

УДК 622.5:65.011.56

Н.В. Червинская, В.И. Бессараб, В.В. Червинский
Донецкий национальный технический университет, г. Донецк
кафедра автоматизации и телекоммуникаций
E-mail: nashenka@mail.ru

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ДИНАМИКИ КОМПЛЕКСА ШАХТНОГО ВОДООТЛИВА В БАЗИСЕ MAX-PLUS АЛГЕБРЫ

Abstract

Chervinskaya N.V., Bessarab V.I., Chervinskiy V.V. Modeling of mine pumping complex dynamic processes in Max-Plus algebra basis. In the article the problem of mathematical model structure development and construction of full mine pumping complex with use of Max-Plus algebra tool is considered. The canonical form of mathematical model is proposed, the model construction is carried out, the generalized composite mine pumping system is assumed as the object for modeling. The model analysis is made in different dynamic conditions. The magnitude of water drainage sumps' volume that provide whole mine pumping complex' working in the off-peak periods of power system load is obtained.

Keywords: discrete-continuous object, design, dynamic mode, Max-Plus algebra, diagram of Gantt.

Анотація

Червінська Н.В., Бессараб В.І., Червинський В.В. Моделювання процесів динаміки комплексу шахтного водовідведення в базису Max-Plus алгебри. Розглянуто задачу розробки структури й побудови математичної моделі повного комплексу шахтного водовідведення з використанням апарату Max-Plus алгебри. Запропоновано канонічну форму математичної моделі, проведено побудову моделі, в якості об'єкту для моделювання прийнято узагальнену комбіновану схему східчастого водовідливу. Виконано дослідження на отриманій моделі в різних режимах. Отримано значення об'ємів водозбірників, при яких забезпечується робота комплексу водовідливу в періоди позатикового навантаження енергосистеми.

Ключові слова: дискретно-безперервний об'єкт, моделювання, динамічний режим, Max-Plus алгебра, діаграма Гантта.

Аннотация

Червинская Н.В., Бессараб В.И., Червинский В.В. Моделирование процессов динамики комплекса шахтного водоотлива в базисе Max-Plus алгебры. Рассмотрена задача разработки структуры и построения математической модели полного комплекса шахтного водоотлива с использованием аппарата Max-plus алгебры. Предложена каноническая форма математической модели, проведено построение модели, в качестве объекта для моделирования принята обобщенная комбинированная схема ступенчатого водоотлива. Выполнены исследования на полученной модели в различных режимах. Получены значения объемов водосборников, при которых обеспечивается работа комплекса водоотлива в периоды внепиковой нагрузки энергосистемы.

Ключевые слова: дискретно-непрерывный объект, моделирование, динамический режим, Max-Plus алгебра, диаграмма Гантта.

Общая постановка проблемы. Одним из наиболее важных горнотехнических процессов в условиях современных горных предприятий является технологический процесс водоотведения. От надежности работы комплекса шахтного водоотлива зависит бесперебойность и безопасность ведения горных работ.

Для большинства глубоких шахт водоотливные комплексы представляют собой сложные территориально распределенные динамические объекты, состоящие из нескольких технологических элементов (модулей): нескольких участковых и одного или нескольких главных водоотливов [1,2].

В работах [2,3] предложены варианты синтеза автоматических систем управления шахтным многоступенчатым водоотливом в динамических режимах. Рассматриваются различные технологические схемы многоступенчатого водоотлива, определяется схема «из насоса в насос» как наиболее перспективная и предлагается система автоматизации, позволяющая вести оптимальное управление в переходных режимах по обобщенному квадратичному критерию качества. Однако предложенные решения рассматривают отдельно взятый участок водоотлива шахты и не учитывают, во-первых, всего комплекса водоотлива, и во-вторых, необходимости работы в соответствии с суточными периодами внепикового потребления электроэнергии горнодобывающим предприятием. Таким образом, актуальным направлением исследований является разработка системы управления комплексом водоотлива горнодобывающего предприятия на основе современных методов и средств автоматизации во взаимосвязи с системой внепикового энергопотребления шахты.

