

УДК 621.316.1

РАЗРАБОТКА И ПРОВЕРКА НА АДЕКВАТНОСТЬ ПОЛИНОМИАЛЬНОЙ МОДЕЛИ СНИЖЕНИЯ ПОТЕРЬ МОЩНОСТИ В СЕТЕВОЙ ОРГАНИЗАЦИИ ПРИ КОМПЕНСАЦИИ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ В СЕТИ ПОТРЕБИТЕЛЯ*

А.В. Кузнецов, Д.А. Ребровская

Ульяновский государственный технический университет
Россия, 432027, г. Ульяновск, ул. Северный Венец, 32

E-mail: kav2@ulstu.ru; diana-06-08@mail.ru

Аннотация. Показано, что модели оценки конкретного вклада отдельного потребителя в снижение потерь в сетевой организации при установке компенсирующих устройств (КУ) долго отсутствовали. Это не позволяло инвесторам получать достоверную информацию о доходной составляющей проекта установки КУ, проекты не поддерживались. КУ в сетях потребителей перестали устанавливаться в необходимом объеме, потоки реактивной мощности увеличились, потери электроэнергии возросли. Появление такой модели и ее совершенствование позволяет активизировать деятельность по установке КУ в сетях потребителей электроэнергии. Достижению цели способствует совершенствование модели в направлении ее упрощения и создание упрощенных инженерных методик. Упрощение модели возможно путем преобразования ее в полиномиальную при использовании математической теории планирования эксперимента. По результатам вычислительных экспериментов определены коэффициенты полиномиальной модели и произведена проверка на адекватность по критерию Фишера. Отмечено, что предложенная полиномиальная модель может быть рекомендована для потребителей электроэнергии, не имеющих возможности воспользоваться математической моделью для получения важной информации для технико-экономического обоснования решения об установке КУ необходимой мощности.

Ключевые слова: система электроснабжения, сетевая организация, математическая модель, полиномиальная модель, компенсация реактивной мощности, компенсирующее устройство, РФФИ.

Известно, что при установке компенсирующих устройств (КУ) снижаются потоки реактивной мощности в питающей электрической сети, снижаются потери активной мощности и электроэнергии. Необходимость компенсации реактивной мощности и координации действий сетевых организаций и потребителей в этом направлении очевидна [1, 2]. Стоимость снижения потерь представляет собой показатель доходной части инвестиционного проекта установки КУ или годовое сбережение [3]. Точное определение доходной части

** Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Ульяновской области в рамках научного проекта № 18-48-730025.*

Кузнецов Анатолий Викторович (д.т.н., с.н.с.), заведующий кафедрой «Электроснабжение».

Ребровская Диана Андреевна, старший преподаватель кафедры «Электроснабжение».

проекта необходимо для получения достоверных показателей эффективности инвестиционного проекта [4]. Наиболее важными из них являются период окупаемости PB , чистый дисконтированный доход NPV , индекс доходности PI , внутренняя норма рентабельности IRR , дисконтированный период окупаемости DPB [5].

После анализа и оценки показателей эффективности инвестором принимается решение о финансировании проекта. Либо наоборот, инвестор отказывается заказчику в финансировании проекта [6]. Неточность значений этих показателей может привести к ошибочным решениям, в результате которых окажется под сомнением прибыльность таких проектов. Надежды инвестора на получение запланированной прибыли должны быть оправданы. Годовое сбережение зависит от величины снижения потерь мощности $\delta\Delta P_{CD}$ и электроэнергии во всех ветвях схемы электроснабжения, питающих узел, в котором планируется размещение КУ. Значение $\delta\Delta P_{CD}$ для каждой ветви определяется по выражению

$$\delta\Delta P_{CD} = \frac{P^2 + Q^2}{U_n^2} \cdot R - \frac{P^2 + (Q - Q_{CD})^2}{U_n^2} \cdot R = \left(\frac{Q^2 - (Q - Q_{CD})^2}{U_n^2} \right) \cdot R, \quad (1)$$

где P и Q – активная и реактивная мощность ветви;

R – активное сопротивление ветви;

Q_{CD} – мощность КУ;

U_n – номинальное напряжение.

