УДК 658.5+64.011.56

Разработка алгоритма комплексирования базовых массивов информационной модели машиностроительного предприятия

И.А. Александров✉**, Н.З. Иванов**

Институт конструкторско-технологической информатики Российской академии наук, Москва, Российская Федерация

Резюме. Актуальность данной работы связана с расширяющимся применением информационных систем и моделей, позволяющих отслеживать динамику ключевых показателей функционирования предприятий и принимать соответствующие организационно-управленческие решения. При работе с информационными моделями предприятий необходимо обращение к массивам данных, что может повлечь проблемы с временем на анализ данных и обработку запросов. При рассмотрении этой задачи важно учитывать размеры и структуру базовых информационных массивов, хранящих основные данные предприятия. В связи с этим, в данной работе рассматривается целесообразность объединения массивов, отражающих состояние объектов определенных цехов машиностроительного предприятия. Показано, что выигрыш от такой операции возможен за счет уменьшения времени операций с массивом. Предложена задача для нахождения оптимальной структуры состава полученных базовых массивов, характеризующихся оптимальным временем актуализации. Для решения данной задачи предлагается алгоритм для объединения основных массивов. Проводится анализ целесообразности процесса объединения, в результате которого определены условия, при которых такое объединение целесообразно. Для алгоритма предложено использование метода «ветвей и границ». Предложенный алгоритм позволяет принять оптимальное решение по выбору состава базовых массивов и позволяет объединять базовые массивы данных информационной модели предприятия, обеспечивая сокращение суммарного времени обращения к данным.

Ключевые слова: информационная модель предприятия, информационный массив, комплексирование данных, анализ данных, критерии оптимизации, эффективность объединения информационных массивов, управление предприятием, организация производства, автоматизация.

Благодарности: Представленные результаты получены в рамках работ по Дополнительному соглашению от 18.04.2024 г. № 075-03-2024-278/1 к Соглашению от 22.01.2024 г. № 075-03-2024-278 между Минобрнауки России и ИКТИ РАН на выполнение государственного задания по созданию новой (молодежной) лаборатории, выполняющей исследования по теме: «Организация и управление гибридными многономенклатурными машиностроительными производствами».

Для цитирования: Александров И.А., Иванов Н.З. Разработка алгоритма комплексирования базовых массивов информационной модели машиностроительного предприятия. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии.* 2024;12(2). URL: https://moitvivt.ru/ru/journal/pdf?id=1600

Development of an algorithm for combining basic arrays of an information model of a machine-building enterprise

I.A. Alexandrov✉**, N.Z. Ivanov**

Institute for Design-Technological Informatics Russian Academy of Sciences, Moscow, the Russian Federation

© Александров И.А., Иванов Н.З., 2024

Abstract. The relevance of this work is associated with the expanding use of information systems and models that make it possible to monitor the dynamics of key indicators of the functioning of enterprises and make appropriate organizational and managerial decisions. When working with enterprise information models, it is necessary to access data arrays, which can lead to problems with time for data analysis and query processing. When considering this task, it is important to take into account the size and structure of the basic information arrays storing the basic data of the enterprise. In this regard, this paper examines the feasibility of combining arrays that reflect the state of objects in certain workshops of a machine-building enterprise. It is shown that the gain from such an operation is possible by reducing the time of operations with the array. A problem is proposed for finding the optimal structure of the composition of the resulting base arrays, characterized by the optimal updating time. To solve this problem, an algorithm is proposed for combining the main arrays. An analysis of the feasibility of the merger process is carried out, as a result of which the conditions under which such a merger is advisable are determined. For the algorithm, it is proposed to use the "branch and bound" method. The proposed algorithm allows you to make the optimal decision on the choice of the composition of the base arrays and allows you to combine the base data arrays of the enterprise information model, ensuring a reduction in the total time of accessing the data.

Keywords: information model of an enterprise, information array, data integration, data analysis, optimization criteria, efficiency of combining information arrays, enterprise management, production organization, automation.

Acknowledgements: The presented results were obtained within the framework of work under the Additional Agreement dated 04/18/2024 No. 075-03-2024-278/1 to the Agreement dated 01/22/2024 No. 075-03-2024-278 between the Ministry of Education and Science of the Russian Federation and IDTI RAS for the implementation of state assignments to create a new (youth) laboratory that will carry out research on the topic: "Organization and management of hybrid multi-product engineering production".

