DOI: 10.15593/2499-9873/2019.4.07
УДК 519.1; 519.8

Г.Н. Калянов[1], Н.Н. Титов[2], В.Н. Шибеко[3]

[1]Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, Москва, Россия
[2]ООО «НВП МОДЕМ», Москва, Россия
[3]Гомельский государственный технический университет им. П.О. Сухого, Гомель, Республика Беларусь

НЕПРЕРЫВНОЕ КАЛЕНДАРНОЕ ПЛАНИРОВАНИЕ В УСЛОВИЯХ МАССОВОГО СТРОИТЕЛЬСТВА СКВАЖИН. ЧАСТЬ 1

Исследуется комбинаторная задача формирования согласованных календарных планов работ, обеспечивающих непрерывную загрузку выделяемых трудовых ресурсов на строительство группы скважин. Предложена параметрическая математическая модель непрерывного календарного планирования, учитывающая целый ряд ограничений на организацию процесса строительства скважин. Модель дополнена простой формулой расчета временных характеристик строительства скважин в зависимости от условий бурения и квалификации буровой бригады. Универсальный характер базовой модели непрерывного календарного планирования позволяет без проблем трансформировать модель для многих практически важных приложений. Разработан многокритериальный комбинаторный алгоритм поиска наилучших вариантов планирования, основанный на методах динамического программирования и агрегирования исходного планового задания с учетом дебита строящихся скважин. Для отбора альтернативных решений предложена система показателей эффективности и ряд критериев, учитывающих не только порядок строительства и маршруты переброски буровой техники, но и важные экономические факторы, включая временные риски выполнения плановых заданий. Новизна работы заключается в том, что вместо «ручного» подхода к составлению единственного пригодного календарного плана предложена методология решения задач календарного планирования, основанная на разработке адекватных алгоритмов комбинаторного поиска.

Ключевые слова: непрерывное календарное планирование, строительство скважин, комбинаторный поиск, динамическое программирование, агрегирование, многоальтернативные решения, оптимизация распределения ресурсов.

G.N. Kalyanov[1], N.N. Titov[2], V.N. Shibeko[3]

[1]V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation
[2]LTD "NVP MODEM", Moscow, Russian Federation
[3]Sukhoi State Technical University of Gomel, Gomel, Republic of Belarus

CONTINUOUS SCHEDULING IN CONDITIONS OF MASS WELL CONSTRUCTION. PART 1

The article investigates the combinatorial problem of the formation of coordinated work schedules, ensuring the continuous loading of the allocated labor resources for the construction of a group of wells. A parametric mathematical model of continuous scheduling, taking into account a number of restrictions on the organization of the well construction process, is proposed. The model is supplemented with a simple formula for calculating the time characteristics of the well construction depending on the drilling conditions and the drilling crew qualification. The universal nature of the basic model of continuous scheduling allows you to easily transform the model for many practical applications. A multi-criteria algorithm for finding the best planning options based on the methods of dynamic programming and aggregation of the initial planning task taking into account the flow rate of wells under construction is developed. For the selection of alternative solutions, a system of performance indicators and a number of criteria are proposed, taking into account not only the construction procedure and routes of drilling equipment, but also important economic factors, including the time risks of performing planned tasks. The novelty of the work lies in the fact that instead of the "manual" approach to the preparation of a single suitable calendar plan, a methodology for solving calendar planning problems is proposed, based on the development of adequate combinatorial search algorithms.

Keywords: continuous scheduling, well construction, combinatorial search, dynamic programming, aggregation, multi-alternative solutions, optimization of resource allocation.

Введение

Данная работа посвящена вопросам разработки календарных планов выполнения производственных задач, связанных со строительством заданных объемов скважин с учетом выделяемых ресурсов и их реальной загруженности. Пусть исходное плановое задание состоит из строительства скважин различной сложности и ценности. На реализацию плана централизованно выделяются следующие ресурсы: трудовые ресурсы – буровые бригады, имеющие различный уровень квалификации, и технические средства (буровые установки), которые необходимо своевременно перебрасывать на объекты внедрения.

Суть календарного планирования заключается в составлении согласованного расписания выполнения планового задания с использованием выделенных ресурсов [1, 2]. Принципиально важно контролировать не только сроки, но и порядок ввода новых скважин в эксплуатацию, так как от этого зависит динамика прироста добычи нефти на месторождении. Другой особенностью данной постановки задачи календарного планирования является необходимость управления перемещением (маршрутами) буровых установок. Подобные задачи не вписываются в классификацию теории расписаний (ТР) по типу искомого решения [3] и поэтому до сих пор малоизучены. Оптимизация очередности выполнения плановых операций сталкивается с анализом гигантского количества возможных вариантов расписания работ и необходимостью учета существенных временных и экономических факторов. Требуется не только оптимизировать общую загрузку выделенных ресурсов, но и минимизировать издержки, связанные с организацией производственной деятельности и финансированием работ. Для этого необходимо аргументированно предложить систему показателей эффективности с учетом следующих принципов планирования:

– обеспечение постоянной загрузки исполнителей и эффективного управления нагрузкой на технические средства;

– формирование резерва времени на неблагоприятные события;

– ключевые мероприятия плана не должны приходиться на малые промежутки времени;

– соблюдение преемственности и непрерывности в планировании.

