

# Оценка потенциала ресурсо- и энергосбережения при управлении развитием и функционированием магистрального водовода

*Андрей Тевяшев, Ольга Матвиенко*

Kharkiv National University of Radio Electronics  
prosp. Nauki, 14, Kharkiv, Ukraine, 61166  
e-mail: [tad45@mail.ru](mailto:tad45@mail.ru), [orcid.org/0000-0002-2846-7089](https://orcid.org/0000-0002-2846-7089)

**Аннотация.** В работе рассматривается проблема оценивания потенциала ресурсо- и энергосбережения при подготовке инвестиционных проектов модернизации технологического оборудования и перехода от традиционного управления режимами работы магистральных водоводов к оптимальному стохастическому управлению для трёхзонных тарифов на электроэнергию. Предложен новый метод получения несмещённых, эффективных и практически реализуемых оценок потенциала ресурсо- и энергосбережения в магистральных водоводах. Метод основан на использовании результатов компьютерного моделирования решения задачи оптимального стохастического управления режимами работы магистральных водоводов. Все множество вариантов модернизации сведено к изменению графа сети, граничных условий (прогнозов водопотребления и уровней воды в резервуарах), параметров математических моделей насосных агрегатов и участков трубопровода.

Приведены результаты оценок потенциала ресурсо- и энергосбережения для множества различных вариантов модернизации технологического оборудования одного из крупных магистральных водоводов Украины, обеспечивающим водой город с населением свыше 1,5 млн. чел. Полученные оценки потенциала энерго- и ресурсосбережения для конкретного магистрального водовода позволяют сделать его инвестиционно привлекательным.

**Ключевые слова:** магистральный водовод, оценка потенциала ресурсосбережения, оптимальное стохастическое управление, регулируемый привод, насосная станция.

## ВВЕДЕНИЕ

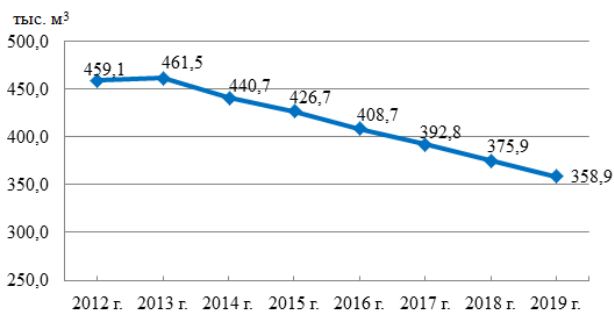
Магистральный водовод (МВ) сложная техническая система, предназначенная для транспорта воды на большие расстояния от источника водоснабжения до крупных населённых пунктов (потребителей), в состав которой входят многоцеховые насосные станции (НС), многониточные магистральные трубопроводы, резервуары чистой воды (РЧВ) [1].

Проектирование и строительство МВ Украины производилось в 1950 – 1980 гг. При этом параметры оборудования рассчитывались для режима максимального водопотребления, с перспективой его дальнейшего роста.

В настоящее время в связи с ростом тарифов на воду и всё более широкому использованию потребителями средств учёта воды во всём мире сложилась устойчивая тенденция к снижению объёмов водопотребления. Такая же тенденция существует и в Украине. На Рис. 1 представлен график фактических и прогнозируемых среднесуточных объёмов подачи воды в город с населением свыше 1,5 млн. жителей.

Устойчивая тенденция снижения водопотребления привела к тому, что в реально эксплуатируемых МВ образовались значительные ресурсы их неиспользуемой производительности, а именно: насосные агрегаты (НА), установленные на НС, были

рассчитаны на значительно большую производительность, в настоящее время вынуждены работать с прикрытыми регулирующими задвижками (РЗ) со значительными материальными и энергетическими потерями [2 – 5]. Это, в свою очередь, явилось одной из причин непрерывного роста удельного расхода электроэнергии ( $\text{кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^3$ ), и как следствие, роста тарифов на воду.



**Рис. 1.** График фактических и прогнозируемых среднесуточных объемов подачи холодной воды МВ

**Fig. 1.** The schedule of actual and projected average daily volume of the cold water supply of water main

Решение этой проблемы приводит к необходимости поиска инвестиционных проектов по модернизации технологического оборудования МВ, приведению его в соответствие с достаточно необходимым уровнем запаса ресурса (по мощности, производительности, надёжности) и переходу от традиционных систем управления к современным системам оптимального стохастического управления, более адекватно соответствующих изменениям окружающей среды МВ, его структуры и параметров [6 – 8].

В работе рассматривается системный подход к оценке потенциала ресурсо- и энергосбережения для крупного МВ, находящегося в эксплуатации, за счёт использования комплекса мероприятий по приведению в соответствие параметров технологического оборудования фактическим режимам его работы [9 – 12].

## ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Целью данной работы является разработка метода получения системы интегральных оценок потенциала ресурсо и энергосбережения при проведении комплекса мероприятий по модернизации и реконструкции МВ и переходе от традиционных систем управления режимами работы МВ к современным системам оптимального стохастического управления для трёхзонного тарифа на электроэнергию. Отличительными особенностями получаемых оценок является их потенциальная несмещённость, эффективность и практическая реализуемость в рамках инвестиционных проектов.

## МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА И ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ МАГИСТРАЛЬНЫХ ВОДОВОДОВ

Одним из наиболее эффективных методов повышения качества и эффективности работы МВ является совершенствование системы оперативно-диспетчерского управления режимами работы МВ на основе использования более адекватных математических моделей [13 – 16], учитывающих как стохастический характер процессов потребления воды, так и статистические свойства параметров модели на заданном интервале управления  $[0, T]$ . Для разработки более адекватных математических моделей режимов работы МВ и эффективного учёта специфических особенностей МВ как объекта управления МВ рассматривается как стохастический объект, функционирующий в стохастической среде. Для МВ такими специфическими особенностями является наличие в них РЧВ достаточно большого объёма.