For citation: Alexandrov I.A., Ivanov N.Z. Development of an algorithm for integrating basic arrays of an information model of a machine-building enterprise. *Modeling, Optimization and Information Technology*. 2024;12(2). URL: https://moitvivt.ru/ru/journal/pdf?id=1600 (In Russ.).

Введение

При проектировании динамической информационной модели предприятия возникает задача определения состава базовых массивов, отражающих состояние предприятия в целом и входящих в его состав подсистем [1–3]. При этом в автоматизированной системе управления предприятием (АСУП) обработка данных, как правило, производится в массивах, соответствующих множествам однотипных объектов предприятия. Затраты времени на решение задач в такой информационной модели предприятия в значительной мере определяются тем, насколько рационально произведен выбор базовых информационных массивов. Основным критерием оптимизации при определении состава массивов является актуализация и решение задач, использующих соответствующие данные. Выигрыш от рационального выбора базовых информационных массивов возможен за счет уменьшения времени, затрачиваемого на обращение к массивам, поиск и обработку данных [4–6]. В связи с этим целью настоящей работы является определение условий, при которых объединение отдельных информационных массивов является эффективным, и разработка для этого соответствующего алгоритма.

Для этого были рассмотрены основные ситуации, в которых возникает задача выбора при информационном моделировании предприятия, исследованы зависимости между основными параметрами, влияющими на выбор варианта для частного случая двух массивов, предложен алгоритм выбора оптимального варианта состава базовых массивов для общего случая по рассматриваемому критерию. Исследование

проводилось в предположении несвязной структуры данных с учетом последовательного и произвольного методов доступа к записям. Это именно такая структура данных и методы доступа, которую позволяет реализовать стандартное математическое обеспечение [7–9].

Зададимся следующим определением: комплекс – это группа одинаково организованных массивов. Например, если сведения об оборудовании одного из цехов машиностроительного предприятия составляют один массив, то для сведений об оборудовании всего предприятия требуется комплекс (по одному массиву на каждый цех предприятия). Все массивы комплекса имеют одинаковую структуру записей.

Вопрос о группировке массивов в комплексе решается при проектировании АСУП по следующему признаку: если участки и цеха машиностроительного предприятия специализируются на производстве отдельных изделий и являются предметно замкнутыми, то целесообразно каждому цеху поставить в соответствие свои массивы. В этом случае будут сформированы комплексы массивов по всем группам, участвующим в производстве ресурсов. Формирование массивов по участкам и цехам нецелесообразно в случае, когда цеха и участки машиностроительного предприятия не имеют технологической специализации и продукция обрабатывается на различных участках. Рассмотренный принцип характеризует то обстоятельство, что в первом случае имеются преимущественно задачи, относящиеся к отдельным массивам комплекса, а во втором – задачи, использующие все данные комплекса. Формализованное описание постановки рассматриваемой задачи и анализ полученных результатов представлены далее.

Материалы и методы

Здесь и далее, для формализации рассматриваемой задачи используем следующие обозначения: t_a^i – время считывания i-го массива при его актуализации; t_v^i – время считывания i-го массива при решении v-й задачи; t^i – время одноразового считывания i-го массива (без учета времени его открытия и закрытия); n_v^i – количество необходимых считываний i-го массива при решении v-й задачи; t_o – время, затрачиваемое на открытие и закрытие массива; w_a^i – частота актуализации i-го массива; w_v^i – частота решения v-й задачи на i-м массиве; k_a^i – количество активных элементов i-го массива при его актуализации; k_v^i – количество активных элементов i-го массива при решении v-й задачи; τ^i – время считывания одной записи i-го массива (при прямом доступе).

Примем, что существует предметная специализация m цехов предприятия и пусть каждый цех решает один и тот же комплекс из n задач на своем массиве данных, причем однотипные задачи в разных цехах отличаются между собой, например, частотой решения. Рассмотрим далее целесообразность сведения массивов, отражающих состояние объектов таких цехов в один и решения этого комплекса задач на общем массиве. Для этого случая имеем:

$$T_1 = \sum_{i=1}^{m} t_a^i w_a^i + \sum_{i=1}^{m} \sum_{v=1}^{m} t_v^i w_v^i,\ T_2 = t_a^0 w_a^0 + \sum_{v=1}^{n} t_v^0 w_v^0, \quad (1)$$

где T_1 – время, затрачиваемое на открытие, закрытие, поиск и считывание данных при актуализации и решении задач в условиях комплекса массивов $M_v (v = 1,2,\ldots,m)$; T_2 – аналогично T_1, но в условиях общего массива M_0.