В настоящее время при массовом строительстве скважин используются методы «ручного» календарного планирования, основанные на эмпирических правилах составления пригодного расписания работ. Подобный подход заведомо приводит к неэффективным вариантам распределения ресурсов. Главным недостатком «ручного» планирования является его необоснованность. Одним из основных инструментов планирования является экономико-математическое обеспечение, которому не уделяется должного внимания в бизнес-процессах планирования. Сложившаяся ранее методология решения оптимизационных задач нацелена на нахождение единственного решения за приемлемое время, удовлетворяющее математически выверенным критериям оптимальности. В задачах календарного планирования целесообразно искать не только единственное оптимальное решение (по некоторому многоэкстремальному критерию), но и ряд близких альтернативных решений. Такой подход обусловлен, с одной стороны, неоднозначностью восприятия показателей отдельных решений, с другой стороны – рисками «потерять» наилучшее конечное решение. Поиск альтернативных решений довольно просто реализуется в комбинаторных алгоритмах. Кроме того, полный перебор позволяет организовать проверку не одного, а сразу нескольких критериев, что существенно расширяет возможности процесса поиска эффективных решений. Однако при дальнейшем отборе альтернативных решений сталкиваемся с проблемой распознавания структурной близости тех или иных плановых решений [4].

1. Модель непрерывного календарного планирования строительства скважин

Календарное планирование в условиях массового строительства скважин имеет ряд ограничений:

– объемы выделяемых ресурсов (бригады и буровых установки) зафиксированы;

– все буровые бригады постоянно должны находиться в работе;

– допустимо строительство любой скважины любой бригадой;

– можно принудительно назначать бригады на строительство скважин;

– отсутствуют сезонно-временные ограничения на строительство и проведение переброски буровых установок на объекты;

– время переброски бригад на новые скважины можно не учитывать;

– все ранее начатые работы должны быть закончены, замена бригад и буровых установок не допускается.

Базовая модель непрерывного календарного планирования задается двумя группами параметров. Разбиение параметров на группы определяется наличием особенностей бизнес-процессов, характерных для организации работ в крупных буровых компаниях, осуществляющих массовое строительство скважин на различных месторождениях [1, 4]. К первой группе относятся общие начальные условия календарного планирования (ОНУКП): $\left[N, M, \Delta\overline{T}, \overline{Q}, \overline{S}, \overline{P}, \overline{\lambda}, \overline{\beta}\right]$, где

– N – заданное количество скважин;

– M – общее количество выделенных буровых бригад;

– $\Delta\overline{T}$ – вектор оценок времени выполнения работ по строительству каждой скважины среднестатистической бригадой, $\Delta\overline{T} = (\Delta t_1, \Delta t_2, ..., \Delta t_N)$. Обычно эта информация доступна в полном объеме только после проведения всего комплекса работ по проектированию конкретной скважины;

– $\overline{Q}$ – вектор сложности строительства скважин, который характеризует долю времени работы в условиях требующих квалификации исполнителей, $\overline{Q} = (Q_1,\ ..., Q_N)$ $(0 \le Q_i \le 1; i = 1, ..., N)$;

– $\overline{S} = (S_1, ..., S_M)$ – нормированный вектор производительности бригад. Каждой бригаде в зависимости от опыта и уровня квалификации соответствует $S_j > 0$ – производительность при выполнении сложной части работы ($\sum_{j=1}^{M} S_j / M = 1$ – плановая (средняя) производительность). Предполагается, что производительность бригады не зависит от номера скважины;

– $\overline{P} = (P_1, ..., P_M)$ – нормированный вектор временных коэффициентов заработной платы ($\sum_{j=1}^{M} P_j / M = 1$). Менее квалифицированные бригады должны зарабатывать меньше за одинаковое время работы и наоборот (деньги и время – категории взаимосвязанные);

– $\overline{\lambda} = (\lambda_1, ..., \lambda_N)$ – вектор ценности новых скважины из планового задания. Ценность скважины разумно определить ожидаемым дебитом скважины, который измеряется в тоннах углеводородов за сутки;

– $\overline{\beta} = (\beta_1, ..., \beta_N)$ – вектор оценок времени испытаний и освоения новых скважин.

Во второй группе параметров задаются (или рассчитываются) стартовые параметры календарного планирования (СПКП): $\left\{K, D, \overline{T}_0\right\}$, где

– K – общее количество задействованных буровых установок (станков);

– $D((K+N)\times(K+N))$ – матрица переброски, элементы которой соответствуют нормативным оценкам времени выполнения всего комплекса обеспечивающих работ по переброске станков между объектами планирования. В нашей модели это сумма нормативных времен демонтажа, времени перевозки по оптимальному маршруту и времени монтажа бурового станка. В общем случае матрица D не обязательно должна быть симметричной;

– $\overline{T}_0 = (\Delta\tau_1, \Delta\tau_2, ..., \Delta\tau_M), \Delta\tau_j \geq T_{\text{н}}, j = 1, ..., M$ – вектор времен готовности бригад к выполнению стартовых работ (отработка последних скважин предыдущего плана, начатых до начала планирования $T_{\text{н}}$).

Важнейшей характеристикой, влияющей на формирование календарного плана работ, является оценка времени строительства скважины. Для оценивания времени строительства применяются нормативные или статистические показатели. Влияние сложности работы на время ее выполнения учитывается с помощью экспертных оценок [5]. Однако учет рейтинга бригад требует нового подхода к оцениванию этой важнейшей для календарного планирования временной характеристики. Предположим, что более быстрая работа (скорость бурения) в осложненных условиях является основным преимуществом более квалифицированных и опытных буровых бригад. Тогда, с учетом ранее введенных величин, время выполнения *i*-й работы *j*-й бригадой определяется по формуле

$$t_{ij} = \Delta t_i \,(1 + Q_i(1 - S_j)),\ i = 1,...,N, j = 1,...,M. \tag{1}$$

Таким образом, вместо вектора $\Delta\overline{T}$ рассчитывается матрица времен выполнения работ $T_{\text{раб}}^{\text{расч}}\left[N \times M\right] = \left\{t_{ij}\right\}, i = 1,...,N, j = 1,...,M$. Оценку времени выполнения работы (1) в силу ее конструкции назовем мультипликативной. Данная оценка зависит всего от трех параметров: Δt_i, Q_i и S_j. В других постановках задач календарного планирования матрица времен выполнения работ ($T_{\text{раб}}\left[N \times M\right]$) может не рассчитываться, а просто задаваться (например, на этапе проведения тендера по строительству конкретной группы скважин). В этом случае векторные параметры $\left\{\Delta\overline{T}, \overline{Q}, \overline{S}\right\}$ не учитываются в модели.

