

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА «ПИОНЕР» В АВТОМАТИЗАЦИИ ПЛАНИРОВАНИЯ РЕМОНТОВ ЭНЕРГООБОРУДОВАНИЯ

РЕЗНИЦКИЙ А. И., ШТИЛЬМАН Б. М.

(Москва)

Приводятся краткое описание метода решения переборных задач большой размерности (метода ПИОНЕР) и его применения к решению задачи планирования ремонтов энергооборудования. Метод сводит переборную задачу, по сути дела, к аналитической. Формализация его выполнена на основе теории формальных языков. Описывается программа ПИОНЕР-2, реализующая метод в задаче месячного планирования ремонтов оборудования электростанций.

1. Постановка задачи

В настоящее время в системе Минэнерго СССР ведутся работы по созданию отраслевой автоматизированной системы управления — ОАСУ «Энергия» и ее важнейшего звена — автоматизированной системы диспетчерского управления Единой энергосистемы — АСДУ ЕЭС СССР.

Для обеспечения надежного энергоснабжения потребителей в энергосистемах периодически проводятся плано-предупредительные ремонты основного оборудования электростанций. Одной из задач, решаемых АСДУ, является задача оптимизации плана ремонтов.

План составляется на основе заявок, поступающих от энергосистем. Заявка характеризуется мощностью агрегата y , продолжительностью ремонта x , рангом r (определяющим приоритетность заявки), а также некоторыми другими параметрами. Суммарная мощность агрегатов, ремонтируемых одновременно, ограничивается сверху функцией $P(t)$. Фигура, расположенная под кривой $P(t)$, называется «ремонтной площадкой» (рис. 1). Ордината ремонтной площадки определяется разностью между располагаемой суммарной мощностью станций системы и прогнозом энергопотребления, величиной аварийного резерва и внешних перетоков электроэнергии.

Включение заявки в план можно графически изобразить прямоугольником $x \times y$, занимающим часть ремонтной площадки.

При составлении плана необходимо учитывать различные технологические и хозяйственные ограничения: непрерывность ремонта, запрет ремонта в определенных временных интервалах, запрет одновременного ремонта нескольких агрегатов на одной станции, ограничения на промежутки между ремонтами, ограничения по рабочей силе и т. д.

Как правило, ограничения и, прежде всего, размеры ремонтной площадки не позволяют включить в план все заявки. В разработанных ранее алгоритмах поиска оптимального плана критерием оптимальности является минимум затрат на топливо, расходуемого на тепловых станциях систем. Однако в условиях дефицита установленной мощности на первый план выдвигается иной критерий — максимум отремонтированной за плановый период мощности.

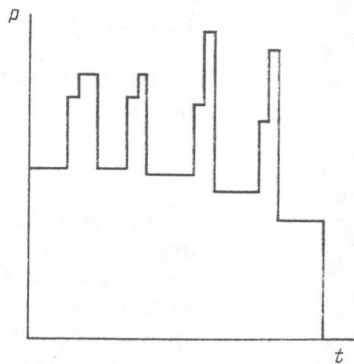


Рис. 1. Ремонтная площадка

Для задачи месячного планирования в масштабах объединенных диспетчерских управлений (ОДУ) были произведены расчеты приближенного числа возможных вариантов плана для различных исходных данных (количество заявок от 100 до 400). Это число находилось в диапазоне от 10^{50} до 10^{300} .

2. Методы решения

Рассматриваемая задача является переборной задачей большой размерности. В разработанных ранее алгоритмах годового планирования поиск оптимального плана производился в два этапа. Вначале выполнялась декомпозиция задачи: на уровне центрального диспетчерского управления (ЦДУ) планировались лишь ремонтные площадки для ОДУ. При этом происходил поиск непрерывного плана с учетом лишь некоторых ограничений — решалась задача нелинейного выпуклого программирования с ограничениями типа равенств и неравенств [4].