Постановка задач исследования.

Построение САУ комплекса шахтного водоотлива предполагает разработку полной математической модели технологического процесса водоотведения.

Рассматриваемый объект состоит из элементов различной природы: поведение одних описывается непрерывными процессами, имеющими конечную длительность, а других — дискретными процессами. Таким образом, комплекс шахтного водоотлива может быть отнесен к дискретно-непрерывному классу. Формально, дискретно-непрерывные системы могут быть представлены как динамические системы, описанные с использованием классических подходов в пространстве состояний. Однако дифференциальные уравнения, которые применяются для анализа систем во временной области, не могут описать специфику дискретно-непрерывных систем, динамика которых управляется событиями и в структуру которых входят дискретные состояния.

В настоящее время существует несколько подходов к моделированию и анализу дискретно-непрерывных систем: теория очередей, теория конечных автоматов, Мах-Plus алгебра, обобщенные марковские процессы, сети Петри и т.д. [5]. Для описания динамики процессов удобно использовать аппарат Мах-plus алгебры.

В данной работе рассмотрена задача разработки структуры и построения математической модели комплекса шахтного водоотлива с использованием аппарата Мах-plus алгебры.

Решение задач и результаты исследований.

Схемы ступенчатого водоотлива горнодобывающего предприятия можно разделить на схемы с промежуточным водосборником; схемы с последовательно соединенными насосами, расположенными на разных горизонтах — "из насоса в насос", комбинированные схемы. Каждая из таких технологических схем водоотлива имеет свои особенности, преимущества и недостатки [2,3].

На глубоких шахтах Донбасса на главном водоотливе применяются промежуточные водоотливные установки на нескольких горизонтах, также функционирующие по различным технологическим схемам (с промежуточными водосборниками на горизонтах или работающие «из насоса в насос»).

В качестве объекта для моделирования и исследования принята обобщенная комбинированная схема ступенчатого водоотлива, в которой используются промежуточные водосборники и последовательно соединенные насосы (рис.1).

Работу участкового водоотлива можно представить в виде периодически повторяющейся последовательности процессов и операций:

- заполнение участковых водосборников;
- включение и запуск насосов;
- перекачка воды в главный водосборник (работа насосов);
- выключение установки.

