

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВНЕШНЕЙ СРЕДЫ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПЛАНА ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТ

к.ф.-м.н. И.В. Гребенник, А.Ю. Хабаров  
(представил д.т.н., проф. Э.Г. Петров)

*Рассматривается задача анализа эффективности построенного плана в условиях внешней нестабильности по отношению к системе среды. Исследуются параметры модели планирования выполнения работ на заданный период, которые могут быть подвержены случайным внешним воздействиям. Проводится анализ результатов таких воздействий на эффективность плана и методики выбора рационального плана в условиях неопределенности поведения внешней среды. Описывается разработанный для этой цели программный продукт.*

**Актуальность исследования.** Одной из задач проектирования является выбор наилучшего варианта построения системы (структурно-параметрический синтез), при этом обычно имеется некоторое количество вариантов окончательной структуры системы. Но не менее важной задачей является поиск наилучшей траектории достижения этой структуры. Особенно это характерно для очень крупных систем, которые вводятся в эксплуатацию поэтапно и постоянно развиваются [1]. Эти особенности присущи предприятию электросвязи.

Проектирование сети электросвязи с самого начала – хорошо разработанная и описанная в литературе проблема [2, 3]. В то же время проектирование развития существующей сети имеет значительные отличия. Поскольку процесс развития растянут во времени, а при этом сеть уже функционирует, требует затрат, приносит доход, то задачи эксплуатации необходимо рассматривать в комплексе с задачами развития. А это влечет за собой планирование развития и эксплуатации (порядка выполнения работ) как составной части процесса проектирования развития сети связи. В процессе эксплуатации сеть претерпевает изменения, требует постоянного мониторинга и реакции ЛПП на изменение внешних условий. Значит, для рассматриваемого класса систем разделять проектирование и эксплуатацию нецелесообразно.

Важным аспектом достижения поставленной цели проектирования является построение такого плана ввода в эксплуатацию мощностей, который бы обеспечивал экстремум некоторого критерия эффективности системы в конце периода планирования. На этапе эскизного проектирования рассмат-

ривается множество вариантов стратегического развития. Первым шагом является выбор нескольких вариантов плана развития, которые целесообразны в рамках системы и приводят к намеченной цели. Второй шаг – отбор из них нескольких наиболее перспективных вариантов путем анализа, производимого с учетом или (что хуже) без учета возможности изменения внешних условий. Выбранные на этапе эскизного проектирования варианты стратегического развития детальнее исследуются на этапах технического и рабочего проектирования [1]. Точность анализа и оптимизационных расчетов на этих этапах требуется повысить, поскольку выделенные ранее планы при небольшой точности могут оказаться неразличимыми между собой. Отдельно необходимо произвести анализ на устойчивость и качество решений при изменении внешних условий.

Традиционный подход к задачам планирования основывается на предположении, что во время выполнения плана характеристики работ не изменяются [4]. Исключением является, наверно, только время выполнения работы, зависящее от производительности труда и некоторых непредсказуемых внешних факторов, например, изменения погодных условий, задержек поставок оборудования партнерами и т.д. Способы и методы построения эффективных планов в условиях случайных колебаний времени выполнения работ достаточно хорошо проработаны [5, 6].

**Целью настоящей работы** является исследование более общей задачи и способов ее решения – планирования выполнения работ на заданный период в условиях неопределенности при воздействии большого числа внешних неуправляемых факторов, влияющих на эффективность плана. **Задачей исследования** является анализ модели планирования, предложенной в [7], на пригодность и целесообразность использования для достижения поставленной цели.

Нет ни одной области человеческой деятельности, в которой в той или иной степени не использовались бы методы моделирования. Особенно это относится к сфере управления различными системами, где основными являются процессы принятия сложных решений, имеющие долговременные и далеко идущие последствия [8]. Это актуально в настоящее время, когда вступили в силу рыночные отношения между субъектами хозяйственной деятельности. Бурное развитие бизнеса заставляет искать новые методы и средства, которые дадут возможность учитывать большое количество факторов, оказывающих влияние на принятие управленческих решений.

