УДК 628.14 doi: 10.23968/2305–3488.2018.20.3.19–23

ЗАМЕНА ОБОРУДОВАНИЯ В СЛОЖНЫХ ВОДОПРОВОДНЫХ СИСТЕМАХ

Койда А. Н.

REPLACEMENT OF THE EQUIPMENT IN COMPLEX WATER SUPPLY SYSTEMS

Koida A. N.

Аннотация
Введение: элементы систем водоснабжения имеют ограниченный срок нормальной (исправной) эксплуатации. Правильная и разумная организация обслуживания таких систем является достаточно сложной задачей. На последовательность замен оборудования существенное влияние оказывает как стоимость приобретаемого на замену нового оборудования, так и стоимость ремонта изношенного оборудования, а также затраты связанные с простоями самого оборудования и всей системы в целом. **Методы и материалы**: для обоснования необходимости грамотной организации процесса обслуживания сложных водопроводных систем используется общий алгоритмический метод ветвей и границ. **Результаты**: предложено математическое решение выбора оптимального алгоритма организации последовательности замен оборудования в водопроводных системах. Рассмотрены стратегии замен как после выработки ресурса одного агрегата, так и при замене всех агрегатов одновременно. **Заключение:** предложенная стратегия замен может использоваться при планировании ремонтов (замен) во внутренних водопроводных сетях зданий.
Ключевые слова: существенное состояние, обслуживание оборудования, системы водоснабжения, простой оборудования, замена агрегатов, стратегия замен.

Abstract
Introduction: elements of water supply systems have a limited period of normal (serviceable) operation. Proper and reasonable organization of the maintenance of such systems is quite a challenge. The sequence of equipment replacement is significantly influenced by both the cost of replacement equipment purchased, as well as the cost of repairing worn out equipment, and the costs associated with downtime of the equipment itself and the overall system. **Methods and materials:** to justify the need for competent organization of the process of servicing complex water supply systems, the general algorithmic method of branches and boundaries is used. **Results:** a mathematical solution is proposed for choosing the optimal algorithm for organizing a sequence of replacing equipment in water supply systems. The strategies of substitutions are considered both after the development of the resource of one unit, and when all the aggregates are replaced simultaneously. **Conclusion:** the proposed substitution strategy can be used in the planning of repairs (substitutions) in the internal water supply networks of buildings.

Key words: essential condition, service of equipment, water supply systems, downtime of equipment, replacement of machines, strategy of replacements.

Введение

Рассматриваемая задача о замене оборудования в сложных водопроводных системах заключается в следующем. Оборудование, состоящее из нескольких агрегатов систем водоснабжения, продолжительность службы которых ограничена, работает в течение некоторого конечного промежутка времени. Замена агрегатов систем водоснабжения требует прерывания работы оборудования, что приводит к экономическим потерям — независящей от числа сменяемых агрегатов плате за простой. Для замены покупаются новые агрегаты, в то время как бывшие в употреблении не реализуются.

В городских системах водоснабжения, в системах специального назначения, для которых отключение оборудования ведет не только к финансовыми потерям, но и к санитарно-эпидемиологическим и гуманитарным катастрофам, необходимо организовать работу оборудования таким образом, чтобы затраты, связанные с закупкой и простоями, были минимальными [1, 2, 4–6].

Так как любая система водоснабжения состоит из N агрегатов, продолжительность службы которых ограничена и равна $TY[Y]$, где $Y \in 1{:}\, N$, и работает в течение некоторого конечного промежутка времени T, причем, хотя бы для одного Y

$$TY[Y] < T, \qquad (1)$$

замена любого из агрегатов или нескольких сразу требует прерывания работы всего оборудования водопроводной системы, что приводит к экономическим потерям, выражающимся в плате за простой, которая в данном случае принимается не зависящей от числа сменяемых агрегатов П [7–10].

Для замены агрегаты покупаются, их стоимость равна $CY[Y]$, где $Y \in 1: N$. Использованные агрегаты, как отработавшие время $TY[Y]$, так и имеющие остатки ресурсов $XY[Y]$, в дальнейшем не используются. В любой момент времени состояние системы характеризуется набором остатков ресурсов агрегатов.