Для определения величины снижения потерь $\delta\Delta P_{CD}$ во всех ветвях схемы необходимо просуммировать значения $\delta\Delta P_{CD}$ в отдельных ветвях. Затем можно определить годовую экономию электроэнергии и годовое сбережение в денежном эквиваленте. Расчеты $\delta\Delta P_{CD}$ достаточно трудоемки, требуют большего массива исходных данных по конфигурации сети. В условиях ведомственной принадлежности электрических сетей такие данные доступны для каждой сетевой организации только в пределах ее сферы деятельности [7]. Кроме того, расчеты, связанные с использованием данных о схемах и нагрузках в смежной сетевой организации, сопряжены с трудностями организационно-правового характера [8]. Это затрудняет их получение в полном объеме. Следовательно, потребители не имеют возможности произвести расчеты, которые дают возможность оценить их возможный вклад в снижение потерь электроэнергии в смежной сетевой организации в результате установки КУ и доходность инвестиционного проекта.

В таких случаях прибегают к моделированию сетей, находящихся вне сферы деятельности организации, производящей расчет. Модели строятся и работают в условиях ограниченной информации, которую легче получить от смежной сетевой организации. К сожалению, модели оценки конкретного вклада отдельного потребителя в снижение потерь в сетевой организации, учитывающие индивидуальный подход к каждому потребителю, долго отсутствовали. Отсутствие таких моделей не позволяло получать достоверную информацию о доходной составляющей проекта установки КУ. Инвесторы с недоверием относились к тем методикам, которые давали усредненные значения, не обеспечивающие точности и определенности возврата затраченных на КУ средств. КУ в сетях потребителей

перестали устанавливаться в необходимом объеме. Зачастую имеющиеся КУ отключались от сети или демонтировались. В результате потоки реактивной мощности увеличились и увеличиваются, потери электроэнергии возросли и возрастают.

Появление такой модели [9] и ее совершенствование [10, 11] позволило инвесторам получать достоверную информацию о доходной части проекта для принятия решения, дало возможность уточнить методику расчета экономического эффекта установки КУ. На следующем этапе необходимо проинформировать о ее существовании широкий круг научной общественности, потребителей электроэнергии и инвесторов. Целью этого мероприятия является активизация деятельности по установке КУ в сетях потребителей электроэнергии для снижения потерь электроэнергии в электроэнергетической системе. Достижению цели способствует совершенствование модели в направлении ее упрощения и создание упрощенных инженерных методик.

Математическая модель [9] представляет собой схему замещения сетевой организации в виде трех сопротивлений, соединенных по схеме «звезда». Одно из сопротивлений является сопротивлением ветви 1, питающей исследуемого потребителя электроэнергии мощностью P_1 , второе сопротивление – это эквивалентное сопротивление ветви 2, питающей эквивалентного потребителя, мощностью P_2 , равной сумме мощностей всех потребителей сетевой организации, за исключением мощности первого. Третье сопротивление представляет собой эквивалентное сопротивление питающей ветви 3 и соединено с источником питания.

Модель предназначена для определения изменения потерь мощности $\delta\Delta P_{CD}^*$ в сети при установке КУ мощностью Q_{CD} в системе электроснабжения потребителя с нагрузкой P_1 , $tg\varphi_1$. Выражение для определения изменения снижения потерь мощности $\delta\Delta P_{CD}^*$ в соответствии с [1] имеет вид

$$\delta\Delta P_{CD}^* = 1 - \left(\frac{(1 + tg^2\varphi_{1,nov})}{(1 + tg^2\varphi_1)} \cdot \frac{\Delta P_1}{\sum_1^3 \Delta P_i} + \frac{\Delta P_2}{\sum_1^3 \Delta P_i} + \frac{(1 + tg^2\varphi_{3,nov})}{(1 + tg^2\varphi_3)} \cdot \frac{\Delta P_3}{\sum_1^3 \Delta P_i} \right), \quad (2)$$

где ΔP_1 , ΔP_2 , ΔP_3 – потери в ветвях схемы замещения до КРМ;

$tg\varphi_1$, $tg\varphi_3$ – коэффициент мощности в ветвях схемы до КРМ;

$tg\varphi_{1,nov}$, $tg\varphi_{3,nov}$ – коэффициент мощности после КРМ.

