

# О ВОЗМОЖНОСТИ ОПТИМИЗАЦИИ ИНВЕСТИЦИОННОЙ ПОЛИТИКИ ПРИ ЗАМЕНЕ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ

Попов Г.В., докт. техн. наук, Крюкова А.В., Комков Е.Ю.

*Рассмотрены вопросы оптимизации инвестиционной политики при замене основных производственных фондов электротехнического оборудования. Приведена развернутая характеристика двух видов износа оборудования: физического и морального. На основании математических методов системного анализа предложен подход, используя который проблему обновления основных производственных фондов можно сделать достаточно прозрачной. В качестве иллюстрации приведен пример выработки оптимальной стратегии для эксплуатации оборудования на шестилетнем периоде эксплуатации. Рассмотрен конкретный пример целесообразности продолжения эксплуатации автотрансформатора АОДЦТ 138000/220/110, проработавшего 35 лет.*

*Ключевые слова: электротехническое оборудование; износ оборудования; замена оборудования; основные производственные фонды; инвестиционная политика; оптимальные решения*

**Х**арактерной чертой многих промышленных, энергетических, транспортных предприятий современной России является достаточно изношенное состояние основных производственных фондов, которые, несмотря на это, продолжают эксплуатироваться.

Различают два вида износа.

**Ф**изический износ оборудования вызывается его активной работой и физико-химическими процессами, происходящими при этом; он имеет место также и в то время, когда оборудование не работает (под действием природных факторов, влаги, изменения температуры и т.п.). Физический износ вызывает ухудшение эксплуатационных качеств оборудования — снижение производительности, повышение расхода топлива, эксплуатационных материалов и т.д. При определенном уровне физического износа оборудования дальнейшая его эксплуатация становится экономически нецелесообразной. Появляется опасность внезапного (аварийного) выхода оборудования из рабочего состояния с вытекающими отсюда потерями от нарушений производственного режима и расходов на последующий ремонт.

Моральный износ заключается в снижении экономичности действующего физически годного оборудования как следствие внедрения новой техники, появления более совершенных и экономичных машин. Моральный износ наступает, как правило, раньше физического. Экономическая целесообразность замены морально устаревшего оборудования раньше срока физического его износа определяется специальными расчетами.

При плановой экономике существовал строгий подход к замене стареющих основных фондов. Так в энергетике, в соответствии с планом, ежегодной замене подвергался определенный процент оборудования, отработавшего свой нормативный ресурс, независимо от возможностей этого оборудования продолжать свое функционирование.

В переходный период для руководителей производства главной заботой стало сохранение основных производственных фондов от полного исчезновения, и, естественно, ни о какой замене оборудования речь не заходила. Это привело к тому, что во всех сферах производства, транспорта и энергетике доля устаревшего оборудования существенно возросла. В некоторых отраслях она достигает 50 и более процентов.

Сегодня основная проблема состоит в том, что собственники производственных фондов в условиях рыночной экономики стремятся «выжать из них все», зачастую не принимая во внимание тот факт, что такая позиция не оправдана с точки зрения национальных интересов, поскольку тормозит технический прогресс, да и с чисто экономических позиций она далеко не безупречна.

Ниже рассмотрен формальный подход, используя который проблему обновления основных производственных фондов можно попытаться сделать более прозрачной.

Сначала заметим, что в арсенале математических методов по системному анализу данная проблема известна как задача о замене оборудования [1].

Рассмотрим ее в общей постановке.

Пусть в течение периода, состоящего из  $n$  этапов, предприятие использует оборудование, которое вместе с установкой имеет стоимость  $z$ . Со временем оборудование изнашивается. При этом:

1) суммарная производительность оборудования  $s(t)$  снижается, так как увеличивается время, необходимое для его профилактики и ремонта;

2) возрастают затраты на обслуживание и ремонт  $r(t)$  данного оборудования.

Требуется определить моменты (их для длительного периода эксплуатации оборудования может быть несколько), когда следует заменять старое оборудование на новое, чтобы суммарная прибыль за весь период эксплуатации оборудования была максимальной.

Под прибылью имеется в виду чистый доход от продажи выпущенной продукции за вычетом стоимости обслуживания и ремонта или замены оборудования. Предполагается, что заменяемое оборудование имеет нулевую стоимость, а доход от его реализации по остаточной стоимости не учитывается. Это допущение не является принципиальным и введено для упрощения анализа.

