

И. М. Якимов, Р. З. Бедретдинов

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССОВ РАЗРАБОТКИ СИСТЕМ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ

Ключевые слова: разработка, имитационное моделирование, регрессионный анализ, оптимизация, BPWin, GPSS W, Arena, Statistica 8.0, MS Excel 2007.

Предлагается компьютерная технология моделирования и оптимизации процессов разработки систем программного обеспечения (СПО). Структурное моделирование проведено в системе BPWin. Имитационное моделирование проведено в системах GPSS W и Arena. Построена математическая модель процессов проектирования, разработки и внедрения СПО, представляющая собой совокупность уравнений регрессии. Проведена оптимизация. Получены формулы для вычисления оптимального количества занятых сотрудников.

Keywords: development, simulation modeling, regression analysis, optimization, BPWin, GPSS W, Arena, Statistica 8.0, MS Excel 2007.

Software development processes simulation and optimization computer technology is represented. Structural modeling has been conducted in GPSS W and Arena systems. Design, development and implementation processes mathematical model has been created. It is represented by a set of regression equations. Model optimization has been held. Formulas for calculating optimal number of employees have been obtained.

В настоящий момент рынок услуг с применением ИТ быстро развивается. При этом значительная часть услуг начинает предоставляться удаленно. Как правило, организация сервисных компаний и подразделений описывается при помощи процессного подхода. Компании, занимающиеся предоставлением каких-либо услуг, часто сталкиваются с проблемой формализации и необходимостью реинжиниринга существующих процессов с целью повышения собственной эффективности, снижения издержек для развития собственных конкурентных преимуществ.

В настоящем исследовании рассматривается новый практический подход к исследованию и оптимизации процессов по разработке ПО на примере поиска возможностей уменьшения стоимости работ по договорам на разработку ПО.

Договорные работы по проектированию, разработке и внедрению систем программного обеспечения (СПО) выполняются специализированным подразделением предприятия. Условия выполнения работ устанавливаются по согласованию заказчика и исполнителя. В работах принимают участие следующие категории исполнителей:

- руководитель проекта контролирует всех работников, занятых в рамках договора, и отвечает за выполнение работ в срок;
- руководители функциональных групп координируют работы каждой группы соответственно;
- отдел маркетинга и продаж участвует в проекте на этапе переговоров и подписания договора;
- экономический отдел участвует в проекте на этапе формирования и распределения бюджета проекта;
- руководители групп координируют соответственно работы аналитиков, разработчиков и архитекторов;
- аналитики, выполняют работы по сбору и документированию требований заказчиков,

постановке задач и оформлению технических заданий на проекты;

- архитекторы, разрабатывают высокоуровневый дизайн СПО и выбирают методы решения поставленных задач;
- разработчики, разрабатывают программные модули (подсистемы), составляют методики тестирования, внедряют и сопровождают СПО.

Для моделирования и оптимизации процессов проектирования, разработки и внедрения СПО предлагается технология, состоящая из следующих этапов:

1. Выбор совокупностей результативных показателей эффективности процессов и влияющих на них оптимизируемых и объективных факторов;
2. Математическая постановка задач;
3. Построение IDEF-диаграмм процессов в системе BPwin и их качественный анализ;
4. Переход от диаграммы IDEF3 в систему Arena и отладка в ней имитационной модели процессов;
5. Разработка и отладка имитационной модели в системе GPSS W;
6. Составление стратегического плана проведения имитационных экспериментов;
7. Определение требуемого количества реализаций состояния модели для получения результатов с заданной достоверностью (тактическое планирование);
8. Моделирование процессов по стратегическому плану;
9. Вычисление коэффициентов линейной корреляции и отбор существенно влияющих факторов в математическую модель;
10. Построение математической модели, состоящей из совокупности уравнений регрессии, связывающих результативные показатели эффективности процессов с влияющими на них факторами;

11. Оценка степени влияния факторов на резуль-
тативные показатели эффективности
моделируемого процесса;
12. Оптимизация процессов;
13. Вывод формул для вычисления оптималь-
ных значений количества аналитиков, раз-
работчиков и архитекторов;
14. Генерация управляющих решений по по-
строению эффективных процессов проекти-
рования, разработки и внедрения для кон-
кретных примеров СПО.

