

## УПРАВЛЕНИЕ ШАХТНОЙ ВОДООТЛИВНОЙ УСТАНОВКОЙ В АВАРИЙНЫХ И АНОМАЛЬНЫХ РЕЖИМАХ РАБОТЫ

**Бессараб В.И., Федюн Р.В., Попов В.А.**

Донецкий национальный технический университет, г. Донецк  
кафедра автоматики и телекоммуникаций

E-mail: bvi@fcita.dn.ua

### *Abstract*

*Bessarab V.I., Fedyun R.V., Popov V.A. Control of the mining drainage plant in emergency and abnormal modes of the work. In article are considered questions of the control by draining of a coal mines in emergency and abnormal operating modes. The analysis of emergency and abnormal modes and their influence on functioning of draining is executed. The necessary set of controllable technological parameters drainage plant is offered. The choice of a way of control by drainage plant in considered operating modes is carried out. Principles of construction the control system by draining are considered.*

**Общая постановка проблемы.** Водоотлив горных предприятий является важным элементом всего комплекса горно-технического оборудования, и его надежная работа во многом определяет бесперебойность и безопасность ведения горных работ по добыче полезных ископаемых. Главная водоотливная установка современной угольной шахты — крупный потребитель электроэнергии (до 25 % общего расхода энергии шахты). Экономичная работа водоотливной установки шахты и рациональный режим электропотребления существенно влияют на экономические показатели всего горного предприятия.

Экономичная и надежная работа водоотливной установки во многом определяется условиями фактического режима работы насоса на внешнюю сеть, которые в процессе эксплуатации постоянно изменяются вследствие повышенного износа оборудования при перекачке вод со взвесями, кислых вод, «зарастании» элементов трубопроводной сети, кавитационных явлений, зашламления водосборных емкостей. В результате совокупного воздействия этих факторов изменяются рабочие параметры насосной установки: подача, напор, к.п.д., что в свою очередь приводит к перерасходу электроэнергии на водоотлив.

Негативное влияние вышеперечисленных факторов на водоотливную установку приводит возникновению аварийных и аномальных режимов, что означает функционирование водоотлива в режимах работы, отличающихся от номинальных.

Применяемые системы автоматизации водоотливных установок (ВАВ, ВАВ–1м) имеют ряд недостатков с точки зрения рассматриваемой проблемы. Во-первых, данные системы автоматизации реализуют функцию защиты от аварийных режимов, а не управление ними. Во-вторых, существующие системы осуществляют контроль только основных аварийных режимов. В-третьих, не одна из существующих систем автоматизации не рассматривает главную водоотливную установку как многомерный, многосвязный объект и не учитывает взаимовлияния параметров водоотлива. Таким образом, вопросы управления главным водоотливом угольной шахты в аварийных и аномальных режимах являются актуальными.

Необходимость исследований аномальных и аварийных режимов работы и разработки эффективной системы контроля, диагностики и защитного управления продиктована и проведенными статистическими исследованиями по вопросам надежности и экономичности функционирования водоотливных установок [2]. Данные этих исследований говорят о большом числе отказов в работе шахтных водоотливных установок. Вероятность

безотказной работы водоотливной установки довольно низка и после 2000 ч эксплуатации составляет 0,15 для главных и 0,3 для участковых установок, а после 3000 ч — соответственно 0,03 и 0,08.

**Постановка задач исследования.** Для построения системы управления главной водоотливной установкой угольной шахты в аварийных и аномальных режимах необходимо решить следующие задачи:

- определение всех существующих аварийных и аномальных режимов работы водоотливной установки;
- исследование влияния аномальных и аварийных режимов на характеристики и эффективность функционирования водоотливной установки;
- исследование интервалов изменения параметров водоотливной установки для серийных насосных агрегатов в аварийных и аномальных режимах работы;
- выбор оптимального набора контролируемых технологических параметров и разработка принципов построения системы защитного управления водоотливной установкой.