Исходное состояние оборудования Ф° характеризуется набором

$$XY^0[Y],\ Y \in 1: N. \tag{2}$$

В тот момент, когда ресурс какого-либо агрегата закончился, работа оборудования останавливается для его замены. Одновременно может быть произведена замена еще нескольких агрегатов, время службы которых уже приближается к концу.

Методы и материалы

Для решения поставленной задачи необходимо принять ряд условий [11]. Состояние оборудования, характеризующееся набором ресурсов $XY[Y] > 0$, $Y \in 1: N$, из которых хотя бы для одного Y выполняется равенство

$$XY[Y] = TY[Y], \tag{3}$$

будем называть существенным состоянием системы Ф.

Работу оборудования в рамках решаемой задачи можно рассматривать как последовательный переход из одного существенного состояния в другое [12], так как только в них производятся учитываемые в задаче затраты.

Для перехода из одного существенного состояния в другое необходимо:

- заменить агрегат с самым коротким остатком ресурса;
- дополнительно заменить $0 \div N - 1$ агрегат.

Применяя правило перехода к исходному состоянию оборудования (2), а затем последовательно ко всем возникающим существенным состояниям, мы получим бесконечное множество существенных состояний.

Множество можно ограничить, если учесть ряд условий на применение правила перехода:

1. Каждому существенному состоянию припишем еще одну характеристику — время, величину которого будем определять по рекуррентной формуле:

$$T^0 = XY^0_{\min}, \tag{4}$$

$$T^k = T^{k-1} + XY^k_{\min},\ k \neq 0, \tag{5}$$

$$XY^k_{\min} = \min XY^k[Y],\ k = 0,1\ldots, \tag{6}$$

где $Y \in 1: N$.

Величина T^k показывает, до какого момента времени оборудование будет работать без простоев после существенного состояния $Ф^k$.

Условие 1 ограничивает круг существенных состояний, к которым мы будем применять правило перехода, а именно лишь к тем, для которых

$$T^k < T. \tag{7}$$

2. Применяя правило перехода к существенному состоянию, удовлетворяющему условию (7), можно получить

$$\Omega = 2^{N-1} \tag{8}$$

новых существенных состояний.

Если договориться, что одновременно с обязательной заменой агрегата, отработавшего свой ресурс, мы будем менять агрегаты лишь в порядке возрастания остатков ресурсов, то это число сокращается до N.

То, что агрегат будет заменяться лишь после того как все агрегаты с меньшим ресурсом уже заменены, не накладывает ограничений на решение задачи, так как оставленные без внимания существенные состояния будут учтены в дальнейшем.

3. Очевидно, что если $XY^k[M] = TY^k[M]$, то заменять M-й агрегат бессмысленно, так как возникающее при этом существенное состояние повторяет предыдущее, а достижение его обходится дороже. Следовательно, из существенного состояния $Ф^k$ мы получим $M - 1$ существенное состояние.

4. Если для существенного состояния $Ф^{k+1}$, полученного из существенного состояния $Ф^k$ заменой M агрегатов по правилу перехода и условиям 1–3, не выполняется условие (8) , а именно $T^k \geq T$, то все существенные состояния, возникающие при дальнейшей замене агрегатов, рассматриваться не будут, так как решение задачи их содержать не может.

В дальнейшем следует пользоваться лишь дополнительным правилом перехода, то есть правилом перехода с учетом условий 1–4.

Результаты и обсуждение

Итак, существенное состояние Φ^{k+1} следует за существенным состоянием Φ^k, если оно может быть получено применением правила перехода к существенному состоянию Φ^k или к существенному состоянию, следующему за Φ^k ($\Phi^{k+1} \succ \Phi^k$).

Кроме этого, существенное состояние Φ^{k+1} непосредственно следует за существенным состоянием Φ^k, если $\Phi^{k+1} \succ \Phi^k$ и не $\exists \Phi^L$, $\Phi^{k+1} \succ \Phi^L \succ \Phi^k$. Обозначение $\Phi^{k+1} \overset{\text{н}}{\succ} \Phi^k$.

Таким образом, применяя дополнительное правило перехода к исходному состоянию оборудования, а затем, последовательно ко всем возникающим существенным состояниям [14], мы получим ограниченное множество существенных состояний Φ.