Большая часть социально-экономических объектов (банки, муниципальные системы, фирмы, в т.ч. предприятия электросвязи) являются нестационарными, высокодинамичными системами с плохо прогнозируемой динамикой развития. Для таких объектов характерны следующие особенности [8]:

- структура объекта нестационарная;

- многие параметры являются нестационарными;
- наличие большого количества нелинейных зависимостей;
- множество обратных связей;
- объект не имеет конечного горизонта планирования;
- затрудненное прогнозирование.

Они функционируют в условиях неопределенности экономического поведения субъектов рынка, вызванной динамизмом изменения внешней среды.

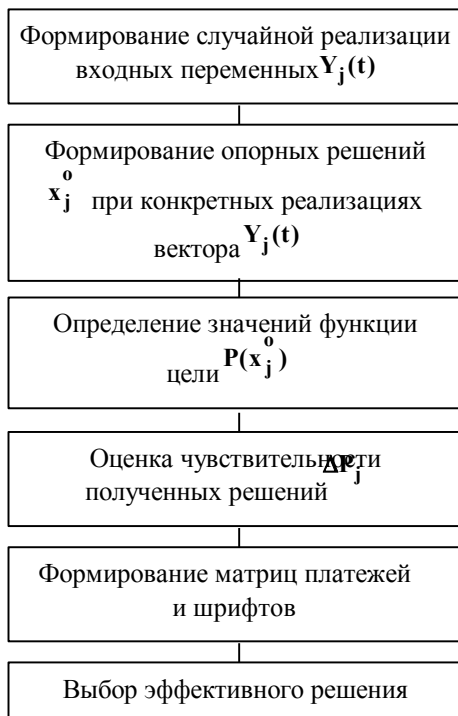


Рис. 1. Этапы моделирования

Под динамизмом понимаются факторы, связанные с недостаточной осведомленностью об условиях проведения операций и свойствах объектов, участвующих в них. Это могут быть неуправляемые переменные системы: цены, спрос, предложение, а также директивные воздействия (законотворчество, решения национального банка). Внешняя среда, таким образом, – это некоторая незаинтересованная инстанция, поведение которой неизвестно, но и не содержит элемента враждебности и сознательного противодействия [4].

В [8] предлагается методика моделирования поведения внешней среды и анализа ее влияния на систему. При этом используется метод статистических испытаний (Монте-Карло), который является инструментальным средством исследования стохастических систем [6, 9, 10]. Суть методики состоит в

оценке большого количества ситуаций на предмет «а что будет, если...». Последовательность действий при моделировании изображена на рис. 1. Вектор внешних воздействий формируется следующим образом: для каждого параметра, допускающего изменение, генерируется случайное влияние по некоторому заданному закону. Для найденных опорных решений вычисляются значения целевой функции при всех вариациях внешних условий. При этом производится оценка чувствительности решений, поскольку в силу

указанной выше нестабильности внешней среды опорное решение  $x_i^0$  при внешних условиях  $Y_j(t)$  будет неоптимальным. Последствия могут быть как отрицательными (неудовлетворение ограничениям), так и неотрицательными (решение допустимое, но неэффективное). За нарушение ограничений назначаются штрафы, что позволяет сравнивать решения между собой.

Для удобства анализа создается матрица штрафов. В ней по диагонали записаны значения функции цели для каждого опорного решения  $x_j^0$ , соответствующего реализации внешних условий  $Y_j(t)$ , а все остальные элементы каждой строки являются оценками последствий вариаций  $Y_j(t)$ . Если же таблицу представить в несколько ином виде, где в каждой ячейке будет стоять значение функции цели, вычисленное при опорном решении  $x_i^0$  и вариации внешних условий  $Y_j(t)$ , то полученная матрица будет иметь вид, аналогичный по форме и содержанию матрице платежей, которая используется при принятии решений в условиях риска и неопределенности. Она является исходной информацией для принятия эффективного решения.

