

ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ УПРАВЛЯЮЩИХ СИСТЕМ¹

Б.Г. Волик

Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, г. Москва

Предложены критерии выбора предпочтительного варианта управляющей системы на основе анализа экономической эффективности конкурирующих вариантов системы.

ВВЕДЕНИЕ

Работоспособность — важнейшее качество управляющих систем. На разных этапах жизненного цикла систем их работоспособность определяют разные свойства. В этом смысле жизненный цикл систем складывается из двух этапов: начального, до ввода в эксплуатацию, и эксплуатации, на заданном интервале времени или до предельного состояния.

На начальном этапе работоспособность систем определяется такими их свойствами, от которых зависит способность систем выполнять предписанные функции в идеальных условиях эксплуатации. Эту способность систем будем называть *функциональной работоспособностью*. Функциональная работоспособность управляющей системы определяется ее свойствами, отражающими точность и динамику управления (например, устойчивость, достижимость, параметрическая грубость, астатизм). На этапе эксплуатации решается задача сохранения функциональной работоспособности на уровне, достаточном для удовлетворения требований применения системы по её назначению. Способность систем удовлетворительно решать эту задачу будем называть *эксплуатационной работоспособностью*. Она определяется надёжностью, живучестью, техногенной безопасностью и эффективностью системы [1]. Эффективность занимает особое место среди названных свойств. Для многих классов объектов, например, технологических процессов, эффективность выступает как сводное свойство нескольких свойств, определяющих и функциональную, и эксплуатационную работоспособности.

¹ Работа выполнена при поддержке РФФИ, проект № 05-08-33535.

1. ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ

Эффективность характеризует полезность применения объекта по назначению. В зависимости от назначения объекта определение понятия *эффективность* трансформируется. Приведём ряд определений, отражающих характер эксплуатации управляющих систем.

Эффективность — свойство системы обеспечивать реализацию на заданном интервале времени эксплуатации заданного объёма своих проектных возможностей. Например, для вычислительной системы АСУ это отношение правильно решенных задач к числу предъявленных для решения задач на заданном интервале времени эксплуатации. Это определение отражает требования, предъявляемые, в частности, ко многим системам военного назначения.

Эффективность — свойство системы обеспечивать на заданном интервале времени эксплуатации целевую отдачу не ниже заданного уровня. Например, для управляющей системы энергоблоком атомной электростанции это предельный объём недовыдачи в течение года генерируемой электроэнергии из-за нарушений работоспособности управляющей системы.

Эффективность — свойство системы обеспечивать превышение целевой отдачи над затратами с некоторого заданного момента времени эксплуатации. Например, для АСУ технологическими процессами это может быть обеспечение превышения дохода от применения принятого варианта системы (объёма автоматизации) над затратами на обеспечение работоспособности системы с некоторого заданного момента времени.

2. ПОКАЗАТЕЛИ ЭФФЕКТИВНОСТИ

Основная особенность управляющих систем заключается в том, что результаты их применения (целевая отдача) выявляются только через измене-



ние объёма и (или) качества выходной продукции (выполнения предписанных функций) управляемого объекта. Затраты, связанные с созданием и эксплуатацией управляющих систем, зависят от режима эксплуатации и управляющей и управляемой систем.

Учитывая эти особенности эксплуатации, сформулируем требования к показателям эффективности управляющих систем.

Прежде всего, должны учитываться затраты и потери на всех этапах жизненного цикла [2] управляющей системы, начиная с этапа составления технического задания и заканчивая этапом демонстража и утилизации аппаратуры.

Далее, должна учитываться зависимость стоимости целевой отдачи и затрат от времени свершения, т. е. дисконтирование. Оно учитывает влияние экономического оборота средств на оценку их истинной стоимости и, вместе с тем, упрощает количественный анализ эффективности, так как позволяет приводить к единому моменту времени свершаемые в разные моменты времени компоненты целевой отдачи и затрат. Дисконтирование производится по формуле:

$$B(t_0) = B(1 + E)^{t_0 - t}, \quad (1)$$

где B — отдача (затраты), совершенные в момент времени t ; $B(t_0)$ — отдача (затраты), приведенные к моменту времени t_0 ; E — норма дисконтирования (обычно в пределах 0,05—0,1).