На втором этапе (на уровне ОДУ) непрерывное решение аппроксимировалось дискретными — строился реальный план. При этом использовались два метода получения дискретных планов: первый — динамическое программирование, второй — метод ветвей и границ. Однако из-за большой размерности задачи и трудности учета ограничений применявшиеся алгоритмы оказались недостаточно эффективными.

В связи с трудностями применения точных методов математического программирования в переборных задачах большой размерности (из-за экспоненциального роста дерева перебора) в настоящее время возросла актуальность построения приближенных методов и, в частности, моделирования методов решения переборов задач человеком.

Во ВНИИЭлектрэнергетики под руководством М. М. Ботвинника ведется работа по созданию нового метода решения переборных задач — метода ПИОНЕР. Основой для обобщений послужила шахматная программа ПИОНЕР, моделирующая мышление шахматного мастера [2–4]. Формализация метода (в первом приближении) была выполнена на основе теории формальных языков.

После успешного опробования в шахматной программе, этот метод был применен в задаче планирования ремонтов энергооборудования.

3. Метод ПИОНЕР. Краткое описание

Рассмотрим некоторую сложную систему, функционирующую путем переходов из одного состояния в другое с целью попасть в состояние из некоторого класса. Множество состояний достаточно велико (хотя, возможно, конечно). Необходимо найти оптимальную по некоторому критерию последовательность переходов.

Для таких задач определяется новая так называемая «неточная» цель игры [3], а также вводится динамическая многоступенчатая структура.

Таким образом, сложная система представляется в виде иерархии ступеней-подсистем, которые в соответствии с приоритетом включаются в перебор.

Отсечение ветвей в дереве перебора производится процедурой, получившей название «движение по рельсам». При этом происходит обследование ранее построенного поддерева для выяснения: может ли включение в перебор очередной ступени привести к улучшению оценки текущей оптимальной ветви поддерева.

При введении многоступенчатости особое значение имеют элементарные цели — «мишени», которые можно «атаковать» в процессе перебора. Устанавливается «горизонт», ограничивающий время достижения элементарной цели, — это сокращает число мишеней. Например, в задаче планирования мишенью является подлежащий ремонту агрегат, который атакуется в горизонте посредством включения в план ремонтов.

Оценочная функция содержит в общем случае две составляющие: материальную и позиционную. Первая оценивает достижение некоторой

