

*В роботі запропонована стратегія оптимізації режимів роботи насосної станції з різнотипними насосними агрегатами на основі стохастичною моделі квазістаціонарних режимів в системах подачі і розподілу води. Ця стратегія є ресурсо- та енергозберігаючою. Сформульована і розв'язана задача оперативного планування режимів роботи насосної станції з різнотипними насосними агрегатами з попередженням в одну добу*

*Ключові слова: насосна станція, насосний агрегат, квазістаціонарний режим, стохастична модель, потенціал оптимізації*

*В работе предложена стратегия оптимизации режимов работы насосной станции с разнотипными насосными агрегатами на основе стохастической модели квазистационарных режимов в системах подачи и распределения воды. Данная стратегия является ресурсо- и энергосберегающей. Сформулирована и решена задача оперативного планирования режимами работы насосной станции с разнотипными насосными агрегатами с упреждением в одни сутки*

*Ключевые слова: насосная станция, насосный агрегат, квазистационарный режим, стохастическая модель, потенциал оптимизации*

УДК 628.12

# ОБ ОДНОЙ СТРАТЕГИИ ОПЕРАТИВНОГО ПЛАНИРОВАНИЯ РЕЖИМОВ РАБОТЫ НАСОСНОЙ СТАНЦИИ

А. Д. Тевяшев

Доктор технических наук, профессор,  
заведующий кафедрой\*

E-mail: tad45@mail.ru

О. И. Матвиенко

Аспирант\*

E-mail: olga\_mat@ukr.net

\*Кафедра прикладной математики  
Харьковский национальный университет  
радиоэлектроники  
пр. Ленина, 16, г. Харьков, Украина, 61166

## 1. Введение

Практический переход на прогрессивные информационные, энергосберегающие и экологически безопасные технологии в трубопроводном транспорте основан на широком использовании частотно-регулирующих приводов (ЧРП) асинхронных двигателей насосных агрегатов (НА) на насосных станциях (НС). Использование ЧРП отдельными НА обеспечивает расчетную экономию электроэнергии до 40 %. Современные НС содержат от 3 до 8 НА и оснащение НА ЧРП, несмотря на всю их эффективность, вызывает серьезные экономические проблемы как из-за значительной стоимости самих ЧРП, так и стоимости монтажа, наладки, гарантийного и послегарантийного обслуживания. Это привело к тому, что на НС продолжают использоваться устаревшие и разнотипные НА, а управление режимами работы НС осуществляется, как правило, по устаревшим стратегиям с помощью регулируемых задвижек. В этом случае проблема энергосбережения на НС переходит в проблему поиска новых стратегий оптимального (по критерию минимума затрат электроэнергии) управления группой параллельно работающих разнотипных НА с помощью регулируемых задвижек.

Фактические режимы работы систем подачи и распределения воды (СПРВ) являются существенно нестационарными. В реальных условиях основными возмущающими факторами являются стохастические процессы потребления воды, которые зависят

от огромного количества не контролируемых и не управляемых факторов. Более того, параметры модели установившегося потокораспределения, оцениваемые по выборкам экспериментальных данных конечной длины, сами являются случайными величинами. Поэтому использование детерминированных моделей установившегося потокораспределения в водопроводных сетях для решения оперативного планирования режимов работы систем водоснабжения (СВ) привело к тому, что даже незначительное изменение параметров модели или граничных условий приводило к существенному изменению оптимального решения и выходу его из области допустимых режимов. Естественно, такие «оптимальные» решения оказались не приемлемые для практики.

Это привело к необходимости разработки и использованию более адекватных стохастических моделей квазистационарных режимов работы СПРВ на заданном интервале времени  $[0, T]$ , учитывающих как стохастический характер процессов потребления воды, так и статистические свойства параметров модели.

## 2. Литературный обзор

Описание принципа действия НА, их технические характеристики, режимы работы, различные способы подключения изложены в трудах Карелина В. Я., Минаева. А. В., Лобачева П. В. [1, 2] В работах Тевяшева А. Д., Лезнова Б. С., Чупина Р. В., Мелехова Е. С. рас-

сма­трива­ют­ся про­бле­мы энер­го­сбе­ре­же­ния и ре­жи­мы ра­боты на­сос­ных стан­ций, осна­щён­ных на­сос­ны­ми агре­га­та­ми с ре­гу­ли­руе­мым при­во­дом [3–6]. В ра­бо­тах [7, 8] даны ре­ко­мен­да­ции по сни­же­нию по­треб­ле­ния элек­тро­энер­гии, во­ды и дру­гих ре­сур­сов.