**Решение поставленных задач и результаты исследований.** Для осуществления водоотлива применяется различное оборудование: центробежные насосы, объемные насосы, эрлифты, гидроэлеваторы. Анализ технологических особенностей, достоинств и недостатков различных схем показывает, что наиболее приемлемыми для водоотлива современных угольных шахт являются водоотливные установки с центробежными насосами и эрлифтами. Сравнительная характеристика работы эрлифтов и центробежных насосов показала преимущество последних: основной недостаток эрлифта — низкий к.п.д. установки, примерно в 1,5–1,7 раза ниже, чем у насосной. Поэтому для дальнейших исследований принимается водоотливная установка, оснащенная центробежными секционными насосами [1,3].

Состояние водоотливной установки описывается следующим вектором параметров:

$$\bar{X} = |Q, H, H_B, H_\Gamma, N, E, \eta, \rho, Q_\Pi, d_H, d_B, L_H, L_B, \alpha_H, \alpha_B, v_{PA3}|$$

где  $Q$  — подача водоотливной установки;  $H$  — напор водоотливной установки;  $H_B$  — вакуумметрическая высота всасывания;  $H_\Gamma$  — геодезическая высота нагнетания;  $N$  — мощность водоотлива;  $E$  — удельные энергозатраты водоотлива;  $\eta$  — коэффициент полезного действия;  $Q_\Pi$  — часовой приток шахты;  $\rho$  — плотность жидкости;  $d_H$  — диаметр напорного трубопровода;  $d_B$  — диаметр напорного трубопровода;  $d_B$  — диаметр всасывающего трубопровода;  $L_H$  — длина напорного трубопровода;  $L_B$  — длина всасывающего трубопровода;  $\alpha_H$  — гидравлическое сопротивление напорного трубопровода;  $\alpha_B$  — гидравлическое сопротивление всасывающего трубопровода,  $v_{PA3}$  — расход воды, проходящей через разгрузочное устройство.

Рабочий режим водоотливной установки можно определить аналитическим или графическим решением системы уравнений характеристик насоса (1) и напорного трубопровода (2) [3]:

$$H_H(Q) = H_{KO} + A \cdot Q - B \cdot Q^2, \tag{1}$$

$$H_{TP}(Q) = H_\Gamma + \alpha_H \cdot Q^2, \tag{2}$$

где  $A, B$  — постоянные коэффициенты для выбранного типа насоса.

Точка А пересечения характеристик (рис. 1) определяет рабочий режим водоотливной установки.

Кроме напорных характеристик насоса и трубопровода, на рис. 1 приведены кривые КПД насоса, удельных энергозатрат  $E$ , вакуумметрической высоты всасывания  $H_B$ . Точкой А определяются рабочие параметры насоса:  $Q_P, H_P, \eta_P, E_P, H_{BP}$ . Оптимальный режим работы водоотливной установки наблюдается при нахождении ее рабочей точки А в зоне промышленного использования — от  $Q_{min}$  до  $Q_{max}$  (рис. 1).

