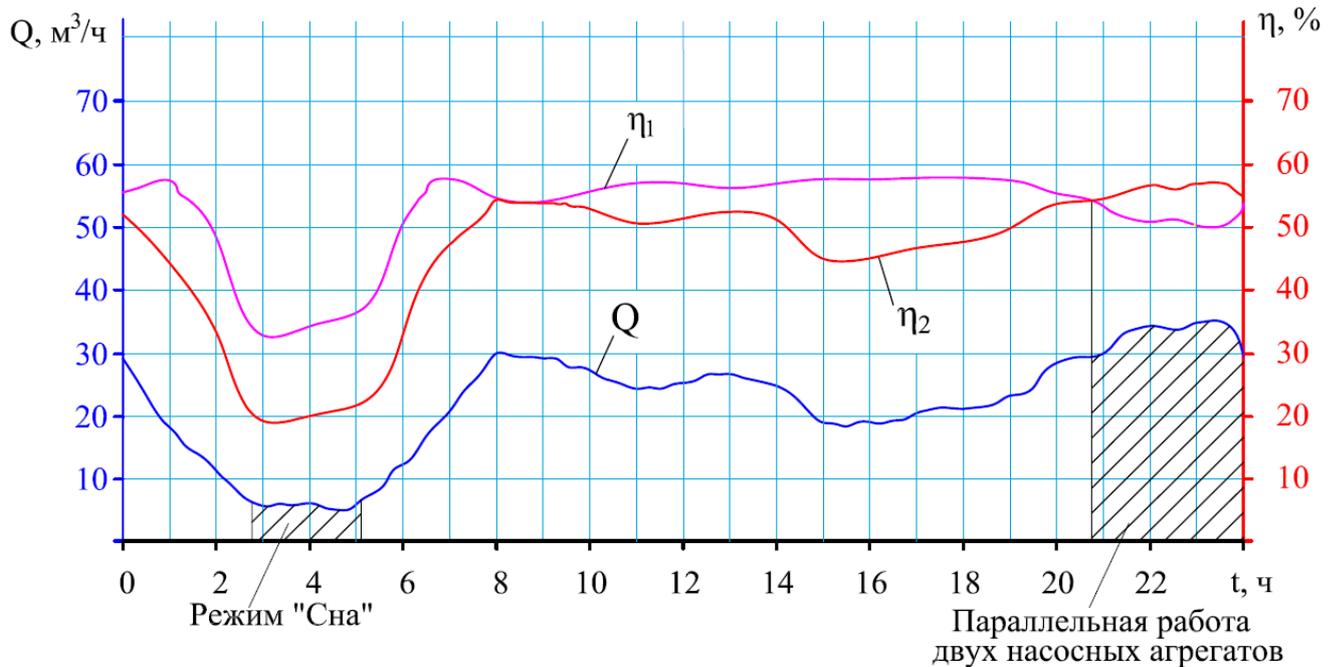


Рисунок 4.5 – График водопотребления и КПД насосной станции

Q – график водопотребления одного из жилых домов;  $\eta_1$  – КПД одного насосного агрегата;  
 $\eta_2$  – КПД двух параллельно работающих насосов при одинаковой частоте вращения

На рисунке 4.6 показан аналогичный график водопотребления (график Q) одного микрорайона. Насосная станция данной гидравлической сети имеет такие параметры, которые в промежуток времени с 20 ч до 24 ч требуют подключения дополнительного насосного агрегата. Как видно КПД двух насосных агрегатов, работающих в параллель на одинаковой частоте вращения (график  $\eta_2$ ), меньше КПД одного насосного агрегата (график  $\eta_1$ ), поэтому совместное время работы двух насосных агрегатов необходимо свести к минимуму. В отличие от существующего алгоритма, отключение дополнительного насосного агрегата по разработанному алгоритму работы произойдет в районе 23 ч 45 мин, поскольку система управления «знает», что далее планируется снижение водопотребления и дальнейшая совместная работа двух насосных агрегатов не требуется. По существующему алгоритму работы, совместная работа насосных агрегатов продолжится, пока частота вращения насосных агрегатов (график  $\eta_2$ ) не снизится меньше частоты отключения дополнительного насосного агрегата. Для данного примера частота

отключения дополнительного насосного агрегата должна быть не менее 35 Гц, иначе дополнительный насосный агрегат никогда не отключится.