Опе­ра­тив­ное пла­ни­ро­ва­ние ре­жи­мов ра­боты НС [9], спо­со­бы оп­ти­ми­за­ции ра­боты НС [10] рас­смот­ре­ны в ра­бо­тах Pulido-Calvo I., Ruuskanen A., Steinbach M. С. [11, 12].

Од­на­ко боль­шин­ство НС в си­сте­мах во­до­снаб­же­ния го­ро­дов Ук­раи­ны не обо­ру­до­ва­ны ре­гу­ли­руе­мым при­во­дом, а в ка­че­стве опе­ра­тив­но­го управ­ле­ния ре­жи­ма­ми ра­боты НС ис­поль­зу­ет­ся тра­ди­ци­он­ное вклю­че­ние/вы­клю­че­ние НА и из­ме­не­ние по­ло­же­ния ре­гу­ли­руе­мых зад­ви­жек.

Бо­лее то­го, да­же в круп­ных го­ро­дах управ­ле­ние си­сте­ма­ми цен­тра­ли­зо­ван­но­го во­до­снаб­же­ния осу­ществ­ля­ет­ся в руч­ном ре­жи­ме.

Изучив вы­ше­пе­ре­чис­лен­ные ра­бо­ты, пред­ла­га­ем сле­ду­ю­щую стра­те­гию оп­ти­маль­но­го пла­ни­ро­ва­ния ре­жи­мов ра­боты на­сос­ной стан­ции.

### 3. Цель и задачи исследования

Цель дан­ной ра­боты – раз­ра­бот­ка стра­те­гии опе­ра­тив­но­го пла­ни­ро­ва­ния ре­жи­мов ра­боты НС с уп­ре­жде­нием в од­ни су­тки на ос­но­ве сто­хас­ти­че­ской мо­де­ли ква­зи­ста­ци­он­ных ре­жи­мов ра­боты НС, ис­поль­зо­ва­ние ко­то­рой по­зво­ля­ет:

- ми­ни­ми­зи­ро­вать ма­те­ма­ти­че­ское ожи­да­ние энер­го­зат­рат НС на ин­тер­ва­ле пла­ни­ро­ва­ния (су­тки);
- по­лу­чить оп­ти­маль­ное ре­ше­ние, ус­той­чи­вое к про­гно­зи­руе­мо­му уров­ню сто­хас­ти­че­ских воз­му­ще­ний по рас­хо­ду и на­по­ру на вы­хо­де НС с ве­ро­ят­но­стью не ни­же за­дан­ной;
- ми­ни­ми­зи­ро­вать ко­ли­че­ство пе­ре­клю­че­ний НА.

### 4. Об одной стратегии оптимизации режимов работы насосной станции с разнотипными насосными агрегатами

#### 4. 1. Стохастическая модель квазистационарных режимов работы НС

В ра­бо­те [13] бы­ло по­ка­за­но, что для ре­ше­ния за­дач опе­ра­тив­но­го пла­ни­ро­ва­ния ре­жи­мов ра­боты цен­тра­ли­зо­ван­ных си­сте­м хо­лод­но­го во­до­снаб­же­ния бо­лее аде­кват­ны­ми яв­ля­ют­ся сто­хас­ти­че­ские мо­де­ли ква­зи­ста­ци­он­ных ре­жи­мов ра­боты э­тих си­сте­м на за­дан­ном ин­тер­ва­ле вре­ме­ни [0, T], учи­ты­ва­ю­щие как сто­хас­ти­че­ский ха­рак­тер про­цес­сов по­треб­ле­ния во­ды, так и ста­ти­сти­че­ские свой­ства па­ра­мет­ров мо­де­ли. Рас­смот­рим сто­хас­ти­че­скую мо­де­ль ква­зи­ста­ци­он­ных ре­жи­мов ра­боты НС.

Для пред­став­ле­ния струк­ту­ры НС в ви­де ор­гра­фа  $G(V, E)$ , где  $V$  – мно­же­ство вер­шин,  $E$  – мно­же­ство дуг ( $e = \text{Card}(E)$ ,  $v = \text{Card}(V)$ ), ре­аль­ная НС до­ба­в­ля­ет­ся ну­ле­вой вер­ши­ной и фик­тив­ны­ми хор­да­ми, со­еди­ня­ю­щи­ми ну­ле­вую вер­ши­ну с вхо­дом и вы­хо­дом НС. Для ма­те­ма­ти­че­ской фор­му­ли­ро­в­ки за­да­чи про­из­во­дят сле­ду­ю­щее ко­ди­ро­ва­ние НС: каж­дая ветвь де­ре­ва гра­фа со­дер­жит од­ин НА, од­ну РЗ (ре­гу­ли­руе­мую за­дви­жку) и пас­сив­ные участ­ки, со­еди­ня­ю­щие НА и РЗ с

вхо­дом и вы­хо­дом НС. Вер­ши­на­ми гра­фа НС яв­ля­ют­ся точки со­еди­не­ния 2-х и бо­лее эле­мен­тов НС [14].