На основании полученной платежной матрицы можно выбрать наиболее эффективное и устойчивое решение. Поскольку принимается решение не в стационарных условиях, то простой выбор экстремума среди опорных решений может привести к катастрофическим результатам по итогам выполнения такого плана. Поэтому в условиях риска и неопределенности нужно использовать всю информацию, имеющуюся в матрице, для принятия решения.

Выбор эффективного решения в условиях риска основан на предположении, что ЛПП известны априорные вероятности реализации различных ситуаций, т.е. сценариев  $Y_j(t)$  поведения внешней среды. При этом выбирается то решение, для которого взвешенное среднее максимально [4]:

$$x^0 = \arg \max_i \bar{P}_i = \arg \max_i \sum_j Q_j P_{ij},$$

где  $Q_j$  – вероятность реализации сценария  $Y_j(t)$ .

Однако при моделировании этих сценариев методом Монте-Карло требуется провести достаточно большое количество экспериментов (сотни и тысячи), что влечет за собой практическую невозможность ЛПП приписать каждой из реализаций вероятность ее появления. Проанализировать каждую ситуацию ЛПП просто не в состоянии. В этом случае удобнее считать все ситуации равновероятными и принимать решения по критерию Лапласа. Но некоторые системы, в том числе и развивающаяся сеть электросвязи, не могут быть корректно интерпретированы как стохастические. Поэтому здесь выгод-

нее применять подход, ориентированный на принятие решений в условиях неопределенности. Основой этого подхода является нахождение компромисса между эффективностью и устойчивостью решения [8]. Наиболее универсальным для рассматриваемого подхода является критерий Гурвица:

$$x^0 = \arg \max_i \left\{ \left[ \max_j P_{ij}(x) \right] * \alpha + \left[ \min_j P_{ij}(x) \right] * (1 - \alpha) \right\},$$

так как позволяет реализовать любые предпочтения ЛПП, от самых пессимистических до самых оптимистических. Принципиальным является то, что величина параметра  $\alpha$  назначается ЛПП на основе эвристических соображений, и не существует формальных методов ее определения.

Предприятие электросвязи является сложной организационно-технической системой, которая постоянно развивается, функционируя в нестабильной внешней среде. Поэтому для него вполне применим описанный выше подход для создания эффективных планов развития. Множество внешних факторов, влияющих на эффективность функционирования и развития предприятия электросвязи, представлено в табл. 1.

В [7] решена задача составления эффективного плана выполнения работ на период, предложена модель планирования в виде оптимизационной задачи с ограничениями. Обоснован выбор вида целевой функции и ограничений. Исходные данные для планирования разделены на две категории:

1) объективные характеристики работ, задаваемые заранее (их вид, набор, технологический порядок, продолжительность выполнения, стоимость, количество, единовременный доход, поэтапные доходы и затраты после выполнения);

2) параметры, зависящие от решения ЛПП и доступные для экспериментов при поиске эффективного плана (продолжительность планового периода, число этапов равной продолжительности в нем, фиксированные затраты в начале каждого этапа, фиксированный доход в конце каждого этапа, ограничение на дополнительно занимаемую на этапе сумму денег, поэтапная процентная ставка на кредит).

Переменными величинами в задаче являются:

- 1) моменты времени, в которые должны быть начаты работы;
- 2) дополнительные заемные суммы денег, которые должны быть привлечены в начале каждого этапа.

Критерий оптимальности – доход последнего этапа планирования, который максимизируется. Для оптимизационных расчетов используются методы комплексов и штрафных функций, поскольку целевая функция имеет сложный вид и является многоэкстремальной.

Исследуемая модель позволяет производить расчеты при различных

исходных данных, что дает возможность статистического эксперимента над ней при условии случайных воздействий на параметры системы. Ограничимся рассмотрением только случая с фиксированным набором работ, поскольку изменение их состава и/или количества приводит, строго говоря, к другому плану в контексте проектирования системы, вызывая, таким образом, необходимость повторения стадий эскизного и технического проекта.

