

Министерство образования и науки Российской Федерации

Государственное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«Оренбургский государственный университет»

Э.Л. Греков, А.А. Кувшинов, А.А. Гусаров

# АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД ЦЕНТРОБЕЖНОГО НАСОСА

Методические указания  
к курсовой работе

Рекомендовано к изданию Редакционно-издательским советом  
Государственного образовательного учреждения высшего  
профессионального образования «Оренбургский государственный  
университет»

Оренбург  
ГОУ ОГУ  
2011

УДК 681.5 (075.8)  
ББК 32.965 я 73  
Г 80

Рецензент – доцент, кандидат технических наук В. Л. Хрипко

**Греков, Э. Л.**

Г 80

Автоматизированный электропривод центробежного насоса: методические указания к курсовой работе / Э. Л. Греков, А. А. Кувшинов, А. А. Гусаров; Оренбургский гос. ун-т. – Оренбург : ОГУ, 2011. – 53 с.

Методические указания содержат методики расчета требуемой мощности двигателя, построения регулировочных характеристик насоса и магистрали и определения энергетических показателей различных способов регулирования подачи.

Методические указания предназначены для выполнения курсовой работы студентами специальности 140604 - Электропривод и автоматика промышленных установок и технологических комплексов очной и заочной формы обучения и бакалаврами по направлению 140400 «Электроэнергетика и электротехника», изучающих дисциплину «Автоматизированный электропривод типовых производственных механизмов и технологических комплексов».

УДК 681.5 (075.8)  
ББК 32.965 я 73

© Греков Э.Л.,  
Кувшинов А.А.  
Гусаров А.А.  
© ГОУ ОГУ, 2011

## Содержание

Введение.....	5
1 Организация работы по выполнению курсового проекта.....	6
1.1 Основные положения .....	6
1.2 Содержание и объем курсовой работы .....	7
2 Регулирование подачи центробежных насосов .....	8
2.1 Основные сведения.....	8
2.2 Основные характеристики насосов .....	10
2.3 Характеристика системы .....	12
2.4 Регулирование производительности насоса.....	13
3 Расчет энергетических характеристик .....	18
3.1 Расчет характеристик насоса при регулировании скоростью .....	18
3.2 Расчет характеристик магистрали .....	19
3.3 Выбор двигателя для насосной установки .....	20
3.4 Расчет потерь и энергии потребления при регулировании подачи задвижкой.....	20
3.5 Расчет потерь и потребления электроэнергии при регулировании подачи «байпасированием» .....	21
3.6 Расчет потерь и энергии потребления при частотном способе регулирования подачи .....	22
3.7 Сравнение технических показателей способов регулирования .....	24
3.8 Разработка электрической схемы управления .....	24
4 Пример расчета курсовой работы.....	25
4.1 Введение.....	25
4.2 Задание на курсовую работу .....	25
4.3 Описание производственного механизма.....	27
4.4 Расчет необходимой мощности и выбор двигателя .....	28
4.5 Расчет характеристик насоса при различных скоростях вращения.....	29
4.6 Расчет характеристик магистрали при регулировании подачи задвижкой.....	32
4.7 Расчет энергетических характеристик при регулировании подачи задвижкой.....	33

4.8	Расчет энергетических характеристик при регулировании подачи байпасированием.....	36
4.9	Расчет энергетических характеристик при регулировании подачи скоростью вращения.....	39
4.10	Сравнение энергетических характеристик.....	42
	Список использованных источников.....	44
	Приложение А Варианты заданий.....	45
	Приложение Б Нормальные характеристики центробежных насосов.....	46
	Приложение В Суточное изменение необходимой подачи насосной установки....	51
	Приложение Г Технические данные асинхронных двигателей серии 4А.....	52

## **Введение**

Целью данных методических указаний является обеспечение самостоятельной работы студентов при выполнении курсовой работы по курсу «Автоматизированный электропривод типовых производственных механизмов».

В указаниях приводятся варианты технического задания на курсовое проектирование, требования к оформлению и защите курсовой работы, ее содержание и объем, а также теоретические обоснования выполнения технического задания. В заключение приводятся список используемых источников и данные электрических двигателей и насосов, которые могут быть использованы при выполнении технического задания.

# **1 Организация работы по выполнению курсового проекта**

## **1.1 Основные положения**

Целью курсовой работы является систематизация и закрепление знаний по курсу «Автоматизированный электропривод типовых производственных механизмов» и развитие практических навыков самостоятельного решения инженерных задач, творческих способностей и умения пользоваться технической и справочной литературой.

Задание на проектирование (приложение А, Б и В) выдается на 6-8 неделе семестра. В задании приводятся все необходимые технические данные для выполнения курсовой работы. Там же приводится перечень вопросов, подлежащих разработке.

Методы решения задач, возникающих по ходу проектирования, рассматриваются на практических занятиях и еженедельных консультациях, проводимых руководителем курсовой работы.

Курсовая работа состоит из пояснительной записки и графической части, которые должны быть оформлены в соответствии с требованиями ЕСКД и стандарта организации по оформлению студенческих работ, действующего на данный момент.

Выполненная студентом курсовая работа после проверки руководителем и исправления указанных ошибок и недостатков должна быть защищена в комиссии, состоящей из преподавателей кафедры.

Доклад при защите работы должен быть рассчитан на 5-6 мин и иллюстрирован графической частью. Оценка курсовой работы комиссией должна учитывать правильность и обоснованность принятых решений и проведенных расчетов, качество оформления проекта и качество ответов исполнителя на вопросы членов комиссии.

## 1.2 Содержание и объем курсовой работы

Как было указано выше, курсовая работа состоит из пояснительной записки и графической части. Пояснительная записка должна включать в себя следующие разделы:

1. Введение.
2. Описание производственного механизма.
3. Расчет необходимой мощности электродвигателя. Выбор электродвигателя.
4. Расчет Q-H характеристик насоса и магистрали при различных способах регулирования подачи механизма.
5. Расчет энергетических параметров электропривода при различных способах регулирования подачи механизма и их сравнение.
6. Разработка схемы электрической принципиальной управления насосной установкой.
7. Заключение.
8. Список использованных источников.

Графическая часть работы выполняется на чертеже формата А1. В ней должны быть представлены:

1. Гидравлическая схема насосной станции.
2. Семейства регулировочных Q-H характеристик насоса и магистрали.
3. Диаграмма суточной подачи.
4. Зависимости от времени потребляемой мощности для различных способов регулирования подачи.
5. Принципиальная схема управления насосной установкой.

В случае необходимости (участие студента в проводимых на кафедре исследованиях, реальных разработках и т.п.) содержание и объем пояснительной записки и графической части работы по согласованию с руководителем могут быть изменены.

## 2 Регулирование подачи центробежных насосов

### 2.1 Основные сведения

Основными техническими данными, характеризующими работу насоса, являются подача  $Q$  ( $\text{м}^3/\text{с}$ ), напор  $H$  (м), КПД  $\eta_n$  (%), мощность  $N$  (кВт) и число оборотов вала  $n$  (об/мин).

**Подачей** (производительностью) **насоса**  $Q$  называется объемное количество жидкости, подаваемое в нагнетательный трубопровод за единицу времени. Измеряется данный параметр обычно в  $\text{м}^3/\text{с}$  ( $\text{м}^3/\text{час}$ ).

**Напором**  $H$  насоса называется приращение энергии, получаемое каждым килограммом жидкости, проходящим через насос, то есть разность удельных энергий жидкости между всасывающим и нагнетательным патрубками насоса, и выражается в метрах столба перекачиваемой жидкости.

Допустим насос работает на систему, состоящей из приемного и подающего резервуаров (смотрите рисунок 2.1). На рисунке отмечены следующие величины:

- $p_0, p_k$  – давление газа над уровнем жидкости в нижнем и верхнем резервуарах соответственно;
- $p_в, p_n$  – давление во всасывающем и нагнетательном патрубке насоса;
- $Z$  – разность высот между уровнем жидкости в нижнем и верхнем резервуарах;
- $Z_в, Z_n$  – положение всасывающего и нагнетательного патрубков насоса относительно уровня жидкости в нижнем резервуаре;
- $v_n, v_в$  – скорость жидкости в нагнетательном и всасывающем патрубках соответственно.

Удельная энергия жидкости на нагнетании насоса

$$E_n = \frac{p_n}{\rho} + Z_n + \frac{v_n^2}{2 \cdot g}, \quad (2.1)$$

где  $\rho$  - удельный вес жидкости ( $\rho=9.81 \cdot 1000 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с}^2)$ ),  
 $g$  – ускорение свободного падения ( $g=9.81 \text{ м}/\text{с}^2$ ).



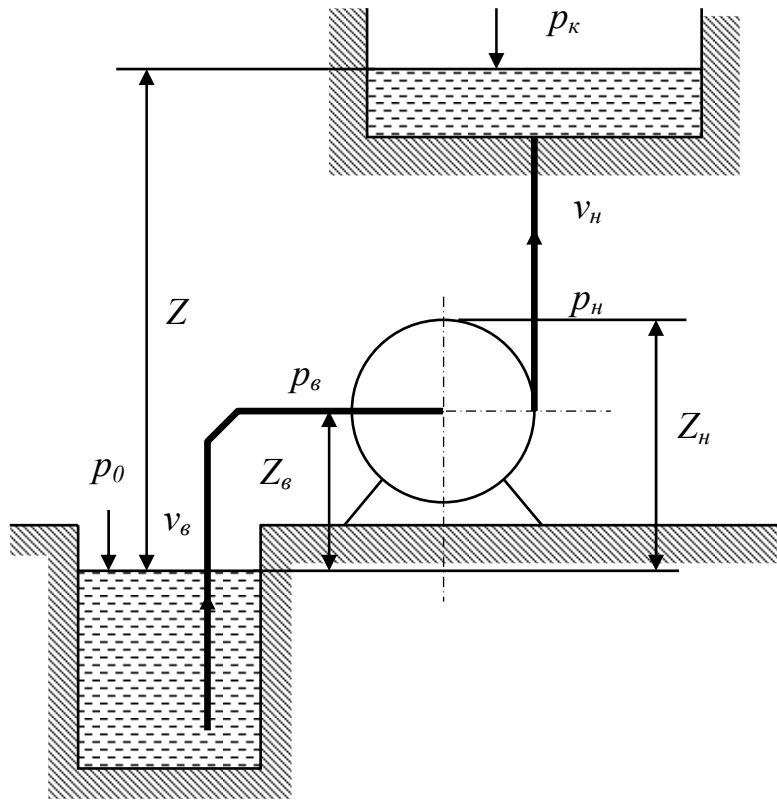


Рисунок 2.1 – Схема насосной установки

Удельная энергия жидкости на всасывании в насос

$$E_в = \frac{p_в}{\rho} + Z_в + \frac{v_в^2}{2 \cdot g}. \quad (2.2)$$

Согласно определению напор насоса

$$H = E_н - E_в = \frac{p_н - p_в}{\rho} + (Z_н - Z_в) + \frac{v_н^2 - v_в^2}{2 \cdot g}. \quad (2.3)$$

Данная формула позволяет рассчитать напор насоса при известных давлении и скорости перемещения жидкости непосредственно на входных и выходных патрубках. Для того чтобы получить уравнение напора, не пользуясь показаниями приборов, а лишь параметрами системы, необходимо знать потери напора в каждом трубопроводе, который расходуется на преодоление всех гидравлических сопротивлений. С учетом этого

$$H = \frac{p_к - p_0}{\rho} + Z + \Sigma h, \quad (2.4)$$

где  $\Sigma h$  – суммарные потери напора во всасывающем и нагнетающем трубопроводах.

В большинстве случаев первых два слагаемых не зависят от подачи насоса и в сумме называются статическим напором  $H_{ст}$ , а последнее слагаемое зависит от расхода жидкости и называется динамическим напором  $H_{дин}$ . То есть

$$H = H_{ст} + H_{дин}. \quad (2.5)$$

Полезной **мощностью** (гидравлической) называется энергия, сообщаемая потоку жидкости, прошедшему через насос в течение одной секунды. Соответственно полезная мощность насоса

$$N_2 = \rho \cdot Q \cdot H. \quad (2.6)$$

Вследствие возникновения потерь в процессе передачи энергии от насоса жидкости мощность на валу двигателя должна быть всегда больше гидравлической. Отношение полезной, или гидравлической, мощности насоса к мощности на валу двигателя  $N$  называется полным КПД насоса:

$$\eta = \frac{N_2}{N}. \quad (2.7)$$

Потребляемая двигателем мощность должна быть больше мощности на его валу на величину потерь в двигателе:

$$P_{дв} = \frac{N_2}{\eta \cdot \eta_{дв}} = \frac{\rho \cdot Q \cdot H}{\eta \cdot \eta_{дв}}, \quad (2.8)$$

где  $\eta_{дв}$  – КПД двигателя.

## 2.2 Основные характеристики насосов

Как отмечалось ранее основными техническими параметрами, характеризующими работу насоса, являются напор, подача, мощность на валу, КПД и число оборотов. Из указанных величин подача и число оборотов являются независимыми величинами, остальные находятся в функциональной зависимости от них.

Взаимосвязь параметров в различных режимах работы насоса изображается графически в виде характеристик. Характеристики насоса обычно представляются в виде функциональных зависимостей напора, мощности и КПД от подачи насоса при одном или нескольких числах оборотов. Характеристики, построенные при номинальной частоте вращения, называются **нормальными**, а при нескольких частотах – универсальными. Примеры нормальных (а) и универсальных (б) характеристик насоса показаны на рисунке 2.2.

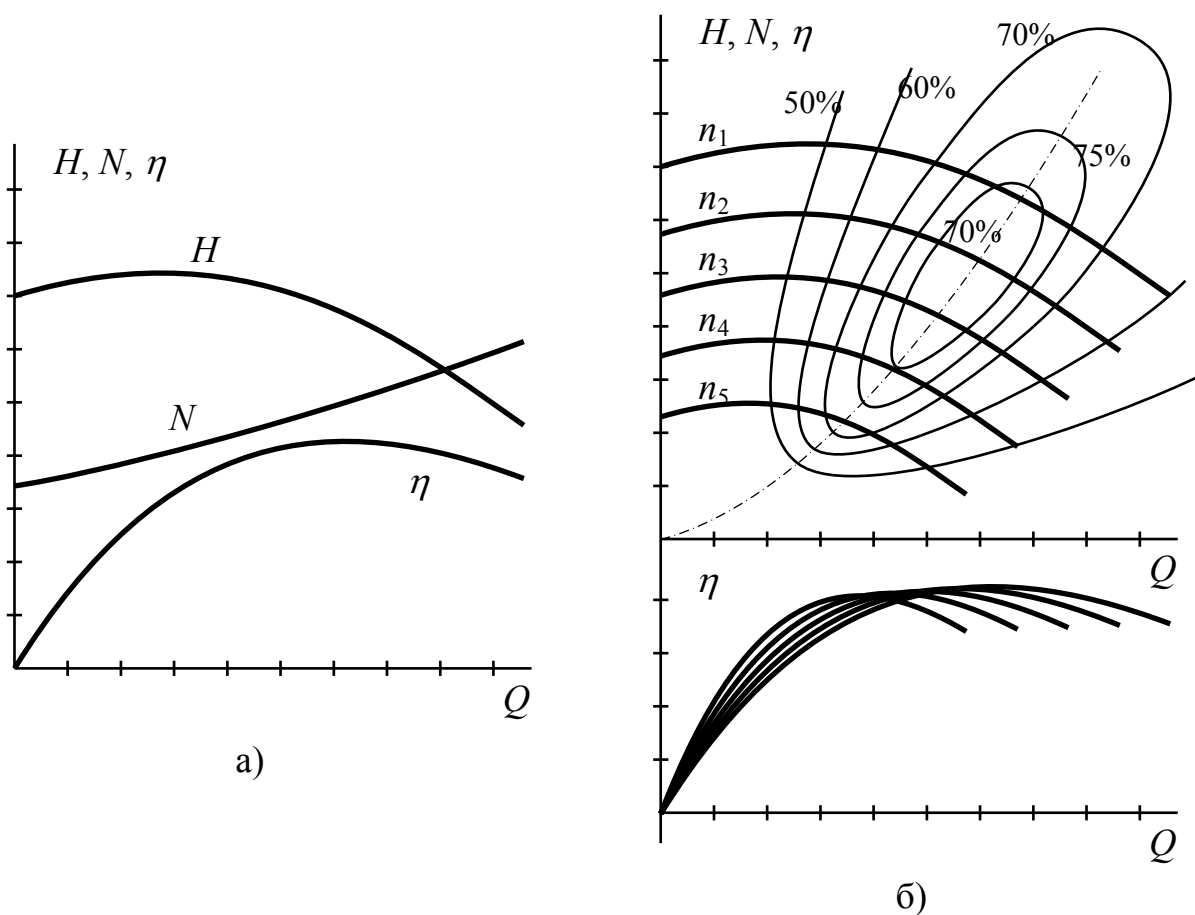


Рисунок 2.2 – Характеристики насоса

При наличии характеристик при одной скорости вращения, остальные можно пересчитать по формулам подобия насосов

$$Q_2 = Q_1 \cdot \frac{n_2}{n_1}; H_2 = H_1 \cdot \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2, \quad (2.9)$$

где  $Q_1, H_1$  – соответственно подача и напор насоса при скорости вращения  $n_1$ ;

$Q_2, H_2$  – соответственно подача и напор насоса при скорости вращения  $n_2$ .

Исходя из нормальных характеристик можно рассчитать зависимости КПД от подачи при другой скорости вращения пользуясь эмпирической формулой //

$$\eta_{n2} = \frac{\eta_{n1}}{\eta_{n1} + (1 - \eta_{n1}) \cdot \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^{0.17}}, \quad (2.10)$$

где  $\eta_{n1}$  – КПД насоса при скорости вращения  $n_1$ ;

$\eta_{n2}$  – КПД насоса при скорости вращения  $n_2$ .

### 2.3 Характеристика системы

Любой режим работы лопастной машины определяется величиной всех сопротивлений системы, на которую она работает при соответствующем расходе жидкости через нее. Один и тот же насос при одном и том же числе оборотов может подавать различный объем жидкости, в зависимости от создаваемого напора, необходимого на преодоление всех сопротивлений сети.

Установившимся режим работы системы насос-сеть будет в том случае, если создаваемый насосом напор  $H$  и подача  $Q$  будут соответственно равны сопротивлению системы (магистральной)  $H_{mag}$  и расходу через нее  $Q_{mag}$ . Режиму, определяемому последними равенствами, будет соответствовать точка пересечения характеристик насоса и системы, называемой **рабочей точкой** (рисунок 2.3).