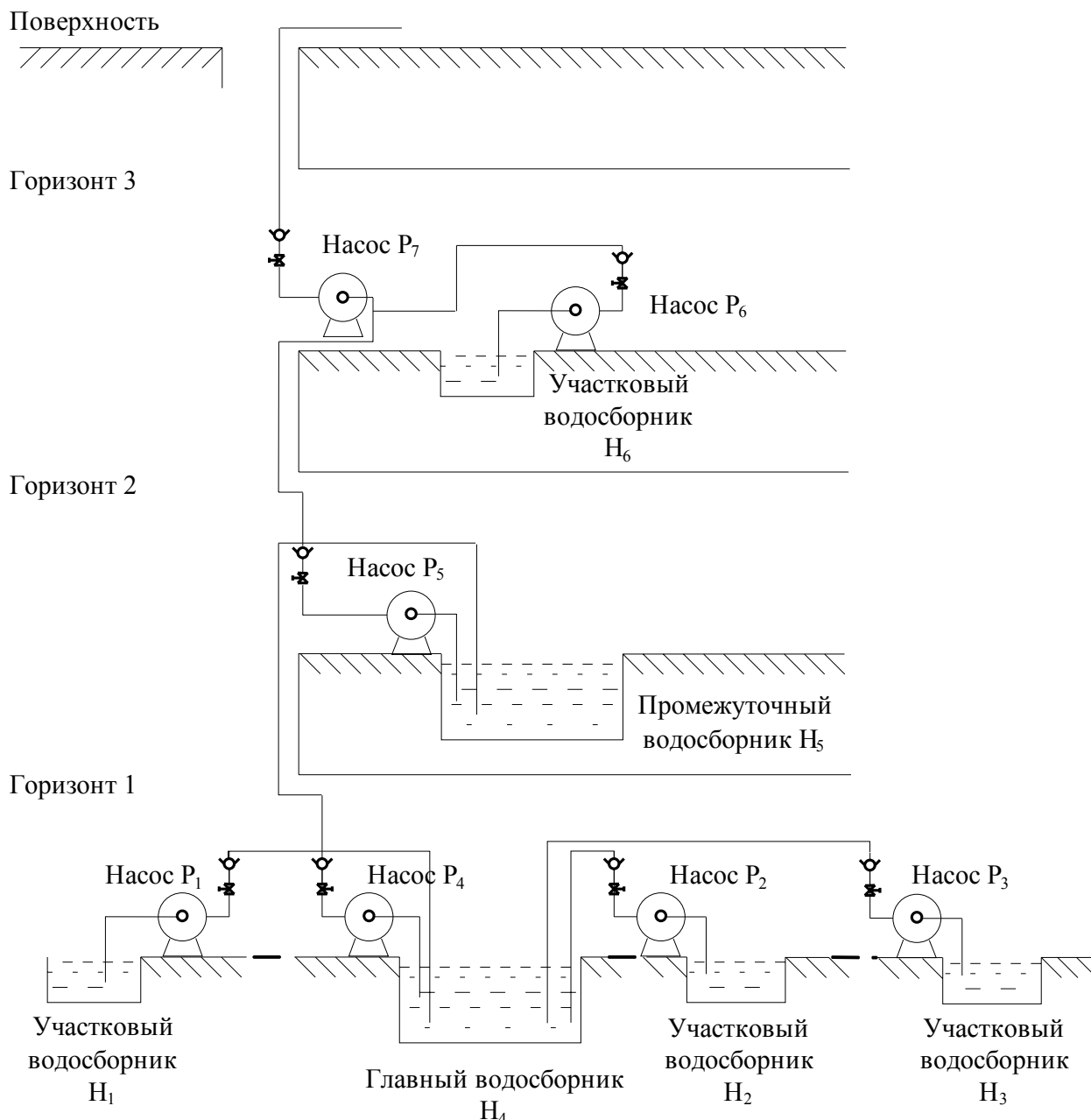


Рисунок 1 — Комбинированная схема ступенчатого водоотлива

Процесс заполнения участковых водосборников можно описать следующим образом. Естественный приток воды из горных выработок определяется с помощью формул Шези [1].

Таким образом, можно определить время, в течение которого i -й участковый водосборник заполняется в k -й раз. Обозначим это время $\tau_i(k)$.

$$\tau_i(k) = \frac{V_i}{v_i}, \tag{1}$$

где V_i — объем i -го участкового водосборника;
 v_i — скорость притока воды в i -й участковый водосборник.

Технологический процесс водоотведения для приведенной схемы может быть описан следующим образом. На горизонте 1 расположены три водосборника (H_1, H_2, H_3), которые заполняются естественным притоком воды из выработок. По достижении уровнем воды в каждом из них верхней допустимой отметки включается соответствующая насосная станция (P_1, P_2, P_3), которая перекачи-

вает воду в главный водосборник H_4 . Процесс заполнения главного водосборника состоит из нескольких циклов включения участковых насосных станций. Момент запуска насосных станций P_4 главного водоотлива формируется аналогично участковым, т.е. по достижении верхнего допустимого уровня. Однако необходимо учитывать, что в главный водосборник вода поступает как вследствие естественного притока из выработок, так и в результате перекачивания из участковых водосборников. Из главного водосборника H_4 вода перекачивается в промежуточный водосборник H_5 , расположенный на горизонте 2, а из него — на поверхность через насос P_7 , расположенный на горизонте 3 и подключенный по схеме "из насоса в насос".