Мно­же­ство  $E$  дуг гра­фа се­ти НС мож­но пред­ста­вить как  $E = L \cup M \cup K \cup R$ , где  $L$  – мно­же­ство дуг гра­фа се­ти, со­от­вет­ст­вую­щих участ­кам с НА;  $M$  – мно­же­ство дуг гра­фа се­ти, со­от­вет­ст­вую­щих пас­сив­ным участ­кам;  $K$  – мно­же­ство фик­тив­ных участ­ков се­ти,  $R$  – мно­же­ство дуг гра­фа се­ти, со­от­вет­ст­вую­щих ре­гу­ли­руе­мым зад­ви­жкам (РЗ). Для э­тих обо­зна­че­ний сто­хас­ти­че­ская мо­де­ль ква­зи­ста­ци­он­ных ре­жи­мов ра­боты НС при­ни­ма­ет вид [15]:

$$M_{\omega} \left( h_r(q_r(\omega)) + \sum_{i \in L} b_{iri} h_{NAi}(q_i(\omega)) + \right. \\ \left. + \sum_{i \in R} b_{iri} h_{RZi}(q_i(\omega)) + \sum_{i \in M} b_{iri} h_i(q_i(\omega)) \right) = 0, \\ (r = v, \dots, v + \eta_2 - 1). \quad (1)$$

$$M_{\omega} \left( h_{vih}(\omega) - h_{vh} + h_{NAr}(q_r(\omega)) + h_{NAr}^{(g)} + \right. \\ \left. + h_{RZr}(q_r(\omega)) + h_{RZr}^{(g)} + \sum_{i \in M} b_{iri} (h_i(q_i(\omega)) + h_i^{(g)}) \right) = 0, \\ r = (1, \dots, n). \quad (2)$$

$$M(q_i(\omega)) = M_{\omega} \left( \sum_{r=v}^e b_{iri} q_r(\omega) \right), \quad (i = 1, \dots, v-1), \quad (3)$$

$$q_i(\omega) > 0, \quad i \in M. \quad (4)$$

$$h_{NAi}(q_i(\omega)) = a_{0i}(\omega) + a_{1i}(\omega)q_i(\omega) + \\ + a_{2i}(\omega)q_i^2(\omega), \quad i \in L, \quad (5)$$

$$h_{RZi}(q_i(\omega)) = \frac{q_i(\omega)C_i(\omega)}{E_i^2}, \quad i \in R, \quad (6)$$

$$h_i(q_i(\omega)) = \text{sgn } q_i(\omega) S_i(\omega) q_i^2(\omega), \\ \bar{S}_i = 0,001736 \frac{l_i}{d_{i,5.3}^2}, \quad i \in M, \quad (7)$$

$$\eta(q_i(\omega)) = d_0(\omega) + d_1(\omega)q_i(\omega) + d_2(\omega)q_i^2(\omega), \quad i \in L, \quad (8)$$

где  $q_i(\omega)$  – слу­чай­ные ве­ли­чи­ны, ха­рак­те­ри­зу­ю­щие рас­ход во­ды на  $i$ -м участ­ке тру­бо­про­во­да;  $S_i(\omega)$  – слу­чай­ные ве­ли­чи­ны, ха­рак­те­ри­зу­ю­щие гид­рав­ли­че­ское со­про­тив­ле­ние  $i$ -го участ­ка тру­бо­про­во­да ( $i \in M$ );  $h_{vih}(\omega)$  – слу­чай­ная ве­ли­чи­на, ха­рак­те­ри­зу­ю­щая на­пор на вы­хо­де НС,  $h_{NAi}$  – на­пор  $i$ -го НА,  $h_{RZi}$  – па­де­ние на­пора на  $i$ -ой РЗ;  $\eta_i$  – КПД  $i$ -го НА;  $h_{vh}$  – на­пор на вхо­де в НС;  $E_i$  – сте­пень от­кры­тия РЗ ( $E \in (0,1)$ );  $l_i, d_i, h_i^{(g)}$  – дли­на, ди­аметр и гео­де­зи­че­ская от­мет­ка  $i$ -го участ­ка тру­бо­про­во­да ( $i \in M$ ),  $b_{iri}$  – эле­мент цик­ло­ма­три­че­ской ма­три­цы;  $a_{0i}, a_{1i}, a_{2i}, d_{0i}, d_{1i}, d_{2i}$  – па­ра­мет­ры НА ( $i \in L$ );  $C_i$  – па­ра­мет­ры РЗ ( $i \in R$ );  $M\{\}$  – ма­те­ма­ти­че­ское ожи­да­ние слу­чай­ной ве­ли­чи­ны  $\{\}$ ;

$\omega \in \Omega$ :  $(\Omega, B, P)$  вероятностное пространство, где  $\Omega$  – пространство элементарных событий,  $B - \sigma$  – алгебра событий из  $\Omega$ ,  $P$  – вероятностная мера на  $B$ .