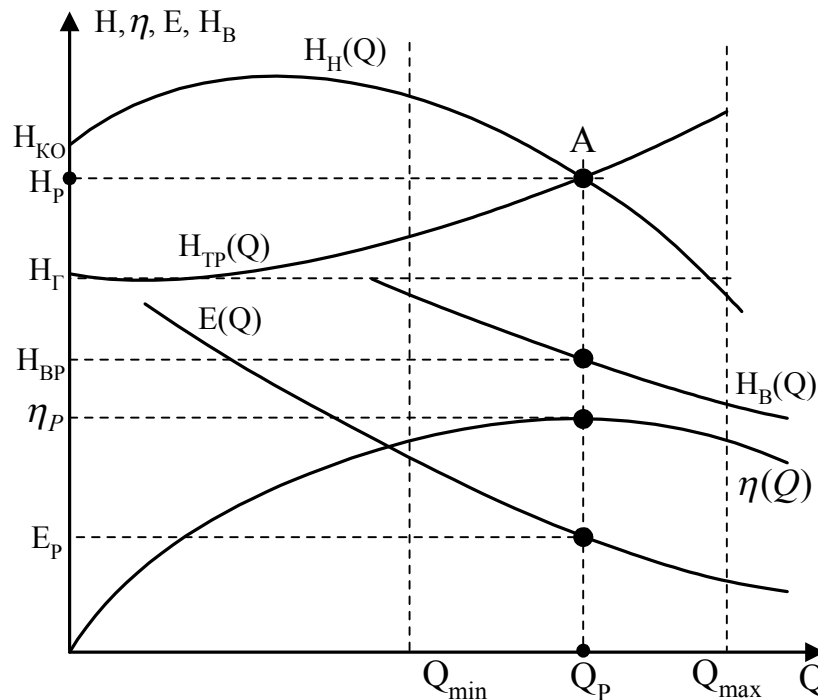


Рисунок 1 — Параметры рабочего режима водоотливной установки

Одна из существенных особенностей функционирования водоотливной установки — непостоянство ее рабочих параметров (подачи, напора, КПД, энергозатрат) в процессе эксплуатации. Объясняется это тяжелыми условиями эксплуатации, особенно перекачиванием кислых и загрязненных вод. Несмотря на то, что в водосборнике, где скорость движения воды невелика предусматривается осветление воды от твердых взвешенных частиц, около 40% твердой взвеси удаляется насосами, что приводит их к интенсивному износу. Ресурс машинного времени насосов составляет в среднем 500...700 ч, а в соответствии с паспортными данными на чистой воде они могут работать до 6000 ч [2].

В результате совокупного воздействия этих негативных факторов изменяются рабочие параметры насоса:  $Q_P, H_P, \eta_P, E_P, H_{BP}$ , рабочая точка A выходит их зоны оптимальных режимов, что в свою очередь приводит к перерасходу электроэнергии на процесс водоотлива и увеличению эксплуатационных затрат на содержание комплекса водоотлива шахты. На рисунке 2 показаны изменения характеристик водоотливной установки в процессе эксплуатации и траектория рабочей точки A–A<sub>1</sub>.

Характер траектории рабочей точки объясняется тем, что в начальный период параметры рабочего режима изменяются в основном за счет износа рабочего колеса насоса, а затем сказывается снижение пропускной способности трубопровода.

Учитывая, что ухудшение рабочих параметров происходит в результате совокупной перемены характеристик насоса и трубопровода, для определения рабочей точки необходим контроль как минимум двух параметров: подачи и напора. Кроме того, по параметрам рабочей точки нельзя точно определить КПД насоса в связи с изменением характеристики КПД. Поэтому для оценки эффективности эксплуатации водоотливной установки необходимо измерить подачу, напор, мощность и определить фактический КПД расчетным путем.

К аварийным режимам работы относят такие режимы, при которых дальнейшее функционирование водоотлива невозможно (разрыв напорного трубопровода, гидравлический удар, разгерметизация всасывающего трубопровода и т.п.). К аномальным режимам работы относят такие режимы, при которых снижается эффективность

функционирования водоотливной установки (увеличение расхода воды на разгрузку, выход рабочей точки водоотливной установки за зону промышленного использования и т.п.).