Кроме того, на горизонте 3 также расположен участковый водосборник H_6 , заполняющийся естественным притоком воды, из которого вода с помощью насоса P_6 перекачивается в трубопровод главного водоотлива.

Обозначим момент времени, в который i -й участковый водосборник в k -й раз начнет заполняться как $u_i(k)$. По достижении водой верхнего допустимого уровня в этом водосборнике включается i -я насосная станция. Обозначим момент включения i -й насосной станции в k -й раз как $x_i(k)$. Время, в течение которого эта станция откачивает воду до нижнего уровня, зависит от объема водосборника и производительности насосов. Обозначим это время как $T_i(k)$. По достижении водой в водосборнике нижнего допустимого уровня станция автоматически отключается. Обозначим момент времени, в который в k -й раз насосные станции главного водоотлива заканчивают работу как $y(k)$.

Используя математический аппарат Max-Plus алгебры, опишем работу всех технологических элементов рассматриваемого дискретно-непрерывного объекта.

Для водосборника H_1 момент включения насосной станции P_1 в k -й раз можно определить следующим образом:

$$x_1(k+1) = \max(x_1(k) + T_1, u_1(k+1) + \tau_1) \quad (2)$$

Аналогичным образом можно определить k -е моменты включения насосных станций P_2 и P_3 :

$$\begin{aligned} x_2(k+1) &= \max(x_2(k) + T_2, u_2(k+1) + \tau_2) \\ x_3(k+1) &= \max(x_3(k) + T_3, u_3(k+1) + \tau_3) \end{aligned} \quad (3)$$

Время заполнения водосборников τ_1, τ_2, τ_3 определяется по формуле (1).

При определении k -го момента включения насосной станции P_4 для главного водосборника H_4 необходимо учитывать, что этот момент формируется с учетом циклов включения соответствующих участковых насосов P_1, P_2 и P_3 , а также с учетом естественного притока воды из выработок в водосборник H_4 :

$$\begin{aligned} x_4(k+1) &= \max(x_4(k) + T_4, x_1(k) + T_1 + \tau_1, x_2(k) + T_2 + \tau_2, \\ & x_3(k) + T_3 + \tau_3, u_4(k+1) + \tau_4) \end{aligned} \quad (4)$$

Время заполнения главного водосборника H_4 за счет естественного притока воды τ_4 рассчитывается для объема водосборника за вычетом притока из участковых водосборников H_1, H_2 и H_3 .

Для водосборника H_5 время включения насоса P_5 в k -й раз также формируется с учетом включения насоса P_4 и собственного естественного притока:

$$x_5(k+1) = \max(x_5(k) + T_5, x_4(k) + T_4 + \tau_4, u_5(k+1) + \tau_5) \quad (5)$$

Время заполнения промежуточного водосборника H_5 рассчитывается аналогично главному водосборнику H_4 , а участкового водосборника H_6 — аналогично водосборникам H_1, H_2 и H_3 .

Поскольку насосы P_5 и P_7 главного водоотлива подключены по схеме «из насоса в насос», их моменты включения и выключения должны быть согласованы. Кроме этого, работа насоса P_6 , расположенного на горизонте 3 и перекачивающего воду из участкового водосборника H_6 в трубопровод главного водоотлива, также должна быть согласована с работой насосов P_5 и P_7 .

Таким образом, k -е моменты включения насосных станций P_6 и P_7 могут быть определены следующим образом:

$$\begin{aligned} x_6(k+1) &= \max(x_6(k) + T_6, u_6(k+1) + \tau_6) \\ x_7(k+1) &= \max(x_7(k) + T_7, x_5(k) + T_5 + \tau_5, x_6(k) + T_6 + \tau_6, u_7(k+1) + \tau_7) \end{aligned} \quad (6)$$

Время, в течение которого из i -го водосборника насосная станция в k -й раз откачивает воду до нижнего уровня, можно определить с помощью следующей формулы:

$$T_i(k) = \frac{V_i}{Q_i} \quad (7)$$

где Q_i — подача i -го насоса.