**4. 2. Математическая постановка задачи оперативного планирования режима работы НС**

Исходными данными для задачи оперативного планирования режимов работы НС являются прогнозируемые в виде оценок условных математических ожиданий дисперсий значения расхода  $\hat{q}_k, \hat{\sigma}_{q_k}^2$  и напора  $\hat{h}_k, \hat{\sigma}_{h_k}^2$  на выходе НС для каждого подынтервала времени  $k$ :  $k=1$  соответствует интервал  $[t_1, t_2]$ ,  $k=2$  соответствует интервал  $[t_2, t_3]$ ,  $k=3$  соответствует интервал  $[t_3, t_4]$ , соответствует интервал  $[t_4, t_5]$ . Также исходными данными являются напор на входе в НС, равный уровню воды в резервуаре; параметры трубопровода (длина, диаметр, геодезическая отметка), оценки параметров НА ( $\bar{a}_0, \bar{a}_1, \bar{a}_2, \bar{c}_0, \bar{c}_1, \bar{c}_2, \bar{d}_0, \bar{d}_1, \bar{d}_2$ ), оценка эквивалентного гидравлического сопротивления полностью открытой РЗ ( $\bar{C}$ ).

На содержательном уровне задача оперативного планирования режима работы НС на интервале времени  $[t_i, t_j]$  заключается в следующем:

- 1) определение такого состава работающих НА на каждом подынтервале времени  $k=1,2,3,4$ , при котором с вероятностью близкой к единице обеспечивается нахождение рабочей точки НС в области допустимых режимов НС, определяемых условиями

$$\bar{q}_k \pm 3\sigma_{q_k}, \bar{h}_k \pm 3\sigma_{h_k}, P(\bar{h}_k^+ \leq h_k(\omega) \leq \bar{h}_k^{++}) = 1, \quad (9)$$

где  $\bar{h}_k^+, \bar{h}_k^{++}$  – минимальный и максимальный допустимый напор на выходе НС на интервале  $k$ ;

- 2) обеспечение на выходе НС планируемых на каждом подынтервале  $k$  значений расхода и напора воды;
- 3) НА должны работать с максимально возможным КПД ( $KПД > KПД_{мин}$ );
- 4) математическое ожидание энергозатрат должно быть минимальным.

Математическая постановка задачи оперативного планирования режимов работы НС на сутки представлена в виде стохастической математической модели квазистационарных режимов работы НС на заданном интервале времени  $[0, T]$  (10) и условий (1)–(9):

$$F(\hat{q}_1, \hat{q}_2, \hat{q}_3, \hat{q}_4, \hat{h}_1, \hat{h}_2, \hat{h}_3, \hat{h}_4) = M \sum_{k=1}^4 \left( \sum_{i=1}^3 \frac{9,81 \cdot h_{NAi}(q_i(\omega)) \cdot q_i(\omega)}{\eta_{NAi}(q_i(\omega))} \right) \rightarrow \min_{S, i} \quad (10)$$

где  $S$  – структура НС, т. е. состав работающих НА на НС;  $F$  – функция энергозатрат.

Заменяя в задаче (10) и в условиях (1)–(9) все случайные величины их математическими ожиданиями, получим детерминированный эквивалент задачи оперативного планирования режимов работы НС на сутки (11)–(19):

$$F(\hat{q}_1, \hat{q}_2, \hat{q}_3, \hat{q}_4, \hat{h}_1, \hat{h}_2, \hat{h}_3, \hat{h}_4) = \sum_{k=1}^4 \sum_{i=1}^3 \frac{9,81 \cdot \bar{h}_{NAi} \cdot \bar{q}_i}{\bar{\eta}_{NAi}} \rightarrow \min_{S, E_i} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} & \bar{h}_r(\bar{q}_i) + \sum_{i \in L} b_{1ri} \bar{h}_{NAi}(\bar{q}_i) + \\ & + \sum_{i \in R} b_{1ri} \bar{h}_{RZi}(\bar{q}_i) + \sum_{i \in M} b_{1ri} h_i(\bar{q}_i) = 0, \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} & (r = v, \dots, v + \eta_2 - 1), \\ & \bar{h}_{vih} - h_{vh} + \bar{h}_{NAr}(\bar{q}_r) + h_{NAr}^{(g)} + \\ & + \bar{h}_{RZr}(\bar{q}_r) + h_{RZr}^{(g)} + \sum_{i \in M} b_{1ri} (\bar{h}_i(\bar{q}_i) + h_i^{(g)}) = 0, \end{aligned} \quad (13)$$