Характеристика системы представляет собой графическую зависимость между расходом жидкости в ней  $Q_{mag}$  и напором  $H_{mag}$ , с помощью которого преодолевается все гидравлические сопротивления магистрали. Для большинства случаев статический напор не зависит от скорости движения жидкости, а динамический пропорционален квадрату подачи, то есть:

$$H_{mag} = H_{ст} + k \cdot Q_{mag}^2. \quad (2.11)$$

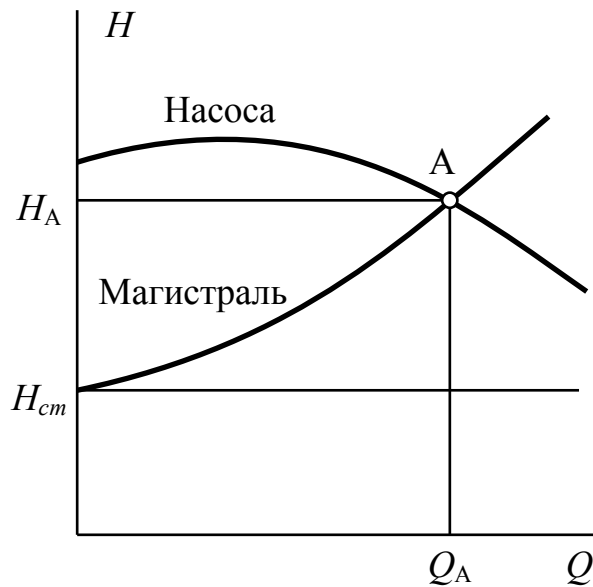


Рисунок 2.3 – Характеристики насоса и магистрали

Нетрудно заметить из рисунка 2.3, что насос, работающий на данную систему, не может обеспечить подачу  $Q$  большую, чем подача  $Q_A$ . Для того, чтобы увеличить подачу данного насоса, необходимо изменить характеристику системы, то есть уменьшить величину статического напора  $H_{cm}$ , гидравлическое сопротивление системы или перейти на другую характеристику самого насоса, применив, например, более производительный насос.

#### 2.4 Регулирование производительности насоса

Под регулированием понимается изменение основных параметров работы механизма: подачи и напора.

Изменение подачи единичного центробежного насоса можно осуществить следующими способами:

- а) регулированием характеристики сети:
  - 1) дроссельное регулирование (задвижкой),
  - 2) регулирование перепуском (байпасирование);
- б) регулирование изменением характеристики насоса:
  - 1) регулирование изменением числа оборотов.

### 2.4.1 Дроссельное регулирование

Наиболее распространенным, простым и надежным способом регулирования в эксплуатации является дросселирование. Дроссельное регулирование производится задвижкой, расположенной на напорной линии насоса, обычно вблизи от него. По мере закрытия задвижки происходит искусственное уменьшение подачи. Каждому положению дроссельной задвижки соответствует новая характеристика системы задвижка+магистраль.

При изменении положения задвижки изменяется угол наклона характеристики эквивалентной магистрали и, следовательно, точка пересечения ее с характеристикой насоса (рисунок 2.4). Данный способ позволяет регулировать подачу насосной установки от номинальной до нуля, что соответствует полному закрытию задвижки.

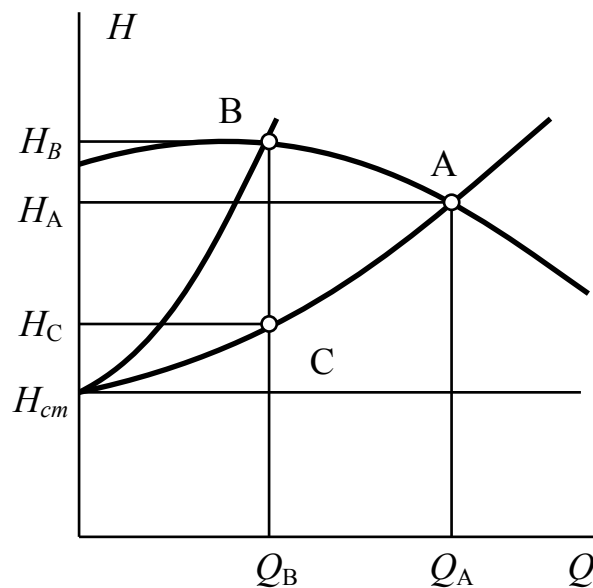
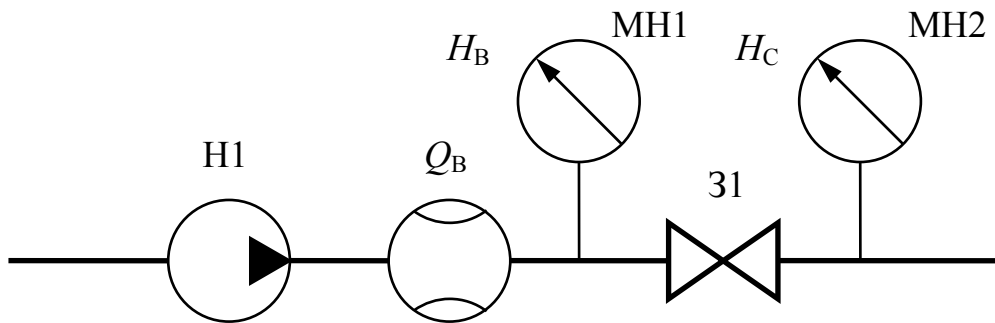


Рисунок 2.4 - Характеристики системы при дроссельном регулировании

Однако наряду с простотой и надежностью данный способ имеет существенный недостаток – уменьшение КПД установки при закрывании задвижки. Из рисунка 2.4 видно, что при регулировании рабочая точка перемещается из точки А в точку В, так как характеристика системы задвижка+магистраль будет иметь больший динамический напор при меньшей подаче. Напор насоса при этом немного увеличился с  $H_A$  до  $H_B$ . Однако, после задвижки характеристика сети осталась прежней. Таким образом, при подаче  $Q_B$  напор в системе будет равен  $H_C$ . Следовательно, на задвижке происходит падение напора из  $H_B$  до  $H_C$ , и соответственно, в этом месте будут дополнительные гидравлические потери при регулировании.

Данный способ регулирования можно сравнить с регулированием напряжения нагрузки путем включения дополнительного сопротивления последовательно с источником и потребителем. При протекании тока дополнительные потери будут выделяться в виде тепла на сопротивлении.

КПД насосной установки при данном способе регулирования будет равен:

$$\eta_{уст} = \eta_{нв} \cdot \frac{H_C}{H_B}, \quad (2.12)$$

где  $\eta_{нв}$  – КПД насоса при подаче  $Q_B$ ;

Следует отметить, что при возрастании статического напора системы  $H_{ст}$ , потери на задвижке будут уменьшаться, так как при одинаковом напоре  $H_B$ , напор в системе  $H_C$  будет больше.

При дроссельном регулировании из-за больших значений местной скорости изнашивается регулирующий орган (дроссельный клапан) и возникает опасность неплотного закрытия задвижки при остановке насоса.

#### 2.4.2 Регулирование перепуском (байпасирование)

В этом способе регулирования требуемая подача сети достигается перепуском из напорной линии на всасывание части подачи насоса. При включении в сеть (рисунок 2.5) параллельно основной характеристики сети 1 добавочной характеристики 2 (перепуск), суммарная характеристика будет уже не равна прежней 1, а сумме 1 и 2. Таким образом, рабочая точка передвинется с  $A_1$  на  $A_2$ . При этом напор насоса снизится с  $H_1$  до  $H_2$ , а подача возрастет с  $Q_1$  до  $Q_2$ . В

основной же магистрали при том же напоре  $H_2$  подача будет уменьшена с  $Q_1$  до  $Q_3$ . У насосов с достаточно жесткими Q-H характеристиками при данном способе регулирования будет наблюдаться рост потребляемой мощности при одновременном снижении полезной составляющей мощности. Действительно, в рабочей точке  $A_1$  гидравлическая мощность насоса составляла:

$$N_{z1} = H_1 \cdot Q_1 \cdot \rho. \quad (2.13)$$

При переходе на рабочую точку  $A_2$  (при допущении, что  $H_1 \approx H_2$ ), гидравлическая мощность:

$$N_{z2} = \rho \cdot Q_2 \cdot H_2 \approx \rho \cdot Q_2 \cdot H_1 > N_{z1}. \quad (2.14)$$

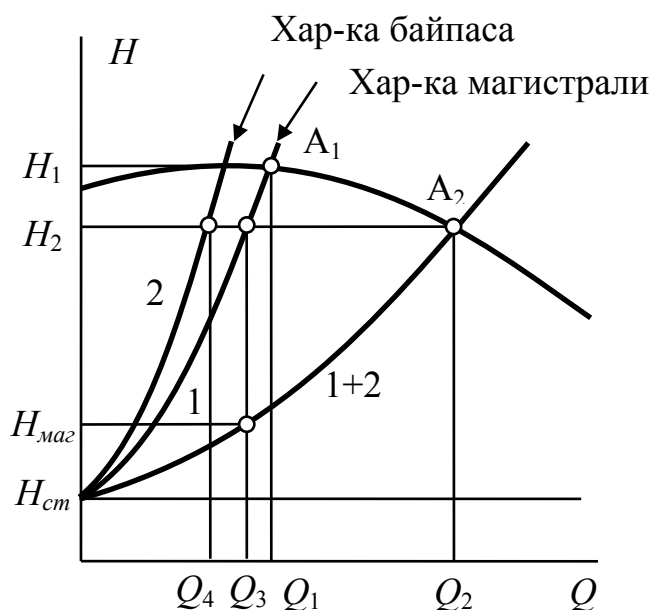
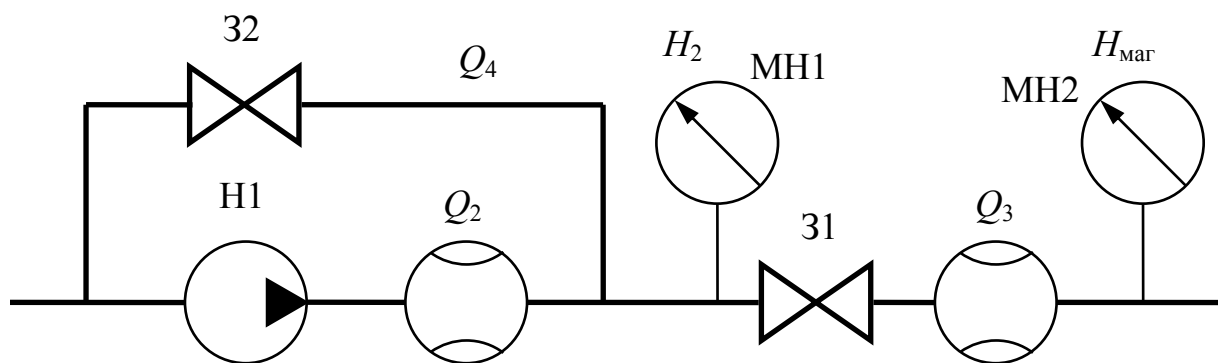


Рисунок 2.5 – Характеристики системы при регулировании байпасированием



То есть насос может работать с перегрузкой. В то же время полезная гидравлическая мощность снизилась с  $N_{21}$  до

$$N_{2n2} = \rho \cdot Q_3 \cdot H_2, \quad (2.15)$$

или

$$N_{2n2} = \rho \cdot Q_3 \cdot H_{маг}. \quad (2.16)$$

По формуле (2.15) рассчитывается полезная мощность насосной станции, когда задвижка 31 установлена у потребителя (или несколько задвижек для каждого потребителя в отдельности). В этом случае потери происходят непосредственно у потребителя.

По формуле (2.16) рассчитывается полезная мощность, если задвижка 31 является частью производственной установки и совместно с задвижкой 32 участвует в процессе регулирования подачи всей станции.

Увеличение мощности и опасность перегрузки двигателя можно предотвратить, если одновременно с открытием клапана на перепускной линии прикрыть задвижку на основной линии с таким расчетом, чтобы суммарная характеристика 1+2 проходила бы по первоначальной характеристике сети 1. В этом случае насос будет работать с постоянной мощностью при регулировании подачи в основной магистрали.

Регулирование перепуском усложняет систему, увеличивает вес и габариты установки, в особенности при больших количествах перекачиваемой воды.

Достоинство данного способа регулирования по сравнению с регулированием задвижкой является уменьшение давления в отходящей от насоса магистрали, и как следствие, уменьшение износа оборудования.

### **2.4.3 Регулирование скоростью вращения**

Регулирование скорости вращения насоса возможно изменением числа оборотов приводного двигателя насоса. Регулирование изменением числа оборотов приводит к новому положению характеристики насоса (рисунок 2.6). Данные характеристики можно рассчитать по формулам подобия (2.9). Рабочая точка переместиться на другую характеристику насоса и будет по прежнему определяться точкой пересечения характеристики сети и насоса. Отличитель-

ной особенностью этого метода регулирования является то, что он не приводит к дополнительным гидравлическим потерям в системе насос-сеть, так как в любых режимах напоры насоса и сети согласованы между собой.

При данном способе регулирования диапазон изменения скорости вращения будет зависеть от статического напора сети. На рисунке 2.6 показаны три различные характеристики с разными статическими напорами. Ясно, что в случае характеристики 3 даже небольшое изменение скорости вращения приведет к полному прекращению подачи (при характеристике 2 и скорости вращения  $n_3$  подача будет отлична от нуля, при характеристике 3 и той же скорости – полезная подача будет отсутствовать).

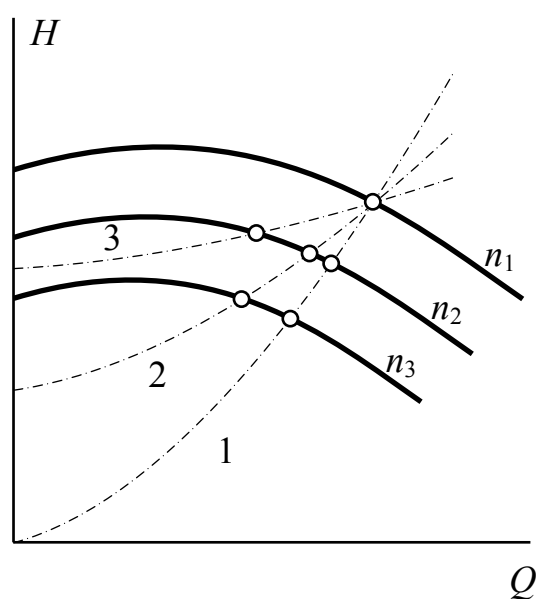


Рисунок 2.6 – Характеристики системы при регулировании скоростью вращения

### 3 Расчет энергетических характеристик

#### 3.1 Расчет характеристик насоса при регулировании скоростью

Расчет семейства характеристик насоса при регулировании скоростью вращения двигателя производится по формулам подобия (2.9) и зависимости КПД (2.10).

Алгоритм расчета:

1) на нормальных характеристиках насоса выбрать 6-7 точек, равномерно распределенных по диапазону подачи  $Q$ ;

2) задавшись скоростью вращения  $n_2$ , отличной от номинальной  $n_1=n_{ном}$ , рассчитать по формулам подобия значения  $Q_2$ ,  $H_2$  и  $\eta_{n2}$ , приняв в качестве базовых ( $n_1$ ,  $Q_1$ ,  $H_1$ ,  $\eta_{n1}$ ) выбранные точки на характеристиках;

3) повторить расчет для других скоростей вращения (не менее 5-ти характеристик). При этом нижнюю скорость вращения необходимо выбрать не ниже той, при которой насос обеспечивает статический напор магистрали  $H_{см}$ ;

4) результаты расчета свести в таблицу.

### 3.2 Расчет характеристик магистрали

Семейство характеристик магистрали при регулировании задвижкой рассчитывается по формуле

$$H_{маг}(Q) = H_{см} + \left( \frac{Q_{маг}}{Q_0} \right)^2 \cdot (H_0 - H_{см}), \quad (3.1)$$

где  $H_{см}$  – статический напор (задан в задании);

$H_0$ ,  $Q_0$  – конкретные напор и подача характеристики магистрали (приведено в задании).

Алгоритм расчета:

1) построить характеристику магистрали при полностью открытой задвижке, подставив в формулу (3.1) значения  $H_{см}$ ,  $Q_0$ ,  $H_0$ . Взять 6-7 точек, равномерно расположенных по диапазону подачи;

2) для построения семейства характеристик магистрали при регулировании задвижкой необходимо взять 5 точек с координатами  $(Q_0^*; H_0^*)$ , равномерно расположенных на Q-H нормальной характеристике насоса. Это будут точки, через которые пройдут характеристики магистрали. Величины данных точек подставить вместо  $Q_0$  и  $H_0$  в уравнение (3.1). Величину  $H_{см}$  следует оставить неизменной. Диапазон изменения подачи  $Q$  для построения каждой характеристики выбирается из диапазона не менее  $(0 - 1.1Q_0^*)$ ;

3) результаты расчета свести в таблицу.

### 3.3 Выбор двигателя для насосной установки

Двигатель выбирается с мощностью, большей чем максимальная мощность на валу насоса, работающего на заданную магистраль. По заданному графику суточной подачи необходимо выбрать время работы насоса с максимальной производительностью. По нормальным характеристикам находится потребляемая мощность  $N_{\text{макс}}$ . Мощность двигателя должна быть больше или равна этой мощности

$$P_{\text{дв}} \geq N_{\text{макс}}. \quad (3.2)$$

Двигатель выбирается по справочнику электрических машин (/3/, приложение Г). Номинальная скорость двигателя должна быть согласована с номинальной скоростью вращения насоса.

### 3.4 Расчет потерь и энергии потребления при регулировании подачи задвижкой

При регулировании задвижкой характеристика насоса остается постоянной, меняется характеристика магистрали.

Алгоритм расчета:

1) для каждого значения требуемой подачи  $Q_i$  (где  $i=0..23$ ) из суточного графика по нормальной Q-H характеристике насоса определить напор  $H_{н.i}$ . По Q-H характеристике магистрали при полностью открытой задвижке (то есть проходящей через точки  $Q_0$  и  $H_0$  – формула 3.1) для тех же подач определить напор в отходящей магистрали  $H_{\text{маг}.i}$ . Величины привести в таблице.