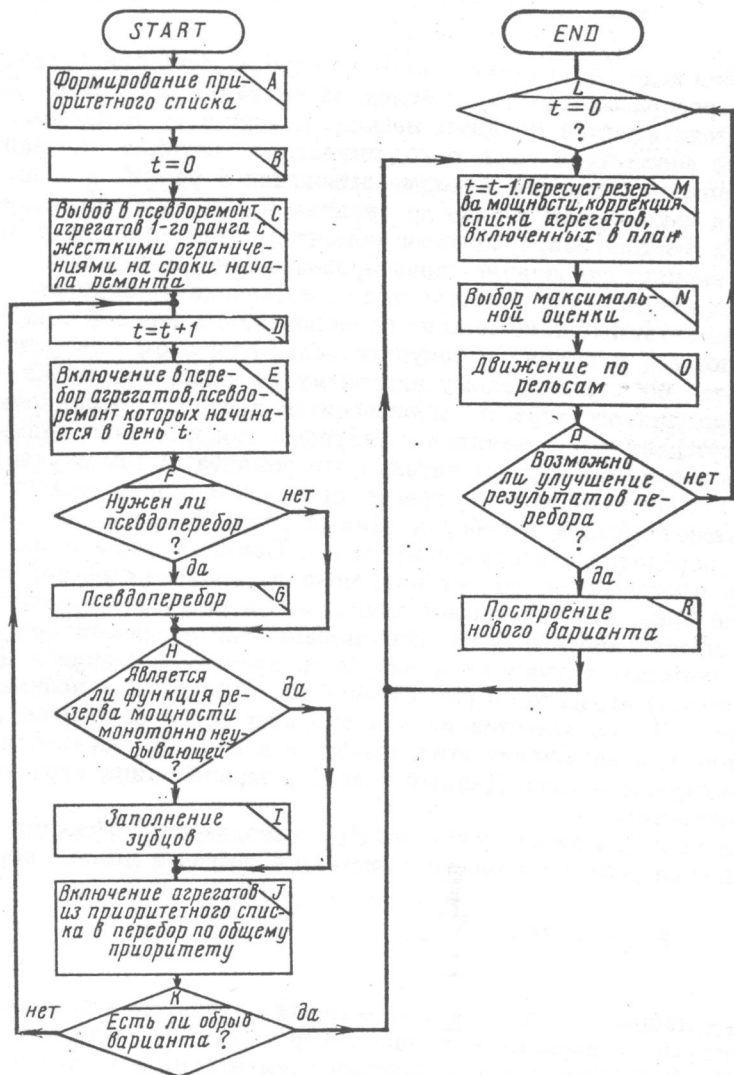


Рис. 2. Блок-схема алгоритма планирования ремонтов ПИОНЕР-2

цели в пределах построенного варианта, вторая прогнозирует достижение этой цели при условии продолжения данного варианта.

В задаче планирования материальная составляющая — это суммарная величина мощности, отремонтированной за период планирования.

Для формализации метода ПИОНЕР были использованы формально-параметрические грамматики, которые являются некоторым расширением грамматик из [5, 6]. При этом сложная система представляется как иерархия формальных языков.

Подробнее метод ПИОНЕР рассмотрен в работах [2–4].

Математическое исследование метода и его успешное опробование на шахматной задаче позволили перейти к использованию метода в задачах планирования ремонтов.

4. Программа ПИОНЕР-2 месячного планирования ремонтов

Здесь приведено содержательное описание алгоритма и программы ПИОНЕР-2. При этом подробнее описаны процедуры, связанные с учетом специфики данной задачи. Отметим также, что эта задача не позволила применить метод в полном объеме.

Блок-схема алгоритма ПИОНЕР-2 приведена на рис. 2.

Перебор ведется по схеме «сначала вглубь». Вершина (исходный узел) дерева перебора соответствует исходной ситуации в системе. Глубина t в дереве отсчитывается по дням месяца. В вершине полагаем $t=0$. При спуске по варианту в узел, находящийся на глубине t , записывается «ход» — список агрегатов, которые выводятся в ремонт в день t . Эта информация сохраняется в узле до окончания перебора. Указанной информации (с учетом непрерывности ремонтов) достаточно для того, чтобы каждый вариант однозначно характеризовал некоторый план.

В каждом узле ход формируется за несколько последовательных «тактов». Элементарный такт состоит во включении в перебор одного агрегата, выведении его в ремонт в текущий день. При этом очередной агрегат выбирается по определенному алгоритму из числа еще не включенных в план. Для данного агрегата производится проверка выполнения всевозможных ограничений, начиная с текущего дня и кончая днем, соответствующим заявленной продолжительности ремонта. В том случае, если ограничения удовлетворяются, агрегат присоединяется к списку агрегатов, ранее включенных в перебор в данный день. В противном случае программа переходит к следующему такту. Попытки включения агрегатов в перебор производятся до тех пор, пока не исчерпан резерв мощности в текущий день. Таким образом, программа в каждом временном интервале стремится наиболее полно использовать высоту ремонтной площадки.

В некоторых ситуациях может быть принято решение о целесообразности вывода агрегатов в ремонт не в текущий день, а позднее (ниже по варианту). Такие «заготовки» для будущих ходов заносятся в специальный список и включение этих агрегатов в перебор производится лишь в соответствующем узле. Данный способ резервирования агрегатов назовем псевдоремонтом.