Завершение k -го цикла работы всего комплекса водоотлива происходит в момент отключения насоса P_7 .

Тогда в соответствии с приведенным выше описанием, а также принятыми обозначениями и формой описания линейных систем в Max-plus алгебре [5,6] получим:

$$\begin{aligned} x(k+1) &= A \otimes x(k) \oplus B \otimes u(k+1) \\ y(k) &= C \otimes x(k) \end{aligned} \quad (8)$$

где:

$$A = \begin{bmatrix} T_1 & e & e & e & e & e & e \\ e & T_2 & e & e & e & e & e \\ e & e & T_3 & e & e & e & e \\ T_1 + \tau_1 & T_2 + \tau_2 & T_3 + \tau_3 & T_4 & e & e & e \\ e & e & e & T_4 + \tau_4 & T_5 & e & e \\ e & e & e & e & e & T_6 & e \\ e & e & e & e & T_5 + \tau_5 & T_6 + \tau_6 & T_7 \end{bmatrix}, \quad (9)$$

$$B = \begin{bmatrix} \tau_1 & e & e & e & e & e & e \\ e & \tau_2 & e & e & e & e & e \\ e & e & \tau_3 & e & e & e & e \\ e & e & e & \tau_4 & e & e & e \\ e & e & e & e & \tau_5 & e & e \\ e & e & e & e & e & \tau_6 & e \\ e & e & e & e & e & e & \tau_7 \end{bmatrix}, \quad (10)$$

$$C = [e \ e \ e \ e \ e \ e \ T_7]. \quad (11)$$

Проведем исследование полученной модели, задаваясь конкретными значениями параметров с учетом требований, предъявляемых к минимальному объему водосборников и подаче насосов [1].

Естественный приток воды в водосборники H_1 – H_6 :

$$v_1 = 20\text{м}^3 / \text{ч}, v_2 = 30\text{м}^3 / \text{ч}, v_3 = 21\text{м}^3 / \text{ч}, v_4 = 40\text{м}^3 / \text{ч}, v_5 = 30\text{м}^3 / \text{ч}, v_6 = 20\text{м}^3 / \text{ч}.$$

В соответствии с притоком воды в каждый водосборник подача насосов B_1 – B_7 :

$$Q_1 = 30\text{м}^3 / \text{ч}, Q_2 = 80\text{м}^3 / \text{ч}, Q_3 = 30\text{м}^3 / \text{ч}, Q_4 = 400\text{м}^3 / \text{ч},$$

$$Q_5 = 500\text{м}^3 / \text{ч}, Q_6 = 30\text{м}^3 / \text{ч}, Q_7 = 500\text{м}^3 / \text{ч}.$$

Считаем, что водосборники H_1 – H_6 имеют следующие объемы:

$$V_1 = 200\text{м}^3, V_2 = 300\text{м}^3, V_3 = 200\text{м}^3, V_4 = 1200\text{м}^3, V_5 = 1500\text{м}^3, V_6 = 200\text{м}^3.$$