Таблица 1

Виды внешних непредсказуемых факторов, влияющих на план

№	Внешний фактор в общем виде	Примеры воздействия фактора на предприятие электросвязи
1	Изменение спроса на продукцию предприятия вообще (в т.ч. из-за действий конкурентов)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• мобильная связь уменьшила число городских переговоров;</li> <li>• фирма-конкурент построила сеть в новом районе, что лишило предприятие возможности развития в нем</li> </ul>
2	Изменение спроса на конкретный вид продукции (в т.ч. при появлении новых видов продукции)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• с появлением пейджинговой связи звонки операторам добавили суточной нагрузки на каналы связи;</li> <li>• с появлением Internet увеличилось время занятия индивидуальных установок (благодаря модемным подключениям);</li> <li>• с появлением Internet увеличилось число подключений по выделенным линиям</li> </ul>
3	Изменение цен на продукцию (в т.ч. в результате конкуренции или директивных ограничений)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• госкомитет по связи ввел ограничения сверху на стоимость услуг;</li> <li>• конкуренция между Internet-провайдерами привела к падению цен на их услуги</li> </ul>
4	Изменение стоимости оборудования и материалов (в т.ч. при появлении новых видов)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• подешевела аппаратура многоканального цифрового уплотнения на 4 абонента;</li> <li>• подорожали медные кабели из-за изменения мировых цен на медь и нефть.</li> </ul>
5	Изменение законодательства (в т.ч. налогового и трудового)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• установлены иные ставки подоходного и прочих налогов;</li> <li>• изменен минимальный размер оплаты труда и необлагаемый налогом минимум</li> </ul>
6	Изменение скорости выполнения работ (в т.ч. из-за автоматизации, ухудшения погодных условий)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• положительный прогноз погоды не оправдался, ливневые дожди затрудняют прокладку кабельной канализации;</li> <li>• применение более совершенных кабелеукладчиков предприятием-подрядчиком позволяет ускорить работы по протяжке кабелей</li> </ul>

Модель [7] позволяет исследовать и случай, когда заданы априорные вероятности осуществления сценариев поведения внешней среды, полученные, например, экспертным путем. Однако это нецелесообразно, поскольку определить вероятности сценариев для рассматриваемой системы практически

невозможно, особенно на произвольный период планирования. Основное назначение метода статистических испытаний – получение и использование дополнительной информации о состоянии внешней среды, которую можно добыть путем эксперимента. Исследования показывают, что в типичных случаях, когда речь идет о получении сколько-нибудь значительного количества дополнительной информации, критерии, не использующие вероятности сценариев поведения среды (Вальда, Сэвиджа, Гурвица), становятся практически равносильными критерию, основанному на вероятностях сценариев [4].

Все факторы, перечисленные в табл. 1, прямо или косвенно можно учесть при планировании в параметрах самой модели. В общем случае они взаимно независимы или их зависимость проследить не удастся. Они оказывают некоторое влияние на величину параметров, известную на момент составления плана. В рассматриваемой модели [7] это влияние можно учесть как для одного, так и сразу для нескольких факторов. Параметры, на которые оказывается случайное воздействие:

- 1) время выполнения каждой работы;
- 2) стоимость выполнения работы, которая может быть условно разделена на составляющие:
  - цена материалов;
  - оплата труда;
- 3) единоразовый доход от выполнения работы;
- 4) регулярные ежеэтапные доходы после выполнения работы;
- 5) регулярные ежеэтапные расходы после выполнения работы.

Каждая работа имеет несколько параметров, поэтому вектор возмущений  $Y_j(t)$  состоит из  $n \cdot m$  чисел, где  $n$  – число работ,  $m$  – число параметров работы. Планирование производится по схеме, описанной в [7], но повторяется для каждого варианта  $Y_j(t)$ . Для более полной оценки возможных последствий изменения внешних факторов необходимо провести некоторое количество экспериментов, которые позволят принять правильное решение в условиях неопределенности. Количество экспериментов должно быть достаточно большим, но не превращающим задачу планирования в неразрешимую по причине вычислительной сложности.