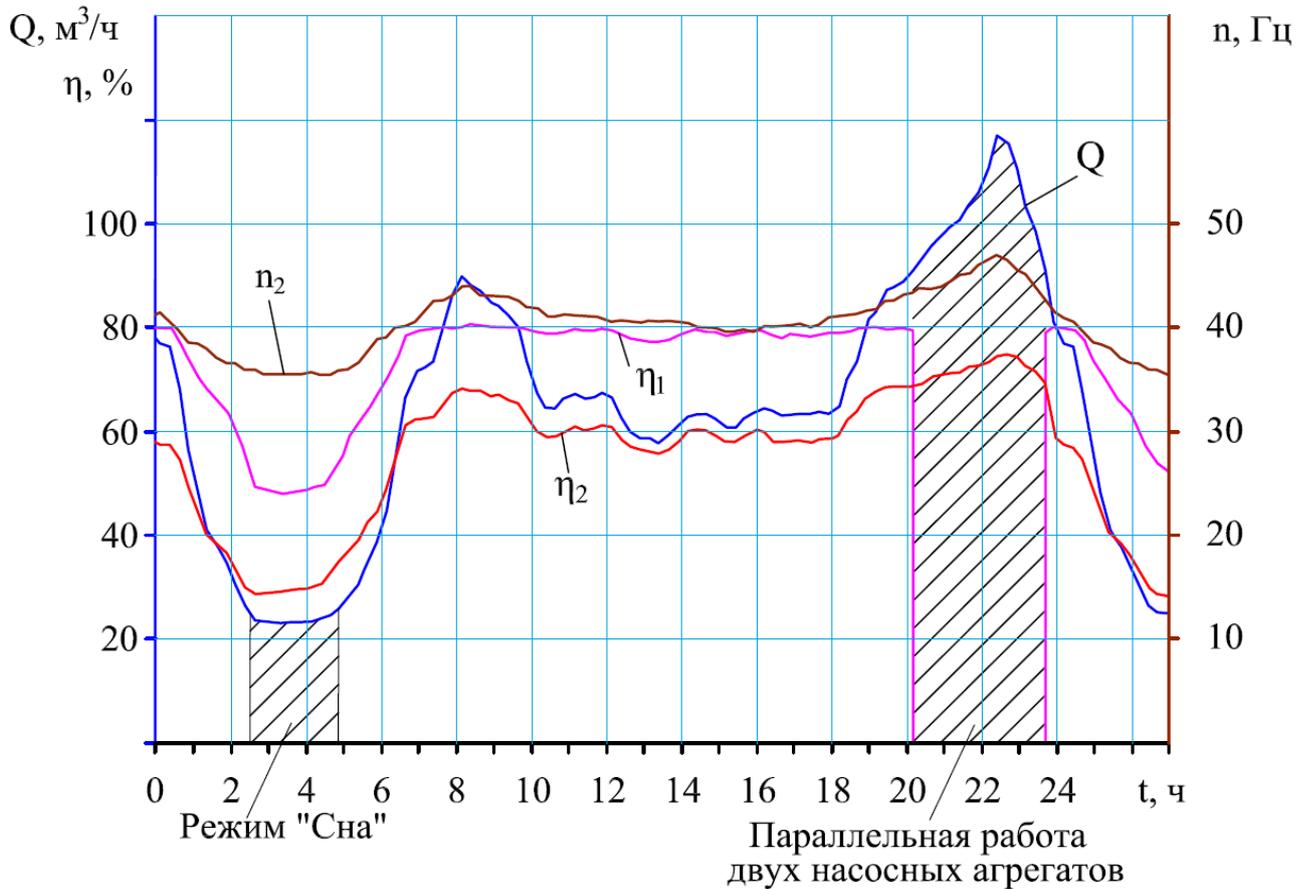


Рисунок 4.6 – График водопотребления и КПД насосной станции

$Q$  – график водопотребления одного из микрорайонов;  $\eta_1$  – КПД одного насосного агрегата;  $\eta_2$  – КПД двух параллельно работающих насосов при одинаковой частоте вращения;  $n_2$  – частота вращения двух насосных агрегатов, работающих в параллель на одинаковой частоте вращения

В таблице 4.2 показано недельное и удельное энергопотребление насосной станции при двух вариантах работы [67, 68].

Новый алгоритм управления многонасосной станции без каких-либо дополнительных затрат позволил снизить относительное энергопотребление на 7%.

Таблица 4.2 – Недельное энергопотребление насосной станции при двух вариантах работы

Алгоритм управления	Энергопотребление, кВт·ч	Водопотребление, м <sup>3</sup>	Удельное энергопотребление, кВт ч/м <sup>3</sup>
Существующий	173,214	1886.9	0,09179
Разработанный	163.284	1907.3	0.08561

#### 4.4 Выводы по главе 4

1. На объектах Мытищинского водоканала (ВЗУ, НС I подъема, НС II подъема и т.д.) проведены экспериментальные исследования для проверки правильности разработанных алгоритмов управления насосными станциями на разных режимах их работы.

2. Для возможности осуществления прогнозирования водопотребления проверен алгоритм определения текущего расхода на насосном агрегате и насосной станции. В результате отличие вычисленных значений расходов с полученными во время эксперимента не превышало 5%.

3. Проверен адаптивный алгоритм управления насосными станциями, учитывающий текущее водопотребление. Новый алгоритм управления многонасосной станции без каких-либо дополнительных затрат позволил снизить удельное энергопотребление на 7%.

4. Результаты теоретических исследований, а также соответствующие акты о внедрении (приложение В) подтвердили целесообразность применения разработанных алгоритмов управления насосными станциями.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Проведен анализ современных методов управления многонасосными станциями повышения давления. На текущий момент в современных алгоритмах управления насосными станциями учитываются только значение текущего давления на выходе МНСПД и текущая частота вращения насосного агрегата. При таком варианте работы не учитывается положение рабочей точки насосной станции и, следовательно, невозможно определить какие дальнейшие действия необходимо предпринять, чтобы заранее вывести насосную станцию на эффективный режим работы с более высоким КПД.

2. Определены параметры совместной работы группы насосных станций, позволяющие снизить общее энергопотребление многонасосными станциями. Задача сводится к определению значения давления, которое должны создавать насосные станции (или насосные агрегаты), при которых потребляемая электрическая мощность будет минимальна. В частном случае, для насосной станции, у которой все насосные агрегаты одинаковые и расположены на одном уровне (на одной раме) с общим вводным коллектором, минимум энергетических затрат при работе двух и более насосных агрегатов будет в том случае, когда частота вращения насосных агрегатов будет одинакова.

3. Проведен анализ существующих методов описания процессов водопотребления в течение суток для управления МНСПД. Анализ показал, что производительность хозяйственно-питьевых и производственных насосных установок определяется на основании соответствующих коэффициентов, которые являются величинами постоянными и не учитывают всего многообразия процессов водопотребления (сезонное изменение водопотребления, изменение количества потребителей и т.д.), что непосредственно влияет на режим работы МНСПД.

4. Разработана математическая модель, позволяющая на основе имеющихся статистических данных за прошлый промежуток времени (72 часа), провести прогнозирование дневного водопотребления на последующий день. В итоге ошибка прогнозирования суточного водопотребления в установившихся режимах

водопотребления не превышает 8%. Для определения водопотребления используется регрессионная математическая модель прогнозирования.

5. На основе полученных результатов разработан оптимизированный алгоритм управления насосными агрегатами, учитывающий не только уровень сигнала от датчика давления, но и изменение водопотребления (расхода). Данный алгоритм позволяет в условиях реального времени изменять режим работы насосного агрегата с целью снижения энергопотребления насосной станции.

6. Разработанные алгоритмы управления реализованы на практике и применяются для управления насосными станциями, что подтверждено соответствующими актами о внедрении. При этом новый алгоритм управления многонасосной станции без каких-либо дополнительных затрат позволил снизить энергопотребление на 7%.

## СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ И СОКРАЩЕНИЙ

$g$	Ускорение свободного падения
$\rho$	Плотность среды
$h$	Высота над уровнем моря
$n$	Частота вращения электродвигателя или НА
$\eta$	КПД
$\eta_n$	КПД насоса
$\eta_{НА}$	КПД насосного агрегата
$\eta_{ном}$	КПД насоса при номинальной частоте вращения
$\eta_{ДВ}$	КПД электродвигателя
$\eta_{ПЧ}$	КПД преобразователя частоты
$D$	Диаметр рабочего колеса насоса
$N$	Мощность насоса
$\alpha_{max}, \alpha_{min}$	Коэффициент, учитывающий степень санитарно-технического благоустройства здания, режим работы предприятия и другие местные условия
$\beta_{max}, \beta_{min}$	Коэффициент, учитывающий влияние числа жителей в населенном пункте
$Q$	Водопотребление (расход, создаваемый насосным агрегатом при текущей частоте вращения )
$Q_B$	Подача (расход), создаваемый насосным агрегатом при номинальной частоте вращения
$Q_{ч max}$	Максимальный часовой расход за сутки
$Q_{ч min}$	Минимальный часовой расход за сутки
$Q_{сут max}$	Максимальный суточный расход воды
$Q_{сут min}$	Минимальный суточный расход воды

$K_{ч\max}$	Максимальный коэффициент часовой неравномерности водопотребления
$K_{ч\min}$	Минимальный коэффициент часовой неравномерности водопотребления
$Z(t)$	Прогнозируемое значение в момент времени $t$
$\alpha_s, \varphi_p$	Коэффициенты математической регрессии
$\varepsilon_t$	Ошибка прогнозирования
$\varepsilon\%$	Ошибка прогнозирования в процентах
$P$	Давление (напор)
$P_{ВХ}$	Давление перед насосным агрегатом
$P_{НА}$	Перепад давления на насосном агрегате
$P_{ВЫХ}$	Давление на выходе насосного агрегата
$k$	Коэффициент гидравлических потерь напора, зависящий от вида элемента (участка) системы
$H$	Напор (или напор, создаваемый насосным агрегатом при текущей частоте вращения)
$\Delta H$	Потери напора на одном элементе (участке) системы
$H_{П}$	Статическая составляющая напора или противодействие, обусловленное работой других насосных агрегатов
$H_{\Phi}$	Напор, создаваемый при нулевой подаче (фиктивный напор)
$H_{Б}$	Перепад (напор), создаваемый насосным агрегатом при номинальной частоте вращения
$n_{ном}$	Номинальная частота вращения насосного агрегата
$P_T$	Потребляемая мощность двигателем из сети
$P_{2T}$	Полезная механическая мощность на валу двигателя
$P_{мех}$	Механическая мощность двигателя
$P_{ном}$	Номинальная мощность электродвигателя

$\Delta P_{\text{мех}}$	Мощность механических потерь
$\Delta P_{\text{СТ}}$	Мощность потерь в стали двигателя
$\Delta P_n$	Номинальная мощность потерь
$\Delta P_{\text{э1}}$	Потери мощности в обмотке статора двигателя
$\Delta P_{\text{э2}}$	Потери мощности в обмотке ротора двигателя
$U_n$	Номинальное фазное напряжение двигателя
$U_1$	Подводимое напряжение к статору двигателя
$f_n$	Номинальная частота двигателя
$f$	Частота двигателя
$R_x$	Активное сопротивление цепи намагничивания электродвигателя
$R_1$	Активное сопротивление фазной обмотки статора
$R_2'$	Приведённое к обмотке статора активное сопротивление фазной обмотки ротора
$X_x$	Индуктивное сопротивление цепи намагничивания электродвигателя
$X_1$	Индуктивное сопротивление фазной обмотки статора
$X_2'$	Приведённое к обмотке статора индуктивное сопротивление фазной обмотки ротора
$I_1$	Действующее значение фазного тока
$I_{1x}$	Ток намагничивания электродвигателя
$I_2'$	Приведённый к обмотке статора ток обмотки ротора электродвигателя
$\cos \varphi$	Коэффициент мощности асинхронного двигателя
$s$	Скольжение асинхронного двигателя

**Сокращения**

НА	Насосный агрегат
НС	Насосная станция
СУНС	Система управления насосной станцией
НС Iп	Насосная станция I подъема
НС IIп	Насосная станция II подъема
ПНС	Повысительная насосная станция
ЦНС	Циркуляционная насосная станция
КПД	Коэффициент полезного действия
РЧВ	Резервуар чистой воды
ПЛК	Программируемый логический контроллер
ПО	Программное обеспечение
ВЗУ	Водозаборный узел
ПК	Персональный компьютер
SCADA	<b>SCADA</b> ( <i>Supervisory Control And Data Acquisition – диспетчерское управление и сбор данных</i> ) – программный пакет, предназначенный для разработки или обеспечения работы в реальном времени систем сбора, обработки, отображения и архивирования информации об объекте мониторинга или управления.
ПЧТ	Преобразователь частоты тока
СУ	Станция управления
доп. НА	Дополнительный насосный агрегат

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Агуров, П. Последовательные интерфейсы ПК. Практика программирования / П. Агуров. – СПб.: БХВ-Петербург, 2004. – 496 с. – ISBN 5-94157-468-1.
2. АДЛ : . [www.adl.ru](http://www.adl.ru). – Москва, 1994. – Насосные установки «ГРАН ФЛОУ» Типа УНВ. Краткое руководство по эксплуатации. Текст: электронный. Яз. рус. – (Дата обращения: 17.01.2015).
3. Али, М.С. Анализ нестационарных процессов при нештатных режимах работы насосных станций / М. С. Али, Д. С. Бегляров, Б. Т. Бекишев, Д. М. Греков // Вестник Федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования "Московский государственный агроинженерный университет имени В.П. Горячкина". – 2016. – № 2 (72). – С. 35-39.
4. Баженов, В. И. Экономический анализ насосных систем на базе показателя - затраты жизненного цикла. / В. И. Баженов // Водоснабжение и санитарная техника. – 2006. – № 3, ч. 2. – С. 31-35.
5. Барбул, М.Л. Современные методы расчета сетей водоснабжения» / М.Л. Барбул // Научно-аналитический журнал «Инновации и инвестиции». – 2021. – №2. – С. 137-140.
6. Барбул, М.Л. Современные средства расчета и контроля сетей водоснабжения / М.Л. Барбул // Научно-аналитический журнал «Инновации и инвестиции». – 2021. – №1. – С. 117-120.
7. Барбул, М.Л. Способы повышения эффективности работы многонасосных станций с использованием средств автоматического контроля и управления / М. Л. Барбул, В.М. Васильев, Ю.Т. Котов, С.В. Староверов // Журнал С.О.К. – 2020. – № 3. –С. 16-19.
8. Барбул, М.Л. Организация высокоскоростного канала передачи многопоточковой информации на основе асинхронной измерительной магистрали ввода-вывода / М. Л. Барбул, В.Г. Домрачев, В. М. Исаев, Е. Г. Комаров, Ю. Т. Котов // Ежемесячный научно-технический журнал «Измерительная техника». – 2014. – №6. – С. 25-29.