Стохастический характер среды проявляется в том, что процессы потребления воды носят ярко выраженный случайный характер. Стохастический характер объекта управления проявляется в том, что параметры технологического оборудования МВ априорно неизвестны, а оцениваются по

экспериментальным данным выборок конечной длины, и являются случайными величинами. Поэтому при решении задач оптимизации режимов работы МВ необходимо использовать стохастическую модель квазистационарных режимов работы МВ. Совершенствование системы оперативно-диспетчерского управления режимами работы МВ заключается в переходе от сложившейся к настоящему времени системы централизованного управления режимами работы МВ к современной децентрализованной системе оптимального стохастического управления для трёхзонного тарифа на электроэнергию.

### ЗАДАЧА ОПТИМАЛЬНОГО СТОХАСТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ РЕЖИМАМИ РАБОТЫ МАГИСТРАЛЬНОГО ВОДОВОДА

Задача оптимального стохастического управления режимами работы МВ реализует стратегию максимально возможного использования всего объёма РЧВ и трёхзонного тарифа на электроэнергию. Суть стратегии заключается в том, что подача воды в РЧВ из МВ должна быть минимальной на интервале времени с максимальным тарифом и максимальной на интервале времени с минимальным тарифом [17].

Исходными данными для задачи являются: структура МВ, представленная в виде ориентированного графа, входами и выходами которой являются РЧВ; параметры многониточных трубопроводов, многоцевых НС и РЧВ; интервал управления  $[0, T]$  (одни сутки), который разбивается на 24 подынтервала, соответствующих каждому часу периода управления  $k = 0, \dots, 23$ . На каждом  $k$ -ом подынтервале времени известны прогнозы притоков воды в резервуары на входах МВ, попутных отборов и отборов из РЧВ на выходе МВ в виде условных математических ожиданий  $\bar{q}_{i0}(l) = M(q_{il}(\omega))$  и их дисперсий  $\sigma_{q_{i0}}^2(l) = D(q_{il}(\omega))$ , вычисляемых в момент

времени  $k = 0$  с упреждением  $l = 1, 2, \dots, 23$ ; измеренные значения уровней воды в каждом  $z$ -ом резервуаре  $H_{zk}(\tilde{\omega})$ ; фактическое количество включённых НА.

Целевая функция задачи оптимального стохастического управления режимами работы МВ [17, 18] представляется в виде математического ожидания суммарной стоимости электроэнергии, затрачиваемой всеми работающими НА на интервале управления  $[0, T]$ :

$$M_{\omega} \sum_{k=0}^{23} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{m_i} N_{ijk}(q_{ik}(\omega)) \cdot r_k \rightarrow \min_{u(k) \in \Omega}, \quad (1)$$

где  $N_{ijk}(q_{ik}(\omega))$  – случайная величина, характеризующая мощность, затрачиваемую  $j$ -м НА  $i$ -й НС на  $k$ -ом интервале времени;  $r_k$  – значение трёхзонного тарифа на электроэнергию на  $k$ -ом интервале времени;  $n$  – количество НС;  $m_i$  – количество работающих НА на  $i$ -ой НС;  $u(k)$  – вектор управления, определяющий математическое ожидание общего количества работающих НА, положения регулирующих задвижек (РЗ) и оборотов привода каждого работающего НА на  $k$ -ом интервале времени.

Область ограничений  $\Omega$  определяется стохастической моделью квазистационарных режимов работы МВ:

$$M_{\omega} \left( h_{rk}(q_{rk}(\omega)) + \sum_{i \in L} b_{1ri} h_{NAik}(q_{ik}(\omega)) + \sum_{i \in R} b_{1ri} h_{RZik}(q_{ik}(\omega)) + \sum_{i \in M} b_{1ri} h_{ik}(q_{ik}(\omega)) \right) = 0, \quad (2)$$

$(r = v, \dots, v + \eta_2 - 1; \quad k = 0, \dots, 23),$

$$M_{\omega} \left( h_{NSjk}(\omega) - H_{zk}(\omega) - h_{NAjrk}(q_{rk}(\omega)) + h_{RZjrk}(q_{rk}(\omega)) + \sum_{i \in M} b_{1ri} (h_{ik}(q_{ik}(\omega)) + h_i^{(g)}) \right) = 0, \quad (3)$$

$(j = 1, \dots, n; \quad r = 1, \dots, m; \quad z = 1, \dots, Z).$

$$q_{ik}(\omega) = M_{\omega} \left( \sum_{r=v}^{v+\eta_2-1} b_{1ri} q_{rk}(\omega) + \sum_{r=v+\eta_2}^e b_{1ri} q_{rk}(\omega) \right),$$

$$(i=1, \dots, v-1), \quad (4)$$

$$q_{ik}(\omega) > 0, \quad i \in L. \quad (5)$$

$$h_{ik}(q_{ik}(\omega)) = \text{sgn} q_{ik}(\omega) S_i(\omega) q_{ik}^2(\omega), \quad i \in M, \quad (6)$$

$$h_{NAik}(q_{ik}(\omega)) = a_{0i}(\omega) + a_{1i}(\omega) q_{ik}(\omega) + a_{2i}(\omega) q_{ik}^2(\omega), \quad i \in L, \quad (7)$$

$$\eta_{NAik}(q_{ik}(\omega)) = d_{0i}(\omega) + d_{1i}(\omega) q_{ik}(\omega) + d_{2i}(\omega) q_{ik}^2(\omega), \quad i \in L, \quad (8)$$

$$N_{NAik}(q_{ik}(\omega)) = \frac{9,81 \cdot h_{NAik}(q_{ik}(\omega)) \cdot q_{ik}(\omega)}{0,9 \cdot \eta_{NAik}(q_{ik}(\omega))},$$

$$i \in L, \quad (9)$$

$$h_{RZik}(q_{ik}(\omega)) = \frac{q_{ik}(\omega) C_i(\omega)}{E_{ik}^2}, \quad i \in R, \quad (10)$$