2) рассчитать полезную (гидравлическую) мощность ( $Q_i$  необходимо перевести в м<sup>3</sup>/с)

$$N_{г.i} = \rho \cdot Q \cdot H_{\text{маг}} / 1000, \text{ кВт}; \quad (3.3)$$

3) рассчитать потребляемую мощность

$$P_{\text{потр}.i} = \frac{\rho \cdot Q_i \cdot H_{н.i}}{\eta_{н.i} \cdot \eta_{\text{дв.н}}}, \quad (3.4)$$

где  $\eta_{н.і}$  – КПД насоса, определяемый по нормальной характеристике для каждой требуемой подачи  $Q_i$ ;

$\eta_{дв.н}$  – номинальное КПД двигателя;

4) рассчитать КПД установки

$$\eta_{уст.і} = \frac{N_{г.і}}{P_{ном.і}} \cdot 100, \% \quad (3.5)$$

5) мощность потерь, затрачиваемая на байпасирование, будет представлять разницу между потребляемой мощностью и полезной

$$\Delta P_i = P_{ном.і} - N_{г.і} \quad (3.6)$$

6) суммарное потребление электроэнергии из сети

$$\Sigma P_{ном.і} = \sum_{i=0}^{23} P_{ном.і}, \text{ кВт}\cdot\text{ч}, \quad (3.7)$$

где  $P_{ном.і}$  – потребляемая мощность (в кВт) в конкретное время;

7) потери электроэнергии за сутки определяется по формуле

$$\Sigma \Delta P = \sum_{i=0}^{23} \Delta P_i, \text{ кВт}\cdot\text{ч}; \quad (3.8)$$

8) среднесуточный КПД установки

$$\eta_{срс} = \frac{\Sigma P_{ном.і} - \Sigma \Delta P}{\Sigma P_{ном.і}} \cdot 100. \quad (3.9)$$

### **3.5 Расчет потерь и потребления электроэнергии при регулировании подачи «байпасированием»**

При этом способе регулирования характеристика насоса не изменяется. Не изменятся также и суммарная характеристика магистрали и перепуска. Соответственно и мощность насоса также не изменяется. Для адекватного сравнения энергетических характеристик различных способов регулирования под по-

лезной мощностью при регулировании байпасированием будем подразумевать гидравлическую мощность в основной магистрали после задвижки.

При данном способе регулирования поддерживается постоянное давление  $H$ , равное напору насоса при максимальной суточной подаче  $Q_{\max}$ .

Алгоритм расчета:

1) потребляемая мощность насосной установки будет равна

$$P_{\text{потр}} = \frac{N_{\max}}{\eta_{\text{дв.н}}}, \quad (3.10)$$

где  $N_{\max}$  – полезная мощность насоса при максимальной суточной подаче  $Q_{\max}$ ;

2) полезная мощность  $N_{z,i}$  будет определяться напором в магистрали после задвижки  $H_{\text{маг}}$  и требуемой подачей  $Q_i$  в соответствии с суточной диаграммой подачи (3.3);

3) мощность потерь рассчитывается по формуле (3.6);

4) КПД насосной установки определяется по формуле (3.5);

5) аналогично пункту 3.4 рассчитать суточное потребление электроэнергии, потери и среднесуточный КПД по формулам (3.7)-(3.9).

### **3.6 Расчет потерь и энергии потребления при частотном способе регулирования подачи**

При данном способе регулирования задвижка максимально открыта, то есть магистраль имеет характеристику, проходящую через  $Q_0, H_0$ .

Алгоритм расчета:

1) нанести Q-H характеристику магистрали на семейство характеристик насоса при регулировании скоростью вращения. На основе точек пересечения характеристики магистрали с семейством характеристик насоса определить зависимость скорости вращения от подачи (см. рисунок 3.1);

2) по полученной зависимости для каждого значения необходимой подачи  $Q_i$  из суточного графика по формулам подобия (2.9) и (2.10) рассчитать значения КПД насоса для частоты вращения, отличной от номинальной, следующим образом. Для конкретной подачи  $Q_i$  определить частоту вращения  $n_i$  (по рисунку 3.1) и по формуле (2.9) значение подачи  $Q_2$  при нормальной частоте

вращения ( $n_2=n_{ном}$ ;  $n_1=n_i$ ). По нормальной зависимости КПД от подачи насоса определить  $\eta_{н1}$  при рассчитанной подаче  $Q_2$ . Подставив в формулу (2.10)  $\eta_{н1}$ ,  $n_1=n_{ном}$  и  $n_2=n_i$  определяем  $\eta_{н2.i}$  для конкретной подачи  $Q_i$ . Расчетные величины привести в таблице.

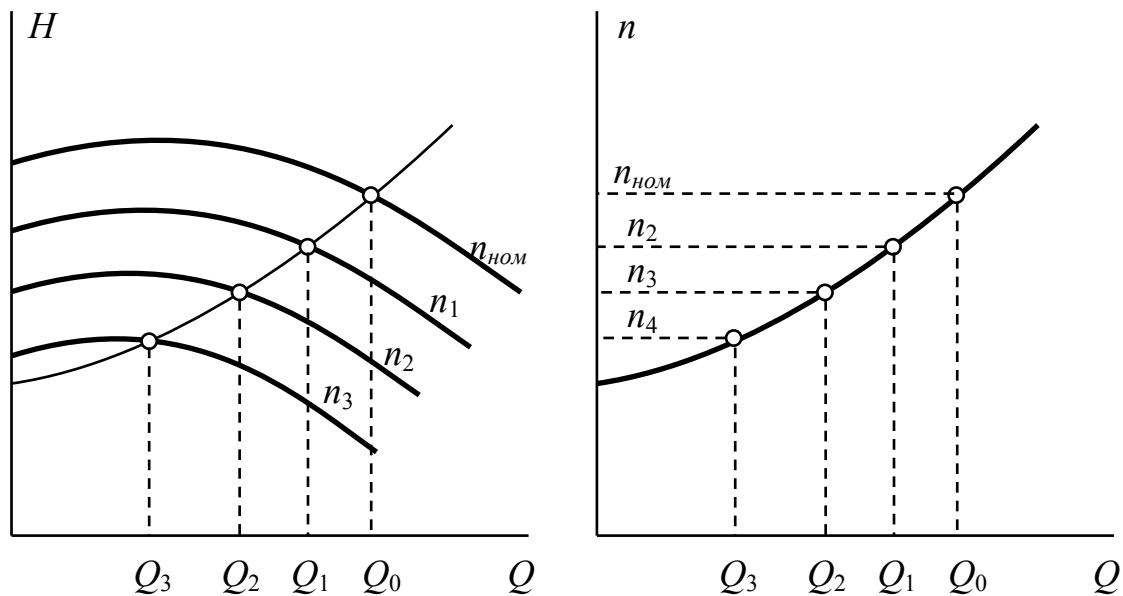


Рисунок 3.1 - Построение зависимости скорости вращения от необходимой подачи

3) по полученным величинам  $Q_i$  (необходимая подача),  $\eta_{н2.i}$  (КПД насоса при данной подаче),  $H_{маг.i}$  (по характеристике магистрали) рассчитать полезную мощность  $N_{пол.i}$  по формуле (3.3), и потребляемую мощность  $P_{потр.i}$  по формуле

$$P_{потр.i} = \frac{\rho \cdot Q_i \cdot H_{маг.i}}{\eta_{н2.i} \cdot \eta_{дв.н}}. \quad (3.11)$$

Результаты привести в таблице для каждого значения необходимой подачи;

5) аналогично пункту 3.4 рассчитать суточное потребление электроэнергии, потери и среднесуточный КПД по формулам (3.7)-(3.9).

### **3.7 Сравнение технических показателей способов регулирования**

По среднесуточному потреблению электроэнергии, потерям и КПД произвести сравнение трех способов регулирования подачи и дать рекомендации по применению.

### **3.8 Разработка электрической схемы управления**

Для насосной установки необходимо разработать схему электрическую принципиальную системы управления. Задачей системы управления является поддержание давления в отходящей магистрали одним из способов регулирования по согласованию с руководителем проекта. Необходимо реализовать следующие функции:

- ручной пуск АД;
- выключение АД как ручное так и при достижении аварийного давления в насосе, при отсутствии воды в насосе, при перегрузке по току АД (с выдержкой времени);
- закрытие задвижки при достижении в отходящей магистрали максимальной уставки давления (реле максимального давления);
- открытие (реверс двигателя) при достижении в отходящей магистрали минимальной уставки давления (реле минимального давления);
- управления приводом задвижки предусмотреть как ручное, так и автоматическое. Приводной двигатель – АД с короткозамкнутым ротором;
- выключение привода задвижки должно осуществляться при максимальном закрытии и максимальном открытии задвижки (конечные выключатели), а также при протекании тока двигателя задвижки больше номинального (с выдержкой времени).

При разработке электрической схемы использовать материалы, приведенные в [1] и [2].

По согласованию с руководителем система управления может быть реализована с применением программируемых логических контроллеров и частотных преобразователей, или на базе релейно-контакторных схем.



## 4 Пример расчета курсовой работы

### 4.1 Введение

Целью курсовой работы является расчет энергоэффективности различных способов регулирования подачи насосной установки.

Наиболее простым в реализации является способ регулирования подачи при помощи дросселирования, путем введения в магистраль различных задвижек. Вследствие дополнительных гидравлических потерь, возникающих на задвижке, данный способ регулирования неэкономичен. Другим недостатком является повышение давления в отходящей от насоса магистрали. Для снижения нагрузок на гидравлическое оборудование в этом случае применяют байпасирование (перепуск). Этот способ имеет дополнительные потери на задвижке перепуска.

Самым экономичным является способ регулирования путем изменения скорости вращения приводного двигателя, так как в этом случае отсутствуют гидравлические потери. Данный способ является актуальным и позволяет экономить электроэнергию в тех установках, в которых подача существенно меняется с течением времени, например в коммунальном хозяйстве.

### 4.2 Задание на курсовую работу

1. Для насоса типа К100-65-250/2-5 при заданном графике суточной подачи рассчитать энергоэффективность различных способов регулирования подачи, а именно:

- регулирование задвижкой;
- регулирование байпасированием;
- регулирование частотой вращения.

1.1 Q-H характеристики насоса приведены на рисунке 4.1.

1.2 График суточной подачи приведен на рисунке 4.2. Единица подачи  $Q^1=100 \text{ м}^3/\text{ч}$ .

1.3 Параметры магистрали:

- статический напор  $H_{cm}=30 \text{ м}$ ;
- $Q_0=150 \text{ м}^3/\text{ч}$ ;  $H_0=90 \text{ м}$ .

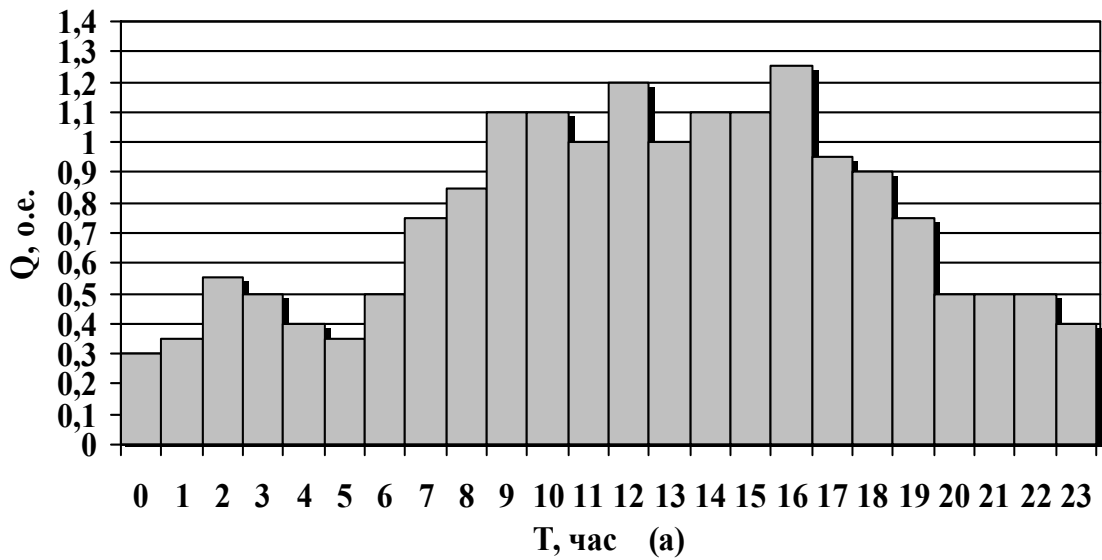


Рисунок 4.1 – Суточное изменение необходимой подачи насосной установки

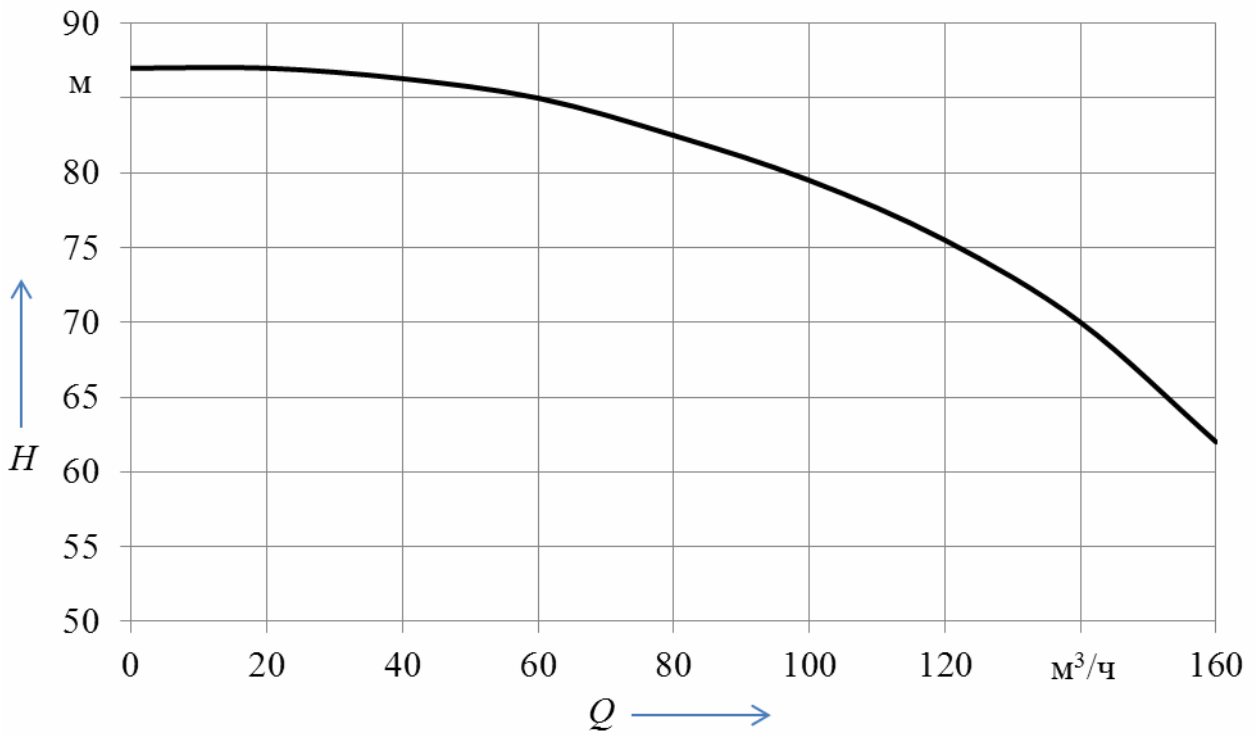


Рисунок 4.2а - Нормальные характеристики насоса К100-65-250/2-5 ( $n_{ном}=2900$  об/мин)

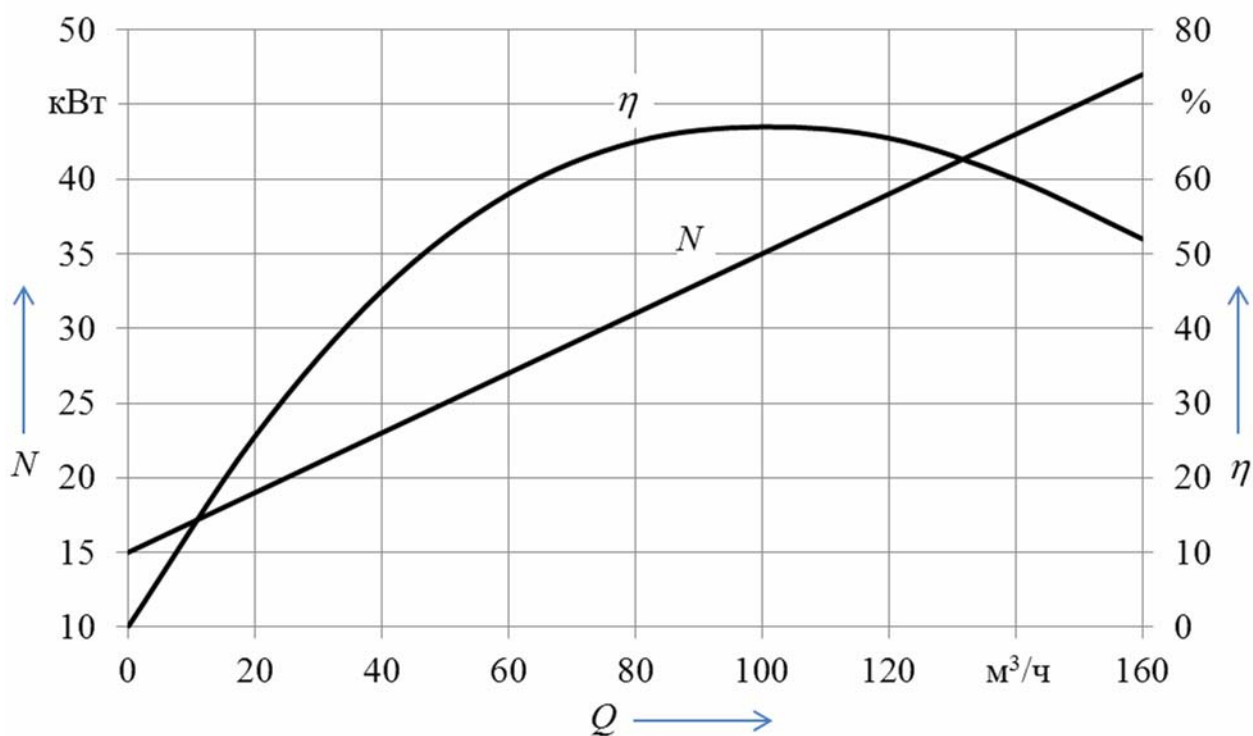


Рисунок 4.2б - Нормальные характеристики насоса К100-65-250/2-5 ( $n_{ном}=2900$  об/мин)

### 4.3 Описание производственного механизма

На рисунке 4.3 изображена схема насосной станции

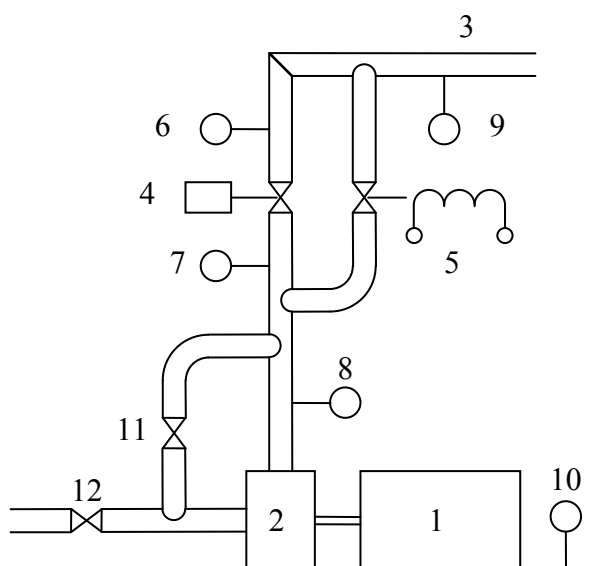


Рисунок 4.3 – Схема насосной станции

На рисунке представлены:

- 1 – асинхронный двигатель,
- 2 – насос,
- 3 – магистраль,
- 4, 11, 12 – задвижки,
- 5 – электромагнитный привод задвижки,
- 6 – реле давления в магистрали (манометрического типа) РД,
- 7 – реле давления на выходе насоса (манометрического типа) РД,
- 8 – реле заливки ВР,
- 9 – расходомер,
- 10 – реле заливки (аварийное) ВРА.