Тогда матрицы A , B , C примут вид:

$$A = \begin{bmatrix} 6,67 & e & e & e & e & e & e \\ e & 3,75 & e & e & e & e & e \\ e & e & 6,67 & e & e & e & e \\ 16,67 & 13,75 & 16,19 & 3,00 & e & e & e \\ e & e & e & 15,50 & 3,75 & e & e \\ e & e & e & e & e & 6,67 & e \\ e & e & e & e & 13,75 & 16,67 & 4,25 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 10,00 & e & e & e & e & e & e \\ e & 10,00 & e & e & e & e & e \\ e & e & 9,52 & e & e & e & e \\ e & e & e & 12,50 & e & e & e \\ e & e & e & e & 10,00 & e & e \\ e & e & e & e & e & 10,00 & e \\ e & e & e & e & e & e & 10,42 \end{bmatrix}$$

$$C = \begin{bmatrix} e & e & e & e & e & e & 4,25 \end{bmatrix}$$

Сначала проведем исследование для нулевых начальных условий, т.е $x(0) = 0$. Моделирование и исследование поведения модели в различных режимах проводилось с помощью MP Toolbox пакета прикладных программ Matlab.

В Max-plus алгебре в качестве графического представления вектора состояний x во времени используются диаграммы Гантта, представляющие собой диаграммы последовательности операций. На рисунке 2 показана диаграмма Гантта для 2х циклов работы насосов, полученная при моделировании объекта с приведенными выше значениями параметров.

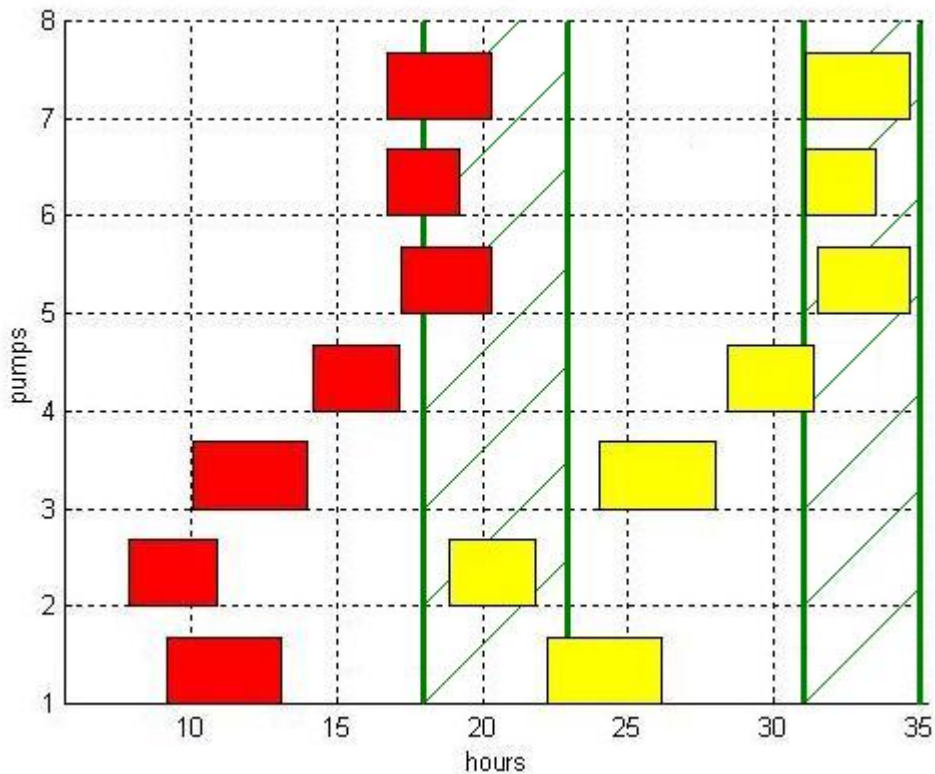


Рисунок 2 — Диаграмма Гантта для исходных значений параметров

Периодический характер замкнутых дискретно-непрерывных систем, которые включают набор периодически выполняющихся действий можно описать путем нахождения собственного числа и собственного вектора. Как и в классических непрерывных системах, нахождение собственного числа дает объяснение процесса, характеризующегося изменением поведения во времени. Для дискретно-непрерывных систем, описываемых с помощью аппарата Max-plus алгебры, необходимо исследовать, при каких значениях собственного числа λ , и собственного вектора v , существует матрица A , для которой:

$$A \otimes v = \lambda \otimes v. \quad (12)$$

Собственный вектор v описывает характеризуемый процесс таким образом, чтобы повторилась с определенным периодом установленная последовательность операций.