и динамическими моделями резервуаров

$$H_{zk}(\omega) = H_{zk-1}(\omega) + c_{zk}(q_{zvhk}(\omega) - q_{zvihk}(\omega)),$$

$$(z=1, \dots, Z) \quad (11)$$

с вероятностными ограничениями на фазовые переменные:

$$P(H_{zk}(\omega) \leq H_z^{\max}) \geq \alpha,$$

$$P(H_{zk}(\omega) \geq H_z^{\min}) \geq \alpha, \quad \alpha \approx 0,97, \quad (12)$$

и экстремальными значениями ограничений на фазовые переменные для фиксированных моментов времени  $k=6$  и  $k=23$ :

$$M_{\omega} \{H_{z6}(\omega)\} \rightarrow \min_{q_{zvhk} \in \Omega}, \quad (k=0, \dots, 6), \quad (13)$$

$$M_{\omega} \{H_{z23}(\omega)\} \rightarrow \max_{q_{zvhk} \in \Omega}, \quad (k=0, \dots, 23), \quad (14)$$

где  $H_{zk}(\omega)$  – уровень воды в  $z$ -ом резервуаре на заданном  $k$ -ом интервале времени,  $H_z^{\min}$ ,  $H_z^{\max}$  – минимально и максимально допустимый уровень воды в каждом  $z$ -ом резервуаре.

Случайные величины характеризуют:  $q_{ik}(\omega)$  – расход воды на  $i$ -м участке трубопровода на  $k$ -ом интервале времени;  $h_{ik}(q_{ik}(\omega))$  – потеря напора на  $i$ -м участке

трубопроводана  $k$ -ом интервале времени;  $h_{NSjk}(\omega)$  – напор на выходе НС,  $h_{NAik}(q_{ik}(\omega))$  – напор  $i$ -го НА.  $S_i(\omega)$  – оценка гидравлического сопротивления  $i$ -го участка трубопровода ( $i \in M$ );  $h_{RZik}(q_{ik}(\omega))$  – оценка падения напора на  $i$ -ой РЗ;  $\eta_{NAik}(q_{ik}(\omega))$  – оценка КПД  $i$ -го НА;  $a_{0i}(\omega), a_{1i}(\omega), a_{2i}(\omega), d_{0i}(\omega), d_{1i}(\omega), d_{2i}(\omega)$  – оценки параметров НА ( $i \in L$ );  $C_i(\omega)$  – оценка параметров РЗ ( $i \in R$ );  $E_{ik}$  – степень открытия РЗ ( $E \in (0,1]$ );  $h_i^{(g)}$  – геодезическая отметка  $i$ -го участка трубопровода ( $i \in M$ );  $b_{1ri}$  – элемент цикломатической матрицы;  $q_{zvh}(\omega), q_{zvih}(\omega)$  – расход воды на входе и выходе резервуара;  $M_{\omega} \{ \cdot \}$  – математическое ожидание случайной величины  $\{ \cdot \}$ .

Для разрешимости задачи (1) – (14) система уравнений (2) – (14) дополняется граничными условиями в виде прогнозов расходов всех потребителей системы  $q_{ik}(l)$  (попутных и конечных), вычисленных в виде условных математических ожиданий в момент времени  $k=0$ , с упреждением  $l=1, 2, \dots, 23$ , а также начальными условиями при  $k=0$  в виде оценок математических ожиданий уровней воды в каждом  $z$ -ом резервуаре –  $H_{z0}$ .

В работе [17] приведен приближённый метод решения рассматриваемой задачи, путём перехода от стохастической задачи (1) – (14) к её детерминированному эквиваленту [19, 20], решение которого осуществляется модифицированным методом ветвей и границ.

## МЕТОД ПОЛУЧЕНИЯ ОЦЕНОК ПОТЕНЦИАЛА РЕСУРСО- И ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ ПРИ УПРАВЛЕНИИ РАЗВИТИЕМ И ФУНКЦИОНИРОВАНИЕМ МАГИСТРАЛЬНОГО ВОДОВОДА

Для получения практически реализуемых несмещённых и эффективных оценок потенциала ресурсо- и энергосбережения в работе предложен новый метод, основан-

ный на сравнении фактически затрачиваемой мощности и стоимости электроэнергии при существующей системе управления с прогнозируемыми затратами мощности и стоимости электроэнергии при оптимальном стохастическом управлении режимами работы МВ [21, 22]. При этом для любого конкретного варианта модернизации МВ оказывается достаточным внести изменения в граф сети, граничные условия (прогнозы водопотребления), в параметры математических моделей НА и участков трубопровода, связанных с рассматриваемым вариантом модернизации.

Получение системы интегральных оценок потенциала ресурсо- и энергосбережения МВ производилось на основании сравнения результатов решения задачи оптимального стохастического управления режимами работы МВ для различных вариантов модернизации с существующим (базовым) вариантом управления. Система интегральных оценок потенциала ресурсо- и энергосбережения получена для различных вариантов модернизации технологического оборудования и управления режимами работы МВ:

1) переход от существующей системы управления к современной системе оптимального стохастического управления ре-

жимами работы МВ для трёхзонного тарифа без изменения структуры МВ и параметров технологического оборудования МВ;

2) для НА на НС МВ, производительность и мощность которых превышает достаточно необходимую, производится:

