

**ПРИМЕНЕНИЕ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРИ ОЦЕНКЕ  
ИНВЕСТИЦИОННЫХ ПРОЕКТОВ ЛИТЕЙНЫХ ПРОИЗВОДСТВ НА БАЗЕ  
ФОРМОВОЧНЫХ ЛИНИЙ****М. В. Зенькович, Ю. Г. Дреус (Москва)**

Инвестирование – один из наиболее важных аспектов деятельности любого динамично развивающегося промышленного предприятия, руководство которого отдает приоритет рентабельности с позиции долгосрочной, а не краткосрочной перспективы. Литейное производство Российской Федерации многие годы находится в длительном и тяжелом кризисе, присущем в основных системных вопросах всей машиностроительной отрасли страны как базовому сектору ее экономики. Инновационный путь развития машиностроения требует от руководителей всех уровней принятия срочных мер по модернизации и реконструкции литейных производств для выведения их на уровень современных международных требований. Наряду с этим необходимо приступить к разработке проектов создания новых специализированных литейных комплексов для удовлетворения потребностей заказчиков в высококачественной литейной продукции. В данных условиях формирование грамотной инвестиционной политики является одним из приоритетных направлений экономической и промышленной стратегии государства и машиностроительных предприятий.

Наиболее распространенным способом производства литых заготовок является технологический процесс изготовления отливок в разовых песчано-бентонитовых формах. Этим способом, по различным оценкам, изготавливается до 65–80% всех производимых в мире отливок. Формовочная линия – главное синхронизирующее звено сложной технологической системы производства отливок в разовых песчано-бентонитовых формах. От ее работы зависят производственные и экономические показатели литейного цеха. В настоящее время в литейных цехах устанавливаются автоматизированные либо автоматические формовочные линии (АФЛ).

В данном докладе рассматриваются методы и программные средства, позволяющие оценивать эффективность инвестиционных проектов по созданию производств отливок на базе АФЛ. Оценка выполняется с учетом специфики производимой продукции, рыночной конъюнктуры и предпочтений лиц, принимающих решения (ЛПР). Оцениваться может как индивидуальный проект, так и группа альтернативных проектов. В случае, если имеется группа альтернативных проектов, из нее по результатам оценки выбирается наилучший. По итогам проведенной оценки могут приниматься следующие решения: если значения характеристик наилучшего инвестиционного проекта удовлетворяют ЛПР, то принимается решение о его реализации; если нет, то анализируются проблемные места проекта, в него вносятся изменения и процедура оценки проекта проводится заново.

Создание нового или модернизация имеющегося производства отливок на базе АФЛ – достаточно дорогостоящая задача с длительным сроком окупаемости. В таких проектах будущая прибыль зависит от решений относительно долгосрочных инвестиций, принятых сегодня, однако окупаемость проектов может растянуться на достаточно долгий период. Необходимо сравнить величины требуемых инвестиций с прогнозируемыми доходами. Поскольку сравниваемые показатели относятся к различным моментам времени, ключевой проблемой здесь является проблема их сопоставления. На результат таких оценок большое влияние оказывает ряд объективных и субъективных условий: темп инфляции, размер инвестиций и генерируемых поступлений, горизонт прогнозирования, уровень квалификации аналитика и т.д. К критическим моментам в процессе оценки инвестиционного проекта относятся: а) прогнозирование объемов реали-

зации с учетом возможного спроса на продукцию; б) оценка притока денежных средств по годам.

В общем виде инвестиционный проект  $P$  можно представить в виде следующей модели [1]:  $P = \{IC_j, CF_k, n, r\}$ , где  $IC_j$  – инвестиция в  $j$ -м году,  $j = 1, 2, \dots, m$  ( $m \leq n$ , часто считается, что  $m = 1$ );  $CF_k$  – приток (отток) денежных средств в  $k$ -м году (денежный поток за  $k$ -й год),  $k = 1, 2, \dots, n$ ;  $n$  – продолжительность проекта;  $r$  – ставка дисконтирования.

Существует множество критериев оценки эффективности инвестиционных проектов. Для решения поставленной задачи используются следующие критерии [1]: чистый приведенный эффект (*Net Present Value, NPV*), индекс рентабельности (*Profitability index, PI*) и внутренняя норма доходности (прибыли) инвестиции (*Internal rate of return, IRR*).