Оно полуупорядоченное и транзитивное, а так как по правилу перехода нельзя получить из существенного состояния Φ^k существенное состояние Φ^k, то и антирефлексивное. Из правила перехода следует также, что оно антисимметричное.

Если образовать граф Г с вершиной из Φ, а дугами $u = \left(\Phi^k, \Phi^{k+1}\right) : \Phi^{k+1} \overset{\text{н}}{\succ} \Phi^k$, то он не будет содержать петель и замкнутых путей.

Примерный вид графа представлен на рисунке.

Стратегия замен агрегатов в оборудовании систем водоснабжения есть последовательность существенных состояний оборудования, обеспечивающих его работу в течение времени T.

$$\bigcup = \{\Phi^0, \Phi^1, \ldots \Phi^r\}, \tag{9}$$

где $\Phi^0 \overset{\text{н}}{\prec} \Phi^1 \overset{\text{н}}{\prec} \ldots \Phi^r$.

Нетрудно заметить, что

$$r \geq \left]\frac{T}{TY_{\min}}\right[,$$

где $TY_{\min} = \min TY[Y]$, $Y \in 1 : N$.

А функция

$$]X[= \begin{cases} ENTIER(x), & x - \text{целое} \\ ENTIER(x)+1, & E - \text{не целое} \end{cases} \;] \; [. \tag{10}$$

Пусть R — конечное множество различных стратегий замен, $S(\bigcup)$ — затраты на работу оборудования по стратегии $\bigcup$. Если стратегия $\bigcup^*$, выполняется неравенство

$$S\left(\bigcup^*\right) \leq S\left(\bigcup\right), \; \bigcup \in R, \tag{11}$$

то $\bigcup^*$ называется оптимальной стратегией.

С учетом (9), (10) и (11) задачу можно записать в следующем виде:

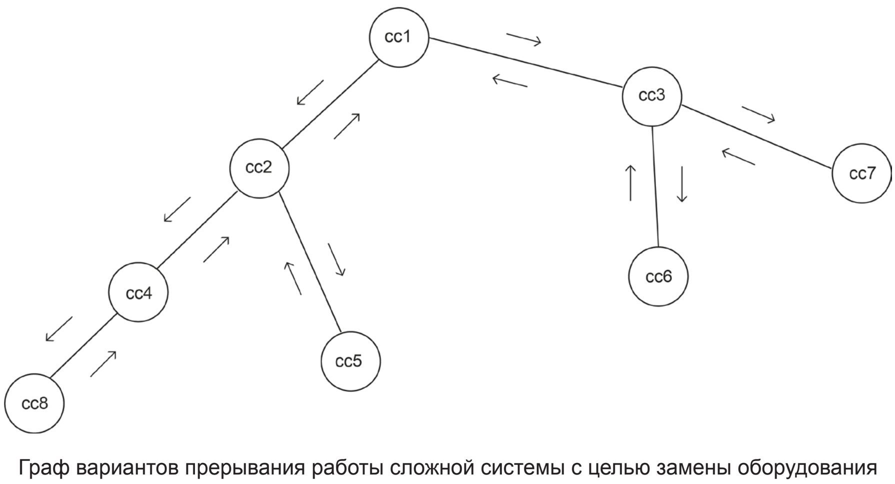
$$\begin{cases} S\left(\bigcup\right) \to \min \\ \bigcup \in R \end{cases} \tag{12}$$

или

$$\begin{cases} r \cdot \Pi + \sum\limits_{k \in 0:r} C\left(\Phi^k, \Phi^{k+1}\right) \to \min \\ \Phi^k \in \bigcup \\ T^r \geq T \\ \bigcup \in R \end{cases} \tag{13}$$

где r — число простоев оборудования по стратегии $\bigcup$; $r{\cdot}\Pi$ — плата за простой по стратегии $\bigcup$; $\sum\limits_k C\left(\Phi^k, \Phi^{k+1}\right)$ — стоимость закупаемого оборудования по стратегии $\bigcup$.

Стратегия замен, согласно которой агрегат меняется лишь после выработки всего ресурса, называется стратегией последовательных замен $\bigcup_{\text{пз}}$. Стратегия замен, согласно которой после



Граф вариантов прерывания работы сложной системы с целью замены оборудования выработки ресурса одного из агрегатов, например K, заменяются все агрегаты, остатки ресурса которых меньше чем $TY[k]$, называется стратегией массовых замен $\bigcup_{мз}$.