9. Барбул, М.Л. Определение рабочей точки насосного агрегата при наличии противодавления / М. Л. Барбул, Ю.Т. Котов // Научный журнал "Естественные и технические науки". – 2016. – №10. – С. 152-159.
10. Барбул, М.Л. Прогнозирование водопотребления населением на основе авторегрессионной модели / М. Л. Барбул, С. В. Староверов // Журнал «Энергобезопасность и энергосбережение». – 2018. – №6. – С. 40-43.
11. Барбул, М.Л. Способ управления многонасосными станциями с учетом текущего водопотребления / М.Л. Барбул, С.В. Староверов // Вестник Евразийской науки. – 2018. – №5. – URL: <https://esj.today/PDF/90SAVN518.pdf/> Режим доступа: свободный. Загл. с экрана. Яз. рус., англ. – (Дата обращения: 21.02.2019).
12. Барбул, М.Л. Современные алгоритмы управления многонасосными станциями / М.Л. Барбул, С.В. Староверов, А.Ю. Феоктистов // Научно-технический журнал «Энергосбережение и водоподготовка». – 2018. – №5. – С. 9-15.
13. Березин, С. Е. Насосные станции с погружными насосами : расчет и конструирование / С.Е. Березин — М. : Стройиздат, 2008. — 160 с.
14. Березин, С.Е. Оптимальные параметры насосных станций с погружными насосам и сухой установки / С.Е. Березин // ВСТ, 2006 – № 3. – Ч. 2. – С.20-25.
15. Берестнева, О. Г. Прикладная математическая статистика: учебное пособие / О.Г. Берестнева, О.В. Марухина, Г.Е. Шевелев // Томск: Изд-во Томского политехнического университета.– 2012. – 188с.
16. Бокс, Дж., Дженкинс, Г.М. Анализ временных рядов, прогноз и управление / Дж. Бокс, Г.М. Дженкинс под редакцией В.Ф. Писаренко // М.: Мир. – 1974. – 406 с.
17. Борисов, Ю.М., Липатов Д.Н., Зорин Ю.Н. Электротехника / Ю.М. Борисов, Д.Н. Липатов, Ю.Н. Зорин // СПб.: БХВ – Петербург. –2012. – 592 с.
18. Васильев, В.М. Насосы и насосные станции: учеб. Пособие / В.М. Васильев, С.В. Федоров, А.В. Кудрявцев ; СПбГАСУ. – СПб., 2017. – Ч. I. – 131 с.

19. Гук, М.Ю. Аппаратные интерфейсы ПК / М.Ю. Гук // Энциклопедия. – СПб.: Питер, 2002. – 528с.
20. Дюбей Гопал, К. Основные принципы устройства электроприводов / К. Дюбей Гопал – М.: Техносфера, 2009. – 480 с.
21. Евдокимов, А. Г. Моделирование и оптимизация потокораспределения в инженерных сетях / А. Г. Евдокимов, А. Д. Тевяшев. — М. : Стройиздат, 1990. — 368 с.
22. Журба, М.Г. Водоснабжение. Проектирование систем и сооружений: в 3т. – Т. 3. Системы распределения и подачи воды. – Изд. 3-е, перераб. и доп. / М.Г. Журба, Л. И. Соколов, Ж. М. Говорова. – М.: Ассоциации строительных вузов, 2010. – 408 с.
23. Земляной, В.В. Насосные и воздуходувные станции. Учебнометодический комплекс / В. В. Земляной, Н. В. Земляная, В. А. Зверева, Л. В. Кучерова, А. А. Надежкина, З. В. Мизенко // М : Проспект, 2015. –102 с.
24. Зоркий, Е. М. Сравнительный анализ устойчивости замкнутых по напору систем водоподдачи с регулируемым насосным агрегатом. // Е.М. Зоркий. – М: Вода: технология и экология, 2008. – № 3, С. 32-39.
25. Ильин, Ю. А. Методика выбора энергосберегающих устройств при реконструкции повысительных насосных станций / Ю. А. Ильин // СПб.: Материалы 4-х академических чтений. – 2009. – С. 53-58.
26. Ильинский. Н.Ф., Козаченко В.Ф. Общий курс электропривода / Н.Ф. Ильинский, В.Ф. Козаченко. – М.: Энергоатомиздат, 1992. – 544 с.
27. Инженерные системы зданий / Москва: ООО "Грундфос". – 256с.
28. Калицун, В.И. и др. Гидравлика, водоснабжение и канализация: Учеб. Пособие для вузов / В.И. Калицун, В.С. Кедров, Ю.М. Ласков. – М.: Стройиздат, 2001. – 4-е изд. перераб. и доп. – 397 с. ил.
29. Карелин, В. Я. Насосы и насосные станции / В. Я. Карелин, А. В. Минаев. — М. : Стройиздат, 1986. — 320 с.
30. Ким, А. Н. Оптимизация насосных систем подачи воды при различных напорно-расходных параметрах водопотребления / А.Н. Ким, О.А. Штейн-

миллер. – СПб: Сборник докладов 5-й международной научно-практической конференции (выставка "Baltic Build — 2006"). – С. 25 - 27.

