

УДК 681.5.015

С.В. Дядюн, О.Н. Штельма

*Харківський національний університет міського господарства ім. О.М. Бекетова, Харків*

## ИМИТАЦИОННЫЕ МОДЕЛИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ТРУБОПРОВОДНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ

*При оценке эффективности разработки алгоритмов оперативного управления функционированием трубопроводных систем необходимо учитывать как характеристики процесса подачи и распределения целевого продукта, так и случайный характер воздействий, которым подвержен объект. Рассматриваемая имитационная модель может быть использована как эталон при проверке адекватности решений, получаемых по более простым, агрегированным моделям трубопроводных систем.*

**Ключевые слова:** имитационная модель, трубопроводная система, модель, функционирование, эффективность, процесс, воздействие, адекватность.

Создание имитационных моделей технологических процессов функционирования трубопроводных транспортных систем (ТТС) и алгоритмизация процессов управления их режимами позволяет на практике повысить качество и эффективность АСДУ и АСУ ТП функционирования этих систем.

При проектировании АСУ ТП либо АСДУ трубопроводных транспортных систем важнейшим является этап разработки алгоритмов оперативного управления режимами функционирования ТТС. При оценке их эффективности необходимо учитывать как характеристики технологического процесса подачи и распределения целевого продукта, так и случайный характер воздействий, которым подвержена ТТС. Это обстоятельство обуславливает необходимость создания имитационных моделей не только ТТС и среды, в которой она функционирует, но и системы автоматизированного управления режимами ее функционирования в целом.

Наличие таких имитационных моделей позволяет сгенерировать и глубже проанализировать процессы потокораспределения в реальных ТТС, проиграть на модели и выбрать оптимальную структуру системы управления с учетом особенностей конкретной ТТС (размерность, конфигурация сети, число активных источников), оценить качество и эффективность реализуемого управления. Кроме того, адекватная имитационная модель позволяет оценить состояние всех элементов ТТС по фактическим измерениям выходных параметров в ряде их них (мера близости этих значений и является основным критерием адекватности имитационной модели реальному процессу). Существенной особенностью задач оперативного управления потокораспределением в ТТС является отсутствие, в общем случае, аналитических зависимостей для выходных параметров управления и критериев качества

эффективности функционирования ТТС, что делает практически невозможным поиск аналитических решений. Единственно приемлемым методом решения оказывается имитационное моделирование функционирования ТТС на ЭВМ, позволяющее получить математические ожидания оценок критериев качества эффективности управления режимами ТТС при соблюдении накладываемых технологических ограничений.

Реализация системы оперативного управления ТТС обеспечивается в результате решения ряда иерархически связанных между собой задач [1-4]. В соответствии с этим структура имитационной модели системы оперативного управления технологическими процессами функционирования ТТС представляется в виде комплекса функционально взаимодействующих модулей, назначением каждого из которых является решение определенной задачи. Общий моделирующий алгоритм имитационной модели заключается в декомпозиции процесса функционирования ТТС на ряд событий, каждое из которых означает изменение состояния ТТС во времени в результате воздействия внешней среды и внутренних взаимодействий между ее отдельными элементами. В зависимости от задач, решаемых при имитационном моделировании, возможна различная глубина детализации используемых моделей ТТС.

Имитационная модель оперативного управления технологическими процессами функционирования ТТС должна быть построена с использованием принципов блочности структуры, модульности алгоритмического и программного обеспечения, информационной развязки модулей, наличие единой информационной базы модели.

Используемая имитационная модель оперативного управления технологическими процессами функционирования ТТС должна быть универсальной, поскольку она должна учитывать

развитие ТТС в пространстве (по территории) и во времени и предусматривать возможность тиражирования для ТТС различных городов и населенных пунктов. Она является инструментом для исследования эффективности алгоритмов[5] при решении практических задач повышения эффективности и качества оперативного управления режимами функционирования ТТС. Имитационную модель целесообразно использовать для обучения персонала диспетчерских служб в предпусковой период АСУ ТП или АСДУ.