Результатом каждого отдельного решения при некотором возмущении  $Y_j(t)$  является план выполнения работ, т.е. моменты начала каждой работы и дополнительно привлекаемые на каждом этапе денежные средства. Затем, следуя методике [8], необходимо произвести оценку чувствительности решений. Для этого необходимо сформировать штрафы за невыполнение ограничений, предусмотренных в модели. Ограничения разделены на группы:

- 1) «Превышен период планирования» – ведет к штрафным санкциям,

связанным с задержкой выплат денег кредиторам, клиентам и пр.;

2) «Нарушен порядок выполнения работ» – тоже приводит фактически к увеличению срока выполнения плана, ибо зависимые работы должны дожидаться окончания выполнения предшествующих им работ;

3) «Расходы больше активов хоть на одном этапе» – это необходимость получить дополнительные кредиты, что влечет за собой их выплату с установленными процентами в конце периода планирования.

Штрафы тоже разделены на категории, каждую из которых можно использовать независимо:

1) фиксированный процент по кредитам за каждый просроченный этап (например, по кредитам банка);

2) фиксированный процент от окончательной прибыли за каждый просроченный этап (например, санкции налоговой инспекции);

3) фиксированная сумма за каждый просроченный этап указывается априори для конкретной работы, которая не должна опоздать (например, в контракте оговорен срок поставки продукции и неустойка при его нарушении).

Модель, предложенная в [7], позволяет задать и другие виды штрафов, список которых может быть расширен.

Разработан программный продукт, позволяющий ЛПП оценить различные варианты плана, которые построены на исходных данных с внесенными в них случайными воздействиями внешней среды. Для задания величины прогнозируемого воздействия ЛПП указывает:

1) математическое ожидание параметра работы (его величину на момент начала планового периода);

2) предполагаемое среднеквадратическое отклонение параметра работы;

3) закон распределения для каждого параметра.

При вычислительном эксперименте согласно центральной предельной теореме принята гипотеза о нормальном распределении значений входных параметров [9, 10], поскольку каждый из них является результатом комбинации многих (возможно, даже неизвестных) причин и влияний. Однако рассматриваемые модель и методика позволяют задать различные законы распределения разным параметрам модели и проанализировать результаты моделирования.

Описанные выше группы ограничений при экспериментах задействовались и отключались независимо для анализа их влияния на величину штрафов и эффективность выбираемого окончательного плана.

После расчета всех вариантов плана ЛПП имеет возможность выбрать наиболее эффективный план. Критерий Гурвица, применяемый для окончательного выбора плана, содержит в себе степень оптимизма, которую ЛПП может задать исходя из личного опыта и здравого смысла.



Кроме выбора эффективного решения по платежной матрице можно на основании данных провести анализ чувствительности и устойчивости решения на изменение внешних условий. Это дает возможность ЛПР провести дополнительный качественный анализ решений и общих тенденций – смещения экстремума в какую-либо сторону, его величины и особенностей проекции переменных задачи на рассматриваемые параметры предметной области. Применительно к исследуемой задаче планирования и модели, предложенной в [7], это моменты начала выполнения работ и дополнительные деньги, привлекаемые на каждом этапе.

Эксперименты показывают, что при задании небольшого отклонения для всех параметров или каждого по отдельности (кроме времени выполнения работ) значительных штрафов не наблюдается. Точка экстремума при этом сдвигается чаще всего только по координатам, имеющим физический смысл заемных денег (что очевидно, ибо случайные изменения затратных сумм на входе требуют соответствующего изменения заемных сумм). Иногда все же происходит сдвиг работ по времени дальше от начала периода планирования (что вызвано необходимостью накопить достаточно денег, и это выгоднее займа) или наоборот, ближе к началу периода планирования (что вызвано уменьшением требуемых ресурсов для выполнения работ и укорачиванием периода накопления денег).