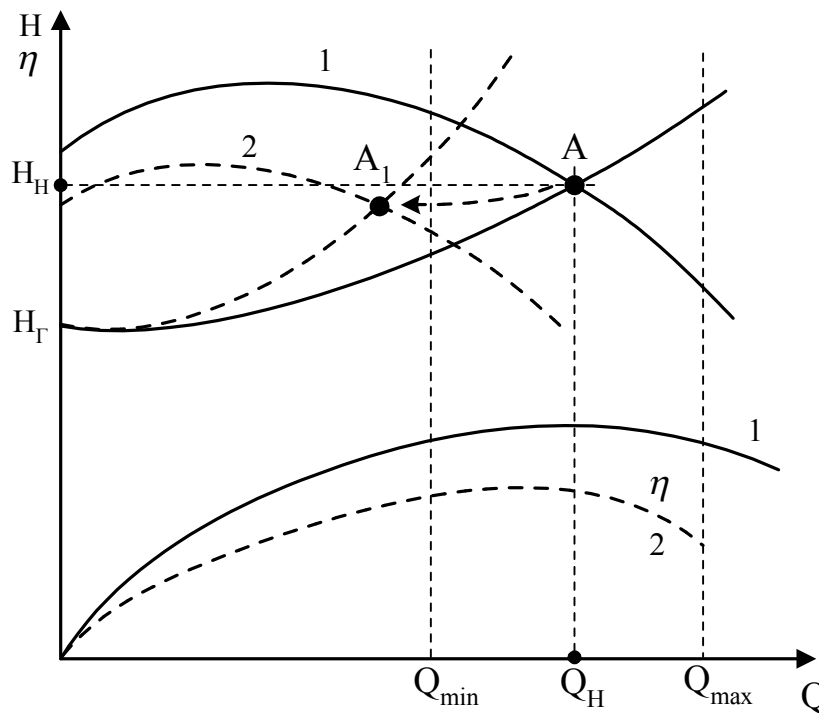


Рисунок 2 — Изменение характеристик водоотливной установки в процессе эксплуатации

Выполненный выше анализ особенностей функционирования водоотлива позволяет определить аномальные и аварийные режимы, которые могут возникнуть при работе водоотливной установки:

- перегрев подшипников насоса и двигателя;
- некачественная заливка главного насоса;
- насос не вышел на рабочий режим за заданное время;
- снижение подачи насоса ниже допустимой;
- снижение напора ниже допустимого;
- прорыв нагнетательного трубопровода;
- закупорка нагнетательного трубопровода;
- закупорка всасывающего трубопровода;
- разгерметизация всасывающего трубопровода;
- задвижка на нагнетательном трубопроводе полностью не открыта или не закрыта;
- кавитация;
- насос вышел из зоны промышленного использования;
- увеличение расхода воды на разгрузку;
- гидравлический удар в нагнетательном трубопроводе;
- аварии приводного электродвигателя.

Анализ отказов и причин их возникновения свидетельствуют, что в период эксплуатации водоотливной установки возникают как внезапные, так и постепенные отказы. Первые связаны с дефектами заводского изготовления, качеством монтажа и проявляются в основном в период приработки. Вторые имеют место в установившиеся режимы эксплуатации и связаны с эксплуатационным износом узлов водоотливной установки. Параметры узлов ухудшаются постепенно, достигают граничных значений, после чего наступает отказ. При этом часть узлов ухудшает свои параметры без видимого изменения

показателей экономичности (элементы электрической части установки), другие (механическая часть) вызывают изменение электрических и технологических параметров (подачи, напора, электропотребления, КПД установки).

Опытом эксплуатации водоотливных установок установлено, что на надежность и экономичность функционирования водоотлива существенно влияют неисправности ряда элементов трубопроводной сети. Это, в первую очередь, относится к работе всасывающего трубопровода, а именно приемного устройства (приемная сетка и приемный клапан). В результате увеличиваются сопротивление и вакуум в подводящем трубопроводе, что приводит не только к снижению экономичности насоса, но и зачастую к полной потере его работоспособности из-за возникновения кавитационных режимов и разрушений рабочего колеса. К такому же результату приводит незначительная разгерметизация подводящей части трубопровода. Отрицательное влияние кавитации на водоотливную установку проявляется в увеличении потерь энергии, усилении шума и вибрации, износа рабочих колес вследствие кавитационной эрозии. Выполненные аналитические и экспериментальные исследования аварийных и аномальных режимов всасывающего трубопровода показали, что все эти режимы оказывают непосредственное влияние на вакуум в подводящем трубопроводе. Поэтому предлагается интегрально контролировать исправность подводящей части трубопровода по фактическому вакууму.

На общую эффективность функционирования водоотливной установки влияет работа разгрузочного устройства. Величиной утечек воды через разгрузку определяется объемный КПД насоса:

$$\eta_{об} = \frac{Q}{Q + v_{РАЗ}}. \quad (3)$$

Выражение (3) показывает, что увеличение утечек воды на разгрузку приводит к снижению объемного КПД насоса. Расход воды на разгрузку не должен превышать (2–3)% от производительности насоса.

В напорной части трубопровода самыми низко надежными элементами являются обратный клапан и задвижка с электроприводом. Отказы или неточности в работе последних приводят к повышению сопротивления трубопровода и снижению его пропускной способности.

Рассмотрим вопросы поведения системы «насос-сеть» при разрыве нагнетательного трубопровода.