Если принять, что

$$P_1^* = \frac{P_1}{P_1 + P_2}, \quad Q_{CD}^* = \frac{Q_{CD}}{Q_1}, \quad (3)$$

то в выражении (3)

$$tg\varphi_{1,nov} = (1 - Q_{CD}^*) \cdot tg\varphi_1, \quad (4)$$

$$tg\varphi_3 = P_1^* \cdot tg\varphi_1 + (1 - P_1^*) \cdot tg\varphi_2, \quad (5)$$

$$tg\varphi_{3,nov} = P_1^* (1 - Q_{CD}^*) \cdot tg\varphi_1 + (1 - P_1^*) \cdot tg\varphi_2. \quad (6)$$

Выражения (3–6) представляют собой математическую модель снижения потерь мощности $\delta\Delta P_{CD}^*$.

В [9] модель содержит семь независимых переменных:

$$P_1^*, \frac{\Delta P_1}{P_1}, \frac{\Delta P_2}{P_2}, \frac{\Delta P_3}{P_1 + P_2}, tg\varphi_1, tg\varphi_2, Q_{CD}^*. \quad (7)$$

Значения переменных для расчета $\delta\Delta P_{CD}^*$ могут быть определены из документооборота потребителя и из документооборота сетевой организации. Значения переменных в форме (7) не представляет собой коммерческую тайну и могут быть без трудностей представлены по запросам заинтересованных организаций.

Использование известной математической модели требует достаточно высокой квалификации. Далеко не все потребители имеют достаточно квалифицированный персонал энергетических служб. В ряде случаев оптимизация производства приводит к тому, что собственной энергетической службы потребители не имеют. Собственники заключают договоры на обслуживание энергетического оборудования со специализированными фирмами. Потребитель не всегда имеет возможности воспользоваться математической моделью.

Для таких потребителей нужен простой и доступный инструмент, не требующий высокой квалификации, затрат времени на освоение и, наконец, материальных ресурсов на обучение и покупку программы. Таким инструментом может быть линейная полиномиальная модель, созданная на основе математической модели. Преобразование математической модели в полиномиальную возможно путем применения математической теории планирования эксперимента [12]. Для этого на математической модели проводится серия вычислительных экспериментов при определенном сочетании верхних и нижних пределов варьирования факторов. По результатам вычислительных экспериментов вычисляются коэффициенты полиномиальной модели и производится ее проверка на адекватность математической модели.

Анализ математической модели позволил сократить число входящих в ее состав переменных с семи до четырех, изменить набор переменных и ввести ограничения на интервалы варьирования факторов, определить константы. В результате анализа математическая модель преобразована к виду, в котором переменными модели являются:

$$P_1^*, \frac{\Delta P_1}{P_1}, \frac{\sum_{i=1}^3 \Delta P_i}{(P_1 + P_2)}, tg\varphi_{1,NAT}. \quad (8)$$

Константами модели приняты следующие величины:

$$tg\varphi_2 = tg\varphi_{2,pred} = 0,4;$$

$$tg\varphi_{1,nov} = tg\varphi_{1,pred} = (0,35; 0,4);$$

$$b = 0,03; 0,04, 0,05.$$

$$\text{В (8) } \frac{\sum_{i=1}^3 \Delta P_i}{(P_1 + P_2)} = \frac{\Delta P_1 + \Delta P_2 + \Delta P_3}{(P_1 + P_2)} - \text{потери мощности во всей сети относи-}$$

тельно передаваемой по ним мощности;

$tg \varphi_{1,NAT}$ – натуральный коэффициент мощности первого потребителя.

Переменная $tg \varphi_{1,nov} = tg \varphi_{1,pred}$, значение которой принято константой, представляет собой значение коэффициента мощности, к которому необходимо стремиться потребителю при установке КУ. В случае, если потребитель получает питание при напряжении ниже 1 кВ, ее значение должно быть принято константой, равной 0,35. При напряжении 1–35 кВ это значение становится равным 0,4 [13];

$$b = \frac{\Delta P_1}{(P_1 + P_2)} + \frac{\Delta P_2}{(P_1 + P_2)} - \text{сумма потерь мощности в первой и второй ветви.}$$

В результате анализа области определения факторов получаем полный набор переменных с диапазонами изменения, при которых в полиномиальной модели будут исключены случаи использования некорректных значений параметров, выходящих за пределы реально существующих значений. Набор переменных с диапазонами их изменения будет следующим:

$$0,05 \leq P^* \leq 0,6; 0 \leq \frac{\Delta P_1}{P_1} \leq 0,05; b \leq \frac{\sum_{i=1}^3 \Delta P_i}{(P_1 + P_2)} \leq 0,06; 0,6 \leq tg \varphi_{1,NAT} \leq 1 \quad (9)$$

при $b = 0,03, b = 0,04, b = 0,05$.