На графе стратегии замен представляются путями от исходного состояния Φ^0 к существенным состояниям, для которых $T^k \geq T$, поэтому множество R содержит элементов не более, чем число тупиковых вершин графа.

Самая левая ветвь графа отвечает стратегии последовательных замен, правая — стратегия массовых замен; все остальные стратегии располагаются между ними. Заметим, что общий вид графа зависит лишь от временных характеристик оборудования TY, TY^0, T, но не от стоимостных. Расположение же оптимальной стратегии всецело зависит от CY и П.

Заключение

Оптимальная стратегия управления сложными водопроводными системами находится между заменой последовательно по одному элементу оборудования или группами в одном из узлов и заменой всего оборудования. Такая стратегия замен может использоваться при планировании ремонтов во внутренних водопроводных сетях зданий. Необходимость замены одного элемента или группы сразу и в каком порядке, например счетчики, краны, трубы, фитинги, насосы, блоки управления насосным оборудованием и другим оборудованием при выборе ремонта: капитального, выборочного (косметического) или устранения дефектов.

В процессе эксплуатации систем водоснабжения города, а особенно областных водопроводных систем, в виду их разветвленности (тупиковости) можно рассмотреть стратегии отключения (подключения) группами или одиночно, в зависимости от сроков постройки (подключения) домов.

Литература

1. Корбут, А. А., Филькельштейн, Ю. Ю. (1969). Дискретное программирование. М.: Наука, 368 с.

2. Кофман, А. (1975). Введение в прикладную комбинаторику. М.: Наука, 480 с.

3. Сигал, И. Х., Иванова, А. П. (2002). Введение в прикладное дискретное программирование: модели и вычислительные алгоритмы. М.: Физматлит, 240 с.

4. Присыпкин, М. А., Сигал, И. Х. (2005). Исследование алгоритмов параллельных вычислений в задачах дискретной оптимизации ранцевого типа. Журнал вычислительной математики и физики, т. 45, № 10, сс. 1801–1809.

5. Присыпкин, М. А., Сигал, И. Х., Галимьянова, Н. Н. (2005). Алгоритмы параллельных вычислений для решения некоторых классов задач дискретной оптимизации. М.: ВЦ РАН, 43 с.

6. Зойтендек, Г. (1963). Методы возможных направлений. М.: Издательство иностранной литературы, 175 с.

7. Рыбашов, М. В., Дудников, Е. Е. (1970). Градиентные методы решения линейных равенств, неравенств и задач линейного программирования на АВМ. М.: Советское радио, 144 с.

8. Land, A. H., Doig, A. G. (1960). An automatic method of solving discrete programming problems. Econometrica, vol. 28, pp. 497–520.

9. Little, J.D.C., Murty, K.G., Sweeney, D.W., Karel, C. (1963). An algorithm for the traveling salesman problem. *Operations Research*, vol. 11, pp. 972–989.

10. Береснев, В. Л., Гимади, Э. Х., Дементьев, В. Т. (1978). Экстремальные задачи стандартизации. Новосибирск: Наука, 336 с.

11. Рейнгольд, Э., Нивергельт, Ю., Део, Н. (1980). Комбинаторные алгоритмы. Теория и практика. М.: Мир, 478 с.

12. Меламед, И. И., Сергеев, С. И., Сигал, И. Х. (1969) Задача коммивояжера. Точные алгоритмы. Автоматика и телемеханика, № 10, сс. 3–29.

13. Данциг, Дж. (1966). Линейное программирование, его обобщения и применения. М.: Прогресс, 602 с.

14. Иоффе, А. Д., Тихомиров, В. М. (1968). Двойственность выпуклых функций и экстремальные задачи. Успехи математических наук, № 6, сс. 51–116.

15. Аксенова, О. П., Аксенов, К. А., Попов, М. В., Неволина, А. Л. (2012). Решение задачи замены оборудования сети связи на основе интеграции объектно-ориентированного подхода, экспертных систем и деревьев решений. Современные проблемы науки и образования, № 6 [online]. Доступно по ссылке: http://www.science-education.ru/ru/article/view?id=7931 [дата обращения: 13.09.2018].