Для исходных значений естественного притока воды в каждый водосборник, подачи насосов и объемов водосборников при моделировании получили значение собственного числа $\lambda = 4,00$.

Поскольку общая задача исследований состоит в необходимости разработки системы управления комплексом водоотлива в соответствии с периодами внепикового потребления электроэнергии, а основную нагрузку на энергосистему со стороны водоотлива представляет работа насосных станций главного водоотлива (т.е. в данном случае работа насосных станций P_4 , P_5 и P_7), необходимо определить, при каких объемах водосборников работа водоотливных установок главного водоотлива шахты будет происходить в течение этих периодов.

Для решения данной задачи воспользуемся графиками нагрузок энергосистемы. Длительность и взаимное расположение периодов максимума нагрузки энергосистемы зависят от времени года (светлой и темной части суток) [4]. Длительность этих периодов обычно составляет 2–4 часа, а число периодов в течение суток, как правило, равно двум. Утренний период максимума нагрузки может начинаться с 7:00 или 8:00 и продолжаться до 10:00 или 11:00. Вечерний период максимума может продолжаться в интервале с 18:00 до 23:00. Соответственно, интервалы времени между периодами максимума нагрузок составляют 10–14 часов. Наиболее трудно обеспечить внепиковую работу водоотливных установок с малым количеством рабочих циклов в сутки.

Из рисунка 2 видно, что при исходных значениях параметров и первый, и второй циклы работы насосных станций главного водоотлива приходятся на периоды максимума нагрузки энергосистемы (эти периоды обозначены на рисунке штриховкой). Первый цикл попадает на период вечернего максимума с 18:00 до 21:00, второй цикл — на период утреннего максимума с 07:00 до 10:00.

Необходимо изменить значения объемов водосборников таким образом, чтобы первый, второй и последующие циклы не совпадали с периодами утреннего или вечернего максимумов нагрузки энергосистемы.

Исследования показали, что таких результатов можно добиться при следующих значениях объемов водосборников:

$$V_1 = 150\text{м}^3, V_2 = 250\text{м}^3, V_3 = 150\text{м}^3, V_4 = 1000\text{м}^3, V_5 = 1400\text{м}^3, V_6 = 200\text{м}^3.$$

Для данных значений объемов водосборников было получено значение собственного числа $\lambda = 3.2$.

Диаграмма Гантта, представляющая работу насосных станций всего комплекса водоотлива для 3х циклов запуска представлена на рисунке 3.

Из рисунка 3 видно, что первый цикл работы водоотливных установок главного водоотлива приходится на период внепикового потребления электроэнергии с 11:00 до 16:00, второй — на период с 23:00 до 04:00, третий — снова на период с 11:00 до 16:00, т.е. работа насосных станций главного водоотлива при данных параметрах происходит в периоды внепикового потребления электроэнергии. При этом было получено количество рабочих циклов в сутки, равное 2.

Выводы.

1. Предложена каноническая форма математической модели полного комплекса шахтного водоотлива с использованием аппарата Max-plus алгебры.