Годовой приток денежных средств зависит от: дохода от реализации продукции за год, издержек за год и налога на прибыль, уплаченного за год. Одним из главных факторов, влияющих на величину дохода от реализации продукции за год, наряду с рыночной потребностью и ценой, является количество годных отливок, изготовленных на АФЛ за год. Прогнозирование количества годных отливок, изготовленных на АФЛ за год, – достаточно сложная задача. Под годной отливкой [2], [3] будем понимать отливку, значения технологических характеристик которой лежат в пределах допустимости. Технологические характеристики отливки: 1) время от изготовления полуформы до сборки формы; 2) время от сборки формы до заливки; 3) температура металла при заливке формы; 4) продолжительность охлаждения отливки в форме; 5) продолжительность охлаждения отливки после выбивки; 6) содержание бентонита в формовочной смеси, из которой была изготовлена форма; 7) содержание специальной технологической добавки в формовочной смеси, из которой была изготовлена форма. На значения этих параметров существенное влияние оказывают конструктивные особенности конкретной АФЛ, простои оборудования, входящего в состав АФЛ, квалификация персонала линии и др. Если хотя бы одна из характеристик отливки выходит за пределы, то будем считать данную отливку негодной.

Под альтернативным проектом [2], [3] будем понимать совокупность экономических (цены на отливки, сырье, энергоресурсы и др.), технологических (характеристики выпускаемых отливок), конструктивных (количество веток охлаждения, передаточных тележек и др.) и производственных (количество годных отливок определенного типа изготовленных на АФЛ за год; коэффициенты использования устройств, входящих в состав производственных участков линии и др.) параметров, описывающих проект АФЛ.

Имеется два наиболее распространенных подхода к расчету перечисленных выше критериев оценки эффективности инвестиционных проектов [1]: детерминированный и стохастический (на основе метода статистических испытаний). При использовании детерминированного подхода значения всех параметров денежных потоков устанавливаются ЛПП на основе экспертных оценок. При использовании стохастического подхода все параметры денежных потоков делятся на две группы: детерминированные, значения которых устанавливаются ЛПП, и стохастические. Параметры стохастической группы являются случайными величинами, для них ЛПП устанавливает интервал изменения и тип распределения вероятностей отражающие, по мнению ЛПП, определенные закономерности изменения значения данного параметра. Таким образом, в общем виде соотношение для расчета критерия  $NPV$  будет выглядеть следующим образом (аналогично можно представить соотношения для расчета других критериев):  $NPV = f(\chi_1, \dots, \chi_i, \dots, \chi_p, \xi_1, \dots, \xi_j, \dots, \xi_q)$ , где  $\chi_i$  – стохастические параметры (составляющие денежного потока, являющиеся случайными величинами);  $p$  – количество стохастических пара-

метров;  $\xi_j$  – детерминированные параметры (составляющие денежного потока, которые в результате анализа были определены как независимые или малозависимые от внешней среды и поэтому далее рассматриваются как детерминированные величины);  $q$  – количество детерминированных параметров. Далее с помощью специального программного обеспечения проводится статистическое моделирование, на основе которого получают оценки значений искомым критериев.

Существенным недостатком описанных выше подходов является большая зависимость результатов оценки от мнения ЛПР, так как значения детерминированных параметров, интервалы, типы и характеристики вероятностных распределений для стохастических параметров назначаются ЛПР на субъективной основе. Один из выходов в данной ситуации – использование для оценки значений производственных параметров рассматриваемого проекта АФЛ имитационной модели АФЛ. Значения экономических и технологических параметров определяются ЛПР на основе экспертных оценок. Значения конструктивных параметров линии устанавливаются в соответствии с проектной конструкторской документацией на рассматриваемый проект АФЛ. Таким образом, модель позволяет, изменяя технологические и конструктивные параметры рассматриваемого проекта АФЛ, получать оценки производственных параметров рассматриваемого проекта АФЛ.

Рассмотрим методологию построения имитационной модели АФЛ.

Для формализованного описания АФЛ была выбрана теория агрегативных систем [4]. Этот подход позволяет описывать поведение непрерывных и дискретных, детерминированных и стохастических систем, т. е. является обобщенным. В данном подходе состояние каждого агрегата описывается вектором, компоненты которого являются функциями времени. Зависимости от времени могут носить как непрерывный (например, температура отливки), так и дискретный (например, состояния позиций на ветках) характер.

Рассмотрим АФЛ как агрегативную систему, состоящую из четырех агрегативных подсистем, описывающих соответствующие им производственные участки линии [3]. В свою очередь, каждая из подсистем состоит из конечного числа агрегатов, описывающих устройства, входящие в состав описываемого подсистемой производственного участка (рис. 1).