Для удобства вместо функции $P(t)$ используется функция $\bar{P}(t, \tau)$, определяющая резерв мощности в системе в текущий момент перебора $\tau \geq 0$:

$$(1) \quad \bar{P}(t, \tau) = P(t) - \sum_{i=1}^m y_i,$$

где y_i — мощность i -го агрегата, который находится в ремонте в день t в соответствии с вариантом плана, построенным к моменту τ . При $\tau=0$ $\bar{P}(t, \tau) = P(t)$. Синхронно с каждым элементарным тактом — выводом агрегата в ремонт (псевдоремонт) на спуске изменяется ситуация в системе: пересчитывается функция $\bar{P}(t, \tau)$ и отмечается включение агрегата в план в списке заявок. На подъеме производятся соответствующие обратные изменения.

В каждом узле проверяются критерии обрыва (на спуске) и отсеечения (на подъеме). В конечном узле оценка варианта производится по значению оценочной функции; выбор оптимального варианта происходит по ее наибольшему значению.

При реализации метода ПИОНЕР особое значение имеет приоритет включения ступеней в перебор.

Уже первый построенный вариант (приоритетный вариант) должен давать хорошее приближение к оптимальному варианту. Для этого приоритет включения ступеней системы в перебор должен соответствовать точной цели. В алгоритме ПИОНЕР-2 в качестве основы приоритета используется функция $1/x$, где x — продолжительность ремонта. Поскольку суммарная мощность агрегатов, находящихся в ремонте в каждый день месяца, лимитируется высотой ремонтной площадки, приоритет $1/x$ позволяет ремонтировать максимальную мощность в единицу времени. Было доказано, что при условии плотного заполнения ремонтной площадки и выполнения ограничений задачи приоритет $1/x$ позволяет сформировать оптимальный вариант. Однако, как правило, эти условия не выполняются. Для получения приоритетного варианта высокого качества в алгоритме предусмотрены поправки к приоритету $1/x$.

Прежде всего учитываются ранги заявок. Составим список заявок, упорядоченный по возрастанию ранга r , а при равных рангах — по возраста-

нию продолжительности ремонта x . Определим площадь заявки как произведение xy , где y — ремонтируемые мощности. Выделим из указанного списка первые k заявок, суммарная площадь которых не превышает пло-

щади ремонтной площадки $S_{\text{рп}}$:
$$\sum_{i=1}^k x_i y_i \leq S_{\text{рп}}$$
 Назовем эту часть общего

упорядоченного списка заявок приоритетным списком. Только заявки, вошедшие в этот список, разрешено включать в перебор при построении приоритетного варианта. Агрегаты первого ранга с жестко заданными сроками проведения ремонта заранее выводятся в псевдоремонт. Затем в каждом узле на спуске предпринимаются попытки включения агрегатов в перебор в той последовательности, в которой они хранятся в приоритетном списке. Если некоторый агрегат в текущем узле не может быть выведен в ремонт из-за различных ограничений, то попытка его включения повторяется в следующем, более низком узле. Указанная последовательность может быть преднамеренно нарушена в целях более эффективного использования ремонтной площадки (например, в процедуре «заполнения зубцов», описанной далее), но во всех случаях в перебор поступают лишь агрегаты из приоритетного списка. При такой методике есть надежда, что в приоритетный вариант плана войдут агрегаты наивысших рангов, а суммарная отремонтированная мощность будет близка к максимально возможной. Можно показать, что сумма мощностей агрегатов, вошедших в приоритетный список, является верхней границей оценок вариантов дерева перебора (M_{sup}). Эта величина используется для оценки качества плана, составленного программой.