16. Соловьева, М. Х. (2008). Методы эффективного управления процессом замены оборудования предприятия. Канд. техн. наук, Москва.

References

1. Korbut, A., Filkelshtein Iu. (1969) Discretnoe programmirovanie [Discrete programming], M.: Nauka, 368 p. (in Russian)

2. Kofman, A. (1975) Vvedenie v prikladnuyu combinatoriku [Introduction to applied combinatorics], M.: Nauka, 408 p. (in Russian)

3. Sigal, I., Ivanova, A. (2002). Vvedenie v prikladnoe dicretnoe programmirovanie: modeli i vychislitelnye algoritmy [Intruduction to discrete programming: models and calculating algorithms]. M.: Fizmatlit, 240 p. (in Russian)

4. Prisypkin, M, Sigal, I. (2005). Issledovanie algoritmov parallelnykh vychislenii v zadachakh discretnoi optimizacii ranzevogo tipa [The study of parallel computing algorithms in problems of discrete optimization knapsack type]. Journal of computational mathematics and physics, vol. 10, № 45, pp. 1801–1809 (in Russian)

5. Prisypkin, M. (2005) Algoritmy parallelnykh vychislenii dlya reshenia nekotorykh klassov zadach discretnoi optimizacii [Algorithms of parallel computations for solving certain classes of problems of discrete optimization]. M.: RAS, 43 p. (in Russian).

6. Soitendeck, G (1963) Metody vozmozhnykh napravlenii [Methods of possibledirections]. M.: Izdatel'stvo inostrannoj literatury, 175 p. (in Russian)

7. Rybashov, M, Dudnikov, E. (1970). Gradientnye metody reshenia lineynikh raventsv, neraventstv i zadach lineinogo programmirovania na AVM [Gradient methods of solving linear equalities, inequalities and linear programming problems using analog computer], M.: Soviet radio, 144 p. (in Russian)

8. Land, A. H., Doig, A. G. (1960). An automatic method of solving discrete programming problems. Econometrica, vol. 28, pp. 497–520.

9. Little, J. D. C., Murty, K. G., Sweeney, D. W., Karel, C. (1963). An algorithm for the traveling salesman problem. Operations Research, vol. 11, pp. 972–989.

10. Beresnev, V. (1978). Extremalnye zadachi standartizacii [Extremal standardization]. Novosibirsk: Nauka, 336 p. (in Russian)

11. Reyngold, E. (1980) Kombinatornye algoritmi. Teoria i praktika [Combinatorial algorithms, theory and practice], M.: Mir, 478 p. (in Russian)

12. Melamed, I. I., Sergeev, S. I., Sigal, I. H. (1969) Zadacha commivoyazhera. Tochnye algoritmy [The traveling salesman problem. Accurate algorithms]. Automation and remote control, № 10, pp. 3–29. (in Russian)

13. Danzing, J. (1964) Lineinoe programmirovanie, ego primenenie i obobshenia [Linear programming, its application and generalization]. M.: Mir, pp. 202–218.

14. Ioffe, A. D., Tikhomirov, V. M. (1968). Dvoistvennost vypuklykh funkcii i extremalnye zadachi [The duality of convex functions and extremal problems]. Uspekhi matematicheskih nauk, № 6, pp. 51–166. (in Russian).

15. Aksyonova, O. P., Aksyonov, K. A., Popov, M. V., Nevolina, A. L. (2012). Reshenie zadachi zameny oborudovaniya seti svyazi na osnove integracii ob"ektno-orientirovannogo podhoda, ehkspertnyh sistem i derev'ev reshenij [The solution of environment upgrade task of telecommunication network base on integration object-oriented approach, expert systems and decision trees]. Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya, № 6. [online] Available on: http://www.science-education.ru/ru/article/view?id=7931 [accessed on: 13.09.2018].

16. Solov'eva, M. H. (2008). Metody ehffektivnogo upravleniya processom zameny oborudovaniya predpriyatiya [Methods for efficient management of the process of replacing equipment]. kand. tekhn. nauk, Moskva.

Автор

Койда Александр Никонорович, канд. техн. наук, доцент

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет

E-mail: pigment@list.ru

Author

Koida Aleksandr Nikonorovich, PhD in Engineering

Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering

E-mail: pigment@list.ru pigment@list.ru