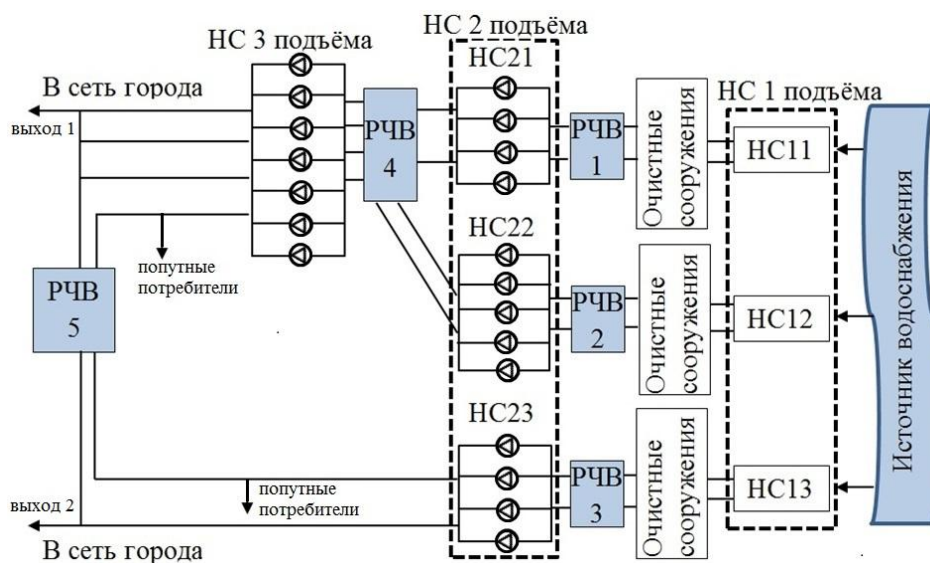
- обрезка рабочих колёс НА;
- снижение оборотов привода НА путём замены электродвигателей НА;
- установка частотно регулируемого привода на НА.

3) Изменение структуры МВ.

В качестве примера получения системы интегральных оценок потенциала ресурсо и энергосбережения при управлении развитием и функционированием МВ рассмотрим МВ, структура которого представлена на Рис. 2.

Рассматриваемый МВ включает в себя три насосные станции первого подъёма (НС11, НС12, НС13), три НС второго подъёма (НС21, НС22, НС23) и НС третьего подъёма. НС второго подъёма НС21 и НС22 подают воду на НС третьего подъёма, а НС третьего подъёма и НС23 подают воду в РЧВ5 и в сеть города.

Для решения задачи оптимального стохастического управления режимами работы



**Рис. 2.** Структура магистрального водовода  
**Fig. 2.** The structure of the water main

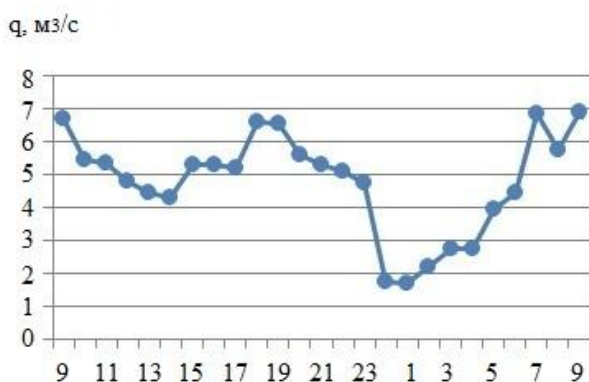
МВ рассматривались НС второго и третьего подъёмов и РЧВ4, и РЧВ5.

НС второго подъёма НС21 и НС23 оснащены четырьмя однотипными, параллельно подключёнными НА с одинаковыми характеристиками, НС22 и НС третьего подъёма оснащены пятью и семью однотипными НА соответственно с различными характеристиками. В нулевой момент времени  $k = 0$  для математическое ожидание уровней воды в РЧВ4  $H_{1,0} = 2$  м; в РЧВ5  $H_{2,0} = 1,45$  м. Допустимые диапазоны изменения уровней воды в РЧВ4 [2...4,9], в РЧВ5 [1,45...4,9]. Фактические параметры технологического оборудования МВ приведены в Табл. 1.

**Таблица 1.** Фактические параметры технологического оборудования МВ

**Table 1.** The actual parameters of technological equipment of water main

НС	Тип НА	$q$ , м <sup>3</sup> /ч	$h$ , м	$N$ , кВт	$nI$ , мин <sup>-1</sup>	$d$ , мм	Кол-во НА
НС21	20НДС	3420	71	960	1000	765	4
НС22	24 НДС	6500	79	1600	750	1040	5
НС23	22 НДС	4799	90	1000	1250	825	4
НС3	24 НДС	6500	79	1600	750	990-1040	6



**Рис. 3.** Типовой почасовой график суточного прогноза потребления воды из РЧВ5

**Fig. 3.** Typical hourly chart of the daily water consumption forecast of CWR 5 (clean-water reservoir)

На Рис. 3 приведен типовой почасовой график суточного прогноза потребления воды из РЧВ5.

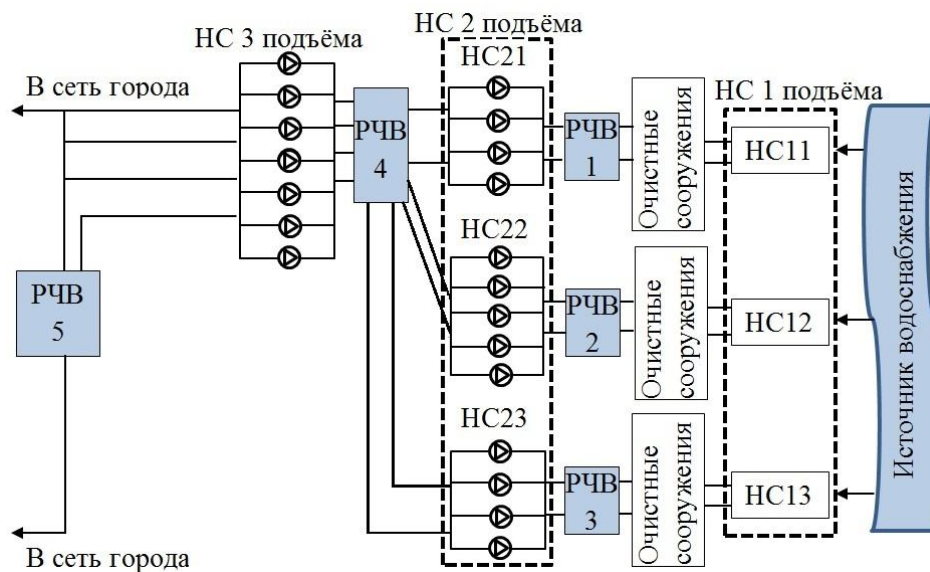
В Табл. 2 приведены 10 вариантов модернизации технологического оборудования МВ.