Обозначенные переменные с их пределами изменения будут являться аргументами, или воздействующими факторами полиномиальной модели. Для каждого сочетания значений константы b и константы $tg \varphi_{1,nov} = tg \varphi_{1,pred}$ проводился полнофакторный вычислительный эксперимент в соответствии с математической моделью и набором переменных (8), составлялось уравнение регрессии:

$$\delta \Delta P_{CD}^* = a_0 + \sum_{i=1}^n a_i \cdot x_i + \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n a_{ij} \cdot x_i \cdot x_j + \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n \sum_{l=j+1}^n a_{ijl} \cdot x_i \cdot x_j \cdot x_l + \dots (10)$$

В этом уравнении:

a_0, a_i – свободный член и коэффициенты уравнения регрессии в именованных единицах a_0, a_1, a_2, a_3, a_4 ;

a_{ij} – коэффициенты парного взаимодействия $a_{12}, a_{13}, a_{14}, a_{23}, a_{24}, a_{34}$;

a_{ijl} – коэффициенты тройного взаимодействия $a_{123}, a_{124}, a_{134}, a_{234}$;

n – число коэффициентов уравнения регрессии $n = 4$;

x_i, x_j, x_l – значения факторов в кодированных единицах $i = 1, 2, 3, 4$;
 $i + 1 \leq j \leq 4, j + 1 \leq l \leq 4$.

Свободный член и коэффициенты регрессии определялись следующим образом:

$$a_0 = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \delta \Delta P_{CD,k}^* \cdot x_{0,k} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \delta \Delta P_{CD,k}, \quad k = 1, 2, 3 \dots 16, \quad x_{0,k} = 1; \quad (11)$$

$$a_i = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \delta \Delta P_{CD,k}^* \cdot x_{i,k}, \quad i = 1, 2, 3, 4, \quad k = 1, 2, 3 \dots 16; \quad (12)$$

$$a_{ij} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \delta \Delta P_{CD,k}^* \cdot x_{i,k} \cdot x_{j,k}, \quad i = 1, 2, 3, 4, \quad i+1 \leq j \leq 4; \quad (13)$$

$$a_{ijl} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \delta \Delta P_{CD,k}^* \cdot x_{i,k} \cdot x_{j,k} \cdot x_{l,k}, \quad i = 1, 2, 3, 4, \quad i+1 \leq j \leq 4, \quad j+1 \leq l \leq 4, \quad (14)$$

где N – число строк матрицы плана ($N = 16$);

$\delta \Delta P_{CD,k}^*$ – значение функции отклика в k -той строке плана в именованных единицах;

$x_{i,k}, x_{j,k}, x_{l,k}$ – значение фактора в k -той строке плана в кодированных единицах.

На основе результатов вычислительного эксперимента получены шесть полиномиальных уравнений регрессии при значениях констант $b = 0,03, b = 0,04, b = 0,05$ и $tg \varphi_{1,nov} = tg \varphi_{1,pred} = 0,35; 0,4$.

Коэффициенты уравнений регрессии, полученные при вычислительных экспериментах, представлены в табл. 1. Результаты вычислительного эксперимента (опытные значения), а также результаты вычислений по полученным уравнениям регрессии (расчетные значения) при $b = 0,04$ представлены в табл. 2. В этой таблице представлена разность между значениями, полученными в результате вычислительного эксперимента и в результате использования уравнения регрессии. Эта разность Δ_k характеризует степень расхождения результатов вычислительного эксперимента (опыта) и расчета по уравнению регрессии. Значения Δ_k используются при вычислении дисперсии адекватности модели в целом. В случае адекватности полиномиальной модели Δ_k стремится к нулевому значению. В таком случае полиномиальную модель в виде уравнения регрессии можно использовать вместо программной модели. В противном случае это невозможно. При увеличении Δ_k степень неадекватности возрастает. Следует отметить, что вывод об адекватности, сделанный по значениям Δ_k , вычисленным для каждой строки матрицы, не является корректным. Значения Δ_k , рассчитанные при другом сочетании значений факторов, могут превышать эти значения и говорить о неадекватности. Для окончательного вывода об адекватности необходима оценка статистической значимости коэффициентов модели по критерию Стьюдента и проверка на адекватность по критерию Фишера.