$$\bar{q}_i = \sum_{r=v}^e b_{1ri} \bar{q}_r, \quad (i = 1, \dots, v-1), \quad (14)$$

$$\bar{q}_i > 0, \quad i \in M, \quad (15)$$

$$\bar{h}_{NAi}(\bar{q}_i) = \bar{a}_{0i} + \bar{a}_{1i} \bar{q}_i + \bar{a}_{2i} \bar{q}_i^2, \quad i \in L, \quad (16)$$

$$\bar{h}_{RZi}(\bar{q}_i) = \frac{\bar{q}_i \bar{C}_i}{E_i^2}, \quad i \in R, \quad (17)$$

$$\bar{h}_i(\bar{q}_i) = \text{sgn} \bar{q}_i \bar{S}_i \bar{q}_i^2, \quad i \in M, \quad (18)$$

$$\bar{\eta}(\bar{q}_i) = \bar{d}_0 + \bar{d}_1 \bar{q}_i + \bar{d}_2 \bar{q}_i^2, \quad i \in L. \quad (19)$$

Далее будем решать задачу оперативного планирования режима работы НС на интервале времени  $[t_1, t_2]$ ,  $[t_2, t_3]$ ,  $[t_3, t_4]$ ,  $[t_4, t_5]$ . Оптимальные режимы работы НС на каждом интервале будем выбирать таким образом, чтобы количество переключений НА было минимальным.

**4. 3. Стратегия оперативного планирования работы НС на сутки**

Для интервала  $[t_1, t_2]$  даны параметры на выходе НС:  $\bar{q}_{vih}, \bar{h}_{vih}$ . Предполагаем, что НА упорядочены по мощности: наиболее мощный НА1, наименее мощный НА3.

В результате реализации данной стратегии находим для каждого интервала состав работающих НА, степень открытия РЗ для каждой ветви, расход по каждой ветви и энергозатраты НС.

*Реализация стратегии:*

Работает один НА: для заданных исходных данных производим увязку сети по формулам (12)–(15). Проверяем, может ли НА с полностью открытой РЗ обеспечить заданные параметры на выходе НС (13), при условии, что НА работает с КПД большим заданного. Если может, то пересчитываем степень открытия РЗ (13), (17), вычисляем целевую функцию  $F1$  (энергозатраты) по формуле (11). Если не может, выбираем другой НА (или их комбинацию).

1. Выполняем п.1 для каждого НА. Находим  $F1$  минимальную.

2. Работает два НА: для заданных исходных данных производим увязку сети по формулам (12)–(15). Проверяем, могут ли два НА с различными комбинациями степени открытия РЗ обеспечить заданные параметры на выходе НС, при условии, что НА работают с КПД большим заданного. Если могут, то вычисляем целевую функцию  $F2$  (энергозатраты) по формуле (13). Если не могут, выбираем другую комбинацию НА.

3. Выполняем п.3 для каждой комбинации двух НА. Находим F2 минимальную.

4. Работают три НА: для заданных исходных данных производим увязку сети по формулам (12)–(15). Проверяем, могут ли три НА с различными комбинациями степени открытия РЗ обеспечить заданные параметры на выходе НС, при условии, что НА работают с КПД большим заданного. Если могут, то вычисляем целевую функцию F3 (энергозатраты) по формуле (13). Если не могут, решения нет.

5. Находим F3 минимальную.

6. Оптимальное решение  $F_{opt} = \min(F1, F2, F3)$ .

После того, как вычислены оптимальные решения для каждого из четырёх режимов, необходимо учесть условие минимального количества переключений НА.

### 5. Апробация результатов исследования

#### Пример.

Не нарушая общности, рассмотрим насосную станцию (рис. 1), состоящую из  $n=3$  параллельно соединённых насосных агрегатов типа АД4000-95-2.