Пуск разрешается только заполненного водой насоса, что контролируется с помощью реле заливки 8. С помощью электромагнитного привода задвижки 5 осуществляется первоначальная заливка насоса. Такое реле 10 применяется и для контроля затопления помещения из-за течи насоса или магистрали. Реле давления 7, установленное до задвижки, контролируют пуск насоса. Если при пуске насос не развивает необходимого давления пуск прекращается.

#### 4.4 Расчет необходимой мощности и выбор двигателя

Двигатель выбирается с мощностью, большей чем максимальная мощность на валу насоса, работающего на заданную магистраль. По заданному графику суточной подачи (рисунок 4.1) при времени  $t=16$  ч максимальная подача насоса будет составлять

$$Q_{\text{макс}} = Q_{\text{макс}}^* \cdot Q^1 = 1.25 \cdot 100 = 125 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

По нормальным характеристикам (рисунок 4.2)

$$N_{\text{макс}} = 41 \text{ кВт}.$$

Выбираем двигатель общепромышленной серии из справочника /??/ типа 4А200L2У3 с параметрами

$$P_{\text{н.дв}}=45 \text{ кВт}, \eta_{\text{н.дв}}=91\%, s_{\text{н.дв}}=1.8\%,$$

$$n_{н.дв} = 3000 \cdot (100 - s_{н.дв}) / 100 = 2946 \text{ об/мин.}$$

#### 4.5 Расчет характеристик насоса при различных скоростях вращения

Пересчет нормальных характеристик при других скоростях вращения производится по формулам подобия

$$Q_2 = Q_1 \cdot \frac{n_2}{n_1}; H_2 = H_1 \cdot \left( \frac{n_2}{n_1} \right)^2, \quad (4.1)$$

$$\eta_{н2} = \frac{\eta_{н1}}{\eta_{н1} + (1 - \eta_{н1}) \cdot \left( \frac{n_1}{n_2} \right)^{0.17}}. \quad (4.2)$$

На нормальных характеристиках выбираем 9 точек. Минимальную скорость вращения выбирается исходя из статического напора магистрали  $H_{см}$

$$n_{мин} \geq n_{ном} \cdot \sqrt{\frac{H_{см}}{H_n(0)}},$$

где  $H_n(0) = 87$  м – напор на выходе насоса при нулевой подаче (по нормальной Q-H характеристике).

$$n_{мин} \geq 2900 \cdot \sqrt{\frac{30}{87}} = 1702; \quad n_{мин} = 1750 \text{ об/мин.}$$

Результаты расчета Q-H характеристик приведены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Q-H характеристики насоса

$n_1=2900$ об/мин	$Q, \text{ м}^3/\text{ч}$	0	20	40	60	80	100	120	140	160
	$H, \text{ м}$	87	87	86.3	85	82.5	79.5	75.5	70	62
	$\eta, \%$	0	25.5	45	58	65	67	65.5	60	52
$n_1=2670$ об/мин	$Q, \text{ м}^3/\text{ч}$	0.0	18.4	36.8	55.2	73.7	92.1	110.5	128.9	147.3
	$H, \text{ м}$	73.7	73.7	73.2	72.1	69.9	67.4	64.0	59.3	52.6
	$\eta, \%$	0.0	25.2	44.7	57.7	64.7	66.7	65.2	59.7	51.6
$n_2=2440$ об/мин	$Q, \text{ м}^3/\text{ч}$	0.0	16.8	33.7	50.5	67.3	84.1	101.0	117.8	134.6
	$H, \text{ м}$	61.6	61.6	61.1	60.2	58.4	56.3	53.4	49.6	43.9
	$\eta, \%$	0.0	24.9	44.3	57.3	64.3	66.3	64.8	59.3	51.3
$n_3=2210$ об/мин	$Q, \text{ м}^3/\text{ч}$	0.0	15.2	30.5	45.7	61.0	76.2	91.4	106.7	121.9
	$H, \text{ м}$	50.5	50.5	50.1	49.4	47.9	46.2	43.8	40.7	36.0
	$\eta, \%$	0.0	24.6	43.9	56.9	63.9	66.0	64.4	58.9	50.8
$n_4=1980$ об/мин	$Q, \text{ м}^3/\text{ч}$	0.0	13.7	27.3	41.0	54.6	68.3	81.9	95.6	109.2
	$H, \text{ м}$	40.6	40.6	40.2	39.6	38.5	37.1	35.2	32.6	28.9
	$\eta, \%$	0.0	24.3	43.4	56.4	63.5	65.6	64.0	58.4	50.4
$n_5=1750$ об/мин	$Q, \text{ м}^3/\text{ч}$	0.0	12.1	24.1	36.2	48.3	60.3	72.4	84.5	96.6
	$H, \text{ м}$	31.7	31.7	31.4	31.0	30.0	28.9	27.5	25.5	22.6
	$\eta, \%$	0.0	23.9	42.9	55.9	63.0	65.1	63.5	57.9	49.9

Пример расчета для скорости вращения  $n_1=2670$  об/мин (выделенная область в таблице 4.1)

$$Q_2 = 40 \cdot \frac{2670}{2900} = 36.8 \text{ м}^3/\text{ч}; H_2 = 86.3 \cdot \left(\frac{2670}{2900}\right)^2 = 73.2 \text{ м},$$

$$\eta_{н2} = \frac{0.45 \cdot 100}{0.45 + (1 - 0.45) \cdot \left(\frac{2900}{2670}\right)^{0.17}} = 44.7 \%$$

Q-H характеристики насоса представлены на рисунках 4.4-4.5

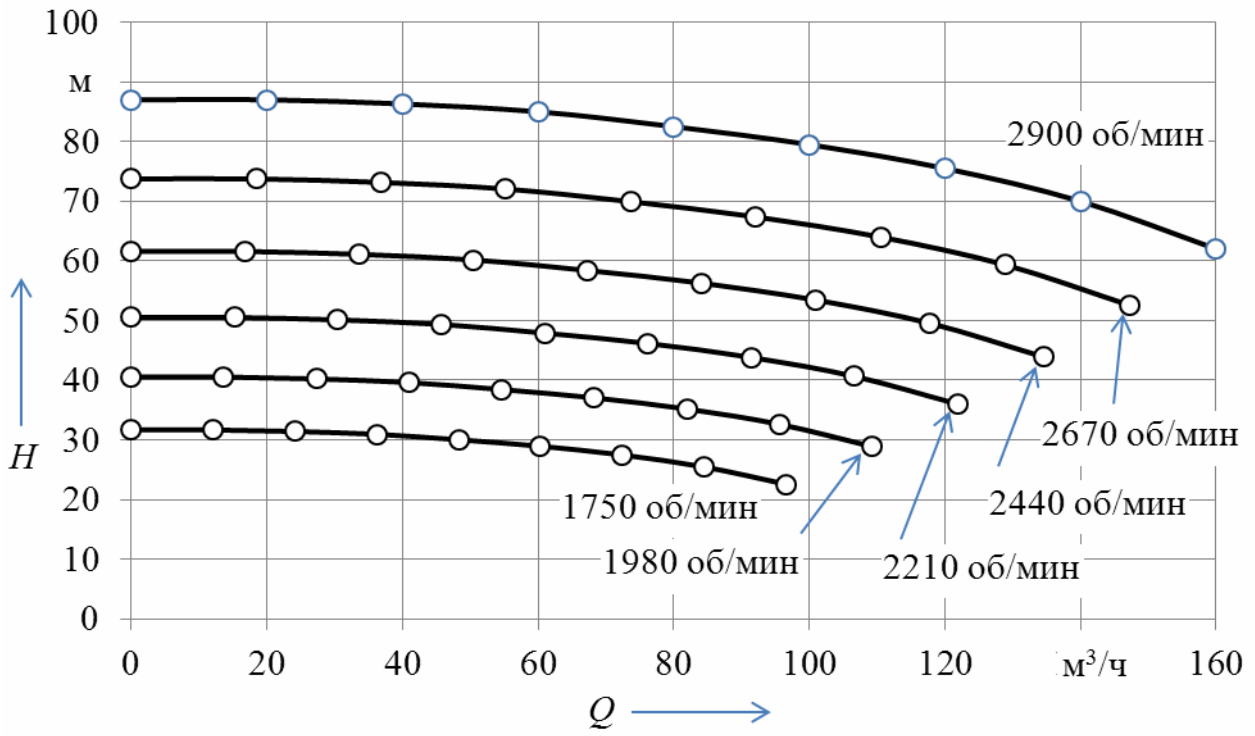


Рисунок 4.4 – Q-H характеристика насоса

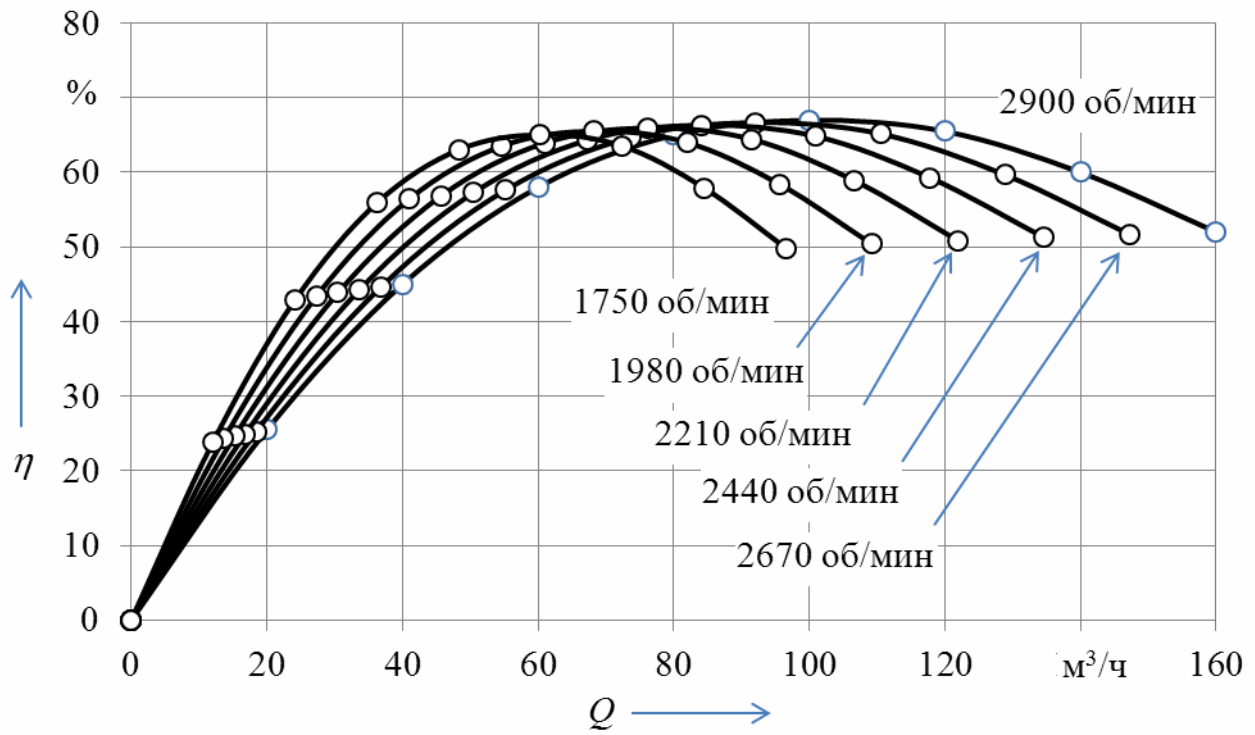


Рисунок 4.5 – Характеристика  $\eta=f(Q)$  насоса

## 4.6 Расчет характеристик магистрали при регулировании подачи задвижкой

Гидравлическая схема насосной станции при регулировании подачи задвижкой показана на рисунке 4.6.

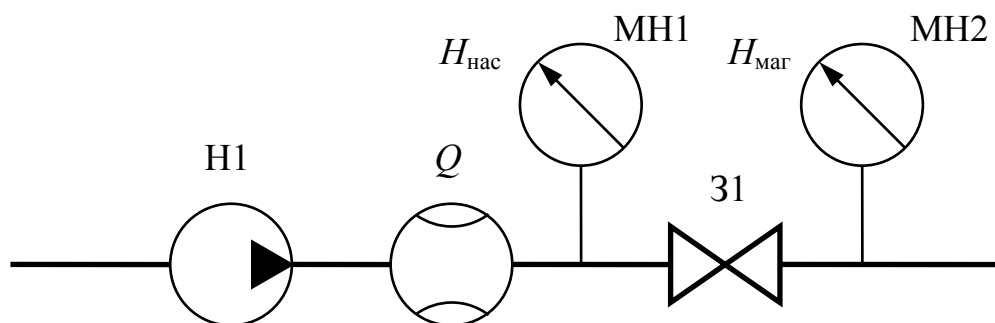


Рисунок 4.6 – Гидравлическая схема насосной станции при регулировании подачи задвижкой

Семейство характеристик магистрали рассчитывается по формуле

$$H_{\text{маг}}(Q) = H_{\text{ст}} + \left( \frac{Q_{\text{маг}}}{Q_0} \right)^2 \cdot (H_0 - H_{\text{ст}}).$$

Для регулировочных характеристик значения  $Q_0^*$  выбираются равномерно из диапазона 0- $Q_0$ . Результаты расчета Q-H характеристик приведены в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Регулировочные Q-H характеристики магистрали

$Q_0=150 \text{ м}^3/\text{ч}$ $H_0=90 \text{ м}$	$Q, \text{ м}^3/\text{ч}$	0.0	20.0	40.0	60.0	80.0	100.0	120.0	140.0	150.0
	$H_{\text{маг}}, \text{ м}$	30.0	31.1	34.3	39.6	47.1	56.7	68.4	82.3	90.0
$Q_0^*=125 \text{ м}^3/\text{ч}$ $H_0^*=90 \text{ м}$	$Q, \text{ м}^3/\text{ч}$	0.0	16.7	33.3	50.0	66.7	83.3	100.0	116.7	125.0
	$H_{\text{маг}}, \text{ м}$	30.0	31.1	34.3	39.6	47.1	56.7	68.4	82.3	90.0
$Q_0^*=100 \text{ м}^3/\text{ч}$ $H_0^*=90 \text{ м}$	$Q, \text{ м}^3/\text{ч}$	0.0	13.3	26.7	40.0	53.3	66.7	80.0	93.3	100.0
	$H_{\text{маг}}, \text{ м}$	30.0	31.1	34.3	39.6	47.1	56.7	68.4	82.3	90.0
$Q_0^*=75 \text{ м}^3/\text{ч}$ $H_0^*=90 \text{ м}$	$Q, \text{ м}^3/\text{ч}$	0.0	10.0	20.0	30.0	40.0	50.0	60.0	70.0	75.0
	$H_{\text{маг}}, \text{ м}$	30.0	31.1	34.3	39.6	47.1	56.7	68.4	82.3	90.0
$Q_0^*=50 \text{ м}^3/\text{ч}$ $H_0^*=90 \text{ м}$	$Q, \text{ м}^3/\text{ч}$	0.0	6.7	13.3	20.0	26.7	33.3	40.0	46.7	50.0
	$H_{\text{маг}}, \text{ м}$	30.0	31.1	34.3	39.6	47.1	56.7	68.4	82.3	90.0
$Q_0^*=25 \text{ м}^3/\text{ч}$ $H_0^*=90 \text{ м}$	$Q, \text{ м}^3/\text{ч}$	0.0	3.3	6.7	10.0	13.3	16.7	20.0	23.3	25.0
	$H_{\text{маг}}, \text{ м}$	30.0	31.1	34.3	39.6	47.1	56.7	68.4	82.3	90.0



Пример расчета для  $Q_0^* = 125 \text{ м}^3/\text{ч}$ ,  $H_0^* = 90 \text{ м}$  (выделенная область в таблице 4.2)

$$H_{\text{маг}}(50) = 30 + \left(\frac{50}{125}\right)^2 \cdot (90 - 30) = 39.6 \text{ м}.$$

Семейство Q-H характеристики магистрали при регулировании задвижкой приведено на рисунке 4.7.