Обозначим моменты начала каждого этапа через  $T_0, T_1, \dots, T_{n-1}$ ; момент завершения всего периода — через  $T_n$ . Тогда на каждом этапе  $T_0, \dots, T_{n-1}$  мы можем выбрать одно из двух возможных управлений:

$U^1$  — сохранить установленное оборудование и продолжать его эксплуатацию;

$U^2$  — приобрести новое оборудование и заменить старое.

Здесь следует подчеркнуть, что управленческие решения могут применяться только в моменты  $T_1, T_2, \dots, T_{n-1}$ .

Оптимальной инвестиционной политикой (стратегией управления)  $U^*$  называется совокупность таких решений  $U_1^*, U_2^*, \dots, U_{n-1}^*$ , в результате реализации которых рассматриваемое производство за  $n$  шагов переходит из начального  $S_0$  состояния в конечное  $S_n$  и при этом суммарная прибыль от эксплуатации оборудования достигает максимального значения.

Состояние процесса на  $k$ -ом этапе  $S_k$  характеризуется возрастом оборудования. Максимально возможный возраст оборудования в момент  $T_k$  равен  $k$ , а минимальный равен 1, если на предыдущем этапе произошла замена оборудования.

Прибыль  $f_k$ , получаемая на  $k$ -м этапе, зависит от состояния оборудования  $S_k$  и сделанного нами выбора (управления)  $U_k$ :

$$f_k = f_k(S_k, U_k) = \begin{cases} c(t) - r(t), & U_k = U^1 \\ c(0) - r(0) - z, & U_k = U^2, \end{cases} \quad (1)$$

где  $c(0)$  — стоимость продукции, выпускаемой на новом оборудовании;

$z$  — полная стоимость нового оборудования.

Очевидно, что суммарная прибыль  $F$ , которую требуется максимизировать для разработки оптимальной инвестиционной политики, равна сумме прибылей на каждом из этапов производства. Таким образом, суммарная прибыль будет определяться по формуле:

$$F(S_k, U_k) = \sum_{k=0}^{n-1} f_k. \quad (2)$$

В выражении (2) критерий является аддитивным. Для оптимизации подобных критериев возможно использование методов динамического программирования [2].

Таким образом, суть разработки оптимальной инвестиционной политики — это получение максимального значения суммарной прибыли  $F$ . Она зависит от результатов управления процессом эксплуатации оборудования на каждом шаге.

Здесь мы дополнительно предположили, что состояние  $S_{k+1}$  не зависит от состояний на предыдущих шагах, то есть от состояний  $S_k, \dots, S_{k-1}, \dots$ , соответствующих этапам, предшествующих  $k$ -ому.

Особенностью динамического программирования является рассмотрение процесса от конца к началу, то есть сначала анализируется  $n-1$  этап, ищется здесь оптимальное решение, затем то же делается на  $n-2$  этапе и т.д.

Таким образом, основой математического аппарата для нахождения оптимального решения является принцип оптимальности Беллмана [2]:

$$F_k^* = f_k(S_k, U_k^*) + F_{k+1}^* = \max_{U_k} \{ [f_k(S_k, U_k) + F_{k+1}(S_{k+1})] \}. \quad (3)$$

При вычислениях с каждым из этапов ассоциирована одна управляемая переменная. Набор рекуррентных вычислительных процедур, связывающих различные этапы, обеспечивает получение оптимального решения задачи в целом при достижении последнего этапа.

Управление  $U_k^*$  выбирают следующим образом:

1) для всех возможных управлений  $U_k$  определяют значения сумм

$$F_k(S_n) = f_k(S_{ki}, U_k) + F_{n+1}(S_{n+1}), \quad (4)$$

которые сравниваются между собой;

2) в качестве условно оптимального управления выбирается то управление, которое соответствует наибольшему значению  $F_k(S_k)$  (при решении задачи максимизации).

Если наибольшее значение  $F_k(S_k)$  получается при применении нескольких различных управлений, то все они являются условно оптимальными. В этом случае  $U_k^*$  не единственный.

При выборе управления на предпоследнем этапе (при  $k=n-1$ ) никаких дальнейших шагов по эксплуатации оборудования не планируется, так что естественно считать  $F_{n+1}(S_{n+1}) = F_n(S_n) = 0$ . Тогда в сумме (4) остается лишь первое слагаемое.