Пусть массивы организованы последовательно, тогда для i-го массива $t_a^i = t_o + t^i, t_v^i = t_o + n_v^i t^i$, а для общего массива $t_a^i = t_o + t^o + n_v^o t$, где $t^0 = \sum_{i=1}^{m} t^i$. При этом:

$$T_1 = \sum_{i=1}^{m} t_a^i w_a^i + \sum_{i=1}^{m} \sum_{v=1}^{m} t_v^i w_v^i,\ T_2 = t_a^0 w_a^0 + \sum_{v=1}^{n} t_v^0 w_v^0. \quad (2)$$

В случае, если $w_a^i = w_a^o$ и $w_v^i = w_v^o$, то выигрыш времени вследствие сокращения суммарного времени обращения к массивам равен:

$$T_1 - T_2 = (m-1)(w_a^o + \sum_{v=1}^{n} w_v^o)t_o.$$

При прямом доступе к элементам массивы полностью не просматриваются, общее количество активных элементов в результате сведения массивов не изменяется. Выигрыш возможен за счет уменьшения суммарного времени обращения к данным. Поскольку при этом $\tau^o = \tau^i = \tau, \sum_{i=1}^{m} \tau k_a^i w_a^i = \tau k_a^o w_a^o$ и $\sum_{i=1}^{m}\sum_{v=1}^{n} \tau k_v^i w_v^i = \sum_{i=1}^{n} \tau k_v^o w_v^o$, то имеем:

$$T_1 - T_2 = \sum_{i=1}^{m} t_o w_a^i - t_o w_a^o \sum_{i=1}^{m}\sum_{v=1}^{n} t_o w_v^i - \sum_{v=1}^{n} t_o w_v^o.$$

Значения w_a^o и w_v^o лежат, соответственно, в следующих пределах:

$$max\, w_a^i \div \sum_{i=1}^{m} w_a^i \text{ и } max\, w_v^i \div \sum_{v=1}^{n} w_v^i.$$

Для наиболее благоприятного случая $\left(w_a^i = w_a^o, w_v^i = w_v^o\right)$ выигрыш времени равен выигрышу времени, определяемому выражением (2).

Оценим целесообразность сведения массивов в общем случае, т. е. когда каждым массивом комплекса M_α (группой массивов комплекса M_α) решается свой набор задач σ_α, отличный от набора задач σ_β, решаемого массивом комплекса M_β (группой массивов комплекса M_β) и при этом необходимо решить некий набор задач, требующий использование данных обоих этих массивов (групп массивов). При сведении этих массивов по учитываемым параметрам выигрываем время за счет уменьшения времени обращения к массивам. Проигрыш времени (при последовательной обработке) обусловлен просмотром участков данных общего массива, не использующихся при решении задач σ_α и σ_β. В связи с этим возникает задача о таком объединении массивов комплекса в группы, которое давало бы оптимальную величину затрачиваемого времени при актуализации массивов и решении задач системы.

Пусть T_α, T_β, $T_{\alpha,\beta}$ – время, затрачиваемое при открытии, закрытии, поиске и считывании данных произвольных массивов $M_\alpha, M_\beta, M_{\alpha,\beta}$ комплекса за некоторый период работы системы, определяемое следующим образом:

$$T_\alpha + T_\beta = t_a^\alpha w_a^\alpha + t_a^\beta w_a^\beta + \sum_{v\in\sigma_\alpha} t_v^\alpha w_v^\alpha + \sum_{v\in\sigma_\beta} t_v^\beta w_v^\beta,$$

$$T_{\alpha,\beta} = t_a^{\alpha,\beta} w_a^{\alpha,\beta} + \sum_{v\in\sigma_a\cup\sigma_\beta} t_v^{\alpha,\beta} w_v^{\alpha,\beta}.$$

Чтобы объединение массивов было рациональным, необходимо, чтобы выполнялось следующее неравенство:

$$t_a^\alpha w_a^\alpha + t_a^\beta w_a^\beta - t_a^{\alpha,\beta} w_a^{\alpha,\beta} + \sum_{v\in\sigma_\beta} t_v^\beta w_v^\beta - \sum_{v\in\sigma_a\cup\sigma_\beta} t_v^{\alpha,\beta} w_v^{\alpha,\beta} > 0. \quad (3)$$

Соответственно, требуется найти такое объединение массивов комплекса в группы, при котором учитываемое время при актуализации массивов и решении задач системы было минимальным.

Аналогичным образом ставится задача определения состава базовых массивов, моделирующих множество объектов машиностроительного предприятия, оптимального по времени обработки данных, поиска и считывания при актуализации данных и решении задач системы. Ситуация, когда одно и то же множество объектов моделируется двумя или более массивами, характерна для АСУП. Это объясняется тем, что в АСУП некоторая часть сведений о рассматриваемом множестве объектов используется часто и их необходимо хранить «под рукой», а остальные данные используются редко и,

следовательно, могут быть расположены отдельно. Поэтому данные об одном и том же множестве объектов могут распадаться на ряд массивов с различной структурой данных, которые в общем случае могут храниться в различных местах – на физических носителях в рамках информационной системы предприятия, на облачных хранилищах и пр. [10, 11].

Предположим, что на некотором этапе создания АСУП в информационную базу включены массивы M_α и M_β, содержащие различные данные о некотором множестве объектов, но обладающие хотя бы одним общим признаком, благодаря которому можно было бы их свести в один массив. При сведении этих массивов в общий $(M_{\alpha\beta})$ имеем новый вариант информационной базы, пригодный для решения задач системы. Целесообразность объединения двух массивов и в этом случае определяется неравенством (3). В общем случае задачу комплексирования информационных массивов, характеризующих параметры состояния некоторого множества объектов, можно сформулировать в следующем виде: пусть в системе функционирует совокупность задач, для решения которых используются соответствующие данные, и необходимо по этим данным (заданным фрагментам массивов) построить совокупность массивов информационной базы, обеспечив суммарное минимальное время обработки данных в массивах при решении задач системы и актуализации ее данных.

Анализ соотношения целесообразности объединения массивов

Далее исследуем более детально неравенство (3), чтобы раскрыть влияние различных параметров на целесообразность сведения двух произвольных массивов информационной базы.

В условиях последовательного, доступа:

$$t_a^\alpha = t_o + t_i^\alpha t_a^\beta = t_o + t^\beta,\ t_a^{\alpha,\beta} = t_o + t^{\alpha,\beta},$$

$$t_v^\alpha = t_o + n_v^\alpha t^\alpha,\ t_v^\beta = t_o + n_v^\beta t^\beta,\ t_v^{\alpha,\beta} = t_o + +n_v^{\alpha,\beta} t^{\alpha,\beta},$$

это неравенство принимает следующий вид:

$$\sum_{v\in\sigma}\left(w_v^\alpha t^\alpha n_v^\alpha + w_v^\beta t^\beta n_v^\beta - w_v^{\alpha,\beta} t^{\alpha,\beta} n_v^{\alpha,\beta}\right) + \sum_{v\in\sigma}\left(w_v^\alpha t_o + w_v^\beta t_o - w_v^{\alpha,\beta} t_o\right) +$$
$$+t^\alpha w_a^\alpha + t^\beta w_a^\beta - t^{\alpha,\beta} w_a^{\alpha,\beta} + t_o w_a^\alpha + t_o w_a^\beta - t_o w_a^{\alpha,\beta}.$$

Обозначим через σ_α множество задач, которые используют только информацию массива M_α, σ_β – множество задач, которые используют только информацию массива M_β, а $\sigma_{\alpha,\beta}$ – это множество задач, использующих данные массивов и M_α и M_β. Далее введем следующие обозначения:

$$\frac{t^\alpha}{t^{\alpha,\beta}} = \xi_\alpha, \frac{t^\beta}{t^{\alpha,\beta}} = \xi_\beta,\ \frac{t_o}{t^{\alpha,\beta}} = \xi_o. \quad (4)$$

Рассмотрим массивы M_α и M_β, для которых $t^\alpha \approx t^\beta$. Тогда $\xi_\alpha \approx \xi_\beta \approx \xi$.

Если рассматриваемые массивы содержат различные данные об одном множестве объектов, то $0{,}5 < \xi < 1$, так как $t_2^\alpha \approx t^\beta, t^{\alpha,\beta} < t^\alpha + t^\beta$ и $t^\alpha \approx t^\beta < t^{\alpha,\beta}$.