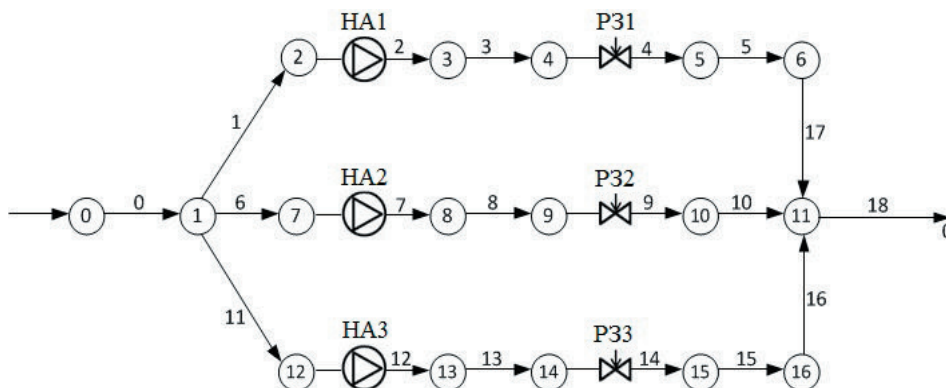


Рис. 1. Граф насосной станции

Характеристики НА1, НА2, НА3 (H-Q, N-Q, КПД-Q) приведены на рис. 2

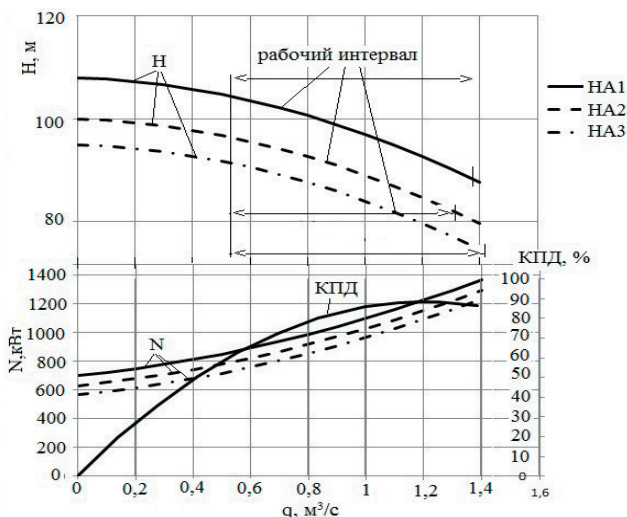


Рис. 2. Характеристики насосных агрегатов

В табл. 1 приведены оценки коэффициентов аппроксимации характеристик НА.

Аппроксимация коэффициентов  $a_0, a_1, a_2, d_0, d_1, d_2$  производится на основании паспортных данных насосных агрегатов по формулам (16), (19).

Таблица 1

Оценки коэффициентов аппроксимации характеристик насосных агрегатов

НА	$a_0$	$a_1$	$a_2$	$d_0$	$d_1$	$d_2$
НА1	108	-2,03524	-8,94861	0	147,0046	-61,030796
НА2	100	-2,03524	-8,94861	0	147,0046	-61,030796
НА3	95	-2,03524	-8,94861	0	147,0046	-61,030796

В табл. 2 приведены математические ожидания и дисперсии режимных параметров (расхода и напора) на выходе НС.

Параметры участков трубопроводов:  $l=10$  м;  $d=0,5$  м;  $h_g=0$ .  $h_{vh}=2$  м.

Параметры регулирующих задвижек:  $l=2$  м;  $d=0,5$  м;  $C=1,8$ .

Результаты решения задачи оперативного планирования работы НС на сутки приведены в табл. 3.

Для каждого интервала времени вычисляется значение потенциала энергосбережения, т.е. количество энергозатрат, которое можно сэкономить, если использовать в качестве управления НА не РЗ, а регулируемый привод.

$$\Delta F_k = \sum_{i=1}^3 \frac{9,81 \cdot \bar{q}_{NAik}}{\bar{\eta}_{NAik}} (\bar{h}_{NAik} - \bar{h}_{vikh}) \quad (20)$$

Таблица 2

Планируемые режимы насосной станции

Параметры НС	$[t_1, t_2]$	$[t_2, t_3]$	$[t_3, t_4]$	$[t_4, t_5]$
$q \pm 3\sigma_q, \text{ м}^3/\text{с}$	$1 \pm 0,4$	$2,5 \pm 0,7$	$3,5 \pm 0,5$	$2,5 \pm 0,7$
$h \pm 3\sigma_h, \text{ м}$	$65 \pm 2$	$75 \pm 3$	$80 \pm 4$	$70 \pm 3$

На рис. 3 приведена область допустимых режимов работы НС.

На рис. 4 – диапазон изменения значений функции энергозатрат для каждого интервала времени.