Таким образом, процесс продвигается от конечного этапа к начальному и на всех промежуточных шагах находятся значения:

– условно оптимальных управлений  $U_k^*$  для каждого из возможных состояний  $S_k$ ;

– оптимальное значение  $F_k^*(S_k)$ .

Вектор оптимального управления  $U^*$  всего процесса будет получен при объединении найденных в ходе вычислений  $F_k^*(S_k)$  условно оптимальных управлений  $U^*$ :

$$U^* = (U_0^*, U_1^*, \dots, U_{n-1}^*).$$

Для иллюстраций метода рассмотрим простой пример.

Пусть требуется выработать оптимальную стратегию для эксплуатации оборудования на 6-ти летнем периоде (табл. 1)

Таблица 1

Возраст оборудования — t, лет	0	1	2	3	4	5
Производительность оборудования — С, млн руб.	9	8	7	6	5	4
Затраты на ремонт — R, млн руб.	1	1	2	2	3	4

Стоимость нового комплекта оборудования z = 6 млн руб. Будем предполагать, что за пределами срока, представленного в таблице, эксплуатация оборудования нас не интересует.

Представим данную задачу в виде графа (рис. 1):

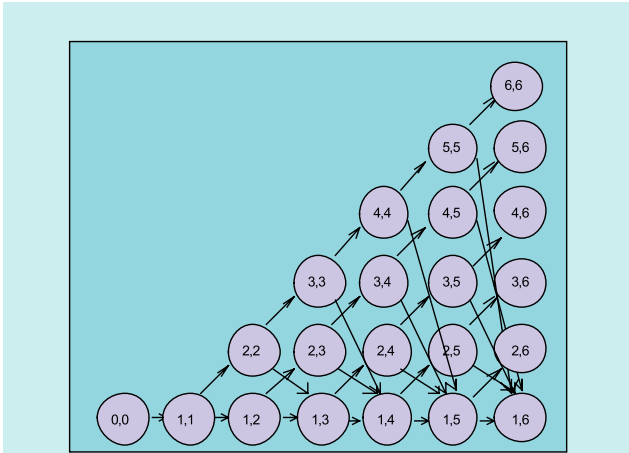


Рис. 1. Процесс поиска решения по замене оборудования

Первая цифра в вершине графа обозначает возраст оборудования; вторая цифра — номер этапа.

Дуги графа показывают возможные действия на каждом этапе.

Момент покупки оборудования ( $T_0$ ) соответствует вершине 0,0, для которой существует только одно управление —  $U^2$ . Для всех остальных вершин управлений по два, что и обуславливает возможность оптимизации процесса. Так, вершина 1,1 соответствует годичной эксплуатации оборудования и общей продолжительности производственного процесса также равной одному году. Из этой вершины горизонтальная стрела в вершину 1,2 соответствует решению о замене оборудования ( $U^2$ ), а стрела в вершину 2,2 означает продолжение эксплуатации (управление  $U^1$ ). Таким образом, все стрелы, направленные вверх, соответствуют  $U^1$ , а горизонтально или вниз —  $U^2$ .

На представленном графе требуется выбрать оптимальный маршрут, что будет соответствовать максимальной прибыли.

Приведем элементарные расчеты.

После пятого этапа эксплуатация оборудования не предусматривается, поэтому будем иметь:

– для вершины 1,5

$$F_5(1) = \max\{f_5(1, U^1), f_5(1, U^2)\} = \max\{8 - 1, 9 - 1 - 6\} = 7; \quad U_5^*(1) = U^1;$$

– для вершины 2,5

$$F_5(2) = \max\{f_5(2, U^1), f_5(2, U^2)\} = \max\{7 - 2, 9 - 1 - 6\} = 5; \quad U_5^*(2) = U^1;$$

– для вершины 3,5

$$F_5(3) = \max\{6 - 2, 9 - 1 - 6\} = 4; \quad U_5^*(3) = U^1;$$

– для вершины 4,5

$$F_5(4) = \max\{5 - 3, 9 - 1 - 6\} = 2; \quad U_5^*(4) = U^1 = U^2;$$

– для вершины 5,5

$$F_5(5) = \max\{5 - 4, 9 - 1 - 6\} = 2; \quad U_5^*(5) = U^2.$$

Из полученных результатов видно, что для последней вершины оптимальным управлением является  $U^2$ , а для остальных —  $U^1$ .