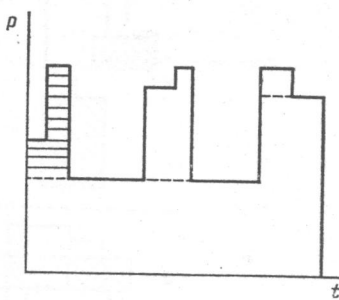


Рис. 3. Зубцы ремонтной площадки

Очевидно, что приоритет $1/x$ в общем случае не обеспечивает плотного заполнения ремонтной площадки. Главной помехой к этому являются отрицательные перепады значений функции резерва мощности $\bar{P}(t, \tau)$ — «зубцы» ремонтной площадки. Если же эта функция становится монотонно неубывающей при $t_0 \leq t \leq T$, где t_0 — текущий день, то ситуация упрощается: выполнение условия $y_i \leq \bar{P}(t_0, \tau)$ гарантирует выполнение аналогичного условия и при $t > t_0$. Заметим, что свойство монотонности функции $\bar{P}(t_0, \tau)$ сохраняется при $t > t_0$, если придерживаться описанной ранее техники перебора. Для того чтобы обеспечить плотное заполнение ремонтной площадки на тех участках, где нарушены условия монотонности $\bar{P}(t, \tau)$, а также для получения свойства монотонности этой функции разработана специальная процедура заполнения зубцов.

Пусть в текущий момент перебора τ_0 на глубине t_0 функция $\bar{P}(t, \tau_0)$ не является монотонно неубывающей. Построим монотонно неубывающую функцию $\bar{P}'(t, \tau_0)$ со значениями $\bar{P}'(t, \tau_0) = \min_{t_0 \leq t_i \leq T} \bar{P}(t_i, \tau_0)$.

Зубцами будем называть участки ремонтной площадки, расположенные между графиками функций \bar{P} , \bar{P}' (рис. 3). Для их заполнения подбираются агрегаты, ремонт которых может быть начат в точках положительного перепада ординаты ремонтной площадки (чтобы не образовывались новые зубцы), а закончен не позднее t_z , где t_z — абсцисса правой границы зубца. Для наиболее полного заполнения агрегаты могут группироваться.

Как уже отмечалось, при построении приоритетного варианта может быть нарушена очередность включения заявок в план в соответствии с рангом. Для того чтобы соблюсти соотношение рангов включенных и не включенных в план заявок, используется процедура псевдоперебора.

Пусть в некоторый момент перебора до конца периода планирования остается t дней и выясняется, что некоторый агрегат ранга r_i с заявленной продолжительностью ремонта x , равной t , не может быть выведен в

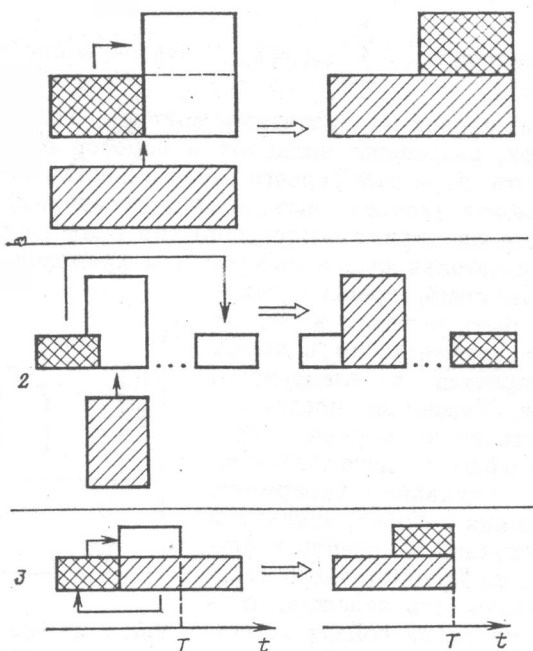


Рис. 4. Перестановки агрегатов в процедуре «движение по рельсам». Светлые прямоугольники изображают пустоты ремонтной площадки. Затемнены переставляемые агрегаты, заштрихованы агрегаты, включаемые дополнительно 1, 2 или 3, для которых увеличивается время ремонта в плановом месяце 3

ремонт. В то же время ранее были включены в план агрегаты более низкого ранга. Тогда вариант обрывается без оценки и начинается подъем по варианту, сопровождающийся постепенным исключением из плана агрегатов более низкого ранга до тех пор, пока не удастся включить в план необходимый агрегат. Затем спуск по варианту возобновляется.