В случае разрыва трубопровода общее сопротивление сети уменьшается, подача насоса до места утечки возрастает от номинальной и, следовательно, расход до места разрыва возрастает на величину утечки. За местом разрыва расход снижается. Кроме того, будет наблюдаться снижение давления в выходном патрубке и рост потребляемой мощности. При разрыве нагнетательного трубопровода величина изменения параметров  $Q$  и  $H$  зависит от места возникновения разрыва. Нагнетательный трубопровод современных водоотливных установок глубоких шахт достигает большой длины. Разрыв в нижней части трубопровода значительно уменьшает сопротивление трубопровода и изменяет  $Q$  и  $H$ . Чем дальше от насоса разрыв, тем меньше его влияние на рабочую точку водоотливной установки. Кроме этого, влияние на изменение параметров  $Q$  и  $H$  оказывает и величина утечки. Чем больше утечка, тем сильнее ее влияние на характеристики рабочей точки водоотлива.

Таким образом, исправность напорной части можно контролировать по КПД трубопровода, потерям подачи и напора.

Выполненный анализ аварийных и аномальных режимов позволяет перейти к выбору необходимого набора контролируемых технологических параметров, а также метода управления водоотливом.

Выполненные исследования аварийных и аномальных режимов функционирования водоотливной установки показали, что основными параметрами, определяющими работу

водоотлива и изменяющимися при аварийных и аномальных режимах, являются напор  $H$  и подача  $Q$ . Поэтому однозначно требуется контроль напора  $H$  и подачи  $Q$ .

Как было показано выше основным параметром, определяющим состояние всасывающего трубопровода, является вакуум. Для определения кавитации можно использовать несколько параметров по отдельности или их совокупность. Для надежного определения и эффективного управления явлением кавитации достаточно контролировать три параметра: напора  $H$ , подачи  $Q$  и вакуума во всасывающем трубопроводе  $H_B$ . Начало кавитации определяется по следующим состояниям этих параметров: напор  $H$  снижается, подача  $Q$  незначительно возрастает и вакуум во всасывающем трубопроводе  $H_B$  — растет.

Расход воды через разгрузку определяет состояние узла разгрузки и объемный КПД насоса. Поэтому на устройство разгрузки необходимо устанавливать чувствительный расходомер.

Рассмотрим вопрос о контроле утечек в нагнетательном трубопроводе. Различают следующие способы контроля утечек: максимальный по расходу — фиксирует увеличение расхода во входном сечении нагнетательного трубопровода; минимальный способ контроля по расходу — фиксирует снижение расхода в выходном сечении; минимальный способ контроля по напору — фиксирует снижение напора; дифференциальный способ контроля — фиксирует разность расходов в выходном и входном сечениях нагнетательного трубопровода.

Так как напорная характеристика и кривая мощности насоса при разрыве трубопровода изменяются мало, то изменение подачи насоса будет более резким чем изменение напора и мощности. Это свидетельствует о преимуществе максимального способа контроля по расходу в сравнении с минимальным способом контроля по давлению и максимальным по мощности.

Максимальный способ контроля утечек по расходу неприемлем для шахтных водоотливных установок, для которых характерно  $H_T = (0,8 - 0,95) \cdot H_H$ . В этом случае, данный способ контроля позволяет защитить только до 1/3 части трубопровода. Поэтому, для контроля разрыва нагнетательного трубопровода необходимо применять минимальный контроль по расходу или дифференциальный контроль по расходу.

Управление параметрами рабочего режима насосной установки может осуществляться несколькими способами: изменением частоты вращения приводного электродвигателя с помощью тиристорных преобразователей частоты; изменением характеристики сети с помощью управляемой задвижки; подводом воздуха во всасывающую систему насоса. Каждый способ регулирования имеет как свои достоинства, так и недостатки.

При регулировании режима работы водоотливной установки изменением частоты вращения приводного электродвигателя минимальное снижение частоты вращения определяется устойчивостью режимов [3]:

$$n_{\min} = n \sqrt{\frac{H_T}{H_{0\min}}},$$

где  $n$  — асинхронная частота вращения данного электродвигателя;  $n_{\min}$  — минимально допустимая частота при регулировании;  $H_T$  — геометрическая высота водоподъема;  $H_{0\min}$  — напор насоса при нулевой подаче и асинхронной частоте вращения.