Решению отдельных задач оперативного управления ТТС в имитационной модели отвечает программная реализация соответствующих алгоритмов. В общем же имитационная модель процессов управления в ТТС содержит в своей основе моделирование технологических процессов функционирования отдельных элементов и ТТС в целом. Остановимся несколько подробнее на описании функционирования отдельных элементов и технологических процессов в имитационной модели ТТС.

Процесс подачи воды насосными станциями (НС) описывается в соответствии с известным полиномом второй степени[2]; анализу функционирования агрегатов каждой НС предшествует идентификация их параметров с целью обеспечения адекватности реальных НС и их моделей. Значения расходов и давлений  $Q_{\text{вых}i}, H_{\text{вых}i}, i \in L$  на выходах насосных станций диктуются запросами и потребностями водопроводной сети, что находит свое выражение в непрерывном изменении положения ее характеристики вследствие неравномерности процессов потребления воды во времени.

Распределение воды в трубопроводной транспортной системе по трубопроводам и между отдельными потребителями, а также в целом потокораспределение в ТТС определяется в результате решения системы уравнений математической модели ТТС [1]. В этом случае неизвестные значения компонент векторов переменных  $\bar{h} = \{h_i, i \in E\}, \bar{q} = \{q_i, i \in E\}$ , однозначно характеризующих потокораспределение в ТТС, определяются на основании решения задач анализа или гидравлического расчета ТТС (в зависимости от достигаемой цели) при задании соответствующей комбинации ряда из этих переменных в качестве граничных условий на входах и выходах ТТС. Если при этом используется математическая модель трубопроводной транспортной системы без активных элементов[6-8], то нахождение переменных  $h_i, q_i, i \in K$ , соответствующих активной части ТТС, становится

невозможным, но значения переменных  $h_{\text{вых}i}, Q_{\text{вых}i}, i \in L$  на выходах НС, характеризующее процесс подачи целевого продукта в сеть, также определяются.

Несколько сложнее обстоит дело с описанием процессов потребления целевого продукта и построения их адекватных моделей. Методы и алгоритмы идентификации моделей процессов подачи и потребления целевого продукта достаточно полно разработаны[2,3] и позволяют получить вполне приемлемые для практики результаты. Однако сложность состоит в том, что в реальных условиях функционирования ТТС мгновенно значения расходов целевого продукта на потребителях не измеряются, а эти значения являются задаваемыми величинами (независимыми переменными) при решении системы нелинейных уравнений математической модели объекта для определения потокораспределения в ТТС. Если же учесть их огромное количество в реальных ТТС, а также неравномерность во времени и стохастический характер процессов потребления целевого продукта, то положение становится и вовсе затруднительным. Эффективным выходом из него на практике является использование агрегированных моделей ТТС[4,9]. Для понятия же и анализа, а также формализации всех реальных процессов, протекающих в таких сложных системах сетевой структуры, как ТТС, приходит на помощь имитационное моделирование.

В водо- и газоснабжении отводится широкое место и придается большое значение построению графиков водо- и газопотребления. Эти графики представляют собой зависимости изменения необходимого расхода целевого продукта в сети во времени (обычно по часам суток). В простейшем случае такие зависимости могут быть получены для каждого активного элемента как  $q_{\text{вых}i}^{(a)}(t), i \in L$ , на основе обработки определенной выборки значений регистрируемых параметров на его выходе при условии обеспечения целевым продуктом всех потребителей в сети. На практике графики потребления целевого продукта наряду с установками диспетчера являются своего рода ориентиром для поддержания заданных значений параметров на выходах активных элементов путем включения обеспечивающих их комбинаций насосных или компрессорных агрегатов по часам суток. Об уровне обеспечения целевым продуктом потребителей всех категорий в некоторый момент времени можно судить по соответствующим значениям давлений в контролируемых точках сети и поступающей от отдельных потребителей различного рода информации.