Статистическая оценка значимости коэффициентов модели по критерию Стьюдента для каждого из шести выбранных уравнений регрессии проводилась по установленным правилам. Интерес в этой процедуре представляет определение дисперсии эксперимента. Известно, что дисперсия σ_{ex}^2 определяется разбросом параметров объекта в заданном поле допусков. Для определения σ_{ex}^2 стави-

лись так называемые параллельные опыты для произвольно выбранной строки матрицы плана (табл. 3). В таких случаях основным уровнем значений факторов считается уровень, заданный для каждого фактора в третьей строке матрицы планирования. Нижний и верхний уровни определяются с учетом возможного разброса значений каждого параметра. В каждом параллельном опыте факторам задавалось значение с учетом положительного и отрицательного отклонения. Разброс задавался с учетом возможного поля допусков и отклонений всех независимых факторов. Для всех факторов возможное отклонение принималось равным 3 % (см. табл. 3).

Таблица 1

Значения коэффициентов модели

Коеф. модели	Значения коэффициентов модели					
	при $b=0,03$		при $b=0,04$		при $b=0,05$	
	$tg \varphi_{1,nov} = 0,35$	$tg \varphi_{1,nov} = 0,4$	$tg \varphi_{1,nov} = 0,35$	$tg \varphi_{1,nov} = 0,4$	$tg \varphi_{1,nov} = 0,35$	$tg \varphi_{1,nov} = 0,4$
a_0	8,828	8,131	6,924	6,381	5,435	5,014
a_1	7,478	6,896	5,864	5,410	4,601	4,248
a_2	6,23	5,759	5,191	4,800	4,568	4,223
a_3	0,522	0,452	0,694	0,622	0,459	0,407
a_4	3,859	3,971	3,020	3,110	2,359	2,433
a_{12}	5,271	4,873	4,393	4,061	3,866	3,574
a_{13}	0,450	0,398	0,593	0,536	0,384	0,349
a_{14}	3,271	3,369	2,556	2,6370	1,998	2,061
a_{23}	-2,077	-1,920	-1,038	-0,960	-0,415	-0,384
a_{24}	2,682	2,772	2,235	2,310	1,967	2,033
a_{34}	0,289	0,275	0,338	0,338	0,214	0,215
a_{123}	-1,757	-1,624	-0,879	-0,812	-0,351	-0,325
a_{124}	2,270	2,346	1,891	1,955	1,664	1,720
a_{134}	0,245	0,241	0,289	0,291	0,182	0,185
a_{234}	-0,894	-0,924	-0,447	-0,462	-0,179	-0,185
a_{1234}	-0,757	-0,782	-0,378	-0,391	-0,151	-0,156

Результаты вычислительного эксперимента при $b=0,04$

Номер опыта	$\delta\Delta P_{CD}^* \cdot 100\%; b = 0,04$					
	$tg \varphi_{1,nov} = 0,35$			$tg \varphi_{1,nov} = 0,4$		
	Опытное значение	Расчетное значение	Расхождение	Опытное значение	Расчетное значение	Расхождение
	$\delta\Delta P_{CD,Q}^*$	$\delta\Delta P_{CD,P}^*$	Δ_k	$\delta\Delta P_{CD,Q}^*$	$\delta\Delta P_{CD,P}^*$	Δ_k
0	7,214	6,924	0,29	6,644	6,381	0,26
1	0,00	0,00	1,33E-15	0,000	0,00000	-6,66E-16
2	0,00	0,00	1,78E-15	0,000	0,00000	0,00E+00
3	1,09	1,09	0,00E+00	0,919	0,91912	0,00E+00
4	13,10	13,10	0,00	11,029	11,02941	0,00E+00
5	0,29	0,29	1,33E-15	0,231	0,23114	-4,44E-16
6	3,50	3,50	0,00	2,897	2,89673	0,00E+00
7	1,02	1,02	0,00E+00	0,844	0,84389	0,00E+00
8	12,23	12,23	0,00	10,250	10,24967	0,00E+00
9	0,00	0,00	0,00	0,000	0,00000	6,66E-16
10	0,00	0,00	4,44E-16	0,000	0,00000	-1,11E-15
11	2,74	2,74	0,00	2,625	2,62500	0,00E+00
12	32,91	32,91	0,00	31,500	31,50000	0,00E+00
13	0,76	0,76	0,00	0,700	0,70048	-1,78E-15
14	9,31	9,31	0,00	8,824	8,82353	0,00E+00
15	2,58	2,58	0,00	2,450	2,45048	0,00E+00
16	31,25	31,25	0,00	29,824	29,82353	0,00E+00