Напорная характеристика насоса  $H_H$  при нормальной частоте вращения  $n$  и характеристика трубопровода  $H_{TP}$  определяют рабочую точку системы "насос-трубопровод" (точка 2) в номинальном режиме работы (рис.3,а).

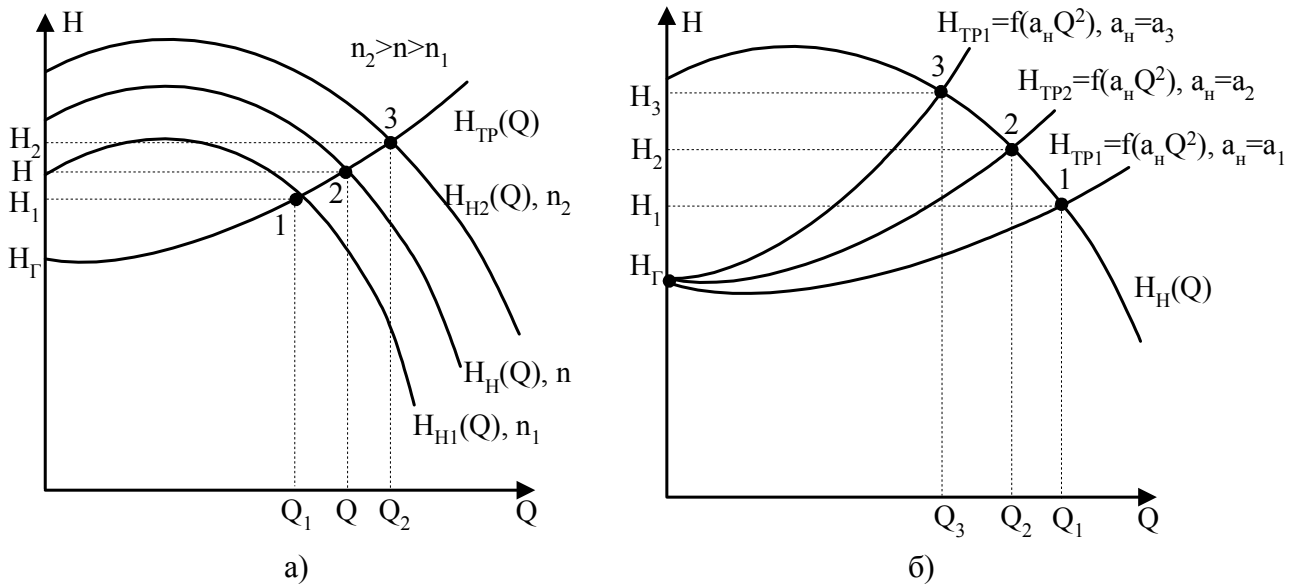


Рисунок 3 — Способы управления рабочим режимом водоотливной установки  
 а) изменением частоты вращения приводного электродвигателя;  
 б) изменением характеристики сети с помощью управляемой задвижки

Режим работы водоотливной установки определяется двумя основными параметрами — напор  $H$  и подача  $Q$ . При изменении частоты вращения соответствующим образом будет изменяться напорная характеристика насоса, рабочая точка водоотливной установки, а значит и параметры  $H$  и  $Q$  (рис.3,а). Напорные характеристики насоса при изменении частоты от  $n_1$  до  $n_2$  обеспечивают изменение параметров рабочего режима от  $(Q_1, H_1)$  до  $(Q_2, H_2)$ . Точки 1, 2, 3 лежат на напорной характеристике внешней сети (трубопровода)  $H_{TP}$  и определяют рабочие режимы водоотлива при изменении частоты вращения  $n_2 > n > n_1$ .

Регулирование изменением частоты вращения ротора имеет следующие достоинства: универсальность – возможность достижения подач насосов как меньших, так и больших номинальной; экономичность — расход энергии на регулирование определяется к.п.д. устройств, применяемых для изменения частоты вращения. К.п.д. при правильном подборе может быть достаточно высоким. К недостаткам следует отнести ограниченную возможность регулирования в сторону снижения подач из-за возможной потери устойчивости рабочего режима.