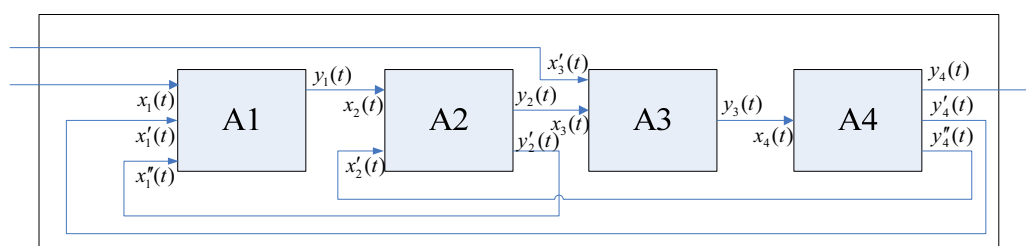
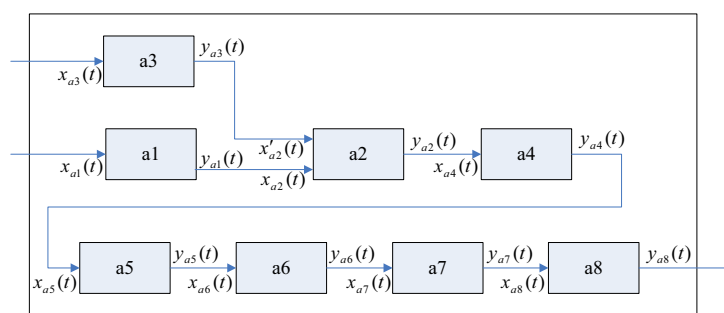


Рис. 1. Агрегативная система, описывающая АФЛ

Сигналы системы:  $x_1(t)$  – освежающие добавки в формовочную смесь;  $x_1'(t)$ ,  $y_4'(t)$  – отработанная формовочная смесь;  $x_1''(t)$ ,  $y_2'(t)$  – просыпавшаяся формовочная смесь;  $y_1(t)$ ,  $x_2(t)$  – формовочная смесь;  $x_2'(t)$ ,  $y_4''(t)$  – опока;  $y_2(t)$ ,  $x_3(t)$  – форма;  $x_3'(t)$  – металл из плавильного отделения;  $y_3(t)$ ,  $x_4(t)$  – залитая форма;  $y_4(t)$  – отливка. Данная агрегативная система состоит из следующих агрегативных подсистем: А1 – участок смешивания; А2 – участок формовки; А3 – участок заливки и охлаждения; А4 – участок выбивки и охлаждения после выбивки.



**Рис. 2. Агрегативная система, описывающая участок заливки и охлаждения**

В состав каждого участка может входить различное количество устройств одного наименования (заливочные ветки, ветки охлаждения и т. д.). Для каждой конкретной компоновки участка агрегативная система, описывающая этот участок, будет состоять из различного числа агрегатов. Рассмотрим в качестве примера этих агрегативных систем представление участка заливки и охлаждения (рис. 2). Сигналы системы:  $x'_{a2}(t)$ ,  $x_{a3}(t)$ ,  $y_{a2}(t)$  – металл;  $x_{a1}(t)$ ,  $y_{a1}(t)$ ,  $x_{a2}(t)$  – незалитая форма;  $y_{a2}(t)$ ,  $x_{a4}(t)$ ,  $y_{a4}(t)$ ,  $x_{a5}(t)$ ,  $y_{a5}(t)$ ,  $x_{a6}(t)$ ,  $y_{a6}(t)$ ,  $x_{a7}(t)$ ,  $y_{a7}(t)$ ,  $x_{a8}(t)$ ,  $y_{a8}(t)$  – залитая форма. Агрегативная система, представляющая участок заливки и охлаждения, состоит из следующих агрегатов: a1, a4, a6 и a8 – передаточные тележки для транспортировки форм; a2 – заливочная ветка; a3 – заливочная машина с установленным на ней заливочным ковшом; a5 и a7 – ветки охлаждения.

Каждый агрегат, входящий в любую агрегативную систему A1, A2, A3 и A4, может быть отнесен к одной из следующих групп [3]: 1) транспортные устройства: устройства для транспортировки полуформ, форм и отливок; 2) поточно-транспортные ветки: ветки для полуформ, заливочные, охлаждения и охлаждения отливок после выбивки; 3) устройства, изготавливающие объект: формовочная машина и устройство сборки форм; 4) смесители/бункеры для формовочной смеси: бункер усреднитель-накопитель, смеситель, бункер для формовочной смеси и бункер формовочной машины; 5) заливочная машина с установленным на ней заливочным ковшом; 6) устройства разборки объекта: устройство распаровки опок, устройство выдавливания кома из опки и выбивная решетка; 7) ленточные конвейеры. Алгоритмическое представление агрегатов, принадлежащих каждой из групп, строится на основе модели обобщенного агрегата, которая описывает общие для агрегатов этой группы свойства [3].