При анализе результатов воздействий внешней среды на время выполнения работ было обнаружено, что при незначительных отклонениях эффективный план остается прежним, рассчитанным для стационарного режима. Это связано с особенностью модели [7], в которой период планирования заведомо длиннее, чем критический путь всего плана. Изменение продолжительности выполнения работ ведет чаще всего только к незначительному изменению дополнительных заемных сумм. Моменты начала работ остаются прежними. Однако штрафы при изменении времени выполнения работ наиболее существенные, особенно при нарушении технологической последовательности их выполнения.

Для проверки гипотез о виде статистического распределения в программном средстве используется универсальный критерий  $\chi^2$ , применимый для любого непрерывного закона распределения, который может получиться на выходе при моделировании [9, 10].

При использовании на входе случайных воздействий, распределенных по нормальному закону, получается следующая картина на выходе. Значения целевой функции в точках опорных решений также случайны, и экспериментальные данные согласуются с гипотезой о нормальном распределении даже при уровне значимости (вероятности отвергнуть правильную гипотезу) 0,001. Это позволяет сделать вывод о наиболее благоприятной ком-

бинации «эффективность/устойчивость», определяемой  $\alpha \in (0.4; 0.6)$  при использовании критерия Гурвица.

**Выводы.** Реализована методика моделирования и оценки влияния внешней среды на план выполнения работ. Разработано программное средство, которое предназначено для поддержки принятия решений при планировании на заданный период. Особенностью является возможность проанализировать качество составленного плана при неизвестном заранее сценарии поведения внешней среды. Этот программный продукт может быть использован не только в электросвязи, на примере которой производилось описание модели и методов, но и в других отраслях промышленности. Поскольку банк моделей является открытым, то он может быть пополнен новыми моделями, для которых тоже можно произвести анализ результатов случайных воздействий внешней среды.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Петренко А.И., Семенов О.И. Основы построения систем автоматизированного проектирования. – К.: Высш. Шк., 1985. – 294 с.
2. Петров Э.Г., Писклакова В.П., Бескоровайный В.В. Территориально распределенные системы обслуживания. – К.: Техніка, 1992. – 208 с.
3. Зайченко Ю.П., Гонга Ю.В. Структурная оптимизация сетей ЭВМ. – К.: Техніка, 1986. – 168 с.
4. Вентцель Е.С. Исследование операций. – М.: Сов. радио, 1972. – 552 с.
5. Кофман А., Дебазей Г. Сетевые методы планирования. – М.: Прогресс, 1968. – 182 с.
6. Таха Х.А. Введение в исследование операций. В 2 кн. – М.: Мир, 1985. – Кн. 2. – 496 с.
7. Гребенник И.В., Хабаров А.Ю. Модель задачи эффективного планирования работ на заданный период // АСУ и приборы автоматики. – 2003. – № 123. – С. 44 – 53.
8. Овезгельдыев А.О., Петров Э.Г., Петров К.Э. Синтез и идентификация моделей многофакторного оценивания и оптимизации. – К.: Наук. думка, 2002. – 164 с.
9. Гмурман В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика. – М.: Высшая школа, 2002. – 479 с.
10. Вентцель Е.С., Овчаров Л.А. Теория вероятностей и ее инженерные приложения. – М.: Высшая школа, 2000. – 480 с.

Поступила 25.08.2003

**ГРЕБЕННИК Игорь Валериевич**, канд. физ.-мат. наук, доцент, доцент кафедры системотехники Харьковского национального университета радиоэлектроники. Область научных интересов – комбинаторная оптимизация, вычислительные методы, математическое моделирование.

**ХАБАРОВ Александр Юрьевич**, аспирант кафедры системотехники Харьковского нацио-

*нального университета радиоэлектроники, научный сотрудник лаборатории автоматизированных систем ООО «Фирма РиКо». Область научных интересов – многокритериальная оптимизация, моделирование сетей связи.*