На Рис. 4 приводится изменённая структура МВ.

**Таблица 2.** Варианты модернизации технологического оборудования МВ

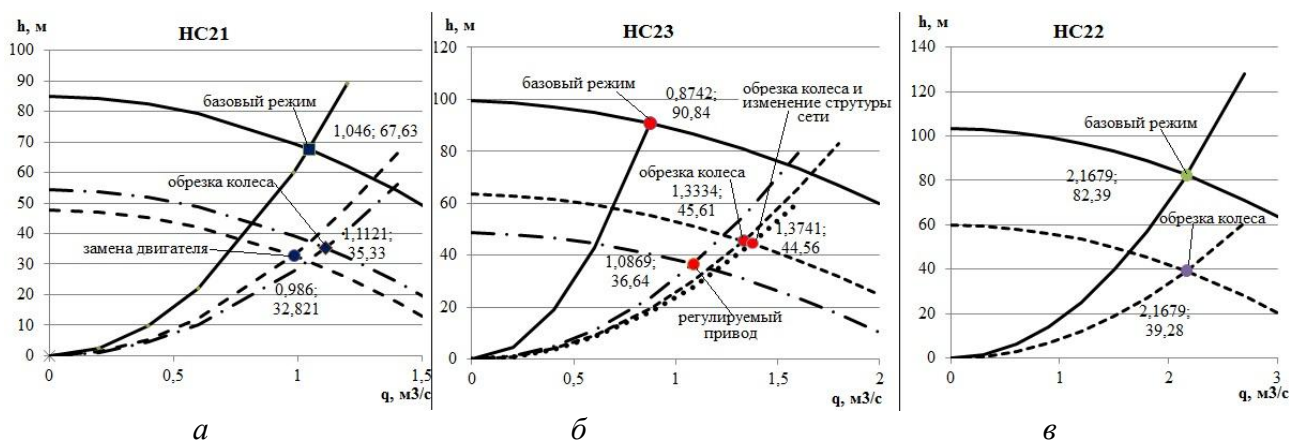
**Table 2.** Options for upgrading technological equipment of water main

Варианты	Произведенные изменения
Базовый	Существующий на данное время
1	Оптимальное стохастическое управление
2	Обрезка колёс НА на НС21 ( $d^*=612$ мм) и НС22 ( $d^*=792$ мм)
3	Обрезка колёс НА на НС21 ( $d^*=612$ мм) и НС22 ( $d^*=792$ мм), регулируемый привод на НС23 ( $nI^*=700$ мин <sup>-1</sup> ) и два регулируемых привода на НС3 ( $nI^*=650$ мин <sup>-1</sup> ), изменение структуры МВ
4	Обрезка колёс НА на НС21 ( $d^*=612$ мм), НС22 ( $d^*=792$ мм), НС23 ( $d^*=660$ мм), три регулируемых привода на НС3 ( $nI^*=650$ мин <sup>-1</sup> ), изменение структуры МВ
5	Замена двигателей на НС21 ( $nI^*=750$ мин <sup>-1</sup> )
6	Обрезка колёс НА на НС22 ( $d^*=792$ мм)
7	Обрезка колёс НА на НС22 ( $d^*=792$ мм), замена двигателей на НС21 ( $nI^*=750$ мин <sup>-1</sup> )
8	Обрезка колёс НА на НС23 ( $d^*=660$ мм), изменение структуры МВ
9	Замена двигателей на НС21 ( $nI^*=750$ мин <sup>-1</sup> ), обрезка колёс НА на НС22 ( $d^*=792$ мм), НС23 ( $d^*=660$ мм), изменение структуры МВ
10	Замена двигателей на НС21 ( $nI^*=750$ мин <sup>-1</sup> ), обрезка колёс НА на НС22 ( $d^*=792$ мм), НС23 ( $d^*=660$ мм), НС3 ( $d^*=792$ мм), изменение структуры МВ



**Рис.4.** Изменённая структура магистрального водовода

**Fig.4.** The modified structure of the water main

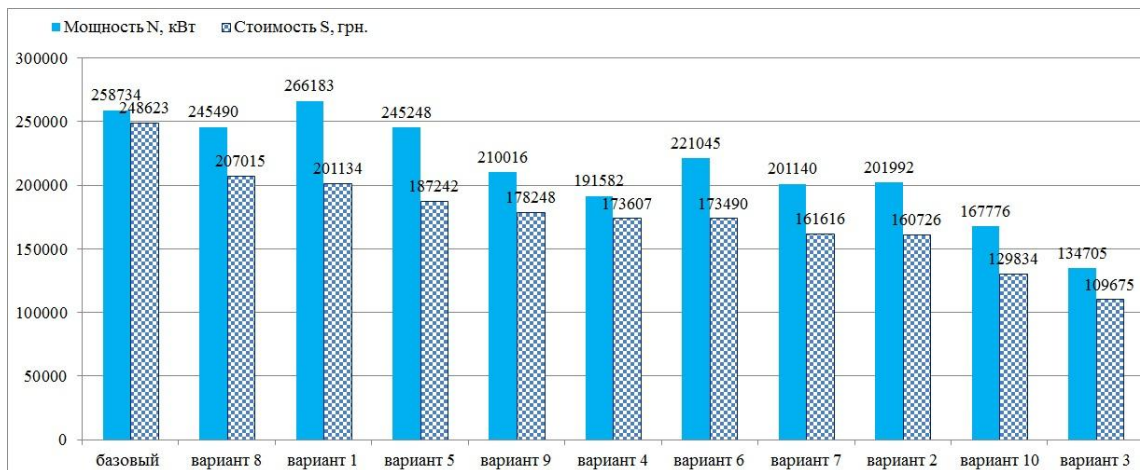


**Рис. 5.** Напорные характеристики насосных агрегатов и МВ для различных вариантов модернизации: *а* – НА типа 20 НДС, *б* – НА типа 22 НДС, *в* – НА типа 24 НДС