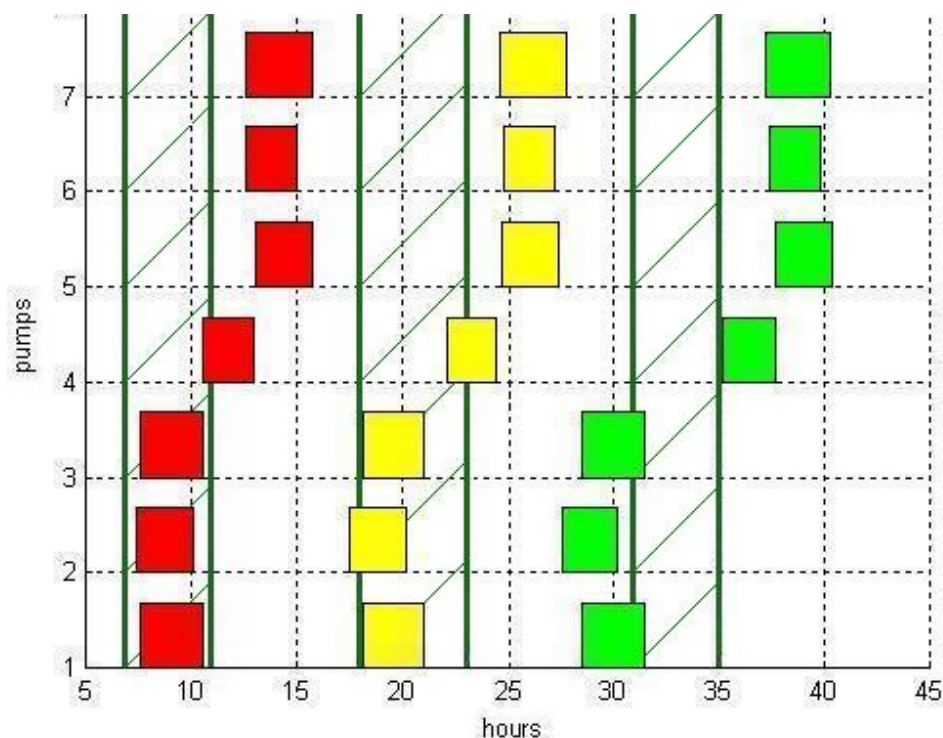


Рисунок 3 — Диаграмма Гантта для итоговых значений параметров

2. Проведено построение модели, в качестве объекта для моделирования принята обобщенная комбинированная схема ступенчатого водоотлива.

3. Выполнены исследования на полученной математической модели в различных режимах. Получены значения объемов водосборников, при которых обеспечивается работа комплекса водоотлива в периоды внепиковой нагрузки энергосистемы.

Литература

1. Гейер, В.Г. Шахтные вентиляторные и водоотливные установки [Текст] / В.Г. Гейер, Г.М. Тимошенко. — М.:Недра, 1987. — 270 с.
2. Бессараб, В. И. Автоматическое управление многоступенчатым водоотливом шахт [Текст] / В. И. Бессараб, Р. В. Федюн // Матеріали міжнародної конференції з управління "Автоматика-2001", 10–14 вересня 2001р., м. Одеса, Україна : в 2-х т. — Одеса : ОГПУ, 2001. — Т.1. — С. 129–130.
3. Федюн, Р. В. Синтез цифровых систем автоматического управления многоступенчатыми водоотливными установками угольных шахт [Текст] / Р.В. Федюн // Сборник научных трудов по материалам 5-го международного молодежного форума "Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке" 24–26 апреля 2001г. В 2-х частях: Часть 1. — Харьков: Б.и., 2001. — С. 70–71.
4. Данильчук, Г.И. Автоматизация электропотребления водоотливных установок [Текст] / Г. И. Данильчук, С.П. Шевчук, П.К. Василенко. — К.: Техника, 1981. — 102с.
5. S. Gaubert. Methods And Applications of (max,+) Linear Algebra. [Text] / S. Gaubert // Technical report, INRIA, Rocquencourt, France, Jan. 1997. — 24 p.
6. G. Cohen. Max-plus algebra and system theory: where we are and where to go now [Text] / G. Cohen, S. Gaubert, J.-P. Quadrat // *Annual Reviews in Control* (Elsevier-IFAC). — 1999. — Vol. 23, No. 1. — P. 207–219.

Здано в редакцію:
23.02.2009р.

Рекомендовано до друку:
д.т.н, проф. Скобцов Ю.О.