Рассмотрим основные принципы построения имитационных моделей АФЛ (более подробно эти вопросы отражены в работе [5]). Имитационная модель АФЛ строится на основе четырех автономных моделей производственных участков АФЛ. Модели всех участков АФЛ состоят из двух модулей: структурной модели и описания алгоритмов взаимодействия ее элементов. Общими модулями модели АФЛ являются монитор моделирования и интерфейс пользователя. При построении модели был использован дискретно-событийный метод. В качестве принципа изменения времени был использован механизм продвижения времени с постоянным шагом. При построении имитационной модели использовался объектно-ориентированный подход, а для реализации модели – язык программирования C++. Все элементы модели описаны в виде классов в понимании языка C++. Разработана библиотека этих классов, что позволяет легко внедрять новые элементы в модель. Все элементы библиотеки являются наследниками базового класса или наследниками наследников базового класса. Наследниками базового класса являются классы, описывающие группы устройств (выделенные выше), такие как транспортное устройство, поточно-транспортная ветка и т.д. Наследниками классов, описывающих группы устройств, являются классы, описывающие устройства, вхо-

дящие в состав АФЛ (устройство для транспортировки форм, заливочная ветка, ветка охлаждения и т.д.). Описание алгоритмов взаимодействия между элементами модели организовано на условно-событийном принципе. Такой подход к реализации управления позволяет легко модифицировать алгоритм функционирования системы и моделировать любые нештатные ситуации. Новые элементы внедряются в структурную часть модели, не затрагивая уже отработанного алгоритма функционирования.

При изучении рассматриваемых систем посредством имитационного моделирования нет возможности собрать данные по временам простоев устройств, входящих в состав АФЛ (так как линия находится на стадии проектирования). Поэтому для выбора распределений времен простоев устройств, входящих в состав АФЛ, воспользуемся следующим методом [6], [7]. Допустим, что случайная величина  $X$ , характеризующая время простоя устройства, является непрерывной на интервале  $[a, b]$  и ее функция плотности скошена вправо (опыт работы с реальными данными показывает [6], [8], что функции плотности таких случайных величин часто имеют подобную форму). Функции плотности многих теоретических непрерывных распределений вероятностей имеют такую форму (например, бета-, гамма-, Фишера и др.). Предположим, случайная величина  $X$  имеет бета-распределение. Известно, что функция плотности вероятности бета-распределения скошена вправо, если выполняется следующее соотношение для параметров этого распределения:  $\alpha_2 > \alpha_1 > 1$ . Среднее  $\mu$  и мода  $c$  такого распределения задаются формулами [8]:

$$\mu = a + \frac{\alpha_1 \cdot (b - a)}{\alpha_1 + \alpha_2} \quad \text{и} \quad c = a + \frac{(\alpha_1 - 1) \cdot (b - a)}{\alpha_1 + \alpha_2 - 2}.$$

При наличии экспертных оценок  $\mu$  и  $c$  можно решить эту систему уравнений и получить следующие оценки  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$ :

$$\alpha_1 = \frac{(\mu - b) \cdot (2c - a - b)}{(c - \mu) \cdot (b - a)} \quad \text{и} \quad \alpha_2 = a + \frac{\hat{\alpha}_1 \cdot (b - \mu)}{\mu - a}.$$

При задании  $\mu$  и  $c$  необходимо учитывать следующие условие: при  $\mu > c$  плотность скошена вправо; при  $\mu < c$ , она скошена влево. Аналогичные соотношения можно получить и для других распределений. Перед проведением эксперимента с имитационной моделью для каждого устройства, входящего в состав АФЛ, ЛПП выбирает распределение вероятностей, характеризующее его время простоя, а затем задает значения  $\mu$  и  $c$ .

Рассмотрим два альтернативных проекта АФЛ. На рис. 3 приведены гистограммы распределения времен охлаждения отливок после выбивки, полученные в результате экспериментов с имитационными моделями, описывающими эти два проекта.