31. Кинебас, А. К. Оптимизация подачи воды в зоне влияния Урицкой насосной станции Санкт-Петербурга / А. К. Кинебас, М. Н. Ипатко, Ю. В. Руксин и др. // ВСТ. — 2009. — № 10, ч. 2. — С. 12–16.

32. Кирсанов, А.А., Колчев, В.Н., Шмиголь, В.В., Черносвитов, М.Д. Исследование работы внутриквартальных подкачивающих насосных станций / А. А. Кирсанов, В. Н. Колчев, В. В. Шмиголь, М. Д. Черносвитов // Водоснабжение и санитарная техника. – 2011. – № 9, ч. 2. – С. 30-33.

33. Китаев, А.И. Анализ работы асинхронного двигателя по данным каталога / А.И. Китаев, В.И., Глухова // Научно-технический журнал «Автоматика. Автоматизация. Электротехнические комплексы и системы. – Издание Херсонского национального технического университета. – 2008. – №1(21). –С. 40-48.

34. Комков, В.А. Насосные и воздуходувные станции: учебник. Среднее профессиональное образование / В.А. Комков, Н. С. Тимахова. – М. : ИНФРА-М, 2009. – 253с.

35. Копытин, А. Н. Современные подходы в определении эффективности работы насосных агрегатов / А.Н. Копытин, О.Ю. Царинник // Сантехника, отопление, кондиционирование. – 2007. –№ 8, – С. 14-16.

36. Красильников, А. Автоматизированные насосные установки с каскадно-частотным управлением в системах водоснабжения [Электронный ресурс] / А. Красильников // Строительная инженерия. — Электрон. дан. — [М.], 2006. — № 2. — Режим доступа: <http://www.archive-online.ru/read/stroing/347>. Яз. рус. – (Дата обращения: 11.10.2018).

37. Красильников, А. Автоматизированные насосные установки с компенсацией потерь в трубопроводах [Электронный ресурс] / А. Красильников // Строительная инженерия. — Электрон. дан. — [М.], 2006. — № 3. — Режим доступа: <http://www.archive-online.ru/read/stroing/361>.

38. Лапшев, Н. Н. Основы гидравлики и теплотехники / Н. Н. Лапшев, Ю. Н. Леонтьева. – М. : Издательский центр «Академия», 2012. – 400 с.

39. Лезнов, Б.С. Частотно-регулируемый электропривод насосных установок / Б.С. Лезнов – М.: Машиностроение, 2013. — 176 с., ил.
40. Лезнов, Б.С. Энергосбережение и регулируемый привод в насосных и воздухоподводящих установках / Б.С. Лезнов – М.: Энергоатомиздат, 2006. –360 с. ил.
41. Лезнов, Б.С. Современные проблемы использования регулируемого электропривода в насосных установках. Б.С. Лезнов // Водоснабжение и санитарная техника. –2007. – № 11, ч. 2, – С. 2-5.
42. Лезнов, Б.С. Энергосбережение и регулируемый электропривод в МУП «Уфаводоканал» / Б.С. Лезнов, Б.С., С.В. Воробьев, А.Г. Гильманов, С.В. Пинчук // Водоснабжение и санитарная техника. – 2004. – №4. –Ч. 2.
43. Лезнов, Б.С., Дмитриев А.С. Диспетчеризация и автоматизация систем водоснабжения / Б.С. Лезнов, А.С. Дмитриев под ред. М.Г. Журбы // Водоснабжение. Проектирование систем и сооружений. Т.3. – М.: АСВ, 2004.
44. Лезнов, Б.С., Чебанов В.Б. Технологические основы энергосбережения в насосных установках / Б.С. Лезнов, В.Б. Чебанов // Водоснабжение и санитарная техника. –2004. –№7.
45. Ленский, В. А. Водоснабжение и канализация / В.А. Ленский. – М. : Высшая школа. – 1964. – 387 с.
46. Моргунов, К. П. Насосы и насосные станции. Учебное пособие / К.П. Моргунов // СПб: Лань. – 2018. – 308 с.
47. Муратова, Л.И. Нормативные системы в прогнозировании развития предпринимательского сектора экономики / Л.И. Муратова [и др.] // Управление экономическими системами [электронный ресурс]. – 2009, – №20.URL: <http://uecs.mcnip.ru/modules.php?name=News&file=print&sid=145> (дата обращения 28.08.2017)
48. Николаев, В. Потенциал энергосбережения при переменной нагрузке лопастных нагнетателей / В. Николаев // Сантехника. — 2007. — № 6. — С. 68–73; 2008. — № 1. — С. 72–79.
49. Николенко, И.В. Анализ энергоэффективности частотного регулирования по относительным параметрам силовых агрегатов насосных станций и водо-

проводных сетей систем водоснабжения / И. В. Николенко // Строительство и техногенная безопасность. – 2019. – № 14 (66). – С. 101-111.

50. Николенко, И.В., Пастушенко А., Котовская Е. Анализ влияния условий эксплуатации насосной станции на параметры насосных агрегатов / И. Николенко, А. Пастушенко, Е. Котовская // MOTROL: Polish Academy of sciences. Lublin. – 2010. – Vol. 12D. – P. 33–44.

51. Николенко, И. В., Рыжаков, А.Н. Метод оптимизации режимов работы силовых агрегатов насосной станции / И. В. Николенко, А.Н. Рыжаков // Строительство и техногенная безопасность. – 2016. – № 5 (57). – С. 77-82.

52. Николенко, И.В., Рыжаков, А.Н. Нелинейная модель оптимизации параметров силовых агрегатов насосной станции подкачки системы водоснабжения / И. В. Николенко, А. Н. Рыжаков // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2019. – № 4 (724). – С. 47-63.

53. Николенко, И.В., Рыжаков, А.Н., Умаров, Р.С. Повышение энергетической эффективности регулирования силовых агрегатов насосных станций систем водоснабжения / И. В. Николенко, А. Н. Рыжаков, Р. С. Умаров // Строительство и техногенная безопасность: Сб. науч. тр. АСиА. Симферополь. – 2016. – Вып. 55. – С. 75–82.

54. Овен. Преобразователи частотные векторные ОВЕН ПЧВХХ // Руководство по применению в системах каскадного управления насосами. Рег. № 008. [www.owen.ru](http://www.owen.ru). Яз. рус. – (Дата обращения: 25.02.2018).