Принимая за момент времени приведения целевой отдачи и затрат начало эксплуатации системы $t_0 = 0$, получаем удобную аппроксимацию формулы (1):

$$B(0) = Be^{-Et}.$$

Наконец, показатель должен отражать существо задачи, решаемой разработчиками управляющей системы.

Типичными можно считать следующие три постановки задачи.

Первая постановка задачи: необходимо оценить экономическую целесообразность замены исходной (базовой) системы некоторой технически реализуемой i -й системой.

Эту задачу будем называть задачей оценки сравнительной эффективности.

В соответствии с основополагающим принципом оценки эффективности «затраты—результаты» показателем эффективности здесь следует принять экономический эффект (прибыль) от замены базового варианта системы на i -й вариант. Итак, $\mathcal{E}_{6i}(t) = Q_{6i}(t) - Z_i(t)$, где Q_{6i} — целевая отдача на интервале времени $(0, t)$, приведенная к моменту $t = 0$, от замены базового варианта системы на i -й; Z_i — приведенные затраты и потери, связанные с переходом на i -й вариант системы.

Вторая постановка задачи: необходимо оценить допустимость вложения средств в замену системы (или модернизацию) при ограничении вложения средств уровнем нормативной эффективности, принятом на фирме-собственнике объекта.

Эта задача названа задачей оценки абсолютной экономической эффективности. Она решается путём сравнения коэффициента рентабельности E_{6i} вложений в i -й вариант с нормативным коэффициентом рентабельности E_n . Итак: $E_{6i}(t) = Q_{6i}(t)/Z_i(t)$.

Третья постановка задачи: необходимо выбрать лучший вариант системы из числа технически реализуемых, одновременно удовлетворяющий ограничению по рентабельности вложения средств. Для такой постановки задачи необходима оценка по показателям задач первых двух постановок.

Замечание. Для некоторых классов управляемых объектов (систем), например военного назначения, целевую отдачу оказывается возможным выразить только в натуральных единицах измерения через оценку приращения выходных эффектов объекта. Однако затраты на замену (модернизацию) управляющей системы, как правило, можно выразить в денежных единицах. В таких случаях оценивать варианты систем можно посредством показателей технической эффективности, определяемых как отношение целевой отдачи (в натуральных единицах) к общим затратам (в денежных единицах).

3. СХЕМА АНАЛИЗА ЭФФЕКТИВНОСТИ

Основная проблема анализа эффективности заключается в получении количественных оценок целевой отдачи Q_{6i} и суммарных затрат Z_i , приведенных к моменту ввода системы в эксплуатацию. Трудности получения оценок связаны с распределённостью во времени и различием физической природы факторов, влияющих на оцениваемые характеристики. Удобный инструмент анализа — модель жизненного цикла системы [2]. Она отражает полную совокупность положительных и отрицательных эффектов, сопровождающих все этапы создания и эксплуатации анализируемого объекта. Построение такой модели следует начинать с выявления источников целевой отдачи и видов затрат и потерь, зависящих от состояния управляющей системы. Для примера назовём типичные источники целевой отдачи управляющих систем промышленными объектами:

- увеличение объёма предотвращённого ущерба, возможного при возникновении аварийных ситуаций на управляемом объекте;
- увеличение объёма выпуска продукции;
- повышение качества и, соответственно, цены продукции;
- сокращение объёма брака;

- сокращение численности оперативного персонала;
- повышение техногенной безопасности [3];
- сокращение потребления энергетических и сырьевых ресурсов;
- сокращение длительности вынужденных простоев оборудования.

Основные виды затрат и потерь:

- капитальные затраты на проектирование, изготовление и наладку системы до момента ввода её в эксплуатацию;
- недовыдача продукции на интервалах времени восстановления работоспособности системы после отказов;
- потери продукции (брак), обусловленные случайными нештатными остановками производства при отказах управляющей системы;
- текущие эксплуатационные затраты, которые складываются из условно-постоянных (зарплаты персонала, платы за помещение, потребляемую энергию, каналы связи и др.) и условно-переменных (на ремонтные работы, запасные изделия и приборы и другие затраты, зависящие от режима функционирования системы).

Обратимся к количественным моделям оценки экономической эффективности управляющих систем.

Соотношения, привлекаемые для оценки целевой отдачи, определяются режимом выпуска выходной продукции (выходом) управляемым объектом.

Выход объекта $Q_i(t)$ дискретный (интервал времени производства продукции значительно меньше интервала ожидания).