**Fig. 5.** Pressure characteristics of pump units and the water main for upgrade options: *a* – PU type 20NDS, *в* – PU type 22NDS, *в* – PU type 24NDS

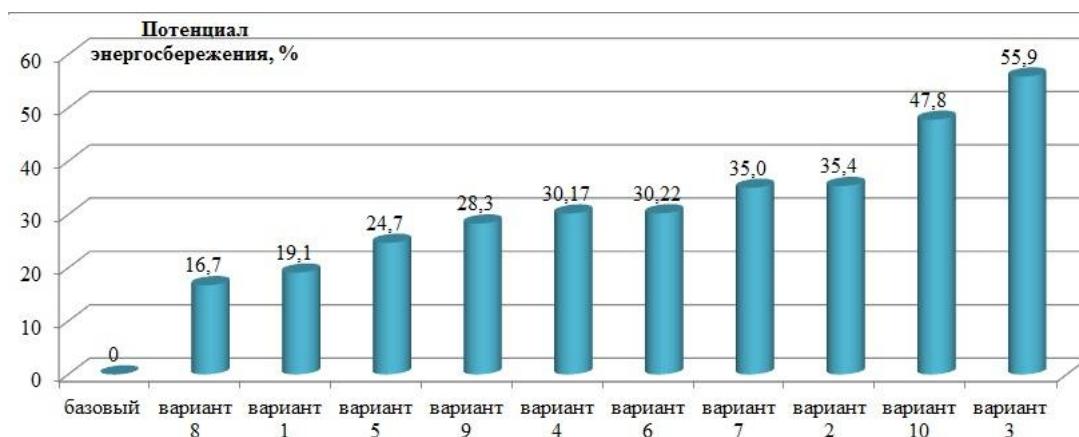
На Рис. 5 приводятся математические ожидания напорных характеристик НА и МВ и оценки математического ожидания положения рабочих точек НА для различных вариантов модернизации. На Рис. 6 приведены проранжированные оценки математического ожидания мощности и стоимости затрат на электроэнергию за сутки для различных вариантов модернизации.

На Рис. 6 видно, что наиболее перспективным вариантом модернизации является вариант 3 (обрезка колёс НА на НС21 ( $d^* = 612$  мм) и НС22 ( $d^* = 792$  мм), регулируемый привод на НС23, изменение структуры МВ; оптимальное управление). На Рис. 7 приведены результаты оценок потенциала ресурса и энергосбережения для множества различных вариантов модернизации.



**Рис. 6.** Оценки математического ожидания мощности и стоимости затрат на электроэнергию за сутки для различных вариантов модернизации

**Fig. 6.** Estimates for the expectation of power and the cost of energy costs per day for a variety of upgrade options



**Рис. 7.** Оценки потенциала ресурса и энергосбережения для множества различных вариантов модернизации

**Fig. 7.** Estimates of resource and energy saving potential for a variety of upgrade options

Для базового режима работы МВ с оптимальным управлением и варианта 3 приведены количество работающих НА (Табл. 3) и уровни воды в РЧВ4, РЧВ5 (Рис. 8, Рис. 9).

Таким образом, из всех рассмотренных вариантов вариант модернизации МВ (вариант 3) обладает максимальными потенциалами энергосбережения в 124 029 кВт, и максимальными потенциалами ресурсосбережения 138 948 грн. в течение суток. В относительных единицах к базовому режиму

эти потенциалы составляют соответственно 47,9% и 55,9%.

## ВЫВОДЫ

1. Предложенный метод получения оценок потенциала ресурса и энергосбережения на основании результатов компьютерного моде-

**Таблица 3.** Количество работающих насосных агрегатов для базового (б) режима



работы магистрального водовода и варианта 3 (в3)

**Table 3.** Number of operating pumps for the base (б) the mode of operation of water main and option 3 (в3)

Часы	НС21		НС22		НС23		НС3	
	б	в3	б	в3	б	в3	б	в3
24	4	4	5	5	4	1	3	1
1	4	4	5	5	4	1	3	2
2	4	4	5	5	4	1	2	2
3	4	4	5	5	4	1	2	2
4	4	4	5	5	4	1	2	2
5	4	4	5	5	1	1	2	2
6	4	4	5	5	1	1	2	2
7	1	2	1	2	1	1	1	2
8	1	2	1	2	1	1	1	1
9	1	1	1	1	1	1	1	1
10	1	1	1	1	1	1	1	1
11	1	2	1	2	1	1	1	1
12	1	2	1	2	1	1	1	1
13	1	2	1	2	1	1	1	1
14	1	2	1	2	1	1	1	1
15	1	2	1	2	1	1	2	2
16	1	1	1	2	1	1	2	2
17	1	1	1	2	1	1	2	2
18	1	1	1	2	1	1	2	2
19	1	1	1	1	1	1	1	1
20	1	1	1	1	1	1	1	1
21	1	1	1	1	1	1	1	1
22	1	1	1	1	1	1	1	1
23	1	1	1	1	1	1	2	1

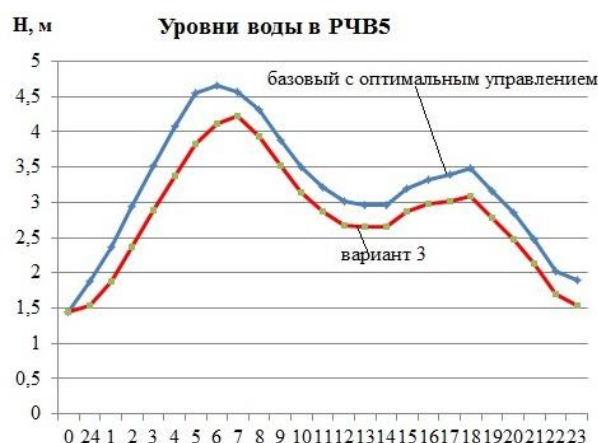
лирования режимов работы МВ при достаточно большом объёме моделирования различных вариантов модернизации структуры и параметров МВ при различных граничных условиях теоретически позволяет получить несмещённые, эффективные и практически реализуемые оценки потенциала ресурсо- и энергосбережения, которые могут служить надёжной основой для разработки и реализации инвестиционных проектов в системах водоснабжения.