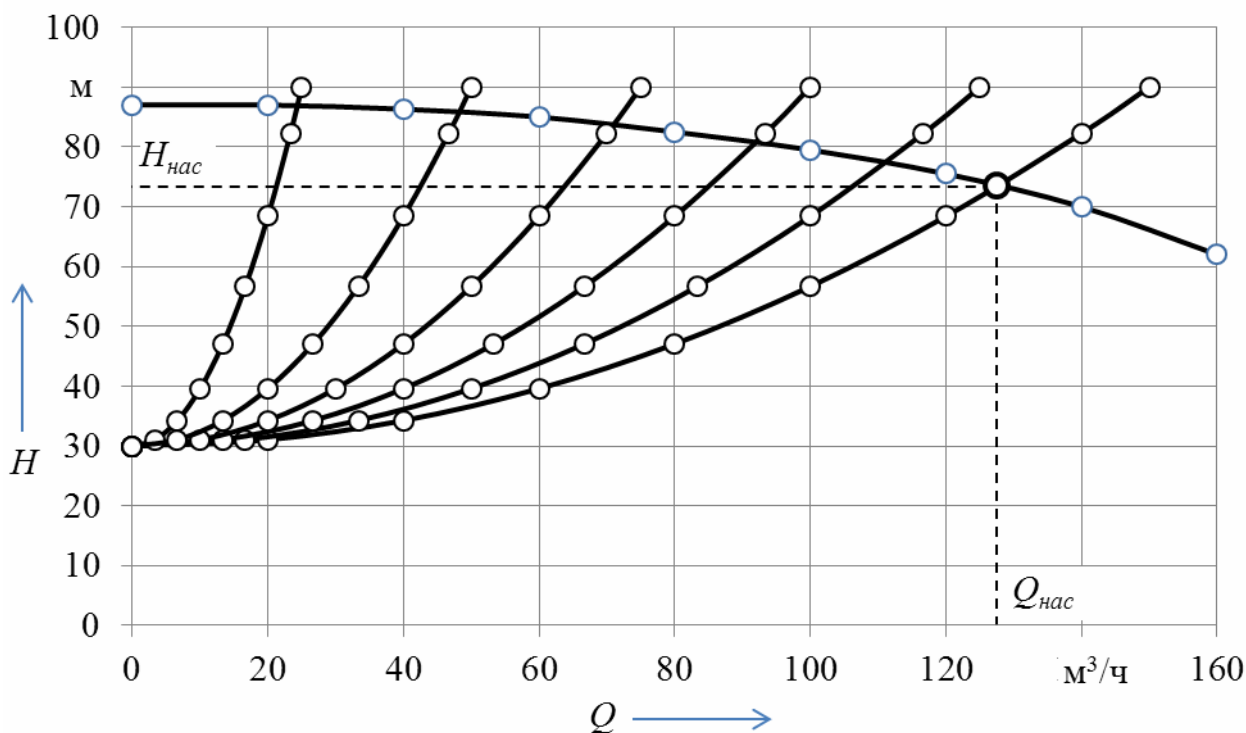


Рисунок 4.7 - Семейство Q-H характеристик магистрали при регулировании задвижкой

#### 4.7 Расчет энергетических характеристик при регулировании подачи задвижкой

Полезная (гидравлическая)  $N_{2,i}$ , кВт, определяется по формуле

$$N_{2,i} = \rho \cdot Q_i / 3600 \cdot H_{\text{маг},i} / 1000, \quad (4.4)$$

где  $Q_i$  – текущая подача по суточному графику с учетом единичной подачи  $Q^1$ , м<sup>3</sup>/ч;

$H_{маг.i}$  – напор в магистрали без учета задвижки при подаче  $Q_i$ , м.

Потребляемая электроприводом мощность  $P_{номр.i}$ , кВт, определяется по формуле

$$P_{номр.i} = \frac{\rho \cdot Q_i \cdot H_{нас.i} \cdot 100 \cdot 100}{3600 \cdot \eta_{нас.i} \cdot \eta_{дв.н} \cdot 1000}, \quad (4.5)$$

где  $H_{нас.i}$  (м),  $\eta_{нас.i}$  (%) – напор и КПД насоса при текущей подаче  $Q_i$  (определяются по нормальным характеристикам насоса);

$\eta_{дв.н}$  – номинальный КПД двигателя, %.

КПД установки, %

$$\eta_{уст.i} = \frac{N_{з.i}}{P_{номр.i}} \cdot 100. \quad (4.6)$$

Мощность потерь  $\Delta P_i$ , кВт, для каждого  $Q_i$

$$\Delta P_i = P_{номр.i} - N_{з.i}. \quad (4.7)$$

Суммарное потребление электроэнергии из сети за сутки, кВт

$$\Sigma P_{номр} = \sum_{i=0}^{23} P_{номр.i}. \quad (4.8)$$

Потери электроэнергии за сутки, кВт, определяются по формуле

$$\Sigma \Delta P = \sum_{i=0}^{23} \Delta P_i. \quad (4.9)$$

Среднесуточный КПД установки, %

$$\eta_{срс} = \frac{\Sigma P_{номр} - \Sigma \Delta P}{\Sigma P_{номр}} \cdot 100. \quad (4.10)$$

Результаты расчета энергетических характеристик приведены в таблице

4.3. Пример расчета для  $t=1$  ч:

$$Q^*=0.35;$$

$$Q_1=0.35 \cdot 100=35 \text{ м}^3/\text{ч};$$

$$H_{\text{маг.1}} = 30 + (35/150)^2 \cdot (90 - 30) = 33.3 \text{ м};$$

$$N_{\text{г.1}} = 9810 \cdot 35 / 3600 \cdot 33.3 / 1000 = 3.18 \text{ кВт};$$

$$H_{\text{нас.1}} = 86.5 \text{ м};$$

$$\eta_{\text{нас.1}} = 40.7 \text{ \%};$$

$$P_{\text{номп.1}} = \frac{9810 \cdot 35 \cdot 86.5 \cdot 100 \cdot 100}{3600 \cdot 40.7 \cdot 91 \cdot 1000} = 22.27 \text{ кВт};$$

$$\Delta P_1 = 22.27 - 3.18 = 19.09 \text{ кВт};$$

$$\eta_{\text{уст.1}} = \frac{3.18}{19.09} \cdot 100 = 14.3 \text{ \%}.$$

Суммарное потребление электроэнергии из сети за сутки

$$\Sigma P_{\text{номп.1}} = \sum_{i=0}^{23} P_{\text{номп.1}} = 726.6 \text{ кВт}\cdot\text{ч}.$$

Потери электроэнергии за сутки

$$\Sigma \Delta P_1 = \sum_{i=0}^{23} \Delta P_i = 470.6 \text{ кВт}\cdot\text{ч}.$$

Среднесуточный КПД установки

$$\eta_{\text{срсл}} = \frac{726.6 - 470.6}{726.6} \cdot 100 = 35.2 \text{ \%}.$$

Таблица 4.3 – Расчет энергетических характеристик электропривода при регулировании подачи задвижкой

$t, ч$	$Q^*$	$Q_{i,3}$ м <sup>3</sup> /ч	$H_{маг.i,}$ м	$N_{э.i,}$ кВт	$H_{нас.i,}$ м	$\eta_{нас.i,}$ %	$P_{номр.i,}$ кВт	$\Delta P_{i,}$ кВт	$\eta_{уст.i,}$ %
0	0,30	30,0	32,4	2,65	86,7	36,0	21,64	18,99	12,2
1	0,35	35,0	33,3	3,18	86,5	40,7	22,27	19,09	14,3
2	0,55	55,0	38,1	5,71	85,4	55,3	25,43	19,72	22,5
3	0,50	50,0	36,7	5,00	85,8	52,3	24,56	19,56	20,4
4	0,40	40,0	34,3	3,74	86,3	45,0	22,97	19,23	16,3
5	0,35	35,0	33,3	3,18	86,5	40,7	22,27	19,09	14,3
6	0,50	50,0	36,7	5,00	85,8	52,3	24,56	19,56	20,4
7	0,75	75,0	45,0	9,20	83,2	63,7	29,33	20,13	31,4
8	0,85	85,0	49,3	11,42	81,8	65,9	31,59	20,17	36,2
9	1,10	110,0	62,3	18,67	77,7	66,7	38,37	19,70	48,7
10	1,10	110,0	62,3	18,67	77,7	66,7	38,37	19,70	48,7
11	1,00	100,0	56,7	15,45	79,5	67,0	35,53	20,08	43,5
12	1,20	120,0	68,4	22,37	75,5	65,5	41,42	19,05	54,0
13	1,00	100,0	56,7	15,45	79,5	67,0	35,53	20,08	43,5
14	1,10	110,0	62,3	18,67	77,7	66,7	38,37	19,70	48,7
15	1,10	110,0	62,3	18,67	77,7	66,7	38,37	19,70	48,7
16	1,25	125,0	71,7	24,42	74,3	64,5	43,12	18,70	56,6
17	0,95	95,0	54,1	14,01	80,3	66,9	34,15	20,14	41,0
18	0,90	90,0	51,6	12,65	81,1	66,5	32,87	20,22	38,5
19	0,75	75,0	45,0	9,20	83,2	63,7	29,33	20,13	31,4
20	0,50	50,0	36,7	5,00	85,8	52,3	24,56	19,56	20,4
21	0,50	50,0	36,7	5,00	85,8	52,3	24,56	19,56	20,4
22	0,50	50,0	36,7	5,00	85,8	52,3	24,56	19,56	20,4
23	0,40	40,0	34,3	3,74	86,3	45,0	22,97	19,23	16,3

#### 4.8 Расчет энергетических характеристик при регулировании подачи байпасированием

Гидравлическая схема насосной станции при регулировании подачи байпасированием приведена на рисунке 4.8.

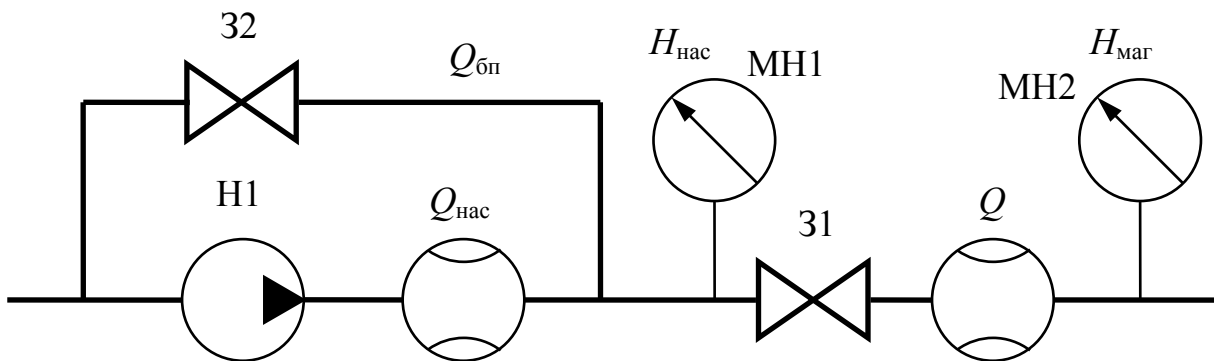


Рисунок 4.8 – Характеристики системы при регулировании подачи байпасированием

Полезная (гидравлическая)  $N_{z,i}$ , кВт, определяется по формуле (4.4). При таком способе регулирования подачи рабочая точка насоса не меняется, оставаясь в точке пересечения характеристик магистрали при полностью открытой задвижке и насоса. По рисунку 4.7  $Q_{нас}=128 \text{ м}^3/\text{ч}$ ,  $H_{нас}=74 \text{ м}$ . Соответственно потребляемая электроприводом мощность  $P_{потр}$ , кВт, будет постоянной

$$P_{потр} = \frac{\rho \cdot Q_{нас} \cdot H_{нас} \cdot 100 \cdot 100}{3600 \cdot \eta_{нас} \cdot \eta_{дв.н} \cdot 1000}, \quad (4.11)$$

где  $\eta_{нас}$  (%) определяется по нормальной характеристике  $Q_{нас}=128 \text{ м}^3/\text{ч}$ .

$$P_{потр} = \frac{9810 \cdot 128 \cdot 74 \cdot 100 \cdot 100}{3600 \cdot 64 \cdot 91 \cdot 1000} = 44.32 \text{ кВт.}$$

КПД установки, мощность потерь  $\Delta P_i$ , суммарное потребление электроэнергии из сети за сутки, потери электроэнергии за сутки и среднесуточный КПД установки определяются по формулам (4.6)-(4.10).

Результаты расчета энергетических характеристик приведены в таблице 4.4.

Таблица 4.4 – Расчет энергетических характеристик электропривода при регулировании подачи байпасированием

$t, \text{ч}$	$Q^*$	$Q_{3,i}$ м <sup>3</sup> /ч	$H_{\text{маг},i}$ м	$N_{2,i}$ кВт	$H_{\text{нас},i}$ м	$\eta_{\text{нас},i}$ %	$P_{\text{номр},i}$ кВт	$\Delta P_i$ кВт	$\eta_{\text{уст},i}$ %
0	0,30	30,0	32,4	2,65	74,0	64,0	44,32	41,67	6,0
1	0,35	35,0	33,3	3,18	74,0	64,0	44,32	41,14	7,2
2	0,55	55,0	38,1	5,71	74,0	64,0	44,32	38,61	12,9
3	0,50	50,0	36,7	5,00	74,0	64,0	44,32	39,32	11,3
4	0,40	40,0	34,3	3,74	74,0	64,0	44,32	40,58	8,4
5	0,35	35,0	33,3	3,18	74,0	64,0	44,32	41,14	7,2
6	0,50	50,0	36,7	5,00	74,0	64,0	44,32	39,32	11,3
7	0,75	75,0	45,0	9,20	74,0	64,0	44,32	35,12	20,8
8	0,85	85,0	49,3	11,42	74,0	64,0	44,32	32,90	25,8
9	1,10	110,0	62,3	18,67	74,0	64,0	44,32	25,65	42,1
10	1,10	110,0	62,3	18,67	74,0	64,0	44,32	25,65	42,1
11	1,00	100,0	56,7	15,45	74,0	64,0	44,32	28,87	34,9
12	1,20	120,0	68,4	22,37	74,0	64,0	44,32	21,95	50,5
13	1,00	100,0	56,7	15,45	74,0	64,0	44,32	28,87	34,9
14	1,10	110,0	62,3	18,67	74,0	64,0	44,32	25,65	42,1
15	1,10	110,0	62,3	18,67	74,0	64,0	44,32	25,65	42,1
16	1,25	125,0	71,7	24,42	74,0	64,0	44,32	19,90	55,1
17	0,95	95,0	54,1	14,01	74,0	64,0	44,32	30,31	31,6
18	0,90	90,0	51,6	12,65	74,0	64,0	44,32	31,67	28,5
19	0,75	75,0	45,0	9,20	74,0	64,0	44,32	35,12	20,8
20	0,50	50,0	36,7	5,00	74,0	64,0	44,32	39,32	11,3
21	0,50	50,0	36,7	5,00	74,0	64,0	44,32	39,32	11,3
22	0,50	50,0	36,7	5,00	74,0	64,0	44,32	39,32	11,3
23	0,40	40,0	34,3	3,74	74,0	64,0	44,32	40,58	8,4

Пример расчета для  $t=1$  ч:

$$\Delta P_1 = 44.32 - 3.18 = 41.14 \text{ кВт};$$

$$\eta_{\text{уст},1} = \frac{3.18}{44.32} \cdot 100 = 7.2 \text{ \%}.$$

Суммарное потребление электроэнергии из сети за сутки

$$\Sigma P_{\text{номр},2} = \sum_{i=0}^{23} P_{\text{номр},i} = 1063.7 \text{ кВт}\cdot\text{ч}.$$

Потери электроэнергии за сутки

$$\Sigma \Delta P_2 = \sum_{i=0}^{23} \Delta P_i = 807.6 \text{ кВт}\cdot\text{ч.}$$

Среднесуточный КПД установки

$$\eta_{срс2} = \frac{1063.7 - 807.6}{1063.7} \cdot 100 = 24.1 \text{ \%}.$$

#### **4.9 Расчет энергетических характеристик при регулировании подачи скоростью вращения**

Полезная (гидравлическая)  $N_{z,i}$ , кВт, определяется по формуле (4.4). Потребляемая электроприводом мощность  $P_{номр.i}$ , кВт, определяется по формуле (4.5).

Зависимость необходимой скорости вращения от подачи насосной установки строится на основе точек пересечения характеристики магистрали при полностью открытой задвижке с семейством регулировочных характеристик насоса при различных скоростях вращения (рисунок 4.9).

Для определения КПД насоса при частоте вращения, отличной от номинальной, подачу по суточному графику необходимо пересчитать на номинальную скорость вращения

$$Q_{н.и} = Q_i \cdot \frac{n_n}{n_i},$$

где  $n_i$  определяется по графику  $n=f(Q)$  на рисунке 4.9б.