Далее последовательно рассмотрим все вы-
деленные этапы.

1. Для исследования процессов отобраны 8
результативных показателей эффективности и 7
влияющих на них факторов. Первые три фактора,
которые мы можем менять для обеспечения требуе-
мых значений откликов, будем называть оптимизи-
руемыми факторами. Остальные факторы мы не
имеем возможности менять, их будем называть объ-
ективными факторами. Отобранные для исследова-
ния факторы и отклики представлены в таблице 1.

**Таблица 1 – Результативные показатели и фак-
торы, отобранные для исследования**

№	Код	Наименование
1	y_1	Стоимость работ за время выполнения договора в рублях
2	y_2	Среднее время выполнения работ по договору в часах
3	y_3	Среднее отклонение времени выполне- ния работ по договору в часах
4	y_4	Вероятность выполнения работ в уста- новленные договором сроки
5	y_5	Среднее время просрочки работ по до- говору в часах
6	y_6	Коэффициент утилизации аналитиков
7	y_7	Коэффициент утилизации разработчи- ков
8	y_8	Коэффициент утилизации архитекторов
9	x_1	Количество аналитиков
10	x_2	Количество разработчиков
11	x_3	Количество архитекторов
12	x_4	Сложность выполнения работ (количе- ство подсистем)
13	x_5	Средняя заработная плата за один час работы в рублях
14	x_6	Планируемое время выполнения работ по договору в часах
15	x_7	Штраф за каждый просроченный час выполнения договорных работ в рублях

Принято, что все временные распределения
являются экспоненциальными.

2. Требуется построить математическую мо-
дель процесса в виде совокупности уравнений рег-
рессии:

$$y_j = f_j(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7); j = \overline{1, 8}. \quad (1)$$

По математической модели (1) производит-
ся постановка оптимизационной задачи:

$$y_j = f_j(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7) \rightarrow \min; \quad (2)$$

$$a_j \leq y_j = f_j(x_{i1}, x_{i2}, x_{i3}, x_{i4}, x_{i5}, x_{i6}, x_{i7}) \leq b_j;$$

$$i = \overline{1, N}; j = \overline{1, 8};$$

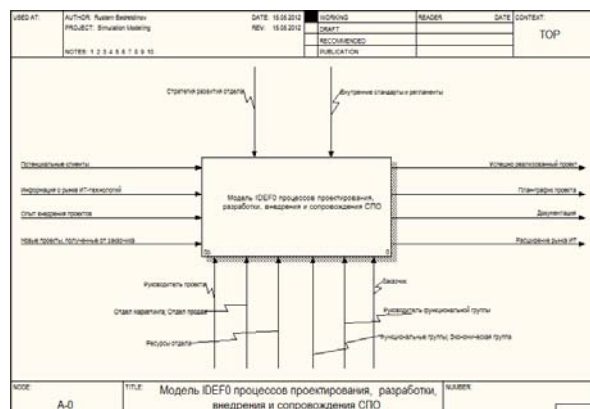
$$c_i \leq x_i \leq d_i; i = \overline{1, 7},$$

где a_j, b_j – левая и правая границы допустимых зна-
чений j – го результативного показателя эффектив-
ности; c_i, d_i – левая и правая границы допустимых
значений i – го фактора; N – количество промодели-
рованных вариантов реализации процессов.

По результатам оптимизации (2) выводятся
расчётные формулы для вычисления оптимальных
значений факторов: x_1, x_2 и x_3 :

$$x_i = f_i(x_4, x_5, x_6, x_7); i = \overline{1, 3}; \quad (3)$$

3. Структурные модели процессов проектиро-
вания, разработки и внедрения СПО разработаны в
системе BPWin в виде диаграмм IDEF0 (рис. 1) и
IDEF3 (рис. 2).