Пусть в АСУП принят закон обновления информации в массивах через определенные промежутки времени, т. е. $w_a^\alpha = w_a^\beta = w_a^{\alpha,\beta} = w_a$. Кроме того, $w_v^\alpha = w_v^\beta = w_v^{\alpha,\beta} = w_v, n_v^\alpha = n_v^\beta = n_v^{\alpha,\beta} = n_v$, поскольку частота решений v-й задачи и количество просмотров не зависят от способа хранения данных о множестве объектов. Предположим, что частота выполнений v-й задачи за период актуализации массивов

равна $\rho_v = \frac{w_v}{w_a}$. Тогда $\rho_1 = \sum_v \rho_v$ – это количество выполнений задач v, для которых $v \in \sigma_\alpha \cap \sigma_\beta$ за период актуализации массивов, а $\rho_2 = \sum_v \rho_v$ количество выполнений задач $v \in \sigma_\alpha \cap \sigma_\beta$ за тот же период. При $n_v \approx n$ имеем:

$$\rho_2 > \frac{n(1-\xi)}{n(2\xi-1)+\xi_0}\rho_1 - \frac{2\xi+\xi_0-1}{n(2\xi-1)+\xi_0}, \quad (5)$$

или для случая «однопросмотровых» задач:

$$\rho_2 > \frac{1-\xi}{2\xi+\xi_0-1}\rho_1 - 1. \quad (6)$$

Неравенства (5) и (6) позволяют определить целесообразность сведения двух произвольных массивов, исходя из соотношения между основными параметрами. Поскольку величина ξ_0 мала, то не оказывает заметного влияния на множитель при ρ_1, а $0{,}5 < \xi < 1$, соответственно возможно заранее для проектируемой информационной базы построить некоторую совокупность областей, для которых выполняются соотношения, справедливые в большинстве практических случаев. Например, для соотношения (6) определена область, в которой выполняются условия по количеству выполнений задач (Рисунок 1).

Исследуем также выражение, определяющее целесообразность сведения двух произвольных массивов комплекса. Поскольку при этом $t^\alpha + t^\beta = t^{\alpha,\beta}$ и, следовательно, для «близких», в смысле времени просмотра, массивов $\xi = 1/2$, то имеем:

$$\rho_2 > \frac{t^{\alpha,\beta}n}{2t_0}\rho_1 - 1.$$

В наиболее общем случае $\left(t^\alpha \neq t^\beta\right)$ справедливо соотношение:

$$\rho_3 \frac{n(t^{\alpha,\beta}-t^\alpha)}{t_0}\rho_2 + \frac{n(t^{\alpha,\beta}-t^\beta)}{t_0}\rho_1 - 1,$$

где ρ_3 – количество выполнений задач $v \in \sigma_\alpha \cap \sigma_\beta$, ρ_2 – количество выполнений задач $v \overline{\in} \sigma_\beta$, ρ_1 – количество выполнений задач $v \overline{\in} \sigma_\alpha$ за период актуализации массивов.

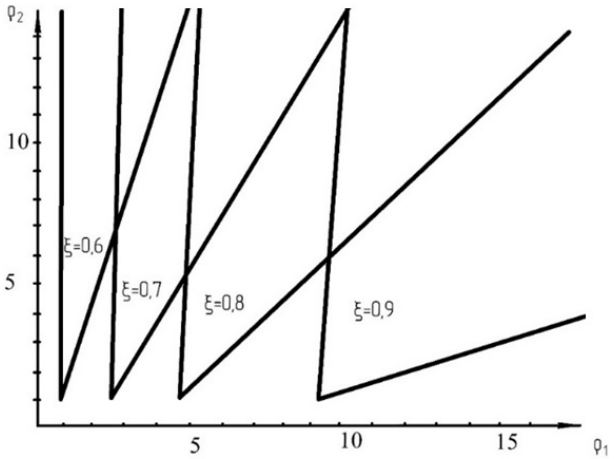

Рисунок 1 – Область, в которой выполняются и соблюдаются условия по количеству выполнений задач

Figure 1 – The area in which the conditions for the number of tasks are fulfilled and met

При прямом доступе к массивам $t_a^\beta = t_0 + k_a^\beta \tau^\beta, t_a^{\alpha,\beta} = t_0 + k_a^{\alpha,\beta}\tau^{\alpha,\beta}$, $t_v^\alpha = t_0 + k_v^\alpha \tau^\alpha, t_v^\beta = t_0 + k_v^\beta \tau^\beta, t_v^{\alpha,\beta} = t_0 + k_v^{\alpha,\beta}\tau^{\alpha,\beta}, t_a^\alpha = t_0 + k_a^\alpha \tau^\alpha$.

При сведении двух массивов комплекса в один сумма активных элементов не изменяется. Ввиду того, что $\tau^{\alpha} \approx \tau^{\beta} \approx \tau^{\alpha,\beta} = \tau$, получим:

$$T_{\alpha} + T_{\beta} - T_{\alpha,\beta} = t_0\left(w_a^{\alpha} + w_a^{\beta} - w_a^{\alpha,\beta}\right) + t_0 \sum_{v\in\sigma}\left(w_v^{\alpha} + w_v^{\beta} - w_v^{\alpha,\beta}\right).$$

Выигрыш времени возможен за счет уменьшения затрат времени при обращении к данным, если частота обращения к объединенному массиву меньше суммы частот к двум объединенным массивам. Таким образом, при объединении двух массивов, моделирующих состояние одного множества объектов, для случая прямого доступа:

$$k_v^{\alpha} = k_v^{\beta} = k_v^{\alpha,\beta} = k_v,\ \tau_v^{\alpha} = \tau_v^{\beta} = \tau_v^{\alpha,\beta} = \tau,\ k_a^{\alpha} = k_a^{\beta} = k_a^{\alpha,\beta} = k_a,\ w_a^{\alpha} = w_a^{\beta} = w_a^{\alpha,\beta} = w_a,$$

$$T_{\alpha} + T_{\beta} - T_{\alpha,\beta} = \sum_{v\in\sigma_{\alpha}\cap\sigma_{\beta}} \tau w_v k_v + \sum_{v\in\sigma_{\alpha}\cap\sigma_{\beta}} t_0 w_v + t_0 w_a + \tau k_a w_a.$$

Последнее выражение всегда больше нуля, следовательно, в этом случае объединение массивов целесообразно.

Алгоритм определения состава базовых массивов

Рассмотренные выше соображения позволяют сформулировать общую задачу определения состава базовых массивов при информационном моделировании машиностроительного предприятия по критерию времени их считывания для решения прикладных задач и актуализации данных. Они справедливы как для случая комплекса массивов, так и совокупности массивов, моделирующих состояние одного и того же множества объектов.

Пусть для решения некоторой совокупности задач системы имеется группа из m массивов $M_1, M_2, \ldots, M_m$, которые можно свести к группе из меньшего числа массивов (или в один массив). Имеется симметричная матрица «целесообразности» объединения этих массивов $\|C_{ij}\|, i, j = \overline{1, m}$, элементы которой C_{ij} равны $T_i + T_j - T_{ij}$, если $C_{ij} > 0$ и нулю, если $C_{ij} \leq 0$, то считаем, что необходимые для вычисления элементов этой матрицы параметры определены. В связи с этим необходимо использовать алгоритм, основанный на методе «ветвей и границ» [12–14].

Результаты и обсуждение

Определим матрицу $\left\|\frac{1}{C_{i_0 j_0}}\right\|$, т. к. вспомогательной задачей в предлагаемом алгоритме является задача о назначениях:

$$min \sum_{i=1}^{m} \sum_{j=1}^{m} \frac{1}{C_{ij}} x_{ij}, \sum_{i=1}^{m} x_{ij} = 1\ ,\ j = \overline{1, m}, \sum_{j=1}^{m} x_{ij} = 1,\ i = \overline{1, m}, x_{ij} = 0 \vee 1.$$

Поскольку в такой задаче не учитываются все возможные варианты объединений, имеем некоторую оценку («оценка снизу») решения рассматриваемой задачи выбора, которая не превосходит ее точного решения. Эту оценку используем для отсева «неперспективных» вариантов. Осуществим приведение матрицы $\left\|\frac{1}{C_{ij}}\right\|$следующим образом: сумма σ_0, отнимаемых при «приведении» значений от строк и столбцов, служит прогнозом функции критерия нашей задачи на первом шаге («оценка снизу»). В приведенной матрице $\left\|\frac{1}{C_{ij}}\right\|$ каждый нулевой элемент $C_{i_0 j_0}$ оценим как:

$$\Delta_{i_0 j_0} = \delta_{i_0} + \delta_{j_0}, \delta_{i_0} = \min_{j\neq j_0} C_{i_0 j}, \delta_{j_0} = \min_{i\neq i_0} C_{i j_0}.$$

Величина σ_0 служит оценкой того, что мы «проиграем», если не включим $|i_0, j_0|$в решение. Выбираем максимальное $\Delta i_0 j_0$, выбираем (i_0, j_0) решением и фиксируем проделанную операцию следующим образом. Объединенный массив $M(i_0, j_0)$ проверяем на целесообразность сведения с остальными из рассматриваемых массивов. Если при этом не все $C_{m+1,j}$ и $C_{i,m+1}$ равны нулю, то из матрицы $\left\|\frac{1}{C_{ij}}\right\|$ вычеркиваем M_{i_0}, M_{j_0}, запоминаем $\frac{1}{C_{i_0 j_0}}$ и добавляем к ней вновь полученный столбец и строчку.