Таблица 3

Результаты решения задачи оперативного планирования работы насосной станции

НА	$[t_1, t_2]_{\min}$	$[t_2, t_3]_{\uparrow}$	$[t_3, t_4]_{\max}$	$[t_4, t_5]_{\downarrow}$
НА1	-----	q1=1,343 м <sup>3</sup> /с E1=0,6 КПД1=87,3 %	q1=1,318 м <sup>3</sup> /с E1=0,75 КПД1=87,7 %	-----
НА2	-----	-----	q2=1,174 м <sup>3</sup> /с E2=1 КПД2=88,5 %	q2=1,221 м <sup>3</sup> /с E2=0,55 КПД2=88,5 %
НА3	q1=1 м <sup>3</sup> /с E1=0,405 КПД3=85, %	q3=1,157 м <sup>3</sup> /с E3=0,931 КПД3=88,4 %	q3=1,009 м <sup>3</sup> /с E3=0,995 КПД3=86,2 %	q3=1,279 м <sup>3</sup> /с E3=0,853 КПД3=88,2 %
F, кВт	947,9	2353,5	3357,25	2220,38
Потенциал энергосбережения, ΔF, кВт	217,17	213,24+72,8=286,04	144,2+68,84+44,09=257,12	191,92+110,25=302,17
$\sum_{i=1}^4 F = 8879,03 ; \sum_{i=1}^4 \Delta F = 1062,5$ (экономия 11,9 %)				

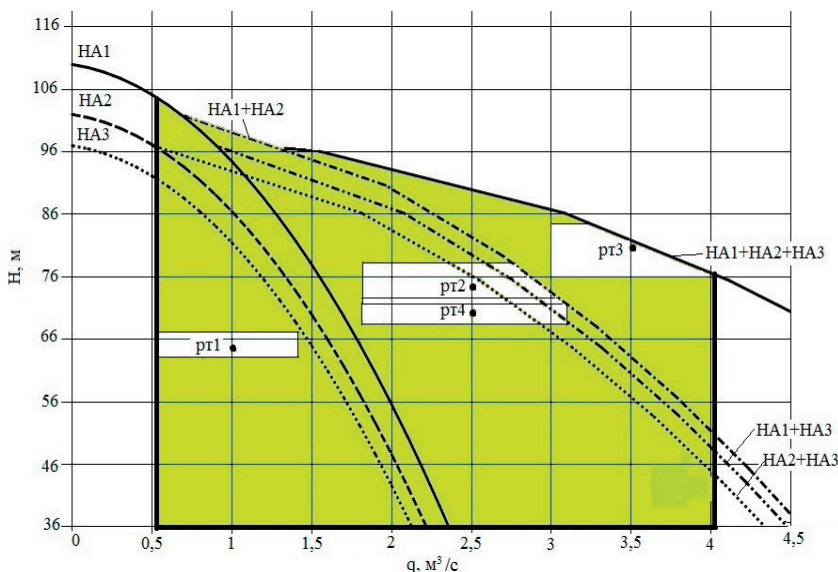


Рис. 3. Область допустимых режимов работы насосной станции (pt1, pt2, pt3, pt4 – рабочие точки для каждого интервала планирования, белая область вокруг pt показывает дисперсию напора и расхода)

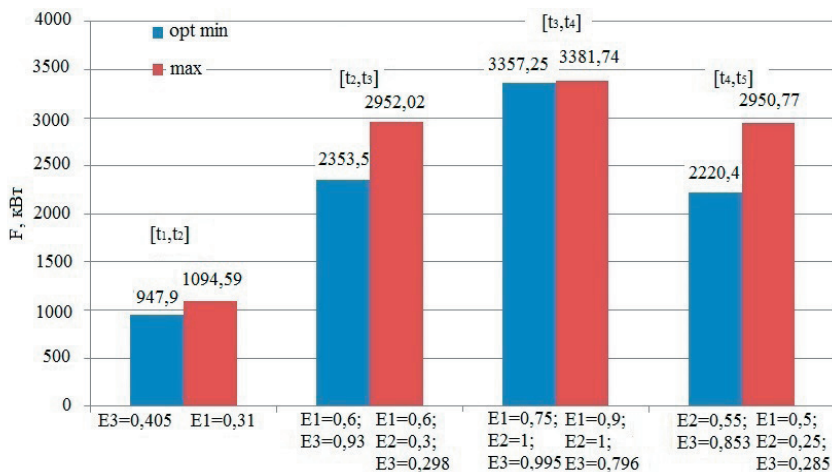


Рис. 4. Максимальное и минимальное значения функции энергозатрат для каждого режима работы насосной станции

Таким образом, для данного примера потенциал оптимизации составляет 11,9 % от энергозатрат.

### 6. Выводы

В работе предложена стратегия оптимального планирования режимов работы НС с упреждением в одни сутки. НС оснащена разнотипными НА, управление которыми осуществляется изменением положения РЗ.