55. Прозоров И. В. Гидравлика, водоснабжение и канализация городов / И. В. Прозоров, Г. И. Николадзе, А.В. Минаев . –М.: Высш. шк., 1975. – 422 с.

56. Промышленное насосное оборудование. — М. : ООО "Грундфос", – 2006. — 176 с.

57. Радин, В.И. и др. Электрические машины: Асинхронные машины: Учебник для электромеханических специальностей вузов / В.И. Радин, Д. Э. Брускин, А. Е. Зорохович; под ред. И.П. Копылова. – М.: Высш. шк., –1988. – 328 с.: ил.

58. Сабра, К. Особенности работы центробежных насосов с использованием преобразователя частоты вращения / К. Сабра, М. С. Али // Природообустройство. – 2013. – № 5. – С. 64-67.
59. Соловьев, В.А. Расчет характеристик трехфазного асинхронного двигателя: методические указания к самостоятельной работе студентов по дисциплинам «Электротехника и электроника», «Основы электропривода» / В.А. Соловьев. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. – 44 с. : ил.
60. Сомов, М.А. Водоснабжение. Учебник. / М. А. Сомов, Л. А. Квитка. – М.: ИНФРА, 2007. - 287 с.
61. Теоретические основы гидравлики // Москва: ООО "Грундфос". – 41с.
62. Теория перекачивания жидкостей // Москва: ООО "Грундфос". – 44с.
63. Тихонов, Э.Е. Прогнозирование в условиях рынка / Э. Е. Тихонов // Невинномысск, –2006. –221 с.
64. Товстолес, Ф. П. Гидравлика и насосы. Часть III. Насосы / Ф.П. Товстолес. – М.: ГОНТИЛ, –1938.
65. Ухин, Б.В. Гидравлические машины. Насосы вентиляторы компрессоры и гидропривод. учебное пособие / Б.В. Ухин. – М: Сер. Высшее образование. – 2011. – 320с.
66. Фащиленко, В.Н. Регулируемый электропривод насосных и вентиляторных установок горных предприятий: Учеб. пособие. / В.Н. Фащиленко. – М.: Горная книга, 2011. –260 с.: ил.
67. Фисенко, В. Н. Оценка энергоэффективности насосов в системах водоснабжения / В.Н. Фисенко // Сборник: Яковлевские чтения XIII Международная научнотехническая конференция, посвященная памяти академика РАН С.В. Яковлева. М-во образования и науки Рос. Федерации, Московский государственный строительный университет. – 2018. – С. 116-123.
68. Фисенко, В. Н. Энергетическая эффективность насосов в системах водоснабжения и водоотведения / В.Н. Фисенко // Водоснабжение и санитарная техника. – 2018. – № 6. – С. 52-63.

69. Хайкин, С. Нейронные сети: полный курс. / С. Хайкин. – М.: ООО «И. Д. Вильямс», 2006. – 1104 с.
70. Хоанг, Т.Т. Оптимизация параллельной работы насосов/ Т. Т. Хоанг, М. С. Али // Доклады ТСХА : Сборник статей. – 2020. – № 292, ч. 2. – С. 196-199.
71. Хованский, С.О. Повышение эффективности эксплуатации центробежных насосов в системе водоснабжения жилищно-коммунального хозяйства, диссертация, канд. тех. наук / С. О. Хованский // Суми : Сумский государственный университет. – 2010.
72. Черносвитов, М.Д. Динамика режимов и величин удельного водопотребления населением города, диссертация, канд. тех. наук/ М. Д. Черносвитов // Самара : Самарский государственный архитектурно-строительный университет. – 2011.
73. Чугаев, Р. Р. Гидравлика. 4-е изд. перераб. и доп. / Р. Р. Чугаев. – Л.: Стройиздат, 1982. – 672 с.
74. Чучуева, И.А. Модель прогнозирования временных рядов по выборке максимального подобия, диссертация, канд. тех. наук / И. А. Чучуева // Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана. Москва, – 2012.
75. Шмиголь, В.В., Черносвитов, М.Д., Атанов Н.А. Интегральное регулирование работы повысительных насосов / В. В. Шмиголь, М. Д. Черносвитов, Н. А. Атанов // Водоснабжение и санитарная техника. – 2013. – № 8. – С. 23-27.
76. Штейнмиллер, О. А. Коллективные системы водоснабжения / О. А. Штейнмиллер // СПб.: Инженерные системы АВОК Северо-Запад. —2005. — № 4 (20). — С. 22–24.
77. Штейнмиллер, О. А. Оптимизация систем водоотведения, водоснабжения и водоподготовки. Вопросы энергоэффективности / О. А. Штейнмиллер // СПб. : Инженерные системы АВОК Северо-Запад. Тематический выпуск "Реконструкция и эксплуатация". – 2009. — № 1 (39)–2 (42). — С. 38–41.
78. Штейнмиллер, О. А. Проблемы в системах хозяйственно-питьевого водоснабжения зданий. Установки повышения давления / О. А. Штейнмиллер //

СПб.: Инженерные системы АВОК Северо-Запад. —2004. — № 2 (14). — С. 26–28.

79. Штейнмиллер, О.А. Оптимизация насосных систем водоснабжения на уровне районных, квартальных и внутридомовых сетей, диссертация, канд. тех. наук // СПб.: Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет. – 2010.

80. Щербаков, В.И. Прогнозирование рабочих характеристик центробежных насосов на осадках сточных вод / В. И. Щербаков, А. В. Морозов // сборник докладов: Яковлевские чтения. X Научно-техническая конференция, посвященная памяти академика РАН Сергея Васильевича Яковлева.– 2015. – С. 61-65.

81. Щербаков, В. И. Определение суммарной производительности водозаборных сооружений из подземных источников / В. И. Щербаков, И. Ю. Пурусова // Сборник: Технологии очистки воды "ТЕХНОВОД-2017". Материалы X - Юбилейной Международной научно-практической конференции. – 2017. – С. 68-73.

82. ГОСТ Р МЭК 60034-2-1-2009. Машины электрические вращающиеся. Часть 2-1. Стандартные методы определения потерь и коэффициента полезного действия по испытаниям (за исключением машин для подвижного состава). Введ. 2011-01-01. – М.: Стандартинформ, 2011. – 58 с.

83. СП 30.13330.2020 Внутренний водопровод и канализация зданий. Актуализированная редакция СНиП 2.04.01-85. – М. : Минстрой России, 2020.

84. Федеральный закон от 23.11.2009 N 261-ФЗ «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности, и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации» [электронный ресурс] / Режим доступа : URL: [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_93978](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_93978) – Яз. рус. – (Дата обращения: 20.05.2019).

85. Федеральный закон от 07.12.2011 N 416 – ФЗ О водоснабжении и водоотведении [электронный ресурс] / Режим доступа : URL: <http://www.akdi.ru/scripts/gosduma/smotri.php?z=1545> – Яз. рус. – (Дата обращения: 17.04.2018).

86. Alfares, H.K., Nazeeruddin M. Electric load forecasting: literature survey and classification of methods/ H.K. Alfares, M. Nazeeruddin // *International Journal of Systems Science*. –2002. Vol 33. – Pp. 23–34.
87. Armstrong, J.S. Forecasting for Marketing / J.S. Armstrong // *Quantitative Methods in Marketing* // London: International Thompson Business Press. – 1999. – Pp. 92–119.
88. Catalao, J. An Artificial Neural Network Approach for Day-Ahead Electricity Prices Forecasting [et al.] / J. Catalao // 6th WSEAS international conference on Neural networks, USA, Stevens Point. – 2005. – Pp. 80–83.
89. Danfoss. Руководство по программированию VLT® AQUA Drive FC 202. Код документа MG200750.
90. Danfoss. Operating Instructions Modbus RTU. Код документа MG92B102.
91. Draper, N., Smith H. Applied regression analysis. / N. Draper, H. Smith // New York: Wiley, In press. – 1981. – 693 p.
92. LeónCeli, C. F. Energy optimization of supplied flows from multiple pumping stations in water distributions networks / C.F. LeónCeli, P.L.Iglesias-Rey, F.J. Martínez Solano // *Procedia Engineering*, volume 186. – 2017. Pp.93-100.
93. Saeed Asadi Bagloe. Minimization of water pumps' electricity usage: A hybrid approach of regression models with optimization / Saeed Asadi Bagloe, Mohsen Asadi, Michael Patriksson // *Expert Systems with Applications*, Volume 107. – October 2018. Pp. 222-242.
94. Gheyas, I.A. A Neural Network Approach to Time Series Forecasting / I.A. Gheyas, L.S.Smith // *Proceedings of the World Congress on Engineering*, London. – 2009. – Vol 2 [электронный ресурс] / Pp. 1292–1296. – Режим доступа : URL: [www.iaeng.org/publication/WCE2009/WCE2009\\_pp1292-1296.pdf](http://www.iaeng.org/publication/WCE2009/WCE2009_pp1292-1296.pdf) (дата обращения 28.08.2017).
95. Grundfoss. Hydro MPC. Паспорт, Руководство по монтажу и эксплуатации. Код документа 96605929 0614. [Электронный ресурс] / [www.ru.grundfos.com](http://www.ru.grundfos.com) Яз. рус. – (Дата обращения: 15.06.2019).

96. Jingfei Yang M. Sc. Power System Short-term Load Forecasting: Thesis for Ph.d degree. – Germany, Darmstadt, Elektrotechnik und Informationstechnik der Technischen Universitat. – 2006. – 139 p.

97. Maximum likelihood // The free encyclopedia «Wikipedia» [Электронный ресурс] / URL: [http://en.wikipedia.org/wiki/Maximum\\_likelihood](http://en.wikipedia.org/wiki/Maximum_likelihood) (дата обращения 28.08.2017).

98. Mazengia, D.H. Forecasting Spot Electricity Market Prices Using Time Series Models: Thesis for the degree of Master of Science in Electric Power Engineering / D.H. Mazengia. – Gothenburg, Chalmers University of Technology. – 2008. – 89 p.

99. Norman R. Draper, Applied Regression Analysis, 3rd Edition / Norman R. Draper, Harry Smith // John Wiley & sons, Inc. – 1998. – 736 p.

100. Schneider Electric. Altivar 212. Преобразователи частоты для асинхронных двигателей. Краткое руководство по установке и программированию.

101. Schneider Electric. Altivar 212. Variable speed drives for asynchronous motors. Modbus communication manual.

102. Vacon. Руководство пользователя по VACON NXL. Код документа ud00950B.

103. Wilo. Инструкция по монтажу и эксплуатации Wilo-DEA. [Электронный ресурс] / [www.wilo.com/ru](http://www.wilo.com/ru). Яз. рус. – (Дата обращения: 22.10.2018).

## Приложение А

### Требования к аппаратной части насосных станций

Для управления объектами водоснабжения, к которым в большинстве случаев относят насосные станции, используются программируемые логические контроллеры (ПЛК). Определим, каким основным требованиям должен соответствовать ПЛК для реализации разработанных автором алгоритмов.

#### **а) возможность выполнения сложных математических вычислений.**

Помимо простых математических операций (сложение, вычитание, умножение и т.д.) в соответствии с уравнениями (3.4-3.6, 3.8 и т.д.) ПЛК должен выполнять операции извлечения квадратного корня и возведения в степень, причем значение степени может принимать не целые значения (см. уравнение 3.8), т.е. иметь возможность работы с числами с плавающей запятой.

#### **б) наличие аналоговых входов.**

ПЛК в своем составе или с помощью модулей расширения ввода/вывода должен иметь как минимум два аналоговых входа для подключения:

- 1) датчик давления на входе насосной станции;
- 2) датчик давления на выходе насосной станции.

Также может возникнуть ситуация, для которой требуется подключение резервного датчика давления на выходе, а также датчика температуры, устанавливаемого для контроля температуры в помещении насосной станции, и др.