Тогда

$$Q_i(t) = \sum_{j=1}^N q_i(t_j) K_{ri}(t_j) e^{-Et_j}, \quad (2)$$

где t — интервал времени $(0, t)$ оценки эффективности; N — число съёмов выходной продукции на интервале $(0, t)$; t_j — моменты съёма продукции; $K_{ri}(t_j)$ — значение коэффициента готовности управляющей системы в момент времени t_j ; $q_i(t_j)$ — объём (в денежных единицах измерения) выходной продукции в момент времени t_j ; e^{-Et_j} — коэффициент приведения стоимости продукции полученной в момент t_j к моменту $t = 0$.

Выход объекта непрерывный:

$$Q_i(t) = \int_0^t q_i(\tau) e^{-E\tau} d\tau - \omega_i q_{i0} t e^{-Et/2}, \quad (3)$$

где $q_i(\tau)$ — интенсивность прибыли (в денежных единицах в единицу времени) управляемого объекта с i -й управляющей системой; q_{i0} — среднее значение интенсивности прибыли на интервале $(0, t)$; ω_i — параметр потока отказов i -й управляющей

системы на стационарном этапе эксплуатации; t_b — среднее значение времени восстановления работоспособности управляющей системы после отказов; τ — текущее время.

Для непрерывных производств интенсивность прибыли определяется как

$$q_i(\tau) = (u_i(\tau) - c_i(\tau)) P_p(\tau),$$

где u и c — цена и себестоимость выходной продукции объекта, P_p — производительность объекта.

В формуле (3) второй член зависимости суть среднее значение объёма недовыдачи продукции управляемым объектом на интервалах восстановления работоспособности управляющей системы на интервале времени эксплуатации $(0, t)$.

Аналогично, как и по формулам (2) и (3) вычисляется выход объекта $Q_6(t)$ с исходным (базовым) вариантом управляющей системы.

Целевая отдача от замены базового варианта управляющей системы на i -й вариант составит величину: $Q_{6i}(t) = Q_i(t) - Q_6(t)$.

Приведем соотношения, необходимые для количественной оценки приведенных суммарных затрат на создание и эксплуатацию управляющей системы, а также потерь, обусловленных возможными её отказами.

Капитальные затраты на проектирование и создание i -й управляющей системы, приведенные к моменту времени $\tau = 0$ ввода системы в эксплуатацию:

$$K_i = \sum_{r=1}^R K_{ir} e^{-Et_r} + \int_{t_0}^0 k_i(\tau) e^{-E\tau} d\tau, \quad t_r, t_0 < 0,$$

где K_{ri} — разовые вложения (например, покупки оборудования) в создание системы, производимые в моменты времени t_r ; R — общее число разовых вложений; $k_i(\tau)$ — непрерывные затраты на этапе $(t_0, 0)$ проектирования и создания управляющей системы.

Эксплуатационные затраты i -й управляющей системы:

$$Z_{3i}(t) = \int_0^t z_{poi}(\tau) e^{-E\tau} d\tau + \int_0^t z_{pei}(\tau) e^{-E\tau} d\tau + \omega_i t n_i e^{-Et/2} \quad (4)$$

где z_{poi} — интенсивность условно-постоянных затрат, связанных с эксплуатацией i -й управляющей системы; z_{pei} — интенсивность усреднённых на интервале $(0, t)$ условно-переменных затрат; n_i — усреднённые потери (брак) продукции управляемого объекта, штраф за возможное нарушение экологических ограничений, затраты на восстановление работоспособности системы и объекта, связанные с одним событием отказа управляющей системы; $e^{-E\tau}$ — коэффициент приведения затрат к моменту времени $\tau = 0$.



В формулах (3) и (4) невыдача продукции и потери (брак) приведены с момента времени $t/2$ для упрощения расчётов.

Полные приведенные затраты и потери, связанные с i -м вариантом управляющей системы, составляют величину:

$$Z_i(t) = K_i + Z_{\Sigma i}(t).$$

4. КРИТЕРИИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ

Для первой постановки задачи — выбора предпочтительного варианта управляющей системы.

Критерий выбора: i -й вариант системы предпочтительней базового (исходного) варианта при условии $\mathcal{E}_{\delta i}(t) = Q_{\delta i}(t) - Z_i(t) > 0$, где t — заданная продолжительность эксплуатации, $\mathcal{E}_{\delta i}$ — экономический эффект перехода на i -й вариант системы.