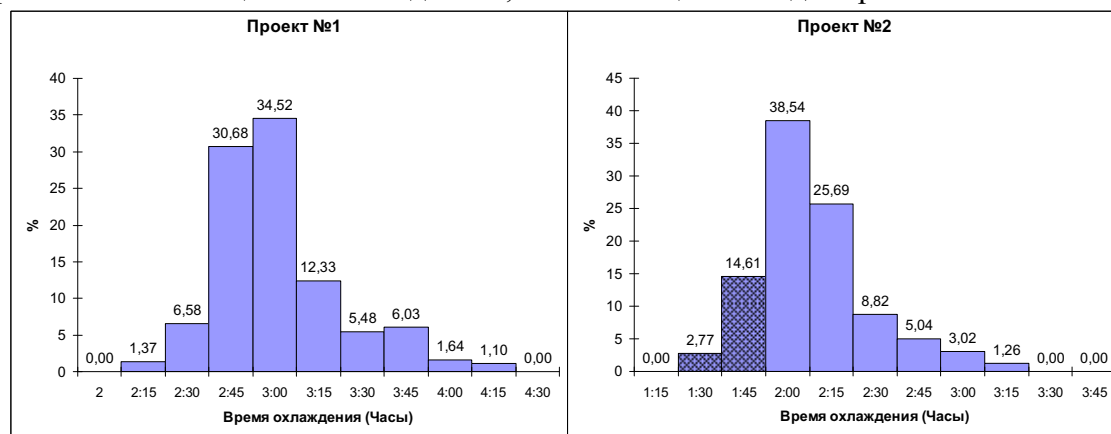


Рис. 3. Распределение времен охлаждения отливок после выбивки

Из приведенных гистограмм видно, что при реализации 1-го проекта АФЛ все отливки охлаждаются более 2 ч 15 мин. При реализации 2-го проекта из-за конструктивных особенностей линии продолжительность охлаждения 17,38% изготовленных отливок составит менее 2 ч. Рекомендуемое время охлаждения после выбивки для рассмотренной номенклатуры отливок – 2 ч, поэтому считаем отливки, охлаждавшиеся менее 3 ч, негодными. Аналогичные сопоставления проводятся по всем технологическим характеристикам отливок. В результате обработки данных, полученных в ходе моделирования, рассчитаны следующие значения критериев оценки эффективности проектов: для проекта №1 –  $NPV = 557,9$  млн. руб.,  $PI = 1,47$ , а для проекта №2 –  $NPV = 475,4$  млн. руб.,  $PI = 1,21$ . Значения критериев  $NPV$  и  $PI$  для проекта №1 больше значений соответствующих критериев для проекта №2. Следовательно, к реализации целесообразно рекомендовать проект №1.

### Выводы

Представленная методика оценки эффективности проектов литейных производств на базе АФЛ хорошо зарекомендовала себя в ходе выполнения проектных и инженеринговых работ по созданию новых и реконструкции существующих производств отливок. Она выгодно отличается от стандартных методик использованием детальной имитационной модели АФЛ, что позволяет более точно оценить технологические и конструктивные особенности рассматриваемых проектов. Разработанная методика успешно применяется ЗАО «Литаформ» для анализа альтернативных проектов АФЛ, выбора наилучших структур линий и при разработке алгоритмов управления ими.

### Литература

1. **Ковалев В. В.** Введение в финансовый менеджмент. М.: Финансы и статистика, 2004.
2. **Зенькович М. В., Дреус Ю. Г.** Оценка эффективности проектов формовочных линий с применением имитационного моделирования // Научная сессия НИЯУ МИФИ. Аннотации докладов. В 3 т. Т. 3. М.: НИЯУ МИФИ, 2010.
3. **Зенькович М. В., Дреус Ю. Г.** Методы и средства поддержки принятия решений при проектировании формовочных линий // Автоматизация в промышленности. 2010. № 11.
4. **Бусленко Н. П.** Моделирование сложных систем. М.: Наука, 1978. 400 с.
5. **Дреус Ю. Г., Зенькович М. В., Любченко А. С.** Имитационное моделирование автоматизированных формовочных линий для изготовления отливок // Автоматизация в промышленности. 2008. № 7.
6. **Лоу А., Кельтон В.** Имитационное моделирование. СПб.: Питер, 2004.
7. **Keefner D. L., Verdini W. A.** Better Estimation of PERT Activity Time Parameters // Management Science. 1993. Vol. 39. № 9. P. 1086–1091.
8. **Jerry Banks, John S. Carson II, Barry L. Nelson, David M. Nicol.** Discrete-Event System Simulation, Fourth Edition. Pearson: Prentice Hall. New Jersey, 2004.