2. Полученная зависимость оценок потенциала энерго и ресурсосбережения от вида и



**Рис. 8.** Изменение оценки математического ожидания уровня воды в CWR4

**Fig. 8.** The change of the estimate of the mathematical expectation of water level in CWR4



**Рис. 9.** Изменение оценки математического ожидания уровня воды в CWR5

**Fig. 9.** The change of the estimate of the mathematical expectation of water level in CWR5

объёма модернизации МВ позволяет построить оптимальную, с точки зрения располагаемых инвестиций и сроков их окупаемости, стратегию проведения работ по реконструкции и развитию МВ.

3. Полученные оценки потенциала энерго- и ресурсосбережения для конкретного МВ позволяют сделать его инвестиционно привлекательным.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Абрамов Н. Н., 1974.** Водоснабжение. Москва. Стройиздат, 481.
2. **Burgschweiger J., Gnadig B., Steinbach M. C. 2009.** Nonlinear Programming Techniques for Operative Planning in Large Drinking Water Networks. The Open Applied Mathematics Journal, 3, 14-28.
3. **Burgschweiger J., Gnadig B., Steinbach, M. C. 2009.** Optimization Models for Operative Planning in Drinking Water Networks. Optimization and Engineering, Vol. 10, 1, 43-73.
4. **Lipták B., 2009.** Pumping Station Optimization. Control Promoting Excellence in Process Automation, 12-19.
5. **Pulido-Calvo I., Gutiérrez-Estrada J. C., 2011.** Selection and Operation of Pumping Stations of Water Distribution Systems. Environmental Research Journal, Nova Science Publishers, 1-20.
6. **Ruuskanen A., 2007.** Optimization of Energy-Consumption in Wastewater Pumping. Lappeenranta University of Technology Department of Energy- and Environmental Technology, 99.
7. **Карелин В.Я., Минаев А. В., 1986.** Насосы и насосные станции. Москва, Стройиздат, 320.
8. **Лезнов Б.С., 2006.** Энергосбережение и регулируемый привод в насосных и воздушных установках. Москва? Энергоатомиздат, 358.
9. **Лобачёв П.В., 1983.** Насосы и насосные станции. Москва, Стройиздат, 191.
10. **Тевяшев А.Д., Матвиенко О.И., 2014.** Об одной стратегии оперативного планирования режимов работы насосной станции. Восточно-Европейский журнал передовых технологий, 3, 4-9.
11. **Тевяшев А.Д., Шулик П.В., 2002.** Оценка параметров математических моделей элементов насосных станций в реальном времени. АСУ и приборы автоматики, 1, 28-37.
12. **Тевяшев А.Д., Матвиенко О.И., Никитенко Г. В., 2014.** Стохастическая модель и метод оперативного планирования режимов работы насосных станций. Вода. Экология. Общество. Харьков, Матер. IV междунар. уч.-техн. конф. ХНУГ им. Бекетова, 61-64.
13. **Steinbach M.C., 2001.** Tree-Sparse Convex Programs. Konrad-Zuse-Zentrum für Informationstechnik Berlin, ZIB-Report, 22.
14. **Steinbach M.C., 2001.** General Information-Constrained in Stochastic Programs. Berlin, ZIB, 5.
15. **Teviashev A.D., Matvienko O. I., 2014.** About One Approach to Solve the Problem of Management of the Development and Operation of Centralized Water-Supply Systems. Econtechmod, An International Quarterly Journal, Vol. 3, 61-76.
16. **Tevyashev A., Matviyenko O., 2015.** About One Problem of Optimal Stochastic Control of the Modes of Operation of Water Mains. Econtechmod, An International Quarterly Journal, Vol. 4, Issue 3, 3-12.
17. **Тевяшев А.Д., Матвиенко О.И., 2015.** Математическая модель и метод оптимального стохастического управления режимами работы магистрального водовода. Восточно-Европейский журнал передовых технологий, № 6/4(78), 45-53.
18. **Тевяшев А.Д., Матвиенко О. И., 2014.** Стохастическая модель и метод зонирования водопроводных сетей. Восточно-Европейский журнал передовых технологий, 1(67), 17-24.
19. **Евдокимов, А.Г., Тевяшев А.Д., 1980.** Оперативное управление потокораспределением в инженерных сетях. Харьков, Вища школа, 144.
20. **Бертсекас Д., Шрив С., 1985.** Стохастическое оптимальное управление. Москва, Наука, 280.
21. **Тевяшев А.Д., Матвиенко О. И., Никитенко Г. В. 2014.** Оценка потенциала энерго и ресурсосбережения в системах централизованного водоснабжения. Науковий вісник будівництва, 3(77), 144-150.
22. **Чупин Р.В., Мелехов Е. С., 2011.** Развитие теории и практики моделирования и оптимизации систем водоснабжения и водоотведения. Иркутск, Изд-во ИрГТУ, 323.
23. **Zhuravska N., Malkin E. 2015.** Energy-saving technologies with the use of water treat the magnetic fields. Підводні технології. Вип. 02, 79-83.