Для объектов с изменяющимися во времени параметрами, например, параметром потока отказов, ценой продукции, затратами и др., в качестве показателя экономического эффекта следует применять показатель «время окупаемости $T_{ок}$ ». Для таких объектов критерий выбора $T_{ок} < t$, где $T_{ок} \subset \{\tau: \mathcal{E}_{\delta i}(\tau) = 0\}$.

Для второй постановки задачи.

Критерий принятия решения: намечаемый к внедрению i -й вариант системы экономически допустим при условии: $E_{\delta i}(T_n) = Q_{\delta i}(T_n)/Z_i(T_n) > 1$, $T_n = 1/E_n$ — нормативное время достижения рентабельной эксплуатации, где E_n — коэффициент нормативной рентабельности вложения средств в создание или модернизацию объектов, принятый в фирме-собственнике анализируемого объекта.

Для объектов с изменяющимися во времени параметрами следует применять временной критерий: $T_{pi} < T_n$, где $T_{pi} = \{\tau: E_{\delta i}(\tau) = 1\}$ — момент времени достижения рентабельной эксплуатации с i -й управляющей системой.

Для третьей постановки задачи.

Критерий принятия решения: намечаемый к реализации i -й вариант системы приносит экономическую выгоду и допустим, по ограничению фирмы на вложения средств в новые разработки, при условиях:

$$T_{pi} = T_{oki} < T_n \text{ и } T_{pi} = T_{oki} < t.$$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье приведены упрощенные зависимости целевой отдачи и эксплуатационных затрат. Упрощение заключается в том, что принято среднее значение параметра потока отказов. Для получения более точных оценок эффективности следует потери и затраты в формулах (3) и (4) распределить по видам отказов (простым, аварийным и

цепным [4]), так как значения могут существенно различаться.

Зависимости целевой отдачи (3), потерь и затрат (4) показывают пути влияния на уровень эффективности эксплуатации систем. Так, факторы, определяющие функциональную работоспособность систем, влияют на цену и себестоимость продукции, а также производительность управляемого объекта, а факторы, определяющие эксплуатационную работоспособность систем, влияют на потери и затраты на восстановление работоспособности, и управляющей системы, и управляемого объекта, иными словами, на размер предотвращённого ущерба. Для многих типов управляемых объектов, особенно технологических процессов, повышение надёжности и совершенствование подсистемы противоаварийной защиты управляющей системы служат основными рычагами повышения эффективности комплекса «объект—управляющая система».

Основная трудность анализа эффективности систем сложной структуры в получении оценок коэффициента оперативной готовности K_r и параметра потока отказов ω анализируемых вариантов системы. Описание методов анализа для систем сложной структуры можно найти, например, в работах [4, 5]. Для практических расчётов следует применять современные программные комплексы [6].

Для восстанавливаемых систем с неограниченным временем эксплуатации мы неизбежно сталкиваемся со старением аппаратуры систем и, соответственно, с ростом интенсивности их отказов. Таким образом, возникает необходимость исследования динамики эффективности [2]. Такое исследование позволяет дополнительно получить оценки оптимального по эффективности времени эксплуатации системы и времени её полной экономической деградации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Волик Б.Г. Эксплуатационная работоспособность систем // Третья международная конференция по проблемам управления (20—22 июня 2006 г.): Пленарные доклады и избранные труды. — М.: Институт проблем управления, 2006.
2. Волик Б.Г. Анализ влияния надёжности на экономическую эффективность АСУТП // Приборы и системы управления. — 1976. — № 4.
3. Волик Б.Г. Проблемы анализа техногенной безопасности // Автоматика и телемеханика. — 2002. — № 12.
4. Методы анализа структур управляющих систем / Б.Г. Волик и др. — М.: Энергоатомиздат, 1988.
5. Дж. Хенли Э., Куамато Х. Надёжность технических систем и оценка риска. — М.: Машиностроение, 1984.
6. Relex — программа анализа надёжности, безопасности, рисков / В.С. Викторова и др. // Надёжность. — 2003. — № 4.

☎ (495) 334-79-61, e-mail: lfvk@ipu.ru

Статья представлена к публикации членом редколлегии А.С. Манделем. □