На графиках городского газо- и водопотребления выделяется утренний и вечерний пик максимального потребления целевого продукта, небольшой дневной спад и ночной уровень минимального газо- и водопотребления[3,10]. Аналогичным образом изменяется на протяжении суток и потребление целевого продукта отдельными потребителями, однако значения этого параметра не измеряются и не регистрируются. Таким образом, зависимости  $q_j^{(H)}, j \in N$  отражают характер изменения потребления целевого продукта  $j - m$  потребителем ТТС.

При имитационном моделировании ТТС наряду с моделями, разработанными в [4,9], можно использовать и более простые модели. Так, например, процесс потребления целевого продукта  $j - m$  потребителем ТТС может быть описан дискретной функцией времени, выражающей сумму частей двух синусоид вида

$$q_j^{(H)}(t) = Mq_j^{(H)} + Aj \sin(\omega_j t + \phi_j), \quad (1)$$

$$j \in N, t \in [0, T]$$

которые отличаются различными значениями математического ожидания  $Mq_j^{(H)}$  потребляемого расхода целевого продукта на временном интервале  $[0, T]$

$$Mq_j^{(H)} = \begin{cases} \gamma_j q_{oj}, & 0 \leq t < t_1 \\ q_{oj}, & t_1 \leq t \leq T \end{cases} \quad (2)$$

где  $0 < \gamma_j < 1$ .

При имитационном моделировании ТТС значения параметров, входящих в выражения (1), (2), определялись на основе обработки экспериментальных данных о процессах, протекающих в реальной ТТС. Распределяя среднее за некоторый длительный период  $\theta$  значение

суммарного расхода в сети  $\bar{Q} = \sum_{t=1}^{\theta} \sum_{i \in L} q_{\text{вых}i}(t)$

между всеми узлами модели ТТС пропорционально интегральным показателям потребителей за этот же период, был найден вес каждого потребителя

$\left\{ \alpha_j, j \in N : \sum_{j \in N} \alpha_j = 1 \right\}$  и математическое

ожидание  $Mq_j^{(H)}$  потребляемого им расхода воды.

Для любых заданных в некоторый момент времени  $t$  значений расходов  $q_{\text{вых}i}^{(a)}(t)_{i \in L}$  на выходах активных элементов соответствующие значения расходов в узлах сети вычислялись как  $q_j^{(H)}(t) = \sum_{i \in L} q_{\text{вых}i}(t)$ . Таким образом определялся

график суточного водопотребления для узлов модели ТТС. Значения параметров в выражениях (1), (2) принимались следующими:  $A_j = 0,5q_{oj}$ ;

$$\omega_j = \frac{\pi}{6}; \quad \phi_j = \pi; \quad \alpha_j = 0,6; \quad t_1 = 6 \text{ час}.$$

Соответствие фактического и модельного режимов оценивалось по значению невязки  $Y = \sum_{j \in N' \subset N} (h_j^{(\phi)} - h_j^{(M)})$  в контролируемых точках

ТТС при одинаковых  $q_{\text{вых}i}, i \in L$ . Так, для городской ТТС, состоящей из 15 узлов, значение  $Y$  составило 30 м, причем  $\max_{j \in N' \subset N} (h_j^{(\phi)} - h_j^{(M)}) = 4$  м,

что говорит о соответствии имитационной модели реальной ТТС. Небольшое расхождение в значениях выходных параметров  $h_j, j \in N'$  получено, в основном, за счет ошибок, полученных при распределении весов  $\alpha_j$ .

Имитационная модель ТТС в данном виде может быть использована как эталон при проверке адекватности решений, получаемых по более простым, агрегированным моделям ТТС.