**Рис. 1 – Модель IDEF0 процессов
проектирования, разработки и внедрения СПО**

В диаграмме IDEF0 указываются информа-
ционные и материальные связи. IDEF0 отображает
структуру и функции процессов и потоки исполь-
зуемой и генерируемой информации [1]. На диа-
грамме A-0, которая представлена на рисунке 1,
содержится наиболее общее описание объекта моде-
лирования. Диаграмма A-0 описывает, как и с по-
мощью каких средств производятся работы по про-
ектированию, разработке и внедрению СПО.

Более подробно эти процессы представля-
ются диаграммой IDEF3. Структурная модель
IDEF3 позволяет представить сценарий информа-
ционного процесса (информационной технологии) в
виде параллельно и последовательно выполняемых
действий с одновременным описанием объектов,
имеющих к процессу непосредственное отношение.
Ещё одним несомненным достоинством структур-
ной модели IDEF3 является возможность непосред-
ственного перехода от неё в систему имитационного
моделирования, для этого требуется только допол-
нительно ввести некоторые количественные харак-
теристики процессов с помощью предусмотренной
совокупности меню.

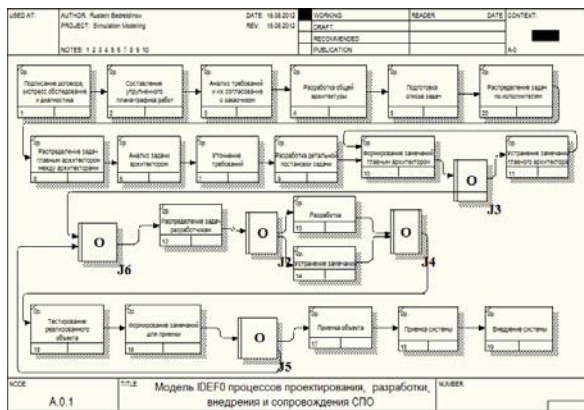


Рис. 2 - Структурная модель IDEF3 процессов проектирования, разработки и внедрения СПО

4. С помощью встроенной в Agena процедуры была проведена генерация имитационной модели на основе разработанной структурной модели IDEF3 (рис. 2).

В системе Agena проведено имитационное моделирование одного варианта реализации процессов со средними значениями факторов и зарегистрированы значения результативных показателей эффективности процессов.

5. Параллельно с системой Agena имитационная модель была разработана и отлажена на языке GPSS W, имеющим больше возможностей по представлению моделируемых процессов по сравнению с системой Agena, но проигрывающий ей в трудоёмкости разработки моделей.

6. В качестве стратегического принят план, состоящий из 23 вариантов. В первом варианте – центральной точкой взяты средние значения всех факторов. Ещё 8 вариантов в геометрической интерпретации представляют собой вершины куба для трёх основных оптимизируемых факторов. Четыре дополнительных факторов меняются по законам изменения произведений основных факторов, т.е. реализуется план факторного эксперимента. Для обеспечения отображения возможных нелинейностей в зависимостях результативных показателей эффективности от влияющих на них факторов вводятся 14 «звёздных» точек [2].

7. Количество реализаций состояний модели вычислено по формуле, полученной на основании неравенства Чебышева:

$$n = \frac{\sigma^2}{\varepsilon^2(1-\beta)} = \frac{487,84^2}{(0,1 \cdot 1035,77)^2 \cdot (1-0,90)} = 221,334 \approx 220, \quad (4)$$

где σ^* – оценка среднего квадратического отклонения; ε – половина ширины доверительного интервала, берётся равной $0,1 \cdot m_i^*$; m_i^* – оценка математического ожидания; β – доверительная вероятность, берётся равной 0,90.

8. Моделирование процессов проведено в двух системах по 23 вариантам.

Согласно полученным данным различие в результатах моделирования в двух системах сравнительно невелико и не превышает 10%, его наличие можно объяснить отличием используемых генераторов случайных чисел в Agena и GPSS W. Можно ожи-

дать, что это различие будет уменьшаться при увеличении количества реализаций состояний моделей.