## REFERENCES

1. **Abramov N., 1974.** Water Supply. Stroyizdat, Moscow, 481.
2. **Burgschweiger J., Gnadig B., Steinbach M. C., 2009.** Nonlinear Programming Techniques for Operative Planning in Large Drinking Wa-

- ter Networks. The Open Applied Mathematics Journal, 3, 14-28.
3. **Burgschweiger J., Gnadig B., Steinbach M.C., 2009.** Optimization Models for Operative Planning in Drinking Water Networks. Optimization and Engineering. Vol. 10, 1, 43-73.
  4. **Lipták B., 2009.** Pumping Station Optimization. Control Promoting Excellence in Process Automation, 12-19.
  5. **Pulido-Calvo I. Gutiérrez-Estrada J.C., 2011.** Selection and Operation of Pumping Stations of Water Distribution Systems. Environmental Research Journal, Nova Science Publishers, 1-20.
  6. **Ruuskanen A., 2007.** Optimization of Energy Consumption in Wastewater Pumping. Lappeenranta University of Technology Department of Energy- and Environmental Technology, 99.
  7. **Karelin V.Y., Minayev A.V., 1986.** Pumps and Pumping Stations. Moscow, Stroyizdat, 320.
  8. **Leznov B.C., 2006.** Energy Saving and Adjustable Drive for Pump and Blower Installations. Moscow, Energoatomizdat, 358.
  9. **Lobachev P.V., 1983.** Pumps and Pumping Stations. Moscow, Stroyizdat, 191.
  10. **Teviashev A.D., Matvienko O.I. 2014.** One Strategy of Operational Planning Mode Pumping Station. East European Journal of Enterprise Technologies, 3, 4-9.
  11. **Teviashev A.D., Shulik P.V., 2002.** Estimation of Parameters of Mathematical Models of the Elements of Pumping Stations in Real Time. ACS and Automation Devices. Kharkov, UnivKhTURE, 28-37.
  12. **Teviashev A.D., Matviyenko O.I., Nikitenko G.V. 2014.** Stochastic Model and Method of Operational Planning Modes Pumping Stations. Water. Ecology. Society. Kharkov, Proceedings of the IV International Scientific Technical Conference. UnivKhNUG, 61-64.
  13. **Steinbach M.C., 2001.** Tree-Sparse Convex-Programs. Konrad-Zuse-Zentrum für Informations technik Berlin, ZIB-Report, 22.
  14. **Steinbach M.C., 2001.** General Information Constraints in Stochastic Programs. Berlin, ZIB, 5.
  15. **Teviashev A.D., Matvienko O.I., 2014.** About One Approach to Solve the Problem of Management of the Development and Operation of Centralized Water-Supply Systems. Econtechmod. An International Quarterly Journal, Vol. 3, 61-76.
  16. **Tevyashev A., Matviyenko O., 2015.** About One Problem of Optimal Stochastic Control of the Modes of Operation of Water Mains. Econtechmod. An International Quarterly Journal, Vol. 4, Issue 3, 312.
  17. **Tevyashev A.D., Matviyenko O.I., 2015.** Mathematical Model and Method of Stochastic Optimal Control Modes of Water Main. East European Journal of Enterprise Technologies, 6/4 (78), 45-53.
  18. **Teviashev A.D., Matviyenko O.I., 2014.** Stochastic Model and Method of Zoning Water Networks. Kharkov, Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 1 (67), 17-24.
  19. **Evdokimov A.G., Teviashev A.D., 1980.** Operational Management of Load Flow in Engineering Networks. Kharkiv, High School, 144.
  20. **Bertsekas D., Shreve S., 1985.** Stochastic Optimal Control. The Discrete Time Case. Moscow, Nauka, 280.
  21. **Tevyashev A.D., Matvienko O.I., Nikitenko G.V., 2014.** Estimation of Potential Energy and Resources in the Centralized Water Supply Systems. Naukoviy Visnik Budivnitstva, 3 (77), 144-150.
  22. **Chupin R.V., Melehov E.S., 2011.** The Theory and Practice of Modeling and Optimization of Water and Wastewater. Irkutsk, Publisher Irkutsk State Technical University, 323.
  23. **Zhuravska N., Malkin E. 2015.** Energy-saving technologies with the use of water treat the magnetic fields. Underwater technology. Vol. 02, 79-83.

ESTIMATION OF THE POTENTIAL OF RESOURCE AND ENERGY SAVING IN THE MANAGEMENT OF DEVELOPMENT AND FUNCTIONING OF WATER MAIN

*Andrey Tevyashev, Olga Matviyenko*

Kharkiv National University of Radio Electronics  
prosp. Nauki, 14, Kharkiv, Ukraine, 61166  
[tad45@mail.ru](mailto:tad45@mail.ru), [orcid.org/0000-0002-2846-7089](https://orcid.org/0000-0002-2846-7089)

**Abstract:** The problem of estimating of the potential of resource and energy saving while the preparation of the investment projects of the modernization of the technological equipment and the transition from the traditional modes of operation of the water mains to the optimal stochastic control for three-band tariffs for the electricity is examined in this work. A new method to obtain unbiased, effective and practically implemented estimates of the potential of resource and energy saving in the water mains has been proposed. The method is

based on the use of the results of computer based simulation of the solving of the problem of optimal stochastic control of the modes of operation of the water main. The whole variety of options of the modernization of the water main is narrowed down to the change of the net graph, boundary conditions (predictions of water consumption and levels of water in the reservoirs), the parameters of mathematical models of the pump units and sections of the pipeline.

The results of the estimates of the potential of resource and energy saving for a variety of differ-

ent options of the modernization of the technological equipment of one of the largest water mains in Ukraine, providing water to the city with a population over 1,5 million people are given. The obtained estimates of the potential of resource and energy saving for the specific water main allow to make it investment-attractive.

**Key words:** water main, estimation of potential resource, optimal stochastic control, steering-wheel drive, the pumping station.