**Рецензент:** д-р техн. наук проф. Н.И. Самойленко, Харьковский национальный университет городского хозяйства им. А.Н. Бекетова, Харьков.

**Автор:** ДЯДЮН Сергей Васильевич кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры прикладной математики и информационных технологий, Харьковский национальный университет городского хозяйства им. А.Н. Бекетова.  
E-mail – dauldin@mail.ru .

**Автор:** ШТЕЛЬМА Ольга Николаевна Старший преподаватель кафедры прикладной математики и информационных технологий, Харьковский национальный университет городского хозяйства им. А.Н. Бекетова,  
E-mail – olga.shtelma@gmail.com

## Література

1. Евдокимов, А. Г. Моделирование и оптимизация потокораспределения в инженерных сетях [Текст] / А. Г. Евдокимов, А. Д. Тевяшев, В. В. Дубровский. – М.: Стройиздат, 1990. – 368 с.
2. Евдокимов, А. Г. Оперативное управление потокораспределением в инженерных сетях [Текст] / А. Г. Евдокимов, А. Д. Тевяшев. – Харьков, 1980. – 144 с.
3. Евдокимов, А. Г. Потокораспределение в инженерных сетях [Текст] / А. Г. Евдокимов, В. В. Дубровский, А. Д. Тевяшев. – М.: Стройиздат, 1979. – 199 с.
4. Дядюн, С. В. Моделирование и рациональное управление системами водоснабжения при минимальном объеме оперативной информации [Текст] / С. В. Дядюн // Радиоэлектроника и информатика. – Харьков, ХНУРЭ, 2002. – № 20. – С. 111-115.
5. Дядюн С.В. Имитационное моделирование АСУ ТП водоснабжения города // Тезисы докладов научно-технической конференции «Проблемы совершенствования управления народным хозяйством на основе средств вычислительной техники» («Управление – 86») - М., 1986. – с. 199-200.
6. Евдокимов, А. Г. Оптимальные задачи на инженерных сетях [Текст] / А. Г. Евдокимов. – Харьков: Вища школа, 1976. – 153 с.
7. Fallside, F., Perry, P. F., Burch, R. H., Marlow, K. C. (1975). The Development of Modelling and Simulation Techniques Applied to a Computer – Based – Telecontrol Water Supply System // Computer Simulation of Water Resources Systems. – № 12. – P. 617-639.
8. Меренков, А. П. Теория гидравлических цепей [Текст] / А. П. Меренков, В. Я. Хасилев. – М.: Наука, 1985. – 279 с.
9. Дядюн, С. В. Оценка качества и эффективности управления системами водоснабжения в зависимости от степени неопределенности модели объекта. [Текст] / С. В. Дядюн // Сборник – специализированный выпуск журнала «Технологический аудит и резервы производства». – Харьков, 2013, №6/4(14), стр. 4-6. Имеет научную индексацию в мировых наукометрических базах и системах: Ulrich's Periodicals Directory, DRIVER, BASE, Index Copernicus, РИНЦ, ResearchBib, Directory of Open Access Journals (DOAJ), WorldCat.
10. Абрамов, Н. Н. Теория и методика расчета систем подачи и распределения воды. [Текст] / Н. Н. Абрамов. – М.: Стройиздат, 1985. – 288 с.