9. Вычисленные значения коэффициентов линейной корреляции позволили установить, что большинство зависимостей результативных показателей от влияющих на них факторов являются существенными, но в то же время они не являются линейными. Кроме того, существенное влияние на результативные показатели оказывают и некоторые произведения факторов между собой. Поэтому принято решение в качестве уравнений регрессии использовать нелинейные зависимости второй степени с включением в них произведений факторов между собой.

10. Постановка задачи построения уравнений регрессии требует, чтобы сумма квадратов отклонений экспериментальных значений от вычисленных по аппроксимирующей зависимости была минимальной. Кроме того, требуется, чтобы отношение стандартной ошибки к среднему значению не превышало 0,1; уровень значимости по коэффициенту множественной детерминации, критерию Фишера для уравнения регрессии и уровни значимости по критерию Стьюдента для коэффициентов уравнения регрессии не превышал 0,05. Совокупность 8 полученных уравнений регрессии представляет собой математическую модель процессов. Для примера представим нелинейные уравнения регрессии, связывающие результативные показатели эффективности: y_1 – стоимость работ и y_2 – среднее время выполнения работ с влияющими на них факторами.

$$\begin{aligned} y_1 = & 20079094,22 - 147694,281 \cdot x_1 - 594944,679 \cdot x_2 - \\ & 14475,045 \cdot x_6 + 158157,632 \cdot x_3^2 + 1427,528 \cdot x_4^2 + \\ & + 0,559 \cdot x_5^2 + 3,582 \cdot x_6^2 + 0,235 \cdot x_7^2; \\ y_2 = & -453,6 - 40,5626 \cdot x_1 - 294,8992 \cdot x_2 - \\ & 215,5050 \cdot x_3 + 8,1071 \cdot x_4 + 2,1701 \cdot x_5 + \\ & 1,1663 \cdot x_6 + 0,3697 \cdot x_7 + 0,7567 \cdot \\ & x_1^2 + 14,2960 \cdot x_2^2 + 25,3811 \cdot x_3^2 + 0,2291 \cdot x_4^2 - \\ & 0,0007 \cdot x_5^2 - 0,0004 \cdot x_6^2 - 0,0001 \cdot x_7^2. \end{aligned} \quad (5)$$

Для полученных уравнения регрессии были определены показатели качества. Все они находятся в допустимых интервалах.

11. Оценка степени влияния факторов на результативные показатели эффективности процессов проектирования, разработки и внедрения СПО проведена по удельным весам и коэффициентам эластичности факторов. Для примера представим результаты оценки степени влияния факторов на стоимость работ - y_1 по их удельным весам (рис. 3) и коэффициентам эластичности (рис. 4).

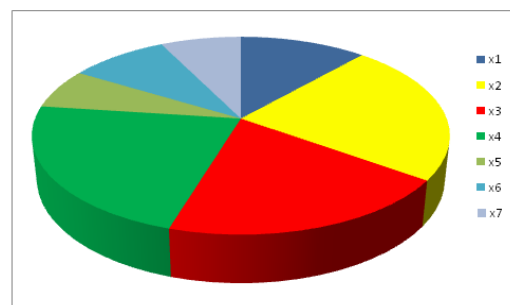


Рис. 3 - Круговая диаграмма удельных весов факторов, влияющих на изменение y_1

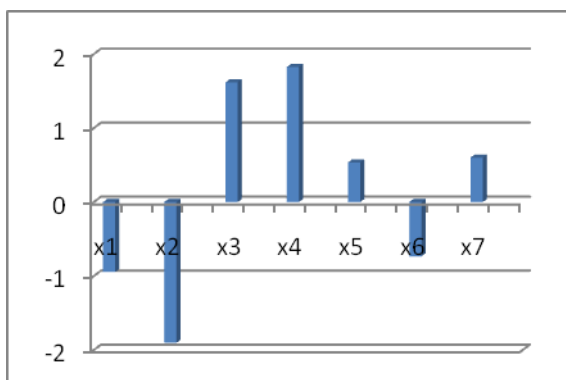


Рис. 4 - Гистограмма коэффициентов эластичности факторов влияющих на изменение y_1