В каждом параллельном опыте факторам на заданном уровне задавалось значение с учетом положительного и отрицательного отклонения. По результатам параллельных опытов вычислялась дисперсия в третьей строке матрицы планирования:

$$\sigma_3^2 = \frac{\sum_{i=1}^m \left(\delta\Delta P_{CD,i}^* - \delta\Delta P_{CD,med}^* \right)^2}{k_{3,ex}}, \quad (15)$$

где $\delta\Delta P_{CD,i}^*$ – результат вычислительного эксперимента в каждом i -том параллельном опыте;

m – число параллельных опытов, равное 10;

$\delta\Delta P_{CD,med}^*$ – среднее значение выхода системы по результатам параллельных опытов;

$k_{3,ex}$ – число степеней свободы в строке:

$$k_{3,ex} = m - 1. \quad (16)$$

Таблица 3

Порядок проведения параллельных опытов, план эксперимента, результаты опытов при $b=0,04$

Номер опыта	Знак отклонения от уровня фактора				$\delta\Delta P_{CD}^* \cdot 100\%; \ b = 0,04$									
					$tg \varphi_{1,nov} = 0,35$					$tg \varphi_{1,nov} = 0,4$				
					Опытное значение	Расчетное значение	Среднее опытное значение	Диспер- сия σ^2		Опытное значение	Расчетное значение	Среднее опытное значение	Диспер- сия σ^2	
	в строке	эксперимента	в строке	эксперимента										
1	0	0	0	0	1,091 5	1,091 5	1,10711	0,00895	0,00001	0,919 1	0,919 1	0,93391	0,00862	0,000005
2	+	+	+	+	1,236 3	1,228 1				1,056 5	1,048 5			
3	-	-	-	-	0,955 1	0,963 1				0,790 4	0,798 3			
4	+	-	+	-	1,003 2	1,010 0				0,828 3	0,835 7			
5	-	+	-	+	1,180 7	1,173 0				1,011 1	1,002 8			
6	+	+	+	-	1,063 8	1,071 4				0,878 4	0,886 6			
7	-	-	-	+	1,110 3	1,103 6				0,950 9	0,943 5			
8	+	+	-	-	1,078 5	1,081 6				0,892 5	0,896 3			
9	-	-	+	+	1,098 0	1,095 7				0,938 2	0,935 4			
10	+	+	+	+	1,253 7	1,239 3				1,073 7	1,059 5			
Дисперсия неадекватности					0,00056					0,00060				
Критерий Фишера					111,76					128,55				

Дисперсия всего эксперимента определяется как среднее значение дисперсий во всех строках матрицы плана. Очевидно, что результаты параллельных опытов при одних и тех же исходных данных в отличие от натурального эксперимента не изменяются при вычислительном эксперименте. Примем во внимание, что параллельные опыты во всех строках матрицы кроме третьей проводились с исход-

ными данными без учета их возможного разброса. Значит, во всех строках плана кроме третьей дисперсию можно принять равной нулевому значению. Тогда, принимая во внимание однородность дисперсии в строке, можно считать, что дисперсия эксперимента равна дисперсии в третьей строке, деленной на количество строк матрицы плана:

$$\sigma_{ex}^2 = \frac{\sigma_3^2}{N} . \quad (17)$$

Число степеней свободы дисперсии всего эксперимента с учетом того, что в каждой строке ставится m параллельных опытов, равно

$$k_{ex} = k_{3,ex} = m - 1 . \quad (18)$$

Результаты расчетов показали, что все коэффициенты модели значимы.

Следующим этапом является проверка модели на адекватность по критерию Фишера. Критерий Фишера позволяет сравнивать величины выборочных дисперсий двух независимых выборок. Одна из них – это результаты вычислительного эксперимента. Другая – результаты расчета по уравнению регрессии. Результаты расчета критерия Фишера и сравнение его с табличным значением по установленной методике показали, что все уравнения регрессии являются адекватными. Значит, они могут использоваться в качестве основы для инженерной методики расчета $\delta\Delta P_{CD}^*$.