Модель календарного планирования должна допускать возможность принудительного назначения бригад на скважины, которое является основным механизмом «ручного» составления календарных планов. Пусть на начало планирования имеется список принудительно распределенных скважин $\left\{N_1^p, N_2^p, ..., N_M^p\right\}$, которые строятся конкретными бригадами. Определим вектор начальной нагрузки: $\Delta\overline{G} = (\Delta G_1, \Delta G_2, ..., \Delta G_M)$, где ΔG_j – суммарное время строительства принудительно назначенных скважин для *j*-й бригады.

Предложенная выше параметрическая модель непрерывного календарного планирования позволяет конкретизировать постановку задачи и определить цель планирования, а именно сформировать согласованное расписание выполнения всех запланированных работ различной сложности, с обеспечением полной и эффективной занятости всех бригад, максимального суммарного эффекта от порядка ввода скважин, а также сбалансированного использования выделенных технических средств (станков). Требуется выбрать календарный план выполнения всех работ (упорядоченное расписание) и задать каждой новой скважине единственную бригаду и свободный станок. Искомый план может оказаться не единственным, поэтому необходимо алгоритмически организовать поиск наиболее интересных альтернативных решений и иметь возможность оценить последствия принятия того или иного решения.

По типу целевой функции в классификации теории расписаний [3] данную задачу следует отнести к многокритериальным задачам оптимизации. Для модели НКП можно выделить и анализировать ряд количественных показатели эффективности плановых решений, но при этом следует привязываться к конкретному алгоритму поиска наилучших решений. Поэтому показатели эффективности и соответствующие критерии для отбора альтернативных решений будут рассмотрены ниже.

Математически данная задача относится к классу комбинаторных задач. Требуется предложить комбинаторный алгоритм поиска эффективных решений. Общая проблема для комбинаторных задач заключается в огромном количестве возможных вариантов расписания работ из-за большой размерности основных групповых параметров планирования (*N*, *M*, *K*). Число возможных вариантов распределения N скважин между M бригадами определяется по формуле

$$N_{\text{вар}}(N, M) = N! \sum_{L=2}^{M} \frac{(N+1)!}{(L-1)!(N-L+2)!}, \tag{2}$$

где $1 \cdot 2 \cdot \ldots \cdot (N-1) \cdot N = N!$ – число перестановок из N элементов.

Даже для сравнительно небольших значений параметров наблюдается экспоненциальный рост числа возможных вариантов планирования. Например, для $M = 3$ и $N = 10$ имеем $N_{\text{вар}}(10,3) = 239{,}5 \cdot 10^6$ различных вариантов, и это без учета вариантов расстановки K станков по скважинам.

Современные вычислительные средства (многопроцессорные скоростные компьютеры) и разработка единой инструментальной среды для прикладных программных комплексов (объектно-ориентированные каркасы [6]) значительно расширили область практического решения подобных комбинаторных задач за разумное время вычислений.

Многие комбинаторные вопросы успешно решаются благодаря продвинутым алгоритмам и высокоскоростным методам решения [7]. Смешанная стратегия решения комбинаторных задач, основанная на методах динамического программирования и агрегирования, часто приводит к хорошим результатам. При этом не следует бояться потерять наилучшее решение, тем более реально существует проблема нехватки вычислительных ресурсов из-за большой размерности комбинаторных задач. Из всего многообразия возможных расписаний организации работ только сравнительно небольшая часть заслуживает внимания.

2. Многоэтапная задача календарного планирования

Анализируя реальный процесс подготовки календарных планов строительства скважин в крупных нефтегазодобывающих предприятиях, можно выделить три последовательных этапа. На первом этапе решается подзадача распределения новых скважин между исполнителями. Принципиально важно контролировать время выполнения всех работ и обеспеченность производственного процесса трудовыми ресурсами (бригадами). Порядок выполнения работ на этом этапе не важен. Данная подзадача (аналог «объемно-календарного» планирования) должна решаться в предположении постоянной занятости всех бригад и с учетом интересов участников строительства. Фактически необходимо убедиться, что запланированных трудовых ресурсов M достаточно для выполнения плана и предложить неупорядоченное расписание выполнения работ, под которым понимается разбиение множества $\{N\}$ на M непересекающихся подмножеств $N_1, N_2, ..., N_M$. Скважины из множества N_j приписываются j-й бригаде и строятся в произвольном порядке. Общее число вариантов для неупорядоченных расписаний существенно меньше и составляет $\tilde{N}_{\text{вар}}(N,M) = M^N$.

Например, для $N = 10$ и $M = 3$ имеем 53 049 неупорядоченных вариантов.

Вектор $\overline{T}_0$ характеризует времена готовности бригад к выполнению стартовых работ. Упорядочим список бригад по мере их готовности к работе и проанализируем ранжированный вектор $\overline{T}_0$ на предмет «рассредоточения» освобождающихся бригад по времени. Ситуация, когда в результате календарного планирования практически одновременно заканчиваются все запланированные работы, является очень нежелательным событием, так как предельно увеличивает нагрузку на парк станков. Если все M бригад в коротком временном интервале заканчивают работы и время переброски станков существенно меньше среднего времени выполнения отдельных работ, то потребуется по крайней мере $K_{\max} = 2M$ станков, чтобы обеспечить непрерывную занятость всех бригад. Поэтому разумно предположить, что эффективное непрерывное планирование подразумевает начальное «рассредоточение» последних работ предыдущего плана. Данное предположение в равной степени относится к формируемому (текущему) календарному плану работ. Самый простой способ сохранить начальное «рассредоточение» выполненных работ заключается в максимально возможной равномерной загрузке по суммарному времени всех бригад.

На первом этапе планирования необходимо определиться с показателями эффективности и критериями отбора решений. Методы комбинаторного анализа позволяют организовать одновременную проверку не одного, а нескольких критериев. Появляется возможность отбирать не только единственное оптимальное решение, но и ряд близких альтернативных решений. Подобное многообразие в зависимости от вариативности значений параметров модели НКП может приводить к появлению структурно близких («клоновых») решений. Для распознавания клоновых решений и их селекции необходимо предложить специальную процедуру отбора. В результате формируется совокупность альтернатив первого этапа:

$$\left\{ (N_1, ..., N_M) : \bigcup_{j=1}^{M} N_j = \{N\}, N_{j1} \cap N_{j2} = \varnothing, j1 \neq j2 \right\}.$$

Второй этап планирования заключается в формировании упорядоченного расписания работ для всех альтернатив первого этапа. При строительстве скважин целесообразно максимизировать суммарный прирост добычи по мере ввода в эксплуатацию новых скважин. Поэтому требуется решить задачу упорядочивания строительства скважин с учетом специфических начальных условий по дебиту. Общее количество вариантов формирования упорядоченных расписаний зависит от разбиения скважин по бригадам и определяется по формуле

$$N_{\text{вар}}(N:\{N_1, N_2, ..., N_M\}, M) = |N_1|! \cdot |N_2|! \cdot ... \cdot |N_M|!$$

Например, для разбиения {4, 3, 3} имеем $N_{\text{вар}}(10:\{4,3,3\},3) = 864.$

Однако раздельное планирование по критерию максимального суммарного прироста добычи позволяет решать задачу упорядочивания отдельно для каждой бригады (так называемое агрегирование [8]). Поэтому суммарное количество вариантов существенно уменьшится:

$$\tilde{N}_{\text{вар}}(N:\{N_1, N_2, ..., N_M\}, M) = |N_1|! + |N_2|! + ... + |N_M|!$$

Для разбиения {4, 3, 3} имеем $\tilde{N}_{\text{вар}}(10:\{4,3,3\},3) =$ $= 24 + 6 + 6 = 36.$

Отбор упорядоченных альтернатив производится по критерию максимального суммарного прироста дебита за счет строительства новых скважин всеми бригадами.

Дальнейшее планирование (3-й этап – маршрутизация) зависит от конкретной ситуации, которая определяется набором параметров СПКП базовой модели НКП. Каждому упорядоченному расписанию соответствует различное число возможных вариантов расстановки имеющихся буровых станков. Поэтому на данном этапе календарного планирования необходимо окончательно определиться с общим числом станков, участвующих в календарном планировании, а также с начальным местонахождением и состоянием каждого станка.

Если не учитывать время переброски станков, то общее количество вариантов расстановки станков определяется по формуле

$$\hat{N}_{\text{вар}}(N, M, K) = (K - M)^N.$$

Например, $\hat{N}_{\text{вар}}(10, 3, 5) = 2^{10} = 1024.$

Учет динамики прироста дебита строящихся скважин (2-й этап поиска) приводит к тому, что многие варианты распределения станков по скважинам не согласуются с анализируемыми расписаниями. Оставшиеся варианты приводят к различным уровням суммарных издержек и временным рискам. Поэтому необходимо учитывать альтернативные варианты упорядоченных расписаний и соответствующие эффективные варианты расстановки станков. Таким образом, раздельная постановка задачи календарного плана инициализирует построение многоальтернативного дерева решений, которое и является предметом целенаправленного комбинаторного поиска.

Ниже приведена укрупненная блок-схема трехэтапного алгоритма поиска.

Рассмотрим алгоритмы решения задач комбинаторной оптимизации для каждого из этапов поиска.

3. Оптимизация распределения новых скважин между бригадами («неупорядоченные расписания»)

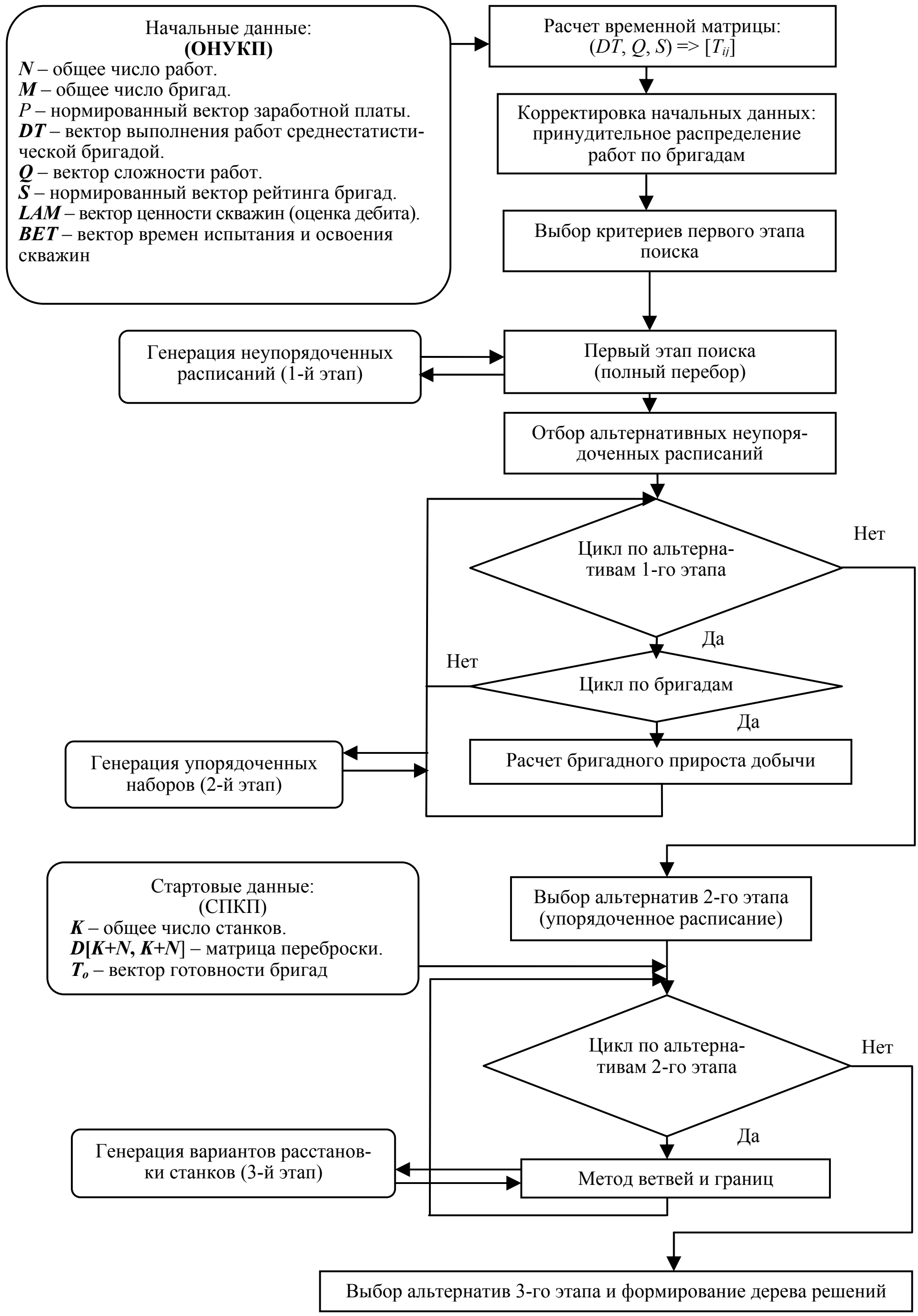
Определим величину $R_j = \Delta G_j + \sum_{i \in N_j} t_{ij}$ как загруженность j-й бригады, $j = 1, ..., M$ без учета стартовой готовности, но с учетом времени принудительной загрузки. Время выполнения работы рассчитывается по формуле (1) или просто задается элементом матрицы $T_{\text{Раб}}\left[N \times M\right]$. Тогда длине расписания DT (время выполнения плана) соответствует величина $\max\limits_{1 \le j \le M} R_j$. Календарное планирование подразумевает скорейшее выполнение планового задания с использованием всех бригад. Этому требованию соответствует задача нахождения оптимального по быстродействию расписания, т.е. расписания минимальной длины.

Имеем

$$\min_{\left\{(N_1,...,N_M):\{N\}=\bigcup\limits_{j=1}^{M} N_j;N_{j_1}\cap N_{j_2}=0;j_1\neq j_2\right\}} \max_{1 \le j \le M}\left(\Delta G_j + \sum_{i \in N_j} t_{ij}\right) = T_{\text{опт}}. \qquad (3)$$

Такая постановка задачи НКП показывает наличие большой зоны пересечения с хорошо исследованными общими задачами оптимизации многопроцессорных вычислений [9]. Известно, что задачи планирования многопроцессорных вычислений являются NP-трудными в сильном смысле и все точные алгоритмы их решения имеют переборный характер, а точных полиномиальных (эффективных) алгоритмов не существует [10]. Число шагов переборного метода растет экспоненциально в зависимости от размерности задачи.

Блок-схема алгоритма поиска



Если применим точный алгоритм решения задачи быстродействия (3), то расписание ($N_1 \bigcup N_1^p$, $N_2 \bigcup N_2^p, ...,$ $N_M \bigcup N_M^p$) обеспечивает минимальное время ($T_{\text{опт}}$) выполнения всех запланированных работ (N нераспределенных и всех «принудительных» работ $N_\Sigma^p = \sum_{j=1}^{M} \left| N_j^p \right|$).

При этом загрузка каждой бригады (R_j) будет максимально равномерной. По сути, оптимизация по критерию быстродействия и заключается в подборе самых сложных работ для более квалифицированных бригад и обеспечения практически одновременного окончания работ всеми бригадами.

Рассчитаем загрузку бригад с учетом начальной готовности: $\tilde{R}_j = R_j + \Delta\tau_j - T_{\text{н}}$ и проведем упорядочивание бригад по загрузке. Точное решение задачи на быстродействие позволит аргументированно выбрать оценку правой границы временного интервала планирования, а именно $\hat{T}_{\text{к}} = \tilde{R}_{(1)} + T_{\text{н}}$. Предполагается, что процесс планирования окончен, как только освободится первая бригада (с этого момента для обеспечения непрерывной занятости необходим очередной план работ). При заданном интервале планирования $\left[T_{\text{н}}, T_{\text{к}}\right]$ проведение оптимального по быстродействию календарного плана позволит при определенных условиях накопить к концу планирования суммарный временной резерв:

$$\Delta T_{\text{рез}} = M(T_{\text{к}} - T_{\text{н}}) - \sum_{j=1}^{M} \tilde{R}_j \text{ при условии } T_{\text{н}} > T_{\text{к}} + \tilde{R}_{(M)}.$$

В отличие от задач оптимизации многопроцессорных вычислений, в задачах НКП необходимо учитывать не только временные характеристики работ, но и стоимость услуг по их выполнению. Каждому неупорядоченному расписанию соответствует собственный вектор загрузки $(R_1, R_2, ..., R_M)$ и суммарное время выполнения всех работ $T_\Sigma = \sum_{j=1}^{M} R_j$. Согласно модели НКП заработная плата каждой бригады оценивается нормированным временным коэффициентом P_j. В качестве еще одного показателя эффективности предлагается взвешенная временная сумма $\breve{T}_\Sigma = \sum_{j=1}^{M} (P_j \cdot R_j)/M$, которая характеризует финансовые затраты на оплату услуг всех бригад (аналог среднего количества трудодней).

Критерий отбора альтернатив первого этапа реализует разумный баланс между временем выполнения планового задания и финансовыми затратами на обеспечение плана. Отбор альтернативных вариантов «неупорядоченных расписаний» проводится последовательно. Оптимальное (по критерию быстродействия) распределение скважин $(T_{\text{опт}})$ обеспечивает предельно равномерную загрузку всех бригад [10], однако соответствующее значение $\breve{T}_\Sigma$ может быть экономически не совсем приемлемым. Поэтому первоначально отбираются расписания с минимальными значениями суммы двух показателей эффективности: $T_Y = T_{\text{план}} + \breve{T}_\Sigma$. Альтернативные расписания допускают небольшое увеличение $T_{\text{план}}$ относительно $T_{\text{опт}}$, но при этом обеспечивается снижение показателя $\breve{T}_\Sigma$. Как и для многих комбинаторных задач, весьма вероятны случаи появления клоновых (структурно мало отличающихся) решений [7] с близкими значениями показателей эффективности. Ситуация с клоновыми решениями определяется вариативностью исходных данных. Пусть при отборе альтернатив учитывается наличие в расписаниях отличия более чем на одну скважину. Упорядочим по критерию T_Y определенное число S_0 лучших альтернатив в виде попарно различных целочисленных векторов размерности $M+N$ и для этих векторов рассчитаем $H[S_0, S_0]$ – симметричная матрица расстояний Хэмминга [7] (h_{ij} – число координат, в которых вектора решений отличаются). Отличие двух неупорядоченных расписаний строго на одну скважину означает, что соответствующий элемент $h_{ij} = 2$. Поэтому достаточно последовательно, начиная с наилучшей альтернативы (первая строка), просеять оставшиеся строки на предмет наличия элементов, равных 2. Если допускается отличие в альтернативах на большее количество скважин $(N_0 > 1)$, то при отсеве клоновых альтернатив проверяется неравенство $h_{ij} \le 2N_0$.

4. Упорядоченные расписания строительства скважин

Следующая оптимизационная задача (второй этап поиска) заключается в нахождении наилучших вариантов упорядоченных расписаний строительства скважин для всех альтернатив, отобранных на первом этапе. Пусть $(N_1, N_2, ..., N_M)$ – одна из таких альтернатив. Для этой альтернативы существует всего $|N_1|! \cdot |N_2|! \cdot ... \cdot |N_M|!$ вариантов составления упорядоченных расписаний, и каждому варианту соответствует определенный хронологический порядок строительства скважин $(t_1^{\text{н}}, t_2^{\text{н}}, ..., t_N^{\text{н}})$, где $t_i^{\text{н}}$ – время начала строительства скважины, отсчитываемое от начала планирования $T_{\text{н}}$. Определим оценку суммарного прироста добычи на момент окончания планирования:

$$\Delta DEB(T_K) = \sum_{j=1}^{M} \sum_{i \in N_j} \left(\lambda_i \cdot IX\left(T_K - \left(t_i^{\text{н}} + t_{ij} + \beta_i \right) \right) \right), \tag{4}$$

где функция включения $IX(x) = x$, если $x > 0$ и $IX(x) = 0$, если $x \le 0$.

Отбор альтернативных упорядоченных расписаний $(t_1^{\text{н}}, t_2^{\text{н}}, ..., t_N^{\text{н}})$ производится по критерию максимальности $\Delta DEB(T_K)$.

Для каждой бригады $j = 1, ..., M$ необходимо провести упорядочивание выделенных скважин по времени начала ввода в эксплуатацию $\left\{ t_i^{\text{в}} = t_i^{\text{н}} + t_{ij} + \beta_i,\ i \in N_j \right\}$. Оценка суммарного прироста дебита представляет собой сумму прироста дебита каждой бригады. Рассмотрим хронологический порядок ввода скважин в эксплуатацию $(t_1^{\text{в}}, t_2^{\text{в}}, ..., t_N^{\text{в}})$. Функция $\Delta DEB(T_K(t_1^{\text{в}}, ..., t_N^{\text{в}}))$ является ступенчатой, монотонно возрастающей и при $T_K > \max\limits_{1 \le i \le N} t_i^{\text{в}}$ переходит в линейную функцию с коэффициентом роста $\lambda_\Sigma = \sum_{i=1}^{N} \lambda_i$. Суммарный прирост добычи обеспечивается каждой бригадой, поэтому можно решать оптимизационную задачу упорядочивания строительства для каждой бригады в отдельности и независимо. Такой подход существенно уменьшает число возможных вариантов $(|N_1|! + |N_2|! + ... + |N_M|!)$.

Рассмотрим задачу упорядочивания расписания выполнения работ для *j*-й бригады. Имеем список из N_j скважин, назначенных на обслуживание данной бригадой. Всего возможно $\left|N_j\right|!$ различных вариантов обслуживания (перестановок в списке скважин). Необходимые временные показатели ($\left\{t_{ij}, i \in N_j\right\}$) уже выбраны для анализируемой альтернативы первого этапа. Требуется для фиксированного значения T_K решить следующую оптимизационную задачу:

$$\max_{\left\{(t_i^{\text{в}}), i \in N_j\right\}} \Delta DEB_j(T_K, ((t_i^{\text{в}}), i \in N_j)),$$

где

$$\Delta DEB_j(T_K, ((t_i^{\text{в}}), i \in N_j)) = \sum_{i \in N_j} \lambda_i \cdot IX(T_K - t_i^{\text{в}}). \qquad (5)$$

Зафиксируем $T_K(j) = \sum_{i \in N_j} t_{ij} + \max_{i \in N_j} \beta_i$. Можно легко убедиться, что критерий (5) эквивалентен решению задачи

$$\min_{\left\{(t_i^{\text{н}}), i \in N_j\right\}} \sum_{i \in N_i} \lambda_i \cdot (T_K(j) - t_i^{\text{н}}). \qquad (6)$$