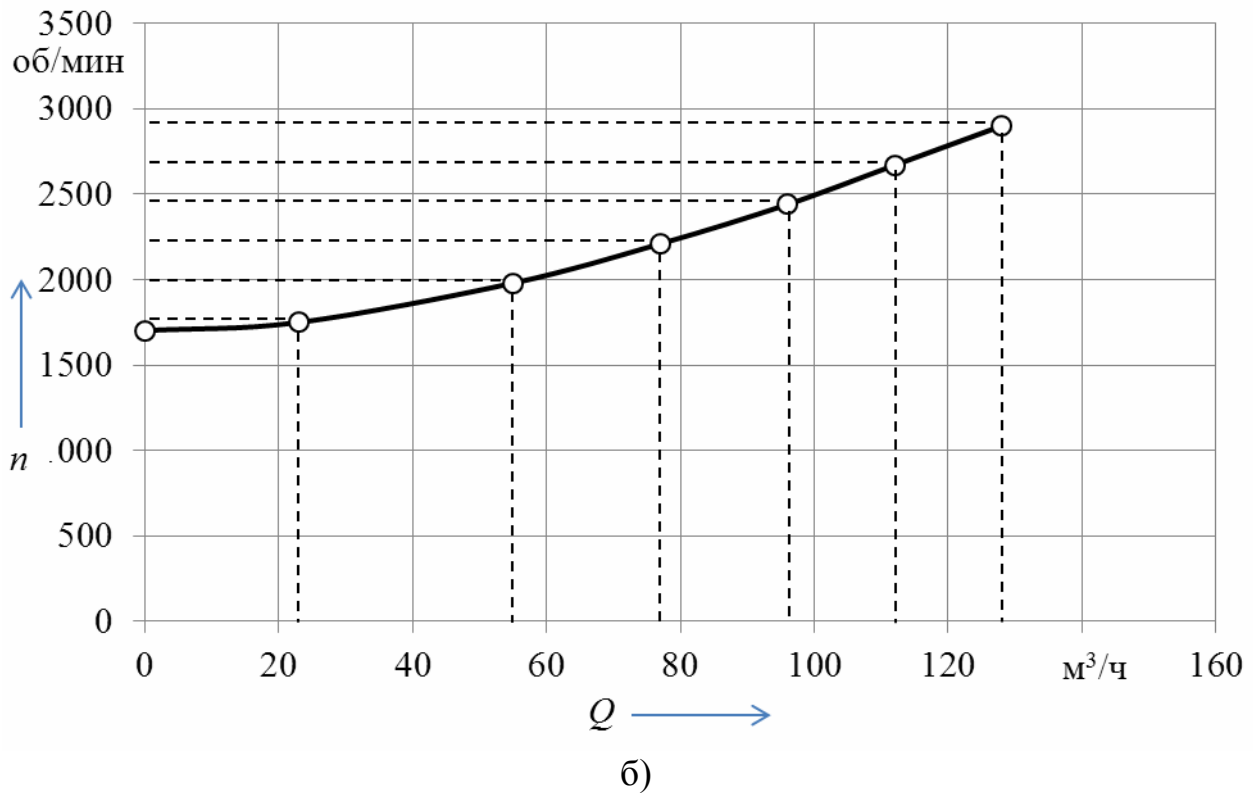
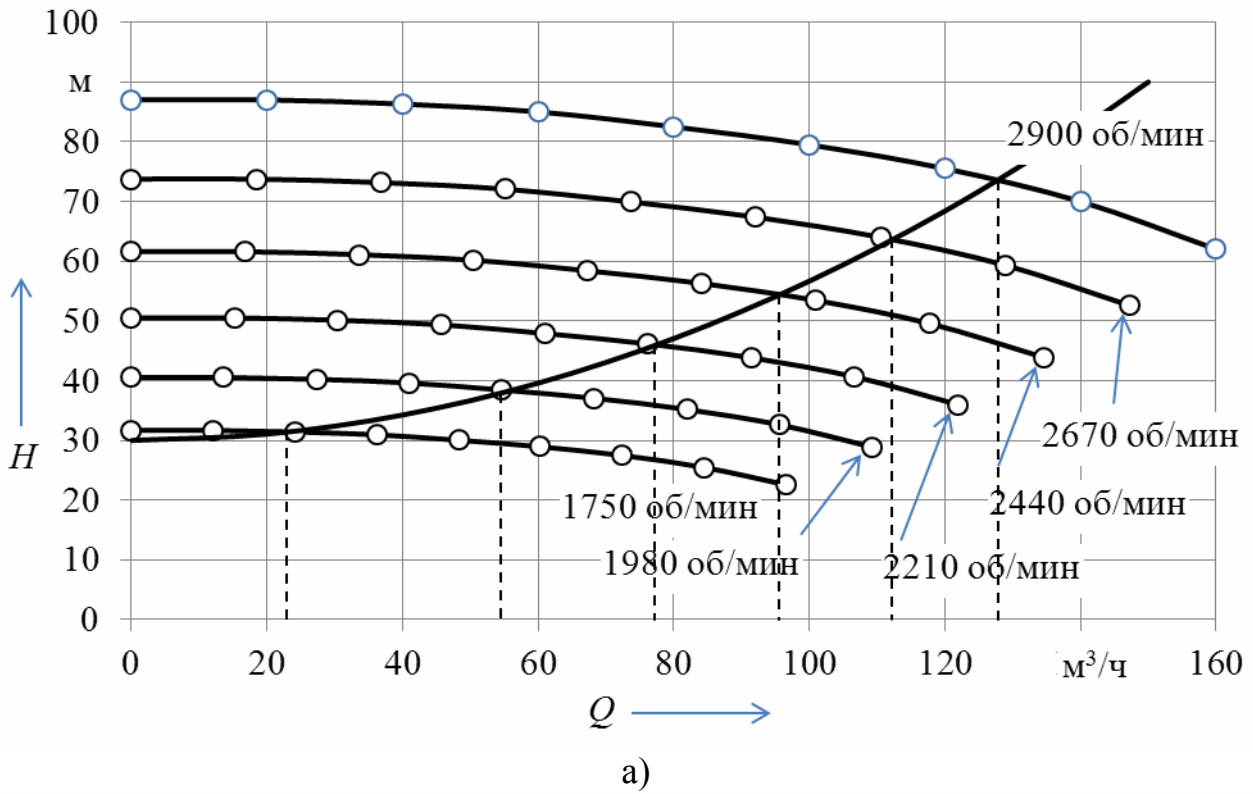


Рисунок 4.9 – Построение зависимости  $n=f(Q)$

Затем по нормальной характеристике КПД насоса определяется текущий КПД для значения  $Q_{n.i.}$ . По формуле (4.2) определяется КПД для текущей частоты вращения.



КПД установки, мощность потерь  $\Delta P_i$ , суммарное потребление электроэнергии из сети за сутки, потери электроэнергии за сутки и среднесуточный КПД установки определяются по формулам (4.6)-(4.10).

Результаты расчета энергетических характеристик приведены в таблице 4.5.

Таблица 4.5 – Расчет энергетических характеристик электропривода при регулировании подачи частотой вращения

$t$ , ч	$Q^*$	$Q_{i,}$ м <sup>3</sup> /ч	$H_{\text{маг.}i,}$ м	$N_{z,i,}$ кВт	$n_{i,}$ об/мин	$Q_{н,i,}$ м <sup>3</sup> /ч	$\eta_{\text{нас.}i,}$ %	$P_{\text{потр.}i}$ кВт	$\Delta P_{i,}$ кВт	$\eta_{\text{уст.}i,}$ %
0	0,30	30,0	32,4	2,65	1785,3	48,7	51,4	5,66	3,01	46,8
1	0,35	35,0	33,3	3,18	1816,9	55,9	55,8	6,25	3,07	50,9
2	0,55	55,0	38,1	5,71	1980,0	80,6	65,1	9,64	3,93	59,2
3	0,50	50,0	36,7	5,00	1935,2	74,9	63,7	8,63	3,63	57,9
4	0,40	40,0	34,3	3,74	1852,9	62,6	59,2	6,94	3,20	53,9
5	0,35	35,0	33,3	3,18	1816,9	55,9	55,8	6,25	3,07	50,9
6	0,50	50,0	36,7	5,00	1935,2	74,9	63,7	8,63	3,63	57,9
7	0,75	75,0	45,0	9,20	2187,4	99,4	67,0	15,08	5,88	61,0
8	0,85	85,0	49,3	11,42	2302,4	107,1	66,9	18,76	7,34	60,9
9	1,10	110,0	62,3	18,67	2641,0	120,8	65,4	31,38	12,71	59,5
10	1,10	110,0	62,3	18,67	2641,0	120,8	65,4	31,38	12,71	59,5
11	1,00	100,0	56,7	15,45	2495,2	116,2	66,1	25,69	10,24	60,1
12	1,20	120,0	68,4	22,37	2785,0	125,0	64,5	38,11	15,74	58,7
13	1,00	100,0	56,7	15,45	2495,2	116,2	66,1	25,69	10,24	60,1
14	1,10	110,0	62,3	18,67	2641,0	120,8	65,4	31,38	12,71	59,5
15	1,10	110,0	62,3	18,67	2641,0	120,8	65,4	31,38	12,71	59,5
16	1,25	125,0	71,7	24,42	2856,9	126,9	64,0	41,93	17,51	58,2
17	0,95	95,0	54,1	14,01	2426,8	113,5	66,4	23,18	9,17	60,4
18	0,90	90,0	51,6	12,65	2362,9	110,5	66,7	20,85	8,20	60,7
19	0,75	75,0	45,0	9,20	2187,4	99,4	67,0	15,08	5,88	61,0
20	0,50	50,0	36,7	5,00	1935,2	74,9	63,7	8,63	3,63	57,9
21	0,50	50,0	36,7	5,00	1935,2	74,9	63,7	8,63	3,63	57,9
22	0,50	50,0	36,7	5,00	1935,2	74,9	63,7	8,63	3,63	57,9
23	0,40	40,0	34,3	3,74	1852,9	62,6	59,2	6,94	3,20	53,9

Пример расчета для  $t=1$  ч:

$$n_1=1816.9 \text{ об/мин};$$

$$Q_{н.1} = 35 \cdot \frac{2900}{1816.9} = 55.9 \text{ м}^3/\text{ч};$$

$$\eta_{нас.1} = 55.8 \%;$$

$$H_{нас.1} = H_{маг.1} = 33.3 \text{ м};$$

$$P_{номр.1} = \frac{9810 \cdot 35 \cdot 33.3 \cdot 100 \cdot 100}{3600 \cdot 55.8 \cdot 91 \cdot 1000} = 6.25 \text{ кВт};$$

$$\Delta P_1 = 6.25 - 3.18 = 3.07 \text{ кВт};$$

$$\eta_{уст.1} = \frac{3.18}{6.25} \cdot 100 = 50.9 \%.$$

Суммарное потребление электроэнергии из сети за сутки

$$\Sigma P_{номр.3} = \sum_{i=0}^{23} P_{номр.i} = 434.7 \text{ кВт}\cdot\text{ч}.$$

Потери электроэнергии за сутки

$$\Sigma \Delta P_3 = \sum_{i=0}^{23} \Delta P_i = 178.7 \text{ кВт}\cdot\text{ч}.$$

Среднесуточный КПД установки

$$\eta_{срс3} = \frac{434.7 - 178.7}{434.7} \cdot 100 = 58.9 \%.$$

#### 4.10 Сравнение энергетических характеристик

На рисунке 4.10 представлены зависимости потребляемой мощности насосной установки от времени для трех разных способов регулирования. В таблице 4.6 приведено сравнение суточного потребления электроэнергии, потерь и среднесуточного КПД. Как видно, самым экономичным является способ регулирования подачи частотой вращения.

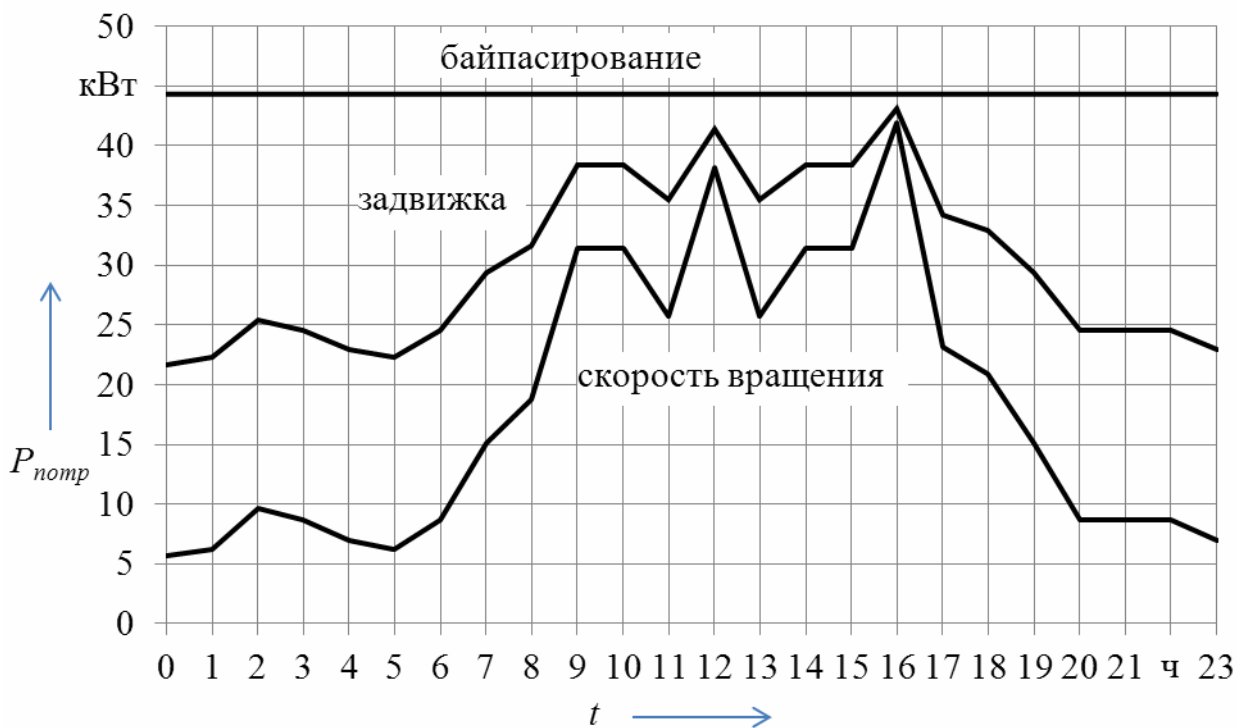


Рисунок 4.10 – Зависимость  $P_{номр}=f(t)$

Таблица 4.6 – Сравнение энергетических характеристик способов регулирования

Параметр	Задвижка	Байпасирование	Скорость вращения
$\Sigma P_{номр}, \text{кВт}\cdot\text{ч}$	726.6	1063.7	434.7
$\Sigma \Delta P, \text{кВт}\cdot\text{ч}$	470.6	807.6	178.7
$\eta_{ср}, \%$	35.2	24.1	58.9

## Список использованных источников

- 1 Ключев, В.И. Электропривод и автоматизация общепромышленных механизмов : учебник / В.И. Ключев, В.М. Терехов. – М. : Энергия, 1980. – 360 с.
- 2 Белов, М.П. Автоматизированный электропривод типовых производственных механизмов и технологических комплексов : учебник / М.П. Белов, В.А. Новиков, Л.Н. Рассудов. – 3-е изд., испр. – М. : Издательский центр «Академия», 2007. – 576 с.
- 3 Инжиниринг электроприводов и систем автоматизации : учебное пособие / Белов М.П. [и др.] – М. : Издательский центр «Академия», 2006. – 368 с.
- 4 Кравчик, А.Э. Асинхронные двигатели серии 4А: справочник / А.Э. Кравчик, М.М. Шлам, В.И. Афонин, Е.А. Соболенская. – М. : Энергоиздат, 1982. – 504 с.

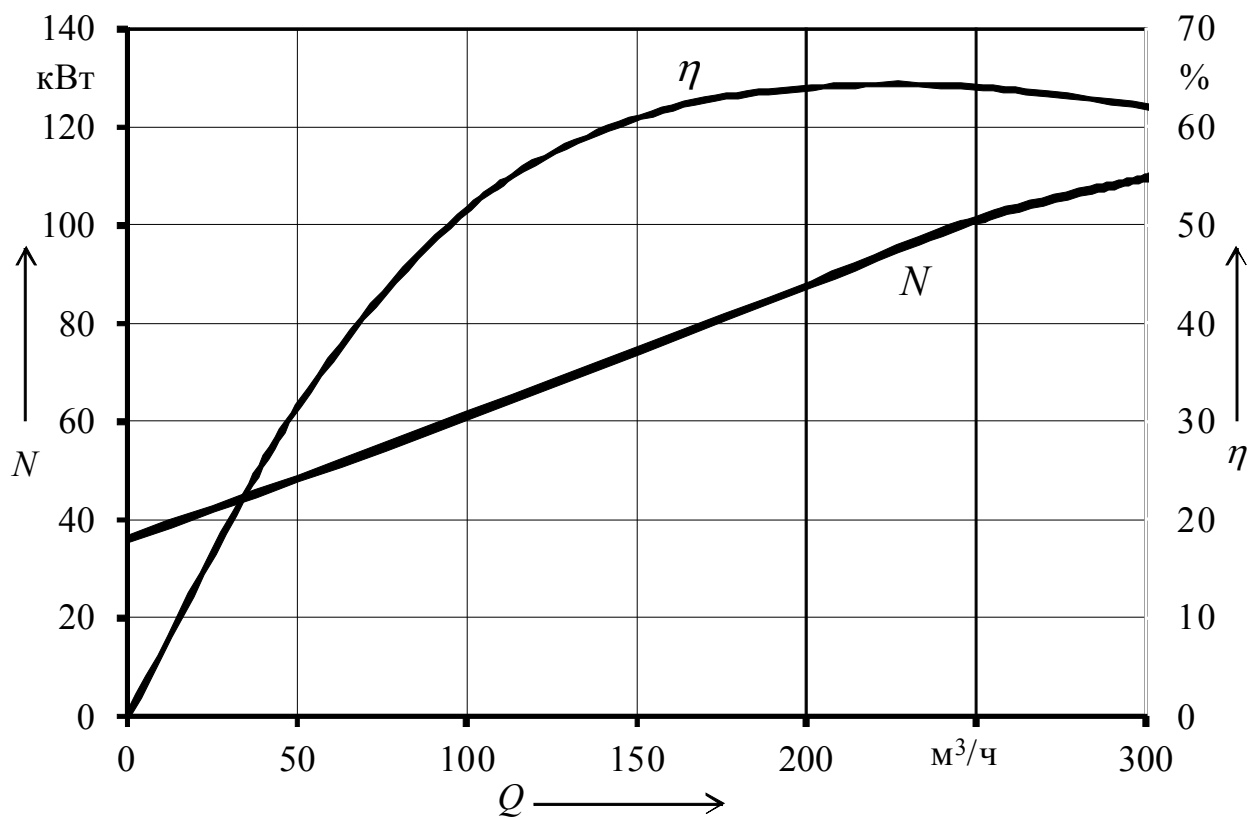
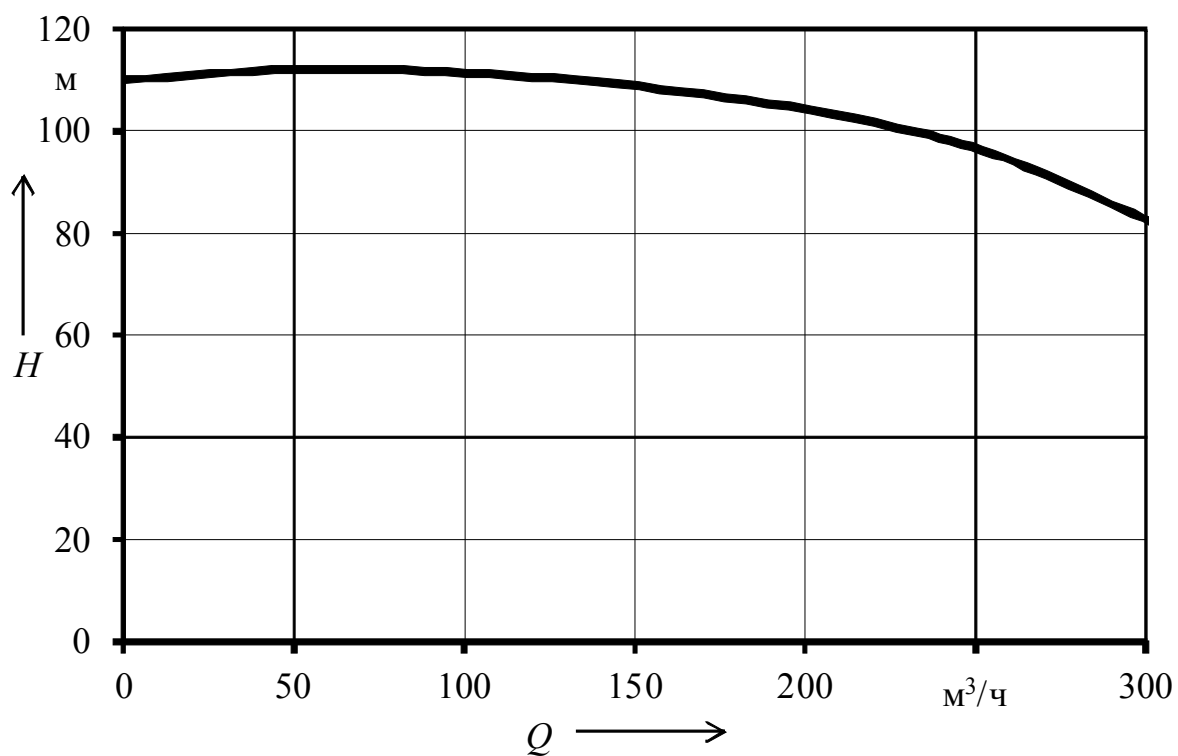
**Приложение А**  
**(обязательное)**  
**Варианты заданий**

Вар-т	Насос	Суточная подача		Параметры магистрали		
		Рисунок (прил. В)	ед. подачи $Q^1$ , м <sup>3</sup> /ч	$H_{ст}$ , м	$Q_0$ , м <sup>3</sup> /ч	$H_0$ , м
1	8НД-6х1	В.а	200	30	300	82
2		В.б		40		
3		В.в		50		
4		В.а	150	35	250	60
5		В.б		45		
6	6МС-6х9	В.а	120	150	200	360
7		В.б		200		
8		В.в		250		
9		В.а	150	175	210	250
10		В.б		225		
11	8МС-7х1	В.а	80	30	125	78
12		В.б		40		
13		В.в		50		
14		В.а	50	35	150	65
15		В.б		45		
16	Д630-90	В.а	550	25	800	83
17		В.б		30		
18		В.в		35		
19		В.а	400	27	850	50
20		В.б		33		
21	ЦС-65	В.а	25	4	40	13
22		В.б		5		
23		В.в		6		
24		В.а	15	4,5	45	20
25		В.б		5,5		

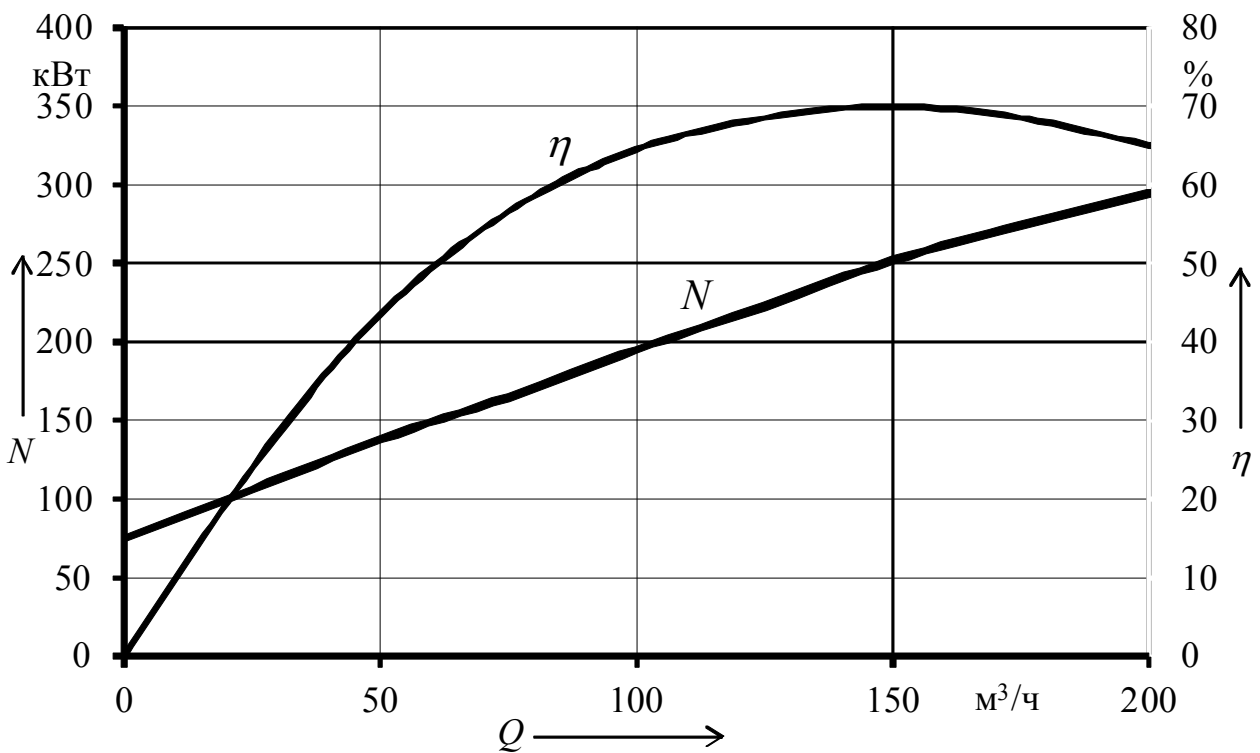
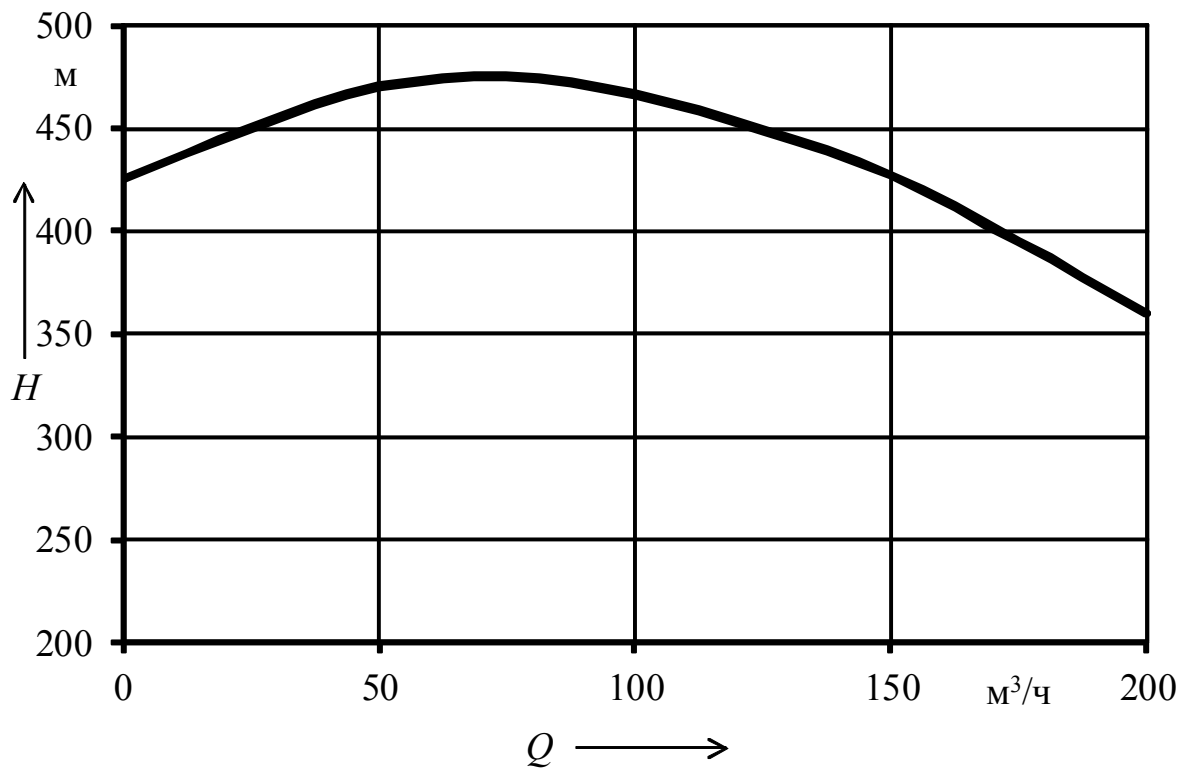
## Приложение Б

(обязательное)

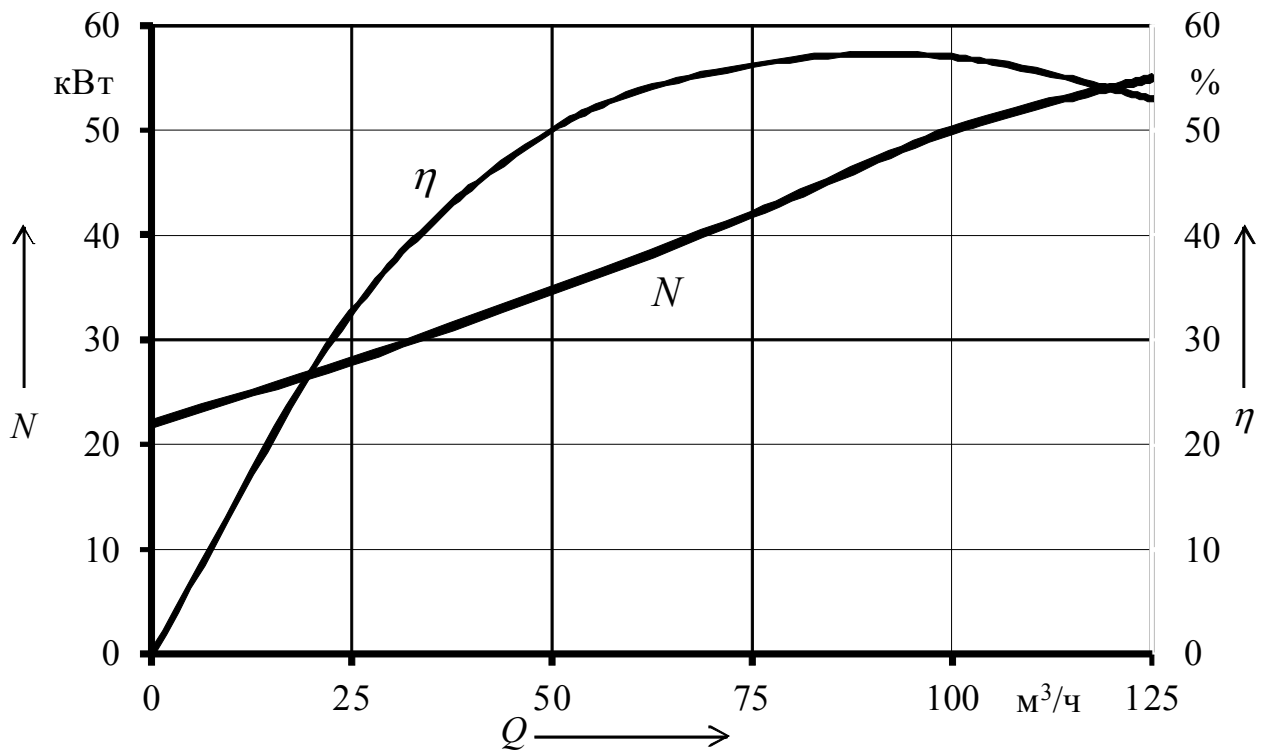
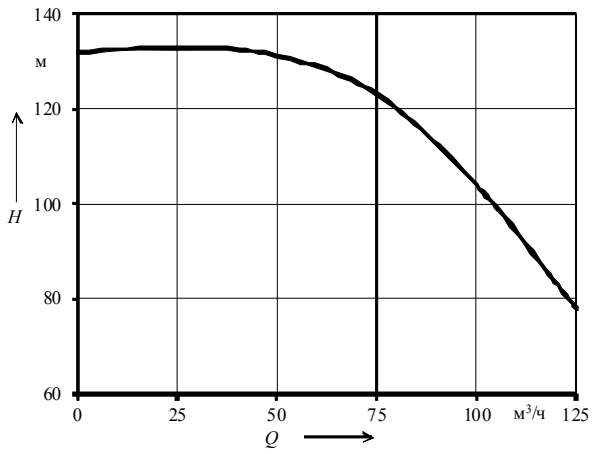
### Нормальные характеристики центробежных насосов



Нормальные характеристики насоса 8НД-6х1 ( $n_{\text{ном}}=1470$  об/мин)

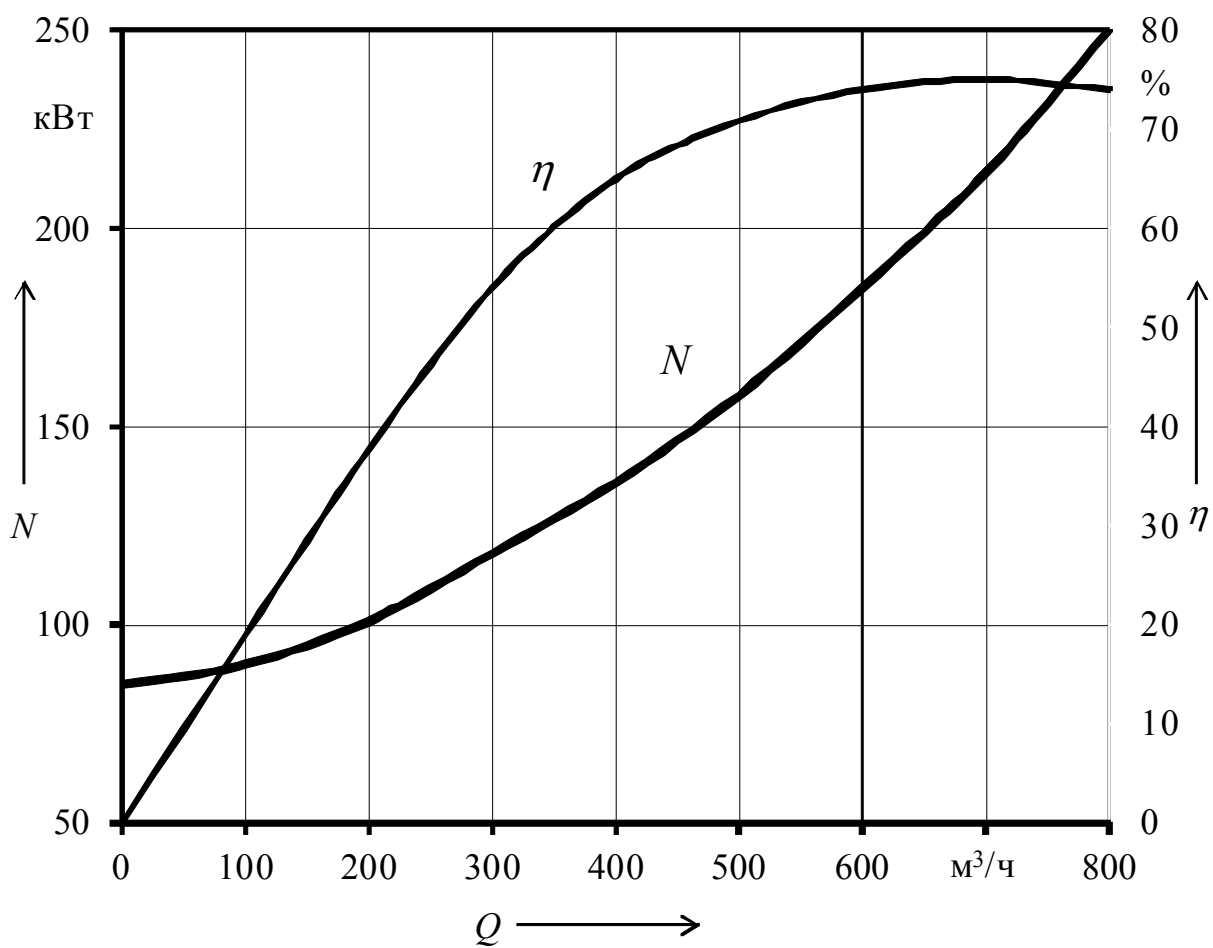
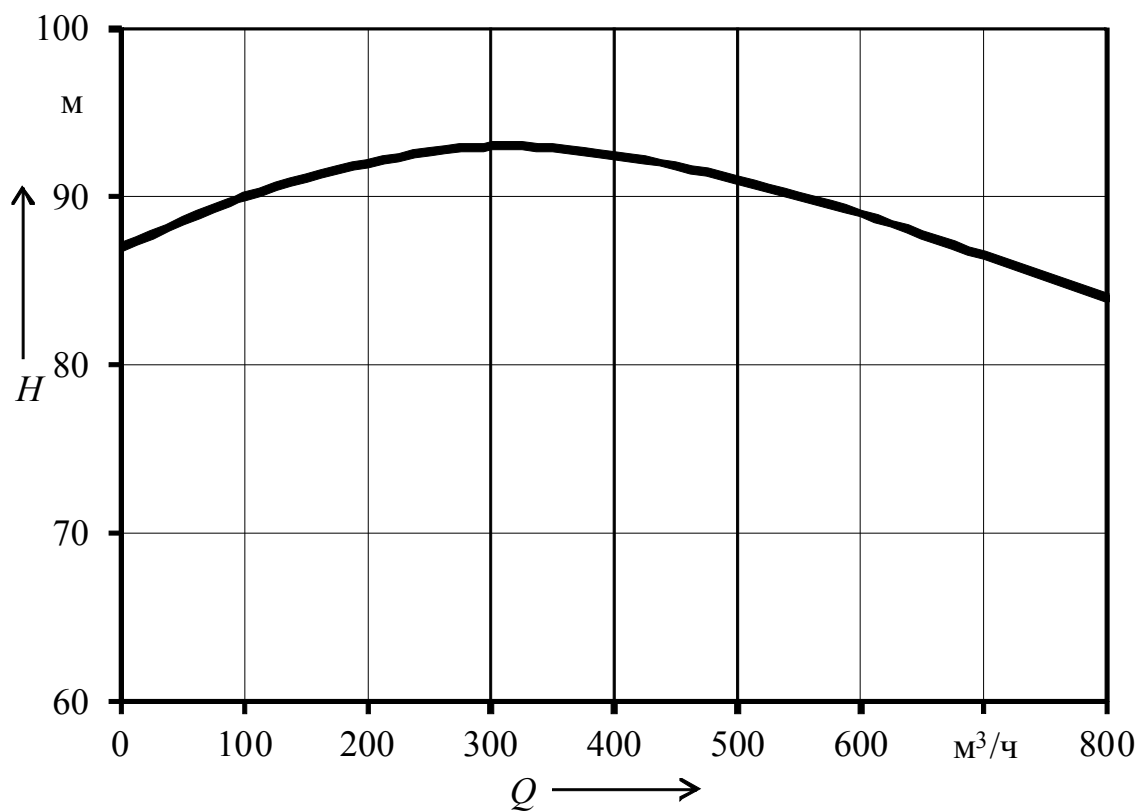


Нормальные характеристики насоса 6МС-6х9 ( $n_{ном}=1450$  об/мин)