Предложенная полиномиальная модель является очередным шагом в направлении совершенствования математической модели и обеспечивает расширение круга сетевых организаций и потребителей электроэнергии, имеющих возможность получить информацию о снижении потерь в смежной сетевой организации при установке КУ в собственной сети. Она может быть рекомендована для потребителей электроэнергии, не имеющих возможности воспользоваться математической моделью для получения важной информации для технико-экономического обоснования решения об установке КУ необходимой мощности. Ее использование будет способствовать активизации деятельности по установке КУ в сетях потребителей электроэнергии, позволит потребителям и сетевым организациям проверить и уточнить значения применяемых повышающих коэффициентов к тарифам на потребление реактивной мощности [14], улучшить качество управления процессом компенсации реактивной мощности в электроэнергетической системе [15].

Выводы

1. Модели оценки конкретного вклада отдельного потребителя в снижение потерь в сетевой организации при установке компенсирующих устройств (КУ) долго отсутствовали. Это не позволяло инвесторам получать достоверную информацию о доходной составляющей проекта установки КУ, проекты не поддерживались. КУ в сетях потребителей перестали устанавливаться в необходимом объеме, потоки реактивной мощности увеличились, потери электроэнергии возросли.

2. Появление такой модели и ее совершенствование позволяет активизировать деятельность по установке КУ в сетях потребителей электроэнергии. Достижению цели способствует совершенствование модели в направлении ее упрощения и создание упрощенных инженерных методик.

3. Упрощение модели возможно путем преобразования ее в полиномиальную при использовании математической теории планирования эксперимента. Для этого ограничена область определения переменных путем исключения значений, далеких от реальных. Часть переменных принята константами.

4. По результатам вычислительных экспериментов определены коэффициенты полиномиальной модели и произведена проверка на адекватность по критерию Фишера.

Предложенная полиномиальная модель может рекомендована для потребителей электроэнергии, не имеющих возможности воспользоваться математической моделью для получения важной информации для технико-экономического обоснования решения об установке КУ необходимой мощности.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Воротницкий В.Э.* Энергетическая эффективность и компенсация реактивной мощности в электрических сетях. Проблемы и пути решения // Энергосовет. – 2017. – № 1(47). – С. 44–54.
2. *Воротницкий В.Э., Шакарян Ю.Г., Сокур П.В.* О развитии и координации услуг по компенсации реактивной мощности // Энергоэксперт. – 2013. – № 5(40). – С. 32–37.
3. *Кузнецов А.В., Аргентова И.В., Буянкин М.И., Даскал Н.В.* Оценка снижения потерь мощности в сетевой организации при компенсации реактивной мощности в сети потребителя // Энергосбережение в городском хозяйстве, энергетике, промышленности: VII Междунар. науч.-техн. конф. (г. Ульяновск, 21–22 апреля 2017 г.): сб. науч. тр. Т. 2. – Ульяновск: УлГТУ, 2017. – С. 260–265.
4. *Кузнецов А.В., Ребровская Д.А.* Уточнение методики оценки финансовой эффективности установки компенсирующих устройств в сети потребителя // Вестник Ульяновского государственного технического университета. – 2017. – № 3 (79). – С. 51–56.
5. *Кузнецов А.В., Ребровская Д.А.* Уточненная оценка эффективности установки компенсирующих устройств в сети потребителя электроэнергии // Актуальные проблемы энергетики в АПК: IX Междунар. науч.-практ. конф. – Саратов, 2018. – С. 85–86.
6. *Кузнецов А.В., Ребровская Д.А.* Особенности математического моделирования процесса компенсации реактивной мощности условиях ведомственной принадлежности электрических сетей // Информационные технологии в электротехнике и электроэнергетике (ИИТЭ-2018): матер. IX Всерос. науч.-техн. конф. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2018. – С. 345–346.
7. *Кузнецов А.В., Магазинник Л.Т.* Повышение эффективности функционирования устройств управления передачей электроэнергии в системах электроснабжения потребителей. – Ульяновск: УлГТУ, 2013. – 144 с.
8. *Кузнецов А.В., Аргентова И.В.* Правовые аспекты применения повышающих коэффициентов к тарифам за потребление реактивной энергии // Промышленная энергетика. – 2013. – № 3. – С. 17–20.
9. *Кузнецов А.В., Аргентова И.В.* Математическая модель оