

Хелмут Виндберг, Светлана Гусева, Наталья Скобелева

## Экономические критерии принятия решений в конкурсах на поставку силовых трансформаторов

В статье дана методика оценки мероприятий по закупкам новых и замене физически или морально устаревших высоковольтных трансформаторов в энергосистемах. Поиск оптимального варианта закупок и поставок новых силовых трансформаторов проводится на основе выбора поставщика оборудования на конкурсной основе (через тендеры) среди ряда фирм-поставщиков или заводов изготовителей. Минимальные суммарные ежегодные дисконтированные затраты для пользователя силовых трансформаторов за весь срок службы являются основным экономическим критерием выбора победителя на поставку оборудования.

Ключевые слова: силовые трансформаторы, тендер, дисконтированные затраты

### I. ВВЕДЕНИЕ

Надежная и экономичная работа высоковольтного трансформаторного оборудования и постоянная модернизация трансформаторной базы являются необходимым условием для обеспечения качественного электроснабжения потребителей. Техническое состояние трансформаторной базы при медленных темпах обновления физически и морально устаревшего оборудования может стать причиной перебоев и ограничений электроснабжения и даже источником угрозы для энергетической безопасности государства.

В условиях рыночной экономики выбор мероприятий по модернизации и обновлению электрооборудования энергосистем должен производиться на основе технико-экономических расчетов для рационального использования денежных ресурсов. Такой подход необходим, так как одновременная замена большого числа трансформаторов, которые выработали нормативный ресурс, морально или физически устарели, требует крупных инвестиций, объем которых в энергетическую отрасль ограничен.

В статье даны экономические оценки мероприятий по закупкам новых и замене установленных высоковольтных трансформаторов для Латвийской энергосистемы (Латвэнерго). Выбор оптимального варианта закупок и поставок новых силовых трансформаторов рассматривается как задача выбора поставщика оборудования на конкурсной основе (через тендеры) среди ряда фирм-поставщиков или заводов-изготовителей. В качестве целевой функции для экономической оценки мероприятий используются суммарные ежегодные дисконтированные затраты у пользователя за срок службы (жизненный цикл) трансформатора. Необходимо отметить, что экономическая оценка предложений поставщиков оборудования производится только для тех вариантов, которые удовлетворяют всем техническим требованиям к оборудованию.

Целевая (оценочная) функция на базе суммарных ежегодных дисконтированных затрат у потребителя силовых трансформаторов за расчетный период для реализации определенного мероприятия  $n$  имеет следующий общий вид:

$$NPV_n = \sum_{t=0}^T C_{T,t} \cdot \frac{1}{(1+i_d)^t} = C_{n_0} + \sum_{t=1}^T C_{T,t} \cdot d_t, \quad (1)$$

где  $C_{T,t}$  - реальные ежегодные затраты (расходы и доходы) у пользователя силовых трансформаторов в  $t$ -ом году;  $C_{n_0}$  - затраты для мероприятия  $n$  в начальный момент расчетного периода;  $d_t$  -

коэффициент дисконтирования затрат;  $T$  - расчетный период (срок службы);  $t$  - год расчетного периода;  $i_d$  - дисконтная ставка.

Основным критерием выбора оптимального варианта закупок оборудования и выбора победителя на поставку оборудования среди ряда фирм-поставщиков или заводов-изготовителей являются минимальные суммарные ежегодные дисконтированные затраты  $NPV_n$  для пользователя силовых трансформаторов за расчетный период. При сравнении вариантов по критерию минимума суммарных ежегодных дисконтированных затрат одинаковые доходы от реализации продукции для трансформаторов одной номинальной мощности можно исключить из целевой функции (1). Затраты для пользователя в этом случае условно принимаются с положительным знаком. Таким образом,

$$\min NPV_n = \text{opt } NPV_n$$

### II. ОЦЕНКА МЕРОПРИЯТИЯ ПО ЗАКУПКЕ НОВЫХ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Целевая функция для оценки мероприятия ( $n=1$ ) по закупке и поставке трансформаторов для новых объектов с учетом затрат на их последующую эксплуатацию в течение нормативного срока службы имеет вид:

$$NPV_1 = C_{1_0} + \sum_{j=1}^m \left\{ \frac{i}{100} \cdot K_{1T\Sigma,tj} + \frac{1}{100} \cdot (P_{1a} + P_{1r}) \cdot K_{1T\Sigma,tj} \right\} + \left\{ + n_T \left[ \Delta R_{1nl} \cdot T_t + \beta_T^2 \cdot \Delta P_{1sc} \cdot \tau \right] \cdot \beta' + \left( \Delta R_{1nl} + \beta_T^2 \cdot \Delta P_{1sc} \right) \cdot \beta'' \right\} \cdot d_t, \quad (2)$$

где  $C_{1_0}$  - суммарные затраты на мероприятие по закупке и доставке новых трансформаторов на начальный момент расчетного периода, равные начальным суммарным капиталовложениям в мероприятие  $K_{1T\Sigma}$ , т.е.  $C_{1_0} = K_{1T\Sigma}$ ;  $j$  - порядковый номер очередной инвестиции, при этом  $j = 1, \dots, m$ ;  $K_{1T\Sigma,tj}$  - суммарные капитальные вложения в мероприятие в расчетный год  $t$  с учетом инвестиции  $j$ ;  $\Delta R_{1nl}, \Delta P_{1sc}$  - потери холостого хода и короткого замыкания трансформатора;  $T_t$  - время работы трансформатора в году;  $\tau$  - время максимальных потерь в году;  $\beta'$  - стоимость 1 кВт·ч потерь электроэнергии;  $\beta''$  - стоимость 1 кВт мощности в максимум энергосистемы;  $\beta_T$  - ожидаемый коэффициент загрузки трансформатора,  $n_T$  - число закупаемых одинаковых трансформаторов;  $T$  - расчетный период (срок службы трансформатора).

Суммарные капиталовложения  $K_{1T\Sigma}$  в начальный момент расчетного периода для данного мероприятия могут включать следующие составляющие: стоимость трансформаторов  $K_T$ , стоимость их транспортировки от завода - изготовителя до места установки  $K_{tr}$ , таможенные пошлины на продукцию государства-поставщика  $K_{cd}$ , стоимость запасных частей (для обеспечения эксплуатации в течение 5 лет после закупки)  $K_{sp}$ , возможную стоимость монтажа  $K_i$  и дополнительные затраты  $K_{add}$  (на проведение приёмных испытаний и др.):

$$K_{1T\Sigma} = K_T + K_{tr} + K_i + K_{sp} + K_{cd} + K_{add} \quad (3)$$

Минимальные суммарные ежегодные дисконтированные затраты для пользователя силовых трансформаторов за расчетный период ( $min NPV_1$ ) являются основным экономическим критерием выбора победителя на поставку оборудования среди ряда фирм-поставщиков или заводов-изготовителей

### III. ОЦЕНКА МЕРОПРИЯТИЯ ПО ЗАМЕНЕ УСТАНОВЛЕННОГО ТРАНСФОРМАТОРА

Необходимость замены установленных силовых трансформаторов на новые с улучшенными техническими характеристиками (меньшие нагрузочные и потери холостого хода, меньший вес стали и др.) может быть вызвана физическим или моральным износом оборудования, аварийным выходом из строя и невозможностью восстановления рабочего состояния, несоответствием номинальных мощностей нагрузкам потребителей и др.

Данное мероприятие ( $n=2$ ) рассматривается как комплексное мероприятие по выбору поставщика силовых трансформаторов на конкурсной основе (через тендеры) среди фирм - поставщиков или заводов - изготовителей, демонтажу эксплуатируемого трансформатора, монтажу нового и дальнейшей эксплуатации нового трансформатора в течение нормативного срока службы.

Задача поиска оптимального решения в данном случае принципиально не отличается от первой рассмотренной задачи. Как и в первом случае, целевая функция включает затраты на закупку и поставку нового трансформатора и, следовательно, стоит задача выбора поставщика оборудования. Однако, целевая функция должна учитывать дополнительные компоненты, такие как затраты на демонтаж и ликвидную стоимость  $K_L$  установленного трансформатора, монтаж нового трансформатора  $K_i$ , т.е.

$$K_{2T\Sigma} = (K_{1T\Sigma} - K_L) + K_d \quad (4)$$

Ликвидная стоимость трансформаторов при их замене определяется индивидуально для каждого трансформатора и обычно не превышает 10% от его первоначальной стоимости.

Суммарные ежегодные дисконтированные затраты  $NPV_2$  для второй рассматриваемой задачи имеют вид:

$$NPV_2 = C_{20} + \sum_{t=1}^T \left\{ \sum_{j=1}^m \left[ \frac{i}{100} \cdot K_{2T\Sigma,tj} + \frac{1}{100} \cdot (P_{2a} + P_{2r}) \cdot K_{2T\Sigma,tj} \right] + \left[ (\Delta P_{2nl} \cdot T + \beta_T^2 \cdot \Delta P_{2sc} \cdot \tau) \cdot \beta' + (\Delta P_{2nl} + \beta_T^2 \cdot \Delta P_{2sc}) \cdot \beta'' \right] \right\} d_i \quad (5)$$

где  $C_{20}$  - затраты для мероприятия по закупке и замене трансформатора в начальный момент расчетного периода, равные начальным суммарным капиталовложениям  $K_{2T\Sigma}$ .

При реализации замены трансформатора возможна последующая экономия эксплуатационных расходов из-за снижения (по сравнению с установленным трансформатором) отчислений на амортизацию, текущий ремонт и обслуживание, а также повышение надежности электроснабжения при новом и более современном оборудовании.

### IV. ОЦЕНОЧНЫЙ РАСЧЕТ ТЕНДЕРА

По предложенной методике выполнен расчёт суммарных ежегодных дисконтированных затрат у потребителя силового трансформатора для тендера на поставку 330 кВ силового трансформатора мощностью 215 МВ·А для подстанции Латвийской энергосистемы. Рассмотрены варианты поставок трансформаторов от двух разных фирм. Исползованные в расчёте технические и технико-экономические показатели трансформаторов и сетей приведены ниже. Заводом-изготовителем в варианте 2 предусмотрен капитальный ремонт трансформатора через 12 лет после начала эксплуатации. Затраты на капремонт оцениваются в 20% от стоимости трансформатора и приведены к начальному моменту расчетного периода. Графическое отображение результатов расчёта суммарных дисконтированных для рассматриваемого примера дано на рис. 1.

#### Технические и технико-экономические показатели для расчёта

Кредитная ставка	$i = 10 \%$
Дисконтная ставка	$i = 5 \%$
Время работы трансформатора	$T = 8760$ ч/год
Число часов использования максимума нагрузки	$T_{\max} = 3550$ ч/год
Время максимальных потерь	$\tau = 2000$ ч/год
Коэффициент загрузки трансформатора	$\beta_T = 0.8$
Потери холостого хода трансформатора:	
вариант 1	$\Delta P_X = 130$ кВт
вариант 2	$\Delta P_X = 160$ кВт
Потери короткого замыкания трансформатора:	
вариант 1	$\Delta P_K = 600$ кВт
вариант 2	$\Delta P_K = 584$ кВт
Отчисления на амортизацию:	
вариант 1	$p_a = 4 \%$
вариант 2	$p_a = 5.8 \%$
Отчисления на ремонт и обслуживание:	
вариант 1	$p_{p,o} = 1 \%$
вариант 2	$p_{p,o} = 2 \%$
Стоимость 1 кВт·ч потерь электроэнергии	$\beta = 0.02$ EUR/кВт·ч
Стоимость единицы мощности в максимум нагрузки энергосистемы	$\beta' = 2.2$ EUR/кВт

Анализ результатов расчёта показывает, что более выгодным является вариант 1, несмотря на более высокую цену трансформатора (1,3 млн. EUR в варианте 1 и 1,1 млн. EUR в варианте 2). При отличающихся в вариантах технических параметрах трансформаторов, ценах на оборудование, установку трансформаторов и услуги, критерий минимальных суммарных ежегодных дисконтированных затрат является объективным подходом к выбору фирмы-поставщика. Графическое отображение результатов расчёта суммарных дисконтированных для рассматриваемого примера дано на рис. 1. На конец расчётного периода (25 лет) минимальные суммарные дисконтированные затраты имеет вариант 1.

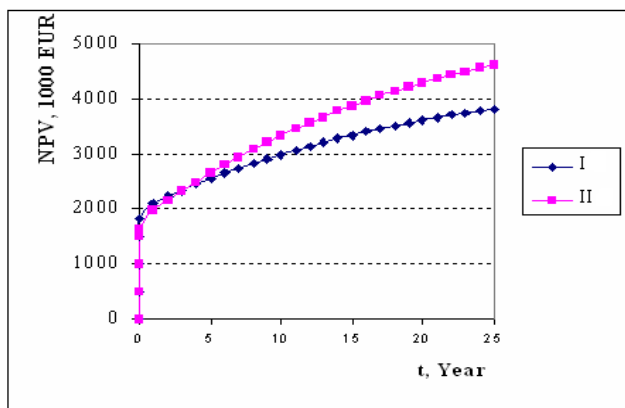


Рис. 1. Сравнение вариантов на поставку трансформатора

Следовательно, тендер на поставку силового трансформатора выигрывает фирма-поставщик, предложившая условия поставок варианта 1.

**V. УПРОЩЕННАЯ ОЦЕНОЧНАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ ВЫБОРА ПОСТАВЩИКА ОБОРУДОВАНИЯ**

Во время подготовки конкурса претендентов трудно точно оценить будущие затраты на эксплуатацию трансформатора в течение нормативного срока службы. В то же время при выборе победителя конкурса необходимо учесть не только цену предлагаемых трансформаторов и их технические характеристики, но и условия кредитования, гарантированный срок эксплуатации, будущие эксплуатационные отчисления, стоимость потерь электроэнергии за срок службы трансформатора и т.д. При некоторых допущениях возможно упрощение целевой функции вида (2) для более быстрой оценки предложений претендентов.

Примем ежегодные затраты, для каждого из вариантов, неизменными по годам расчётного периода. Если ежегодные затраты постоянны, а инвестиции вложены в начальный момент расчетного периода, то формулу (1) для мероприятия (n=1) можно представить в виде:

$$NPV_1 = C_{1T,t} \cdot \sum_{t=0}^T \frac{1}{(1+i_d)^t} = C_{1o} + C_{1T,t} \cdot \sum_{t=1}^T d_t \quad (6)$$

Учитывая выражения (6), (2) и введя коэффициенты  $A_{1k}, A_{1Ec}, A_{1nl}, A_{1sc}$  получим упрощенную целевую функцию:

$$NPV_1 = C_{1o} + A_{1k} \cdot K_{1T\Sigma} + A_{1Ec} \cdot K_{1T\Sigma} + A_{1nl} \cdot \Delta P_{1nl} + A_{1sc} \cdot \Delta P_{1sc} \quad (7)$$

где

$$A_{1k} = \frac{i}{100} \cdot \sum_{t=1}^T d_t;$$

$$A_{1Ec} = \frac{p_{1a} + p_{1r}}{100} \cdot \sum_{t=1}^T d_t; \quad (8)$$

$$A_{1nl} = n_T \cdot (\beta' \cdot T_t + \beta'') \cdot \sum_{t=1}^T d_t;$$

$$A_{1sc} = n_T \cdot [\beta_T^2 \cdot (\beta' \cdot \tau + \beta'')] \cdot \sum_{t=1}^T d_t.$$

Обычно коэффициенты  $A_{1k}, A_{1Ec}, A_{1nl}, A_{1sc}$  сохраняют постоянное значение для всех претендентов в рамках конкретного конкурса. Введение этих коэффициентов облегчает и ускоряет расчет значений  $NPV_1$  и окончательный выбор победителя конкурса. Дополнительно возможна и удобна оценка удельного значения  $NPV_{1sp}$  для каждого конкурсного варианта:

$$NPV_{n\ sp} = \frac{NPV_n}{S_{Tnom}} \quad (9)$$

где  $S_{Tnom}$  - номинальное значение мощности поставляемого трансформатора.

Используя целевую функцию (7), проведены оценочные расчёты для конкурса на поставку трансформатора напряжением 110 кВ и мощностью 63 МВА от разных претендентов-поставщиков оборудования. Результаты сведены в таблицу 1 и представлены на рисунке 2.

По результатам технико-экономических расчетов победителем конкурса является претендент, предложивший условия 1 варианта, имеющего минимальные удельные суммарные дисконтированные затраты.

ТАБЛИЦА 1  
Результаты сравнения вариантов

Показатели вариантов	1 вариант	2 вариант	3 вариант	4 вариант
Потери холостого хода, кВт	28	25	30	27
Потери короткого замыкания $\Delta P_{1sc}$ , кВт	306	225	165	227
Цена трансформатора, тыс. EUR	669,7	821,5	806,4	711,2
$NPV_1$ , тыс. EUR	953,0	1 085,2	1 062,5	970,5
$NPV_{1sp}$ , EUR/кВА	15,1	17,2	16,9	15,4

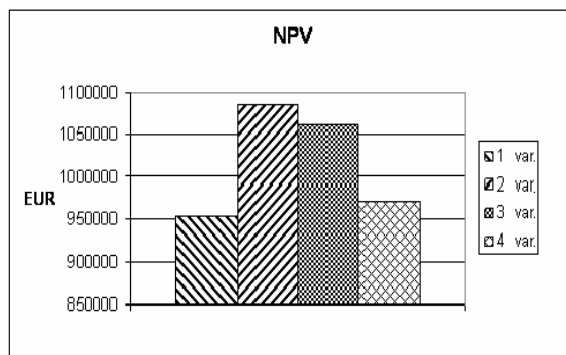


Рис 2. Сравнение вариантов от разных поставщиков

## VI. ВЫВОДЫ

1. В работе дано экономическое обоснование подхода к проведению (конкурсов) тендеров на поставку силовых трансформаторов в условиях рыночной экономики.
2. Разработана полная и упрощенная целевые функции для оценки затрат на поставку и замену трансформатора, основанные на суммарных ежегодных дисконтированных затратах пользователя трансформатора за весь расчётный период (жизненный цикл оборудования).
3. В качестве критерия выбора оптимального варианта принят минимум суммарных ежегодных дисконтированных затрат, что позволяет объективно учесть значительное число факторов влияния.
4. Выполнены оценочные расчёты для тендеров на поставку силовых трансформаторов для подстанций Латвийской энергосистемы по полной и упрощенной целевым функциям.

## БЛАГОДАРНОСТЬ

*Эта работа выполнена при содействии Европейского социального фонда в рамках проекта «Поддержка развития докторантуры РТУ» Национальной программы «Содействие осуществлению программ докторантуры и исследований после неё».*

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Богатов Б.М., Мейксон В.Г., Тихонов А.В., Шифрин Л.Н. Методика учета стоимости потерь и эксплуатационных расходов в силовых трансформаторах при расчете суммарных годовых затрат у потребителя. Сб. докл. VI Симпозиума "Электротехника 2010", т.2. - Москва: ВЭИ, ТРАВЭК, 2001, с.40-42.
- [2] Guseva S., Mahnitko A., Vindbergs H. Economic criteria of an estimation of measures to increase the reability of transformer equipment functionality //XII<sup>th</sup> Intern. Sc. Conf. " Present-day problems of power engineering", APE '05 , vol.III, Jurata, Hel Peninsula, Poland, June 8–10, 2005, pp.205 – 212.
- [3] Бренер Н., Гусева С., Кукля Н. Упрощенная технико-экономическая модель для оценки замены высоковольтных трансформаторов //Энергетика и электротехника, 4 сер., 17 вып. –Рига: РТУ, 2006, с. 79-84 (на лат.яз).
- [4] Х.О., Гусева С.А., Герхард Я.Х., Виндберг Махнитко А.Е. Техничко-экономические модели оценки мероприятий по продлению ресурса высоковольтных трансформаторов // Материалы международной научн. конф. "РРЕ-2006", Киев, КПИ, 5-9 июня, 2006, 25-29 стр.
- [5] Гусева С.А., Бренерс Н.З., Скобелева Н.Н. Техничко-экономическая модель оценки мероприятия по замене силовых высоковольтных трансформаторов /Сб. научн. трудов конф. „Методы и технические средства повышения эффективности применения электроэнергии”. - Ставрополь: Агрус, 2007, с. 209-214.
- [6] С.А.Гусева, А.Е.Махнитко, Н.З. Бренер, Н.Н. Скобелева. Экономический анализ технических мероприятий по повышению надежности функционирования трансформаторного оборудования. //Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева, т.66. „Актуальные проблемы электроэнергетики” Юбилейный том, посвященный 90-летию НГТУ им. Р.Е. Алексеева .-Н. Новгород, 2007, с.88-92.

## ADDRESSES OF AUTHORS

- Helmuts Vindbergs**, Ph.D.student, Mag.sc.ing., Riga Technical University, Power Engineering Institute, Kronvalda blv., 1, LV - 1010, Riga, Latvia, Phone: +371 6565649, fax: +371 7549749  
E-mail: [hvindberg@yahoo.com](mailto:hvindberg@yahoo.com)
- Svetlana Guseva**, Associate Professor, Dr.Sc.Ing., Riga Technical University, Power Engineering Institute, Kronvalda blv., 1, LV - 1010, Riga, Latvia Phone: +371 7089934, fax: +371 7089931  
E-mail: [Guseva@eef.rtu.lv](mailto:Guseva@eef.rtu.lv)
- Nataly Skobeleva**, engineer, Mg. Sc. Ing., Designed Institute "Olymp", Department of Control and Automatic Talinas str.10a, LV-1039, Riga, Latvia Phone: +371 7045631  
E-mail: [nataly\\_Skobeleva@olimps.lv](mailto:nataly_Skobeleva@olimps.lv)