Регулирование рабочего режима водоотливной установки может осуществляться изменением напорной характеристики сети при неизменной характеристике насоса. Наиболее применяемая практическая реализация данного способа управления — дросселирование нагнетательного трубопровода управляемой задвижкой (рис.3,б).

Закрывая или открывая управляемую задвижку, мы меняем сопротивление сети  $a_n \cdot Q^2$  (рис.3,б), вследствие чего изменяется напорная характеристика трубопровода. Наклон напорной характеристики трубопровода  $H_{TP}$  определяется сопротивлением трубопровода  $a_n$ . Чем больше прикрыта управляемая задвижка, тем больше сопротивление трубопровода ( $a_3 > a_2 > a_1$ ), и тем круче пройдет характеристика сети (рис.3,б). Изменение характеристики трубопровода ( $H_{TP1} \rightarrow H_{TP2} \rightarrow H_{TP3}$ ) приводит к изменению рабочего режима водоотливной установки (рис.3,б).

Преимущества этого способа регулирования такие: простота, надежность, отсутствие необходимости в дорогостоящем оборудовании. Недостатком этого способа является

увеличение удельных энергозатрат на откачку воды, необходимость применения специальных управляемых задвижек, имеющих линеаризованную характеристику.

Очень много исследований посвящено регулированию рабочих параметров насоса подводом воздуха в его всасывающую систему. Отношение исследователей к данному способу регулирования неоднозначно. На начальных стадиях исследований этот способ считался перспективным и экономичным: низкий расход энергии на регулирование, относительно большая глубина регулирования по подаче. Однако дальнейшие исследования [4] показали, что подсосы и попадание воздуха во подводящую систему насоса отрицательно сказывается на его работе. Недостатки этого способа регулирования: возможность регулирования только на снижение подачи, возможность срыва работы насоса при большом расходе воздуха, сложная система управления. Подсосы воздуха вызывают резкое ухудшение акустических и вибрационных характеристик, пульсации напора, подачи, мощности, давления на входе. Особенно отрицательно попадание воздуха влияет на долговечность и надежность гидравлического разгрузочного устройства. Учитывая все эти факторы, следует признать способ регулирования впуском воздуха недопустимым для горного водоотлива.

Таким образом, при построении системы автоматического управления аварийными и аномальными режимами работы водоотливной установки необходимо применение комбинации двух способов управления — изменение частоты вращения приводного электродвигателя и дросселирование нагнетательного трубопровода управляемой задвижкой.

#### **Выводы.**

1. В процессе эксплуатации водоотливной установки возникают различные аварийные и аномальные режимы работы, что объясняется тяжелыми условиями эксплуатации, особенно перекачиванием кислых и загрязненных вод.

2. Выполненный анализ возникающих аварийных и аномальных режимов позволил установить степень их влияния на эффективность функционирования водоотливной установки и осуществить выбор необходимого числа контролируемых технологических параметров.

3. Для функционирования системы управления водоотливной установкой в аварийных и аномальных режимах необходим контроль следующих технологических параметров: подачи насоса, расхода на выходе нагнетательного трубопровода, вакуума в подводящем трубопроводе, напора на входе в нагнетательный трубопровод, расхода воды через разгрузку.

4. Выполненное аналитическое исследование способов управления водоотливом показало, что наиболее эффективным будет сочетание управления изменением частоты вращения приводного электродвигателя и дросселированием нагнетательного трубопровода управляемой задвижкой.

#### **Литература**

1. Попов В.М. Шахтные насосы (теория, расчет и эксплуатация). — М.: Недра, 1993.
2. Тимохин Ю.В., Адам О.В., Антонов Э.И., Кошкальда Л.И., Паламарчук Н.В. Надежность высокооборотных насосов. Сборник научных трудов. Горная механика. Выпуск 1, часть 2., Донецк, 1991. — С. 81–87.
3. Гейер В.Г., Тимошенко Г.М. Шахтные вентиляторные и водоотливные установки. — М.: Недра, 1987. — 270 с.
4. Шевчук С.П., Русаловский А.В., Матвиенко Н.П. Модернизация аппаратуры автоматизации шахтных водоотливных установок.// Уголь Украины, октябрь, 1988.— С. 27–29.