По полученным диаграммам, представленным на рис. 3 и рис. 4 можно сделать следующие выводы:

- наиболее существенное положительное влияние на увеличение стоимости работ оказывает сложность выполнения работ (x_4), т.е. чем проще работы, тем они дешевле;
- количество аналитиков (x_1) и количество разработчиков (x_2) следует увеличить;
- количество архитекторов (x_3) следует уменьшить;
- сформулированные предложения позволят сократить стоимость выполняемых работ.

Отметим, что рекомендации, выданные на основании диаграмм, представленных на рис. 3 и 4 носят качественный характер. Количественные рекомендации можно выдать на основе результатов оптимизации процессов.

12. По математической модели в соответствии с математической постановкой (2) проведем оптимизацию как задачу нахождения минимального значения $-y_1$, за счет выбора оптимальных значений оптимизируемых факторов x_1 , x_2 и x_3 при ограничениях на другие показатели эффективности и факторы для каждого из 23 вариантов модели.

13. По результатам оптимизации получено 3 уравнения регрессии для вычисления оптимальных значений количества аналитиков, разработчиков и архитекторов в зависимости от объективных факторов, характеризующих конкретную СПО.

$$x_{1opt} = -3,16662 + 0,35472 \cdot x_4 + 0,00022 \cdot x_5 + 0,00276 \cdot x_6 - 0,00248 \cdot x_7 + 0,43572 \cdot x_4^2 + 0,00053 \cdot x_5^2 + 0,00000063 \cdot x_6^2 - 0,00000081 \cdot x_7^2;$$

$$x_{2opt} = 2,640308 + 0,131235 \cdot x_4 + 0,000347 \cdot x_5 + 0,001650 \cdot x_6 - 0,001350 \cdot x_7 + 0,001210 \cdot x_4^2 + 0,00000035 \cdot x_5^2 + 0,000002 \cdot x_6^2 - 0,00000028 \cdot x_7^2;$$

$$x_{3opt} = 3,514593 + 0,049782 \cdot x_4 - 0,000340 \cdot x_5 + 0,000043 \cdot x_6 - 0,000733 \cdot x_7 + 0,001245 \cdot x_4^2 + 0,00000016 \cdot x_5^2 - 0,00000015 \cdot x_6^2 - 0,00000055 \cdot x_7^2.$$

14. Решение контрольного примера. Пусть заключен договор на проектирование, разработку и внедрение СПО со следующими параметрами: $x_4=60$ подпрограмм; $x_5=1300$ рублей; $x_6=2000$ часов; $x_7=1500$ рублей. По формулам (6) и (5) вычислены:

$$x_{1opt} = -3,16662 + 0,35472 \cdot 60 + 0,00022 \cdot 1300 + 0,00276 \cdot 2000 - 0,00248 \cdot 1500 +$$

$$+ 0,43572 \cdot 60^2 + 0,00053 \cdot 1300^2 + 0,00000063 \cdot 2000^2 - 0,00000081 \cdot 1500^2 = 20 \text{ человек};$$

$$x_{2opt} = 2,640308 + 0,131235 \cdot 60 + 0,000347 \cdot 1300 + 0,001650 \cdot 2000 - 0,001350 \cdot 1500 +$$

$$+ 0,001210 \cdot 60^2 + 0,00000035 \cdot 1300^2 + 0,000002 \cdot 2000^2 - 0,00000028 \cdot 1500^2 = 12 \text{ человек};$$

$$x_{3opt} = 3,514593 + 0,049782 \cdot 60 - 0,000340 \cdot 1300$$

$$+ 0,000043 \cdot 2000 - 0,000733 \cdot 1500 + 0,001245 \cdot 60^2 + 0,00000016 \cdot 1300^2 -$$