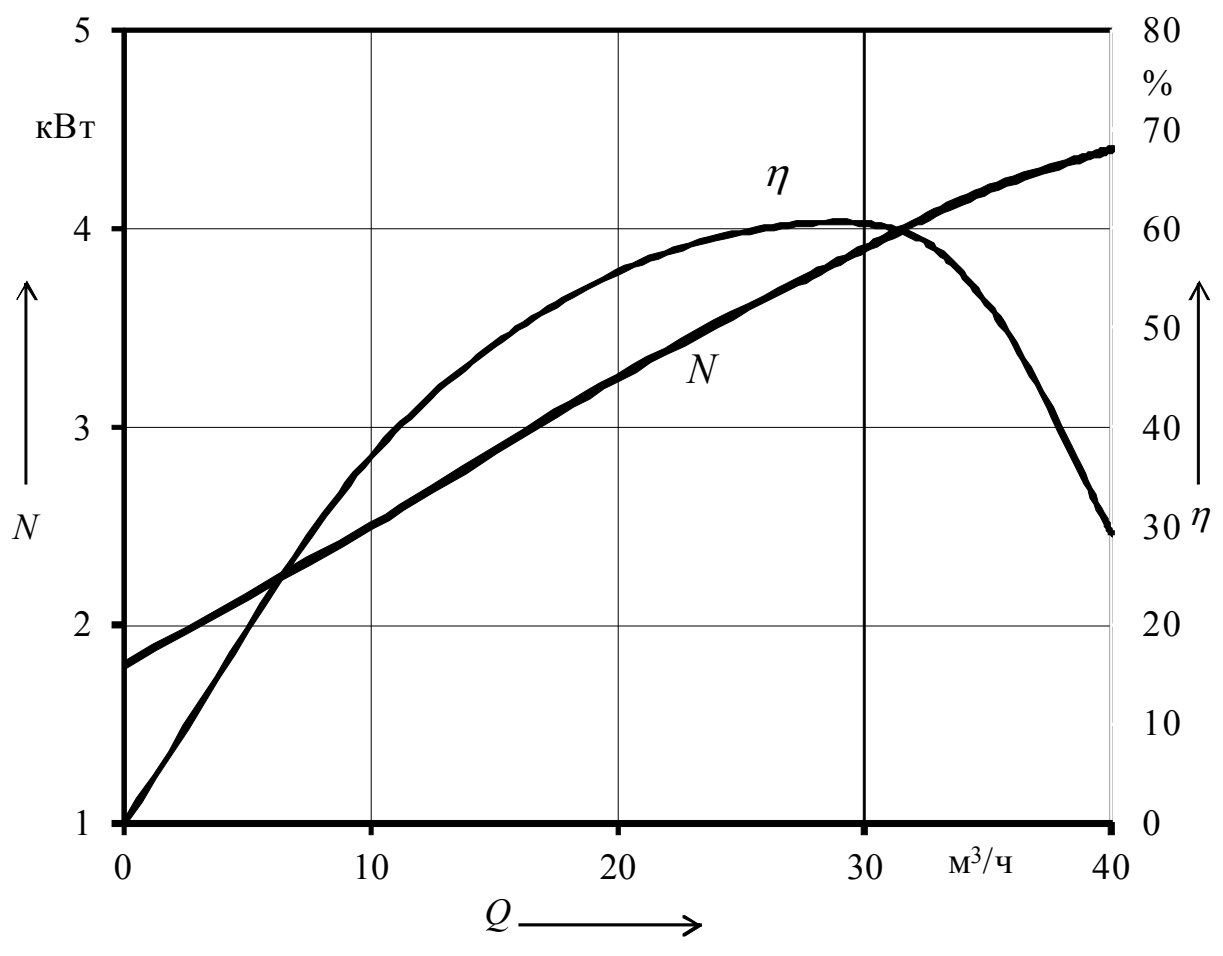
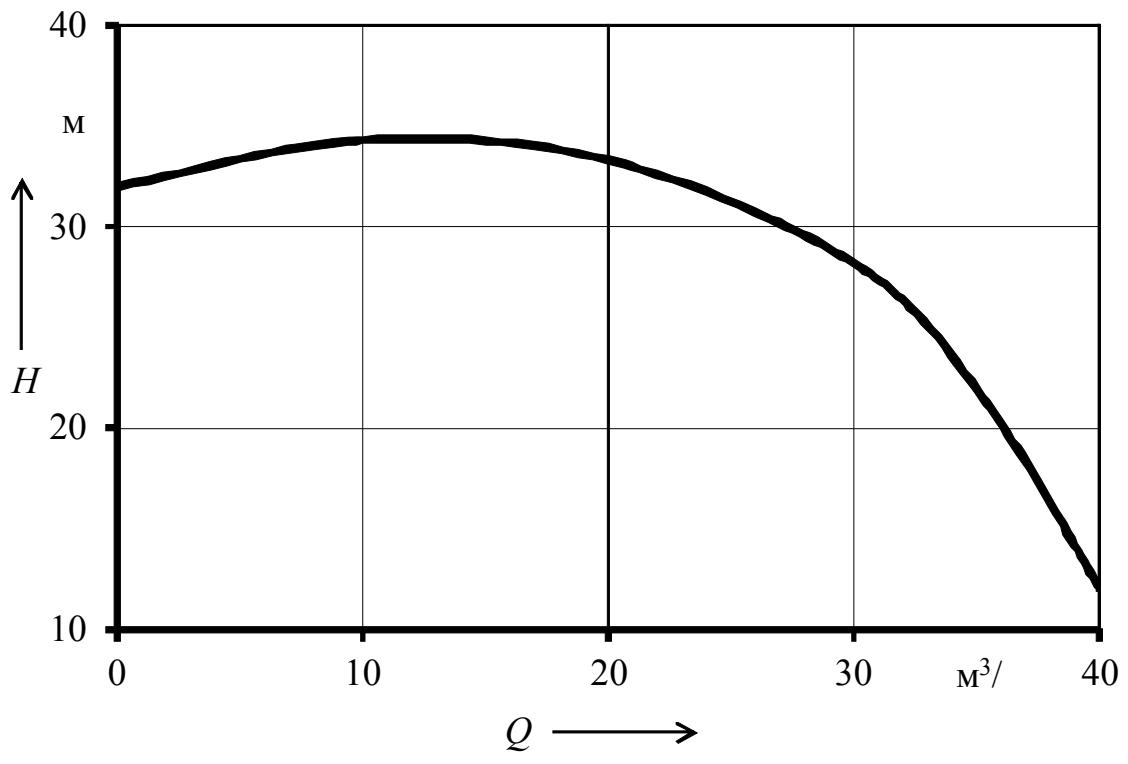


Нормальные характеристики насоса 8МС-7х1 ( $n_{\text{НОМ}}=1460$  об/мин)





Нормальные характеристики насоса Д630-90 ( $n_{\text{НОМ}}=1450$  об/мин)

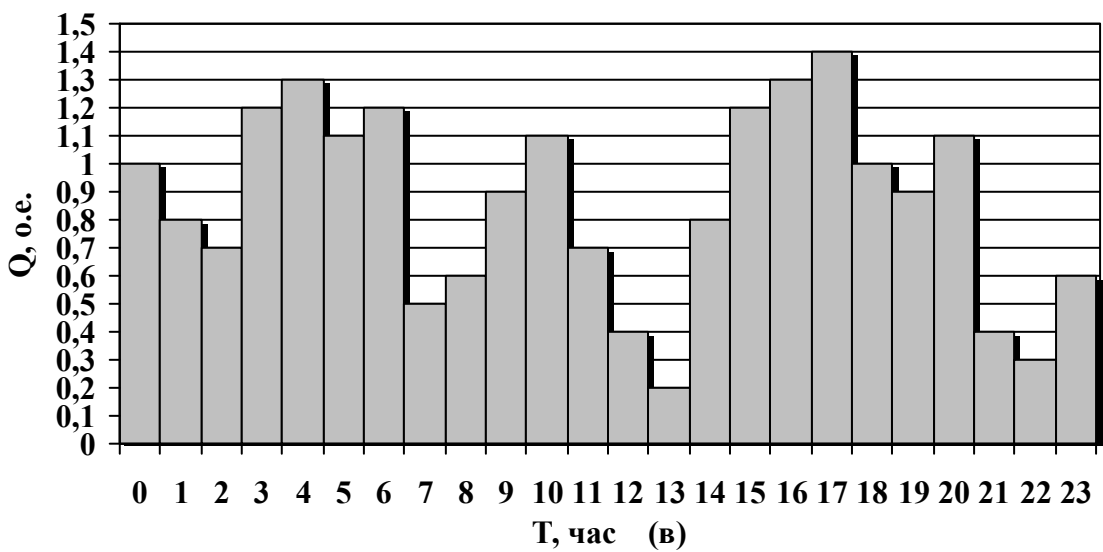
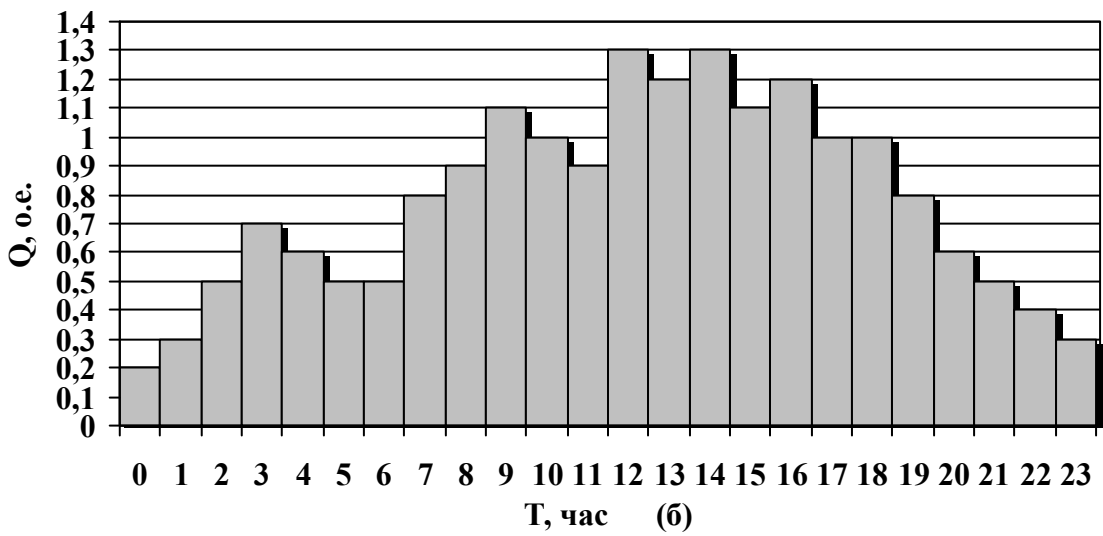
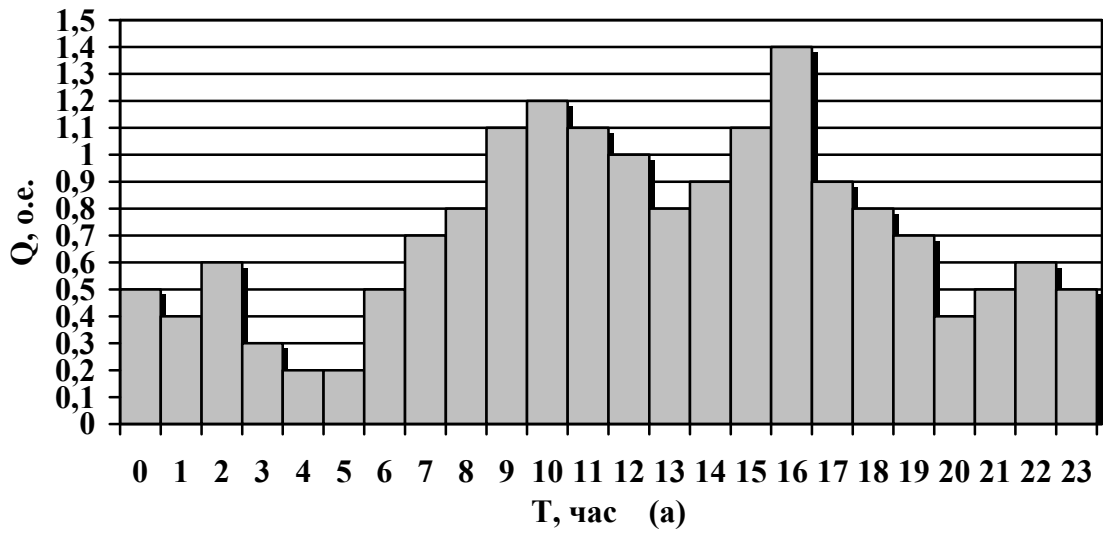


Нормальные характеристики насоса ЦС-65 (пном=2950 об/мин)

## Приложение В

(обязательное)

Суточное изменение необходимой подачи насосной установки



## Приложение Г (справочное)

Технические данные асинхронных двигателей серии 4А

Типоразмер электро- двигателя	P <sub>2ном</sub> , кВт	S <sub>ном</sub> , %	S <sub>кр</sub> , %	M <sub>пуск</sub> /M <sub>ном</sub>	M <sub>макс</sub> /M <sub>ном</sub>	Энергетические показатели										Параметры схемы замещ., отн. ед.							
						КПД, %, при P <sub>2</sub> / P <sub>2ном</sub> , %					cos φ при P <sub>2</sub> / P <sub>2ном</sub> , %					X <sub>μ</sub>	В номинальном режиме				При корот- ком замыка- нии		
						25	50	75	100	125	25	50	75	100	125		R' <sub>1</sub>	X' <sub>1</sub>	R'' <sub>2</sub>	X'' <sub>2</sub>	R'' <sub>2п</sub>	R <sub>к.п</sub>	X <sub>к.п</sub>
n <sub>0</sub> =1500 об/мин																							
4A100S4Y3	3,0	4,4	31,0	2,0	2,4	82,0	7,5	71	71	80,5	0,83	0,87	0,88	0,89	0,88	3,8	0,017	0,097	0,013	0,1	0,047	0,12	0,14
4A100L4Y3	4,0	4,6	31,5	2,0	2,4	82,0	7,5	71	71	80,5	0,83	0,87	0,88	0,89	0,88	3,8	0,017	0,097	0,013	0,1	0,047	0,12	0,14
4A112M4Y3	5,5	3,6	25,0	2,0	2,2	82,0	7,5	71	71	80,5	0,83	0,87	0,88	0,89	0,88	3,8	0,017	0,097	0,013	0,1	0,047	0,12	0,14
4A132S4Y3	7,5	2,9	19,5	2,2	3,0	82,0	7,5	71	71	80,5	0,83	0,87	0,88	0,89	0,88	3,8	0,017	0,097	0,013	0,1	0,047	0,12	0,15
4A200L4Y3	45	1,6	10,0	1,4	2,5	89	94,5	93	93	92,0	0,83	0,87	0,89	0,90	0,91	6,1	0,014	0,088	0,011	0,11	0,031	0,058	0,16
4A225M4Y3	55	1,4	10,0	1,3	2,5	89	94,5	93	93	92,0	0,83	0,87	0,89	0,90	0,91	6,1	0,014	0,088	0,011	0,11	0,031	0,058	0,16
4A250M4Y3	90	1,3	9,5	1,2	2,3	89	92,5	93	93	91,0	0,73	0,87	0,87	0,90	0,91	5,0	0,024	0,098	0,014	0,12	0,03	0,054	0,15
4A280S4Y3	110	2,3	8,5	1,2	2,0	89,5	92,5	93	92,5	91	0,82	0,9	0,91	0,89	0,87	4,9	0,023	0,12	0,019	0,16	0,048	0,071	0,21
4A315S4Y3	160	1,4	6,5	1,3	2,2	89	94,5	93	93	92,0	0,83	0,87	0,89	0,90	0,91	6,1	0,014	0,088	0,011	0,11	0,031	0,058	0,19
4A355S4Y3	250	1,0	4,0	1,2	2,0	91	94,0	94,5	93,5	92,0	0,82	0,96	0,88	0,92	0,91	5,7	0,014	0,086	0,011	0,14	0,033	0,044	0,19

Продолжение таблицы Г

Типоразмер электро- двигателя	P <sub>2ном</sub> , кВт	S <sub>ном</sub> , %	S <sub>кр</sub> , %	M <sub>пуск</sub> /M <sub>ном</sub>	M <sub>макс</sub> /M <sub>ном</sub>	Энергетические показатели										Параметры схемы замещ., отн. ед.							
						КПД, %, при P <sub>2</sub> / P <sub>2ном</sub> , %					cos φ при P <sub>2</sub> / P <sub>2ном</sub> , %					X <sub>μ</sub>	В номинальном режиме				При корот- ком замыка- нии		
						25	50	75	100	125	25	50	75	100	125		R' <sub>1</sub>	X' <sub>1</sub>	R'' <sub>2</sub>	X'' <sub>2</sub>	R'' <sub>2Π</sub>	R <sub>к.Π</sub>	X <sub>к.Π</sub>
n <sub>0</sub> =3000 об/мин																							
4A90L2Y3	3,0	4,3	32,5	2,1	2,5	82,0	7,5	71	71	80,5	0,83	0,87	0,88	0,89	0,88	3,8	0,017	0,097	0,013	0,1	0,047	0,12	0,11
4A100S2Y3	4,0	3,3	28,0	2,0	2,5	82,0	7,5	71	71	80,5	0,83	0,87	0,88	0,89	0,88	3,8	0,017	0,097	0,013	0,1	0,047	0,12	0,11
4A100L2Y3	5,5	3,4	29,0	2,0	2,5	82,0	7,5	71	71	80,5	0,83	0,87	0,88	0,89	0,88	3,8	0,017	0,097	0,013	0,1	0,047	0,12	0,11
4A225M2Y3	55	1,8	11,0	1,4	2,5	89	94,5	93	93	92,0	0,83	0,87	0,89	0,90	0,91	6,1	0,014	0,088	0,011	0,11	0,031	0,058	0,16
4A250M2Y3	90	1,4	10,0	1,2	2,5	84	90	92	92	91,5	0,71	0,84	0,89	0,90	0,90	5,2	0,02	0,078	0,016	0,13	0,03	0,05	0,16
4A280S2Y3	110	2,0	8,5	1,2	2,2	82,0	88,5	91	91	90,5	0,83	0,87	0,88	0,89	0,88	3,8	0,017	0,097	0,013	0,1	0,03	0,05	0,2
4A315M2Y3	200	1,9	9,0	1,0	1,9	89	94,5	93	93	92,0	0,83	0,87	0,89	0,90	0,91	6,1	0,014	0,088	0,011	0,11	0,028	0,038	0,14
4A355S2Y3	250	1,9	7,0	1,0	1,9	87	91,0	92	93	92,0	0,83	0,86	0,88	0,90	0,91	5,7	0,014	0,088	0,011	0,11	0,033	0,044	0,14
4A355M2Y3	315	2,0	7,5	1,0	1,9	89	92,0	93	93	92,0	0,83	0,87	0,89	0,90	0,91	6,1	0,014	0,088	0,011	0,11	0,033	0,044	0,16