Таким образом, имеем матрицу $\left\|\frac{1}{C_{ij}{}^1}\right\|$. «Приводим» эту матрицу и получаем оценку $\frac{1}{C_{ij}} + \sigma_1$, где σ_1 – это сумма приведенных констант матрицы $\left\|\frac{1}{C_{ij}{}^1}\right\|$. Эта сумма служит «оценкой снизу» вариантов, включающих элемент (i_0, j_0). Если же все $C_{m+1,j}, C_{i,m+1}$ равны нулю, то из матрицы $\overline{\left\|\frac{1}{C_{ij}{}^1}\right\|}$ вычеркиваем строки и столбцы i_0, j_0 «приводим» оставшуюся часть матрицы, зафиксировав общую сумму отнимаемых значений. Эта сумма и ранее полученный прогноз критерия σ_0 могут служить в качестве «оценки снизу» для вариантов решения, включающих (i_0, j_0). С полученной матрицей в обоих случаях проделаем ту же самую процедуру: вычислим для нулевых элементов $\Delta i_0^1, j_0^1$, выберем элемент с максимальным $\Delta i_0^1, j_0^1$, включим клетку i_0^1, j_0^1 в план, произведем необходимые построения, пересчеты и оценки – и так до конца, пока не получим решение.

Для множества построенных решений $\{x\}_k$ со значениями функционала σ_k и множества ее фрагментов решения $\{x\}_e$ с оценкой функционала σ_e, справедливо следующее утверждение: если найдется такое $\{x\}_{k_0}$, что $\sigma_{k_0} \leq \sigma_k$ и $\sigma_{k_0} \leq \sigma_e$, то $\{x\}_{k_0}$ есть оптимальное решение поставленной задачи выбора состава базовых массивов.

Таким образом, показано, что в ряде случаев выигрыш времени от сведения нескольких массивов в один не зависит от последовательности, с какой осуществляется объединение. Например, при объединении комплекса массивов в один массив, если на массивах комплекса решаются одни и те же задачи. Тогда оптимальное решение можно получить путем последовательного объединения пар массивов, пока не получим один массив. Однако в большинстве случаев порядок объединения массивов влияет на результат решения. В связи с этим предлагается использовать алгоритм, основанный на методе ветвей и границ.

Заключение

Актуальность данной работы связана с расширяющимся применением информационных систем и моделей, позволяющих отслеживать динамику ключевых показателей функционирования предприятий и принимать соответствующие организационно-управленческие решения.

При работе с информационными моделями предприятий необходимо обращение к массивам данных, что может повлечь проблемы со временем на анализ данных и обработку запросов. В связи с этим проведен анализ целесообразности объединения информационных массивов, который показывает, что объединение двух массивов целесообразно для сокращения затрат времени на обращение к массивам. В результате предложена задача для нахождения оптимальной структуры состава базовых массивов, характеризующихся оптимальным временем актуализации. Для решения данной задачи предлагается использовать алгоритм для объединения основных массивов, основанный на методе «ветвей и границ». Предложенный алгоритм позволяет принять оптимальное

решение по выбору состава базовых массивов и позволяет объединять базовые массивы данных информационной модели предприятия, обеспечивая сокращение суммарного времени обращения к данным.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ / REFERENCES