Реализация предложенной стратегии позволяет минимизировать математическое ожидание энергозатрат в течение суток, количество переключений НА и гарантировать, с вероятностью не ниже заданной, устойчивость оптимального решения для всего диапазона стохастических возмущений.

Научная новизна полученных результатов: впервые предложена стохастическая модель квазистационарных режимов работы НС на заданном интервале времени  $[0, T]$ , которая учитывает как стохастический характер процессов потребления воды, так и статистические свойства параметров модели и является более адекватной фактическим режимам работы НС.

Использование этой модели позволило получить решение не только оптимальное по критерию минимума энергозатрат, но и устойчивое с вероятностью не ниже заданной для всего диапазона прогнозируемых стохастических возмущений.

Практическая значимость: представленную стратегию можно применять в системах водоснабжения для оптимизации управления работой НС. Осуществлена оценка потенциала энергосбережения режимов работы НС при переходе от управления режимами работы НА с помощью РЗ на регулируемый привод.

Дальнейшие исследования могут быть направлены на оптимизацию работы НС, оснащённой НА с регулируемым приводом.

Ограничения: область применения предложенной стратегии – насосные станции с разнотипными НА и РЗ.

---

#### Литература

1. Карелин, В. Я. Насосы и насосные станции [Текст] / В. Я. Карелин, А. В. Минаев. – М.; Стройиздат, 1986. – 320 с.
2. Лобачёв, П. В. Насосы и насосные станции [Текст] / П. В. Лобачёв. – М. : Стройиздат, 1983. – 191 с.
3. Лезнов, Б. С. Энергосбережение и регулируемый привод в насосных и воздуходувных установках [Текст] / Б. С. Лезнов. – М. : Энергоатомиздат, 2006. – 358 с.
4. Чупин, Р. В. Развитие теории и практики моделирования и оптимизации систем водоснабжения и водоотведения [Текст] / Р. В. Чупин, Е. С. Мелехов. – Иркутск. : Изд-во ИрГТУ, 2011. – 323 с.
5. Евдокимов, А. Г. Потокораспределение в инженерных сетях [Текст] / А. Г. Евдокимов, В. В. Дубровский, А. Д. Тевяшев. – М. : Стройиздат, 1979. – 199 с.
6. Евдокимов, А. Г. Оперативное управление потокораспределением в инженерных сетях [Текст] / А. Г. Евдокимов, А. Д. Тевяшев. – Харьков. : Вища школа, 1980. – 144 с.
7. Reinbold, C. The Search for Energy Savings: Optimization of Existing & New Pumping Stations [Text] / C. Reinbold, V. Hart // Florida Water Resources Journal, 2011. – P. 44–52.
8. Lipták, B. Pumping Station Optimization [Text] / B. Lipták // Control Promoting Excellence in Process Automation, 2009. – C. 12 – 19.
9. Pulido-Calvo, I. Selection and Operation of Pumping Stations of Water Distribution Systems [Text] / I. Pulido-Calvo, J. C. Gutiérrez-Estrada. // Environmental Research Journal, Nova Science Publishers. – 2011. – Vol. 5, Issue 3. – P. 1–20.
10. Ruuskanen, A. Optimization of Energy Consumption in Wastewater Pumping [Text] / A. Ruuskanen // Lappeenranta University of Technology Department of Energy- and Environmental Technology, 2007. – 99 p.
11. Steinbach, M. C. Tree-Sparse Convex Programs [Text] / M. C. Steinbach // Konrad-Zuse-Zentrum für Informationstechnik. – Berlin, ZIB-Report, 2001. – 22 с.
12. Steinbach, M. C. General Information Constraints in Stochastic Programs [Text] / M. C. Steinbach // Berlin, ZIB, 2001. – 5 с.
13. Тевяшев, А. Д. Стохастическая модель и метод зонирования водопроводных сетей [Текст] / А. Д. Тевяшев, О. И. Матвиенко // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2014. – № 1(67). – С. 17–24.
14. Тевяшев, А. Д. Оценивание параметров математических моделей элементов насосных станций в реальном времени [Текст] / А. Д. Тевяшев, П. В. Шулик // АСУ и приборы автоматики. – 2002. – № 1. – С. 28–37.
15. Тевяшев, А. Д. Стохастическая модель и метод оперативного планирования режимов работы насосных станций [Текст] : матер. IV междунар. науч. – тех. конф. / А. Д. Тевяшев, О. И. Матвиенко, Г. В. Никитенко // Вода. Экология. Общество. – X. : ХНУГ им. Бекетова, 2014. – С. 61–64.