Данная задача решается простым перебором всех возможных вариантов и фиксированием нескольких альтернативных вариантов, обеспечивающих наименьшие значения критерия (6). Объединенное упорядоченное расписание формируется путем наложения полученных бригадных решений с учетом вектора начальной готовности бригад ($\overline{T}_0$). В ряде случаях бригадные задания в альтернативах совпадают. Этот фактор необходимо учитывать, так как снижается вычислительная нагрузка и упрощается отбор альтернатив на 2-м этапе поиска. Комбинаторное решение (упорядоченный список строительства скважин) не зависит от выбора T_K и вектора $\overline{\beta} = (\beta_1, ..., \beta_N)$ оценок времени испытаний и освоения новых скважин. Однако значение величины увеличения добычи для каждого упорядоченного варианта зависит от этих параметров модели НКП. Имеем

$$\Delta DEB(T_K \left| \overline{\beta}) = \Delta DEB(T_K \right| \overline{\beta} = 0) - \sum_{i=1}^{N} \beta_i \cdot \lambda_i \text{ при условии } T_K \geq \max_{1 \leq i \leq N} t_i^{\text{в}}.$$

Рассмотрим случай, когда скважины изначально имеют одинаковую ценность, т.е. дебит скважины $(\lambda_i = \text{const})$. Тогда для каждой бригады оптимальный порядок строительства скважин определяется упорядоченной по мере возрастания выборкой времен «бурения» $\{t_{ij}, i \in N_j\}$. Имеем простейший алгоритм упорядоченного строительства, а именно «каждой бригаде по мере освобождения строить оставшиеся скважины из своего списка, которые требуют минимальное время на строительство». Данный подход часто используется при определении порядка строительства стволов кустовой скважины, если нет других существенных предпочтений [4]. Не надо путать этот случай с ситуацией, когда в модели НКП вообще отсутствует характеристика ценности отдельных работ [1].

В результате у каждой альтернативы первого этапа определяется несколько упорядоченных альтернатив, имеющих близкие максимальные значения $\Delta DEB(T_K)$. Важным является тот факт, что все неупорядоченные альтернативы должны сравниваться по данному показателю на одно и то же время T_K. Существенное отличие неупорядоченных расписаний по этому критерию отбора может привести к отбраковке альтернатив первого этапа поиска.

5. Третий этап поиска (маршрутизация станков)

Рассмотрим алгоритм поиска эффективных решений третьего этапа задачи календарного планирования, а именно оптимизация расстановки станков для альтернативных упорядоченных расписаний. Согласно модели НКП любой станок, участвующий в планировании, может находиться в одном из трех состояний:

1. Работать.
2. Перебрасываться на объект.
3. Ожидать прибытие бригады на объект (плановый простой).

Критерием эффективности расстановки станков по скважинам является минимизация суммарного времени переброски станков для обеспечения выполнения плана ($T^{\Sigma}_{\text{пер}}$ – сумма соответствующих элементов матрицы переброски D). Каждая плановая переброска станков имеет временной резерв на выполнение данной операции

$Z_i, i = 1, 2, ..., N.$ Обозначим $\Delta Z = \min\limits_{1 \le i \le N} Z_i$ – минимальный резерв времени. Чем больше минимальный временной резерв для упорядоченного расписания работ, тем меньше риски, связанные с задержкой не только операций по переброске, но и основных работ, выполняемых буровыми бригадами.

В данном случае целесообразно организовать неявный перебор, только для всех «свободных» станков, используя метод ветвей и границ, который по существу, является вариацией полного перебора с отсевом подмножеств допустимых решений, заведомо не содержащих оптимальных решений [1]. В результате для каждого альтернативного упорядоченного расписания определяется множество (возможно, пустое) альтернативных расстановок станков с наилучшими техническими показателями планирования ($T_{\text{пер}}^{\Sigma}$ и ΔZ). Если множество пустое, то целесообразно увеличить парк буровых станков на единицу и повторить для данной упорядоченной альтернативы процедуру поиска оптимальной расстановки станков.

Таким образом, комбинаторный поиск закончен и каждое отобранное расписание (вариант эффективного календарного плана) имеет следующие показатели эффективности:

– время выполнения плана $T_{\text{план}}$;

– среднее количество трудодней $\breve{T}_{\Sigma}$;

– оценка суммарного прироста добычи на момент окончания планирования $\Delta DEB(T_K)$;

– суммарное время переброски станков $T_{\text{пер}}^{\Sigma}$;

– минимальный резерв времени на операции по переброске станков ΔZ.

Право отбора единственного (оптимального) расписания остается за лицом, принимающим решение (ЛПР).

Заключение

Рассмотренная выше модель календарного планирования достаточно универсальна и может быть адаптирована для многих приложений, например, массовое строительство территориально-распределенных объектов, проведение плановых дорожных ремонтов с привлечением соответствующих трудовых и технических ресурсов, организация обслуживания заявок клиентов в транспортно-логистических компаниях. Кроме того, легко трансформировать модель НКП для задач планирования капитальных ремонтов фонда эксплуатационных скважин, которые требуют оптимизацию сроков ремонтов, загрузки собственных бригад и минимизации потерь в добыче углеводородов.

Обобщая результаты проведенных исследований, можно сделать следующие выводы:

1. Существующая практика ручного составления календарных планов массового строительства скважин не реализует в полном объеме возможности централизованного распределения выделяемых ресурсов.

2. Формализована базовая модель непрерывного календарного планирования строительства скважин, учитывающая наиболее важные особенности бизнес-процессов организации работ в крупных нефтегазодобывающих компаниях.

3. Предложена формула расчета времени строительства скважины с учетом ее сложности и квалификации буровой бригады.

4. Показано, что задача оптимизации распределения скважин между бригадами по критерию быстродействия математически эквивалентна известной задаче оптимизации планирования многопроцессорных вычислений.