1. Kim K., Teizer J. Automatic design and planning of scaffolding systems using building information modeling. *Advanced Engineering Informatics*. 2014;28(1):66–80. https://doi.org/10.1016/j.aei.2013.12.002
2. Уваров В.С. Управляем предприятием, опираясь на его информационную модель информационные модели, применяемые для управления предприятием. *Российское предпринимательство*. 2009;(8-2):52–58.
   Uvarov V.S. Managing the business guiding by its information model information model used for the enterprise management. *Rossiiskoe predprinimatel'stvo = Russian Journal of Entrepreneurship.* 2009;(8-2):52–58. (In Russ.).
3. Александров И.А., Шептунов С.А., Муранов А.Н. *Моделирование и организация технологической среды машиностроительных предприятий*. Москва: Янус-К; 2023. 128 с.
   Aleksandrov I.A., Sheptunov S.A., Muranov A.N. *Modelirovanie i organizatsiya tekhnologicheskoi sredy mashinostroitel'nykh predpriyatii.* Moscow: Janus-K; 2023. 128 p. (In Russ.).
4. Succar B. Building information modelling framework: A research and delivery foundation for industry stakeholders. *Automation in Construction*. 2009;18(3):357–375. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2008.10.003
5. Ghaderi A., Jabalameli M.S. Modeling the budget-constrained dynamic uncapacitated facility location–network design problem and solving it via two efficient heuristics: A case study of health care. *Mathematical and Computer Modelling*. 2013;57(3-4):382–400. https://doi.org/10.1016/j.mcm.2012.06.017
6. Гайсарова А.А., Штофер Г.А. Проблемы разработки модели информационной системы на современном предприятии. *Экономика строительства и природопользования*. 2020;(2):34–39. https://doi.org/10.37279/2519-4453-2020-2-34-39
   Gaysarova A.A., Shtofer G.A. Problems of developing an information system model in a modern enterprise. *Ekonomika stroitel'stva i prirodopol'zovaniya = Construction economic and environmental management.* 2020;(2):34–39. (In Russ.). https://doi.org/10.37279/2519-4453-2020-2-34-39
7. Sha E.H.-M., Chen X., Zhuge Q., Shi L., Jiang W. A New Design of In-Memory File System Based on File Virtual Address Framework. *IEEE Transactions on Computers*. 2016;65(10):2959–2972. https://doi.org/10.1109/tc.2016.2516019
8. David T., Guerraoui R., Trigonakis V. Asynchronized Concurrency: The Secret to Scaling Concurrent Search Data Structures. *ACM SIGARCH Computer Architecture News*. 2015;43(1):631–644. https://doi.org/10.1145/2786763.2694359
9. Pinaud B.A., Benck J.D., Seitz L.C., Forman A.J., Chen Z., Deutsch T.G. et al. Technical and economic feasibility of centralized facilities for solar hydrogen production *via* photocatalysis and photoelectrochemistry. *Energy & Environmental Science*. 2013;6(7):1983–2002. https://doi.org/10.1039/c3ee40831k
10. Aguilar-Savén R.S. Business process modelling: Review and framework. *International Journal of Production Economics*. 2004;90(2):129–149. https://doi.org/10.1016/s0925-5273(03)00102-6

11. Eppinger S.D., Whitney D.E., Smith R.P., Gebala D.A. A model-based method for organizing tasks in product development. *Research in Engineering Design*. 1994;6(1):1–13. https://doi.org/10.1007/bf01588087
12. Morrison D.R., Jacobson S.H., Sauppe J.J., Sewell E.C. Branch-and-bound algorithms: A survey of recent advances in searching, branching, and pruning. *Discrete Optimization*. 2016;19:79–102. https://doi.org/10.1016/j.disopt.2016.01.005
13. Przybylski A., Gandibleux X. Multi-objective branch and bound. *European Journal of Operational Research*. 2017;260(3):856–872. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2017.01.032
14. Alexandrov I.A., Kirichek A.V., Kuklin V.Zh. et al. Developing the Concept of Methodological Support for Designing and Assessing the Efficiency of Information Protection Systems of Standard Information Systems Considering Their Vulnerabilities. *Journal of Computer Science*. 2023;19(11):1305–1317. https://doi.org/10.3844/jcssp.2023.1305.1317

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Александров Ислам Александрович, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Институт конструкторско-технологической информатики Российской академии наук, Москва, Российская Федерация.
e-mail: alexandrov@ikti.ru
ORCID: 0000-0003-1818-5763

Islam A. Alexandrov, Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher, Institute for Design-Technological Informatics Russian Academy of Sciences, Moscow, the Russian Federation.

Иванов Наур Замирович, научный сотрудник, Институт конструкторско-технологической информатики Российской академии наук, Москва, Российская Федерация.
e-mail: ivanov@ikti.ru
ORCID: 0000-0003-1000-4171

Naur Z. Ivanov, Researcher, Institute for Design-Technological Informatics Russian Academy of Sciences, Moscow, the Russian Federation.

Статья поступила в редакцию 10.06.2024; одобрена после рецензирования 19.06.2024; принята к публикации 23.06.2024.

The article was submitted 10.06.2024; approved after reviewing 19.06.2024; accepted for publication 23.06.2024.