$$0,00000015 \cdot 2000^2 - 0,00000055 \cdot 1500^2 = 5 \text{ человек.}$$

$$y_{1opt} = 20079094,219 - 147694,281 \cdot 20 - 594944,679 \cdot 12 - 14475,045 \cdot 2000 + 158157,632 \cdot 5^2 +$$

$$+ 1427,528 \cdot 60^2 + 0,559 \cdot 1300^2 + 3,582 \cdot 2000^2 + 0,235 \cdot 1500^2 = 5930284 \text{ рубля.}$$

$$y_{2opt} = -453,6011 - 40,5626 \cdot 20 - 294,8992 \cdot 12 - 215,5050 \cdot 5 + 8,1071 \cdot 60 + 2,1701 \cdot 1300 + 1,1663 \cdot$$

$$2000 + 0,3697 \cdot 1500 + 0,7567 \cdot$$

$$20^2 + 14,2960 \cdot 12^2 + 25,3811 \cdot 5^2 + 0,2291 \cdot 60^2 -$$

$$0,0007 \cdot 1300^2 - 0,0004 \cdot 2000^2 - 0,0001 \cdot 1500^2 = 1126 \text{ часов.}$$

Вычисленные оптимальные значения факторов и результативных показателей эффективности приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Оптимальные значения факторов и результативных показателей

Код	Наименование	Значение	Ед. изм-ия
x_1	Количество аналитиков	20	Человек
x_2	Количество разработчиков	12	Человек
x_3	Количество архитекторов	5	Человек
y_1	Стоимость работ за время выполнения договора	5930284	Рубли
y_2	Среднее время выполнения работ по договору	1126,129	Часы
y_3	Стандартное отклонение времени выполнения работ	695,6799	Часы
y_4	Вероятность выполнения работ в установленные сроки	0,95	-
y_5	Среднее время задержки по срокам по договору	133,5228	Часы
y_6	Коэффициент утилизации аналитиков	0,78	-
y_7	Коэффициент утилизации разработчиков	0,82	-
y_8	Коэффициент утилизации архитекторов	0,87	-

В данной статье представлена методика исследования и оптимизации процессов разработки ПО. В работе достигнуто следующее:

1. Осуществлен выбор 8 результативных показателей эффективности процессов, 3 оптимизируемых и 4 объективных факторов, влияющих на них;
2. Произведена математическая постановка оптимизационной задачи;
3. Были построены IDEF0 и IDEF3 диаграммы процесса разработки ПО в системе BPwin и их качественный анализ;
4. На основе разработанной логической модели в IDEF3 были созданы имитационные модели процессов в Arena и GPSS W;
5. Спланирована и проведена серия из 23 опытов с использованием разработанных имитационных моделей в Arena и GPSS W;
6. Построена математическая модель процесса разработки ПО, состоящая из 8 уравнений регрессии;
7. В результате оценки степени влияния факторов на стоимость выполнения работ (y_l), проведенной по удельным весам и коэффициентам эластичности факторов, было определено, что для уменьшения y_l необходимо постараться уменьшить сложность выполнения работ (x_4), увеличить количество аналитиков (x_1) и коли-

чество разработчиков (x_2), а также уменьшить количество архитекторов (x_3);

8. По результатам оптимизации получено 3 уравнения регрессии для вычисления оптимальных значений количества аналитиков (x_1), разработчиков (x_2) и архитекторов (x_3) в зависимости от объективных факторов, характеризующих конкретную СПО.

Новизной представленной работы является разработка имитационной модели процесса разработки ПО, а также построение математической модели процесса, представляющей собой совокупность из 8 уравнений регрессии, и, позволяющую провести оптимизацию, а также выработать обоснованные управленческие решения по оптимизации исследуемого процесса разработки ПО.

В заключение отметим, что предложенная методика пригодна для исследования любых бизнес-процессов.

Литература

1. Р.З. Бедретдинов, III Всероссийская научная конференция (Казань, Россия, 19-22 октября 2010 года). Казань: ТГГПУ, 2010. – С. 228-236.
2. И. Ф. Салихов, Вестник Казанского технологического университета. – 2006. - №6. – С.114-120.