#### **в) работа с массивами.**

Для прогнозирования водопотребления ПЛК должен иметь возможность работы с массивами. Для рекомендуемого часового периода сравнения результатов водопотребления получаем, что для 3 рабочих дней недели (рекомендуемый период прогнозирования водопотребления) потребуется 72 точки, плюс 96 точек для выходных дней недели. Итого, с учетом параметров, которые необходимы для нормального функционирования насосной станции, а также ввода параметров насосного агрегата (напорно-расходной характеристики НА при номинальной ча-

стоте вращения, зависимость КПД НА от расхода при номинальной частоте вращения), получаем порядка 400 энергонезависимых точек.

**г) наличие промышленных сетевых интерфейсов.**

ПЛК должен обладать как минимум тремя промышленными интерфейсами:

1) интерфейс связи ПЛК с панелью оператора, расположенной на щите управления. Функции панели: отображение состояния станции, управление станцией, изменение настраиваемых значений для корректной работы станции;

2) интерфейс связи ПЛК с ПЧТ для управления электродвигателями насосных агрегатов и получения всех необходимых данных от ПЧТ;

3) интерфейс для передачи данных на диспетчерский пункт.

Помимо сетевых интерфейсов, указанных выше, могут понадобиться дополнительные интерфейсы: для резервного канала связи с диспетчерским пунктом, а также опроса дополнительного оборудования (расходомеров, электросчетчиков и т.д.).

**д) наличие ПИ-регулятора.**

Для поддержания требуемого давления на выходе насосной станции ПЛК должен иметь в своем составе как минимум один ПИД-регулятор для управления частотой вращения электродвигателей НА.

**е) редактирование кода программы в режиме OnLine.**

В случае невозможности частых остановок оборудования во время проведения пуско-наладочных работ, ПЛК должен иметь возможность внесения изменений в код программы без остановки всего процесса (в режиме OnLine).

Почти всем основным требованиям (за исключением пункта е) удовлетворяет большинство производителей современных ПЛК, таких как Delta, ОВЕН, Текон, Siemens, Schneider Electric и др.

## Приложение Б

### Параметры и характеристики контрольно измерительных приборов

Таблица Б.1 – Характеристики датчика давления, установленного в подающем трубопроводе

Внешний вид	Параметр	Значение
	Производитель	Schneider Electric
	Марка датчика	XMLG006D21
	Измеряемая среда	Воздух, чистая и морская вода, масло
	Тип датчика	Аналоговый
	Выходной сигнал	4...20 мА
	Верхний предел измерения	6 бар
	Температура измеряемой среды	-15...125 °С
	Погрешность измерения	+/- 0.18 бар

Таблица Б.2 – Характеристики датчика давления, установленного в напорном трубопроводе

Внешний вид	Параметр	Значение
	Производитель	Schneider Electric
	Марка датчика	XMLG010D21
	Измеряемая среда	Воздух, чистая и морская вода, масло
	Тип датчика	Аналоговый
	Выходной сигнал	4...20 мА
	Верхний предел измерения	10 бар
	Температура измеряемой среды	-15...125 °С
	Погрешность измерения	+/- 0.3 бар

Таблица Б.3 – Характеристики расходомера

Внешний вид	Параметр	Значение
	Производитель	Тепловодомер
	Марка расходомера	ВСХНд-100
	Измеряемая среда	Питьевая вода
	Тип	Турбинный, сухого типа
	Диапазон измерения	0,6...300 м <sup>3</sup> /час
	Номинальный расход	230 м <sup>3</sup> /час
	Выходной сигнал	Герконовый
	Цена импульса	100 л/имп
	Температура измеряемой среды	+5...50 °С

Таблица Б.4 – Характеристики электросчетчика

Внешний вид	Параметр	Значение
	Производитель	НПК «Инкотекс»
	Марка электросчетчика	Меркурий 230 ART-01 PQCSIGDN
	Тип измерения	Через измерительные трансформаторы
	Класс точности измерения активной энергии	1
	Класс точности измерения реактивной энергии	2
	Выходной сигнал	Импульсный
	Цена импульса	1000 имп/кВт ч

## Приложение В

### Акты о внедрении результатов диссертационной работы



### ОТКРЫТОЕ АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО «РЭП Голицыно»

143040, Московская обл., Одинцовский р-он, г. Голицыно, ул. Советская, д. 27  
Тел.: 598-27-91, 694-36-20, факс: 598-21-44

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20 \_\_\_\_ г. № \_\_\_\_\_

«Утверждаю»  
Генеральный директор  
ОАО «РЭП Голицыно»  
В.А. Новиков



### Акт о внедрении результатов диссертационной работы Барбул М. Л.

Результаты диссертационной работы Барбул М.Л. были использованы на нашем предприятии для управления существующими насосными станциями. Новый метод управления позволил снизить перепады давления в диктующей точке, а также вывести работу насосных агрегатов на оптимальный режим работы. Новые методы управления будут применяться в дальнейшем, как на новых объектах водоснабжения, так и на существующих.

Главный инженер  
ОАО «РЭП Голицыно»

Яскевич Н.В.

# ОТКРЫТОЕ АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО «ВОДОКАНАЛ»

ОАО «ВОДОКАНАЛ»: 141080, г. Королев, Московской обл., ул. Калининградская, д. 8  
тел.: 8(495) 511-27-00, факс: 8(495) 512-25-02 e-mail: vodokanal@korolev-net.ru

---



Акт о внедрении результатов кандидатской диссертации

Барбул Михаила Леонидовича

Разработанные Барбул Михаилом Леонидовичем методы и алгоритмы моделирования систем автоматизации объектов водоснабжения внедрены на объектах ОАО «Водоканал». Результаты диссертационной работы Барбул М.Л. были использованы на нашем предприятии при управлении, как отдельно стоящими насосными станциями, подающие воду потребителям, так и комплексом насосных станций, подающих воду на отдельные части города и микрорайоны. Применение новых методов и алгоритмов, по сравнению с ранее применяемыми, позволило сократить затраты на электроэнергию и уменьшить количество гидроударов в системе.

Комплекс проведенных исследований, выполненных Барбул М.Л. на базе разработанных методов, а также внедрение новых методов и алгоритмов в существующую SCADA-систему позволил моделировать поведение гидравлической сети в отдельных районах города.

Внедренные методы и алгоритмы будут использоваться в дальнейшем на новых и существующих объектах водоснабжения.

Начальник участка ОГЭ

Д.Б. Буравцев