Переходим к анализу процесса эксплуатации оборудования на четвертом этапе. В соответствии с (3) для вершины 1,4 имеем:

$$F_4(1) = \max\{f_4(1, U^1) + F_5(2), f_4(1, U^2) + F_5(1)\} = \max\{8 - 1 + 5, 9 - 1 - 6 + 7\} = 12; \quad U_4^*(1) = U^1$$

— этот результат — производить эксплуатацию оборудования без замены — получаем для вершины 1,4 графа. Далее аналогично.

$$F_4(2) = \max\{f_4(2, U^1) + F_5(3), f_4(2, U^2) + F_5(1)\} = \max\{7 - 2 + 4, 9 - 1 - 6 + 7\} = 9; \quad U_4^*(2) = U^1 = U^2;$$

$$F_4(3) = \max\{6 - 2 + 2, 9 - 1 - 6 + 7\} = 9; \quad U_4^*(3) = U^2;$$

$$F_4(4) = \max\{5 - 3 + 2, 9 - 1 - 6 + 7\} = 9; \quad U_4^*(4) = U^2.$$

Для третьего этапа:

$$F_3(1) = \max\{8 - 1 + 9, 9 - 1 - 6 + 12\} = 16; \quad U_3^*(1) = U^1;$$

$$F_3(2) = \max\{7 - 2 + 9, 9 - 1 - 6 + 12\} = 14; \quad U_3^*(2) = U^1 = U^2;$$

$$F_3(3) = \max\{6 - 2 + 9, 9 - 1 - 6 + 12\} = 14; \quad U_3^*(3) = U^2.$$

Для второго этапа:

$$F_2(1) = \max\{8 - 1 + 14, 9 - 1 - 6 + 16\} = 21; \quad U_2^*(1) = U^1;$$

$$F_2(2) = \max\{7 - 2 + 14, 9 - 1 - 6 + 16\} = 19; \quad U_2^*(2) = U^1.$$

Для первого этапа:

$$F_1(1) = \max\{8 - 1 + 19, 9 - 1 - 6 + 21\} = 26; \quad U_1^*(1) = U^1.$$

Для нулевого этапа:

$$F_0(0) = 9 - 1 - 6 + 26 = 28; \quad U_0^*(0) = U^1.$$

Значение  $F_0(0) = 28$  — наибольшая прибыль, которую можно получить при эксплуатации оборудования в данном примере. Для того чтобы достигнуть такой прибыли, мы должны окончательно сформировать последовательность локально оптимальных управлений и промежуточных состояний, к которым ведут эти управления. Итак,  $U_0^*(0) = U^1$ , в результате процесс переходит в вершину 1,1. Для нее оптимальное управление —  $U^1$  и переход в вершину 2,2. Там оптимальным также будет  $U^1$  и соответственно переход в вершину 3,3. В этой вершине оптимальным будет управление  $U^2$  с переходом в вершину 1,4. Аналогично процесс развивается до предпоследнего этапа.

Следовательно, вектор оптимального управления  $U^*$  всем процессом следующий:  $U^* = (U^1, U^1, U^1, U^2, U^1, U^1)$ .

Оптимальное решение в данном примере изображается выделенным подграфом (рис. 2).

По результатам рассмотренного примера можно сделать следующий вывод. Оборудование нужно заменить один раз по истечении трех лет эксплуатации. Максимальная прибыль при этом составит 28 млн руб. Любой другой вариант дает меньший эффект.

Теперь рассмотрим ситуацию, близкую к реальной [3]. На предприятии имеется автотрансформатор АОДЦТ-138000/220/110, отработавший 35 лет. Таким образом, превышение нормативного срока службы составляет 10 лет. Рынок предлагает новый трансформатор той же мощности. При этом, капитализированные затраты ( $Z_n$ ) на приобретение нового трансформатора

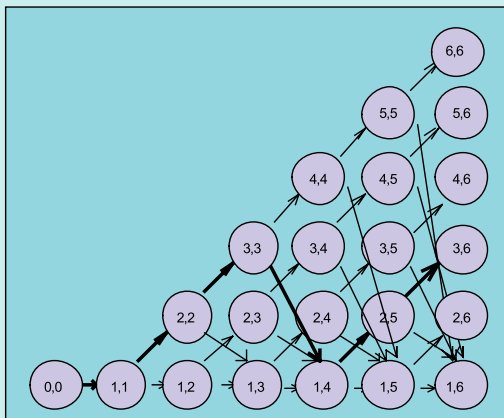


Рис. 2. Графическое изображение оптимального решения задачи

составляют 60,5 тыс. долл. В эти затраты включается стоимость перевозки и монтажа. Характеристики трансформаторов приведены в табл. 2.