## References

1. Evdokimov, A. G. Modelirovanie i optimizacija potokoraspredelenija v inzhenernyh setjah [Tekst] / A. G. Evdokimov, A. D. Tevjashev, V. V. Dubrovskij. – M.: Strojizdat, 1990. – 368 s.
2. Evdokimov, A. G. Operativnoe upravlenie potokoraspredeleniem v inzhenernyh setjah [Tekst] / A. G. Evdokimov, A. D. Tevjashev. – Har'kov, 1980. – 144 s.
3. Evdokimov, A. G. Potokoraspredelenie v inzhenernyh setjah [Tekst] / A. G. Evdokimov, V. V. Dubrovskij, A. D. Tevjashev. – M.: Strojizdat, 1979. – 199 s.
4. Djadjun, S. V. Modelirovanie i racional'noe upravlenie sistemami vodosnabzhenija pri minimal'nom ob#jome operativnoj informacii [Tekst] / S. V. Djadjun // Radioelektronika i informatika. – Har'kov, HNURJe, 2002. – № 20. – S. 111-115.
5. Djadjun S.V. Imitacionnoe modelirovanie ASU TP vodosnabzhenija goroda // Tezisy dokladov nauchno-tehnicheskoy konferencii «Problemy sovershenstvovanija upravlenija narodnym hozjajstvom na osnove sredstv vychislitel'noj tehniki» («Upravlenie – 86») - M., 1986. – s. 199-200.
6. Evdokimov, A. G. Optimal'nye zadachi na inzhenernyh setjah [Tekst] / A. G. Evdokimov. – Har'kov: Vishha shkola, 1976. – 153 s.
7. Fallside, F., Perry, P. F., Burch, R. H., Marlow, K. C. (1975). The Development of Modelling and Simulation Techniques Applied to a Computer – Based – Telecontrol Water Supply System // Computer Simulation of Water Resources Systems. – № 12. – P. 617-639.
8. Merenkov, A. P. Teorija gidravlicheskih cepej [Tekst] / A. P. Merenkov, V. Ja. Hasilev. – M.: Nauka, 1985. – 279 s.
9. Djadjun, S. V. Ocenka kachestva i jeffektivnosti upravlenija sistemami vodosnabzhenija v zavisimosti ot stepeni neopredelennosti modeli ob#ekta. [Tekst] / S. V. Djadjun // Sbornik – specializirovannyj vypusk zhurnala «Tehnologicheskij audit i rezervy proizvodstva». – Har'kov, 2013, №6/4(14), str. 4-6. Imeet nauchnuju indeksaciju v mirovyh naukometriceskih bazah i sistemah: Ulrich's Periodicals Directory, DRIVER, BASE, Index Copernicus, RINC, ResearchBib, Directory of Open Access Journals (DOAJ), WorldCat.
10. Abramov, N. N. Teorija i metodika rascheta sistem podachi i raspredelenija vody. [Tekst] / N. N. Abramov. – M.: Strojizdat, 1985. – 288 s.

ІМІТАЦІЙНІ МОДЕЛІ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ФУНКЦІОНУВАННЯ ТРУБОПРОВІДНИХ  
ТРАНСПОРТНИХ СИСТЕМ

С.В. Дядюн, О.Н. Штельма

При оцінці ефективності розробки алгоритмів оперативного управління функціонуванням трубопроводних систем необхідно враховувати як характеристики процесу подачі та розподілу цільового продукту, так і випадковий характер впливів, яким піддається об'єкт. Розглянута імітаційна модель може бути використана як еталон при перевірці адекватності рішень, одержуваних по більш простим, агрегованим моделям трубопроводних систем.

Ключові слова: імітаційна модель, трубопроводна система, модель, функціонування, ефективність, процес, вплив, адекватність.

## SIMULATION MODELS OF PROCESSES FUNCTIONING PIPELINE TRANSPORTATION SYSTEMS

S. Dyadun, O. Shtelma

Creation of simulation models of functioning pipeline systems allows you to practice to improve the quality and efficiency of the management of their functioning. In assessing the effectiveness of the development of algorithms operational management Pipeline systems must take into account both the characteristics of the process of supply and distribution of the desired product, and random effects, which is subject to the control object. This necessitates the creation of simulation models not only piping systems and the environment in which they operate, but also automated control system modes of operation as a whole. The proposed simulation model can be used as a reference when checking the adequacy of the solutions obtained by a simple aggregate model of pipeline systems.

Keywords: simulation model, pipeline system, model, functioning, efficiency, process, impact, adequacy.