5. С учетом экономической целесообразности и особенностей массового строительства скважин сформулированы количественные показатели эффективности, позволяющие проводить отбор альтернативных календарных планов. Описана процедура отсева клоновых решений с использованием матрицы расстояний Хэмминга.

6. Предложен трехэтапный последовательный алгоритм комбинаторного поиска эффективных решений, основанный на методах динамического программирования и агрегирования.

Список литературы

1. Калянов Г.Н., Титов Н.Н., Шибеко В.Н. Поиск эффективных решений задач непрерывного календарного планирования // Информационные технологии и вычислительные системы. – 2018. – № 1. – С. 85–98.

2. Задачи распределения ресурсов в управлении проектами / С.А. Баркалов, И.В. Буркова, А.В. Глаголев, В.И. Колпачев. – М.: Изд-во ИПУ РАН, 2002. – 65 с.

3. Лазарев А.А., Гафаров Е.Р. Теория расписаний. Задачи и алгоритмы. – М.: Изд-во МГУ, 2011. – 222 с.

4. Титов Н.Н. Разработка системы поддержки непрерывного календарного планирования: Экономико-математическое обеспечение крупной буровой компании. – Саарбрюкен: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2017. – 80 с.

5. Калянов Г.Н., Титов Н.Н., Шибеко В.Н. Информационная система поддержки принятия управляющих решений по данным станции контроля параметров бурения // Автоматизация в промышленности. – 2014. – № 4. – С. 61–64.

6. Аничкин А.С., Семенов В.А. Объектно-ориентированный каркас для программной реализации приложений теории расписаний // Труды ИСП РАН. – 2017. – Т. 29, вып. 3. – С. 247–296. – DOI: 10.15514/ISPRAS-2017-29(3)-14

7. Кнут Д.Э. Искусство программирования. Т. 4А / Комбинаторные алгоритмы, ч. 1. – М.: Вильямс, 2013. – 955 с.

8. Баркалов С.А., Бурков В.Н, Гилязов И.М. Методы агрегирования в управлении проектами. – М.: Изд-во ИПУ РАН, 1999. – 55 с.

9. Головкин Б.А. Расчет характеристик и планирование параллельных вычислительных процессов. – М.: Радио и связь, 1983. – 272 с.

10. Гончар Д.Р., Фуругян М.Г. Эффективные алгоритмы планирования вычислений в многопроцессорных системах реального времени // Управление большими системами. – 2014. – Вып. 49. – С. 269–296.

References

1. Kalyanov G.N., Titov N.N., Shibeko V.N. The search for effective solutions to the continuous task scheduling. Information technology and computer systems, 2018, no. 1, pp. 85-98.

2. Barkalov S.A., Burkova I.V., Glagolev A.V., Kolpachev V.I. Resource allocation problems in project management. Moscow, V.A. Trapeznikov Control Science Institute Russian Academy of Sciences, 2002, 65 p.

3. Lazarev A.A., Gafarov E.R. Scheduling Theory. Problems and algorithms. Moscow, Moscow State University, 2011, 222 p.

4. Titov N.N. Development of continuous scheduling support system: Economic and mathematical support for a large drilling company. Saarbruecken, LAP LAMBERT Academic Publishing, 2017, 80 p.

5. Kalyanov G.N., Titov N.N., Shibeko V.N. Information system of decision-making support according to drilling parameters control station. Automation in industry, 2014, no. 4, pp. 61-64.

6. Anichkin A.S., Semenov V.A. Object-oriented framework for the software implementation of the application of the scheduling theory. The proceedings of ISP RAS, 2017, vol. 29, iss. 3, pp. 247-296, DOI: 10.15514/ISPRAS-2017-29(3)-14

7. Donald E. Knuth "The art of programming. Vol. 4A / Combinatorial Algorithms, Part 1", by Pearson Education, Inc., 2011, ISBN 978-0-201-03804-0

8. Barkalov S.A., Burkov V.N., Gilyazov I.M. Methods of aggregation in project management, Moscow, V.A. Trapeznikov Control Science Institute Russian Academy of Sciences, 1999, 55 p.

9. Golovkin B.A. Calculation of the characteristics and scheduling of parallel computing processes. Moscow, Radio I Svyaz, 1983, 272 pp.

10. Gonchar D.R., Furugan M.G. Efficient scheduling algorithms of calculations in multiprocessor real-time systems. Control of large systems, 2014, vol. 49, pp. 269-296.

Получено 17.10.2019

Сведения об авторах

Калянов Георгий Николаевич (Москва, Россия) – доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник, лаборатория 49 «Автоматизации проектирования и управления многоцелевыми объектами», Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН (117997, Москва, ул. Профсоюзная, 65, e-mail: kalyanov@mail.ru).

Титов Николай Николаевич (Москва, Россия) – кандидат технических наук, исполнительный директор ООО «НВП МОДЕМ» (121108, Москва, Можайское ш., 29, e-mail: nikoltit@yandex.ru).

Шибеко Виктор Николаевич (Гомель, Республика Белоруссия) – старший преподаватель кафедры «Информатика», Гомельский государственный технический университет им. П.О. Сухого (Республика Беларусь, 246746, Гомель, пр. Октября, 48, e-mail: svn20070809@gmail.com).

About the authors

Georgiy N. Kalanov (Moscow, Russian Federation) – Dr. Habil. in Engineering, Professor, Chief researcher, V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of the Russian Academy of Sciences (117997, Moscow, Profsoyuznaya st., 65, e-mail: kalyanov@mail.ru).

Nikolay N. Titov (Moscow, Russian Federation) – Ph.D. in Engineering, Executive director, LTD "NVP MODEM" (121108, Moscow, 29, Mozhaiskoe av., e-mail: nikoltit@yandex.ru).

Victor N. Shibeko (Gomel, Republic of Belarus) – Senior Lecturer, Department "Informatics", Sukhoi State Technical University of Gomel (246746, Republic of Belarus, Gomel, Octyabrya av., 48, e-mail: svn20070809@gmail.com).