Таблица 2

Характеристика	АОДЦТ-138000/220/110	
	старый	новый
Потери холостого хода, кВт	200	150
Потери короткого замыкания, кВт	512	400
Годовая стоимость потерь, 3 п. долл.	83200	64000

При расчете годовой стоимости потерь было принято: число часов включения на номинальную нагрузку и холостой ход 5000 и 8000 соответственно; стоимость 1 кВт·час потерь равна 0,02 доллара.

Теперь составляем таблицу аналогичную табл. 1, что для такого оборудования, как силовые трансформаторы, не является очевидной задачей. Будем для простоты предполагать, что трансформацию электроэнергии оба трансформатора осуществляют в одинаковых объемах, а затраты на ремонт у старого трансформатора такие же, что у нового. При такой постановке задачи, очевидно, что речь идет о минимизации ущерба  $W$  от эксплуатации оборудования.

По аналогии с (1) ущерб на  $k$ -ом этапе эксплуатации оборудования зависит от его характеристики и сделанного нами выбора  $U_k$ :

$$\omega_k = \omega_k(S_n, U_n) = \begin{cases} -3_n^c, & U_k = U^1 \\ -3_n^H - Z_n, & U_k = U^2. \end{cases} \quad (3)$$

Фрагмент графа для данной задачи представлен на рис. 3.

Оптимизация графа дает результат: замена должна быть произведена немедленно. Этот вывод очевиден. Чтобы его сделать, можно не выполнять никаких расчетов. При этом необходимо учитывать, что исходные данные для задачи в виде (3) крайне упрощено. Рассматриваемый подход позволяет проводить оптимизацию расчета с учетом всего спектра факторов:

– ежегодных ремонтно-эксплуатационных затрат для каждого вида оборудования;

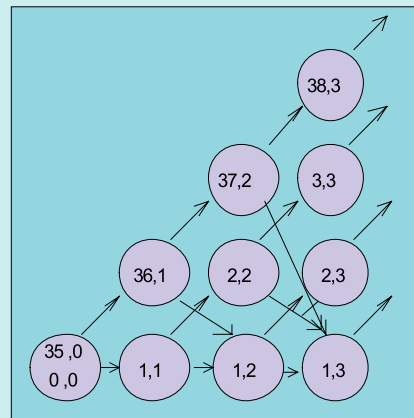


Рис. 3. Фрагмент графа для замены автотрансформатора АОДЦТ-138000/220/110

- возможных санкций из-за недопоставки электроэнергии, вызванной аварийным отказом оборудования;
- амортизационных отчислений и механизма дисконтирования.

В ближайшее время традиционное оборудование начнет постепенно вытесняться элегазовым, сверхпроводящим, кабельным [4,5]. На сколько экономически оправданы на определенный момент времени будут подобные замены, можно будет определить на основе рассматриваемого подхода, который программно реализован в системе паспортизации и оценки состояния электрооборудования в режиме off-line «Диагностика +» [5].

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Карасев А.И., Кремер Н.Ш., Савельева Т.И. Математические методы и модели в планировании. — М.: Экономика, 1987, — 416 с.
2. Вентцель Е.С. Элементы динамического программирования. — М.: Наука, 1964, — 320 с.
3. Никитин О.А. Научные и практические аспекты функционирования энергосистем и развития базы отечественного трансформаторостроения. — ЭЛЕКТРО. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность, 2002, № 4, с.5-6.
4. Электрические аппараты высокого напряжения с элегазовой изоляцией /Под ред. Ю.И. Вишневого. — СПб.: Энергоатомиздат, 2002, — 728 с.
5. Лутидзе Ш.И., Джафаров Э.А. Сверхпроводящие трансформаторы.
6. www.transform.ru

**Попов Геннадий Васильевич** — заведующий кафедрой «Безопасность жизнедеятельности». Ивановский государственный энергетический университет, г. Иваново (4932) 412542 [popov@bjd.ispu.ru](mailto:popov@bjd.ispu.ru)

**Крюкова Анастасия Владимировна** — студентка. Ивановский государственный энергетический университет, г. Иваново (4932) 412542

**Комков Евгений Юрьевич** — инженер по наладке и испытаниям. ОАО «Ивэлектроналадка», г. Иваново (4932) 230230 [vokmok@list.ru](mailto:vokmok@list.ru)