Процедура движения по рельсам используется в алгоритме для проверки возможности «улучшения оценки» текущего оптимального варианта. Происходит заполнение пустот, образовавшихся в ремонтной площадке при спуске по одному из вариантов нижележащего поддерева. При решении этой задачи были сделаны некоторые упрощения. Принято, что новый вариант должен содержать те же агрегаты, что и ранее построенный, но не обязательно только их. Разрешено лишь изменение сроков некоторых ремонтов. Назовем такое изменение сроков ремонта перестановкой агрегата. Чтобы не нарушить ограничения по ремонтной площадке, перестановка возможна лишь в пустоту ремонтной площадки, размеры которой не меньше размеров агрегата. Если к переставляемому агрегату примыкает другая пустота, то она укрупняется при перестановке и тем самым может быть использована для дополнительного включения какого-либо агрегата из числа невключенных (рис. 4). При этом может быть построен вариант с более высокой оценкой. Оценку нового варианта легко вычислить заранее, используя принятую оценочную функцию.

При движении по рельсам определяется наиболее выгодная перестановка. Если при помощи данной перестановки и дополнительного включения некоторого нового агрегата можно превзойти оценку текущего оптимального варианта, то производится построение нового варианта. В противном случае происходит подъем по варианту.

На базе изложенного алгоритма планирования была составлена программа ПИОНЕР-2. Программа написана на ФОРТРАНЕ-IV, содержит 2000 строк, требует около 100 килобайт оперативной памяти. Эксперименты по составлению плана проводились на базе заявок, поступающих от энергосистем. Количество заявок менялось от 118 до 405. Среднее время счета на ЭВМ ЕС-1040 равнялось 1 минуте. Число вариантов в построен-

ных деревьях перебора не превышало 4, число узлов 167. Фактор эффективного ветвления (по Нильсону [7]) изменялся в диапазоне от 1 до 1,06.

Для оценки качества работы программы вычислялся коэффициент использования ремонтной площадки $K_n = M_{opt}/M_{sup}$, где M_{opt} — оценка оптимального варианта плана, M_{sup} — верхняя граница оценок (определяемая суммой мощностей агрегатов приоритетного списка). Значение K_n варьировалось от 0,91 до 0,99. Производилось сравнение планов, получаемых программой, с решениями, принимаемыми технологами, использующими общепринятую методику. Оказалось, что в среднем программа включает в план ремонтов на 18% больше мощности, чем технолог.

ЦДУ Единой энергосистемы СССР приняло программу ПИОНЕР-2 для использования.

В настоящее время разработана и принята в эксплуатацию программа ПИОНЕР-4 годового планирования ремонтов в масштабе всей ЕЭС СССР. В рамках новых реализаций метода ПИОНЕР сейчас ведется работа над программой планирования, учитывающей дефицит ресурсов (рабочая сила, запчасти и т.п.). Новая программа позволит более полно использовать возможности этого метода.

ЛИТЕРАТУРА

1. Автоматизация управления энергосистемами/Под ред. Совалова С. А. М.: 1979.
2. Ботвинник М. М. Алгоритм игры в шахматы. М.: Наука, 1968.
3. Ботвинник М. М. О кибернетической цели игры. М.: Советское радио, 1975.
4. Ботвинник М. М. О решении неточных переборных задач. М.: Советское радио, 1979.
5. Фу К. Структурные методы в распознавании образов. М.: Мир, 1977.
6. Кузин Л. Т. Основы кибернетики. Т. 2. М.: Энергия, 1979.
7. Нильсон Н. Искусственный интеллект. М.: Мир, 1973.

Поступила в редакцию
6.XII.1982

THE PIONER METHOD IN COMPUTER-AIDED SCHEDULING OF POWER FACILITY MAINTENANCE

REZNITSKIY A. I., STIL'MAN B. M.

The briefly described PIONER method for solution of high dimension searching problems which is employed, in particular, to scheduling of power facility maintenance, reduces the problem to what is essentially an analytical problem. The method formalization embodies the findings of the formal language theory. The PIONER-2 program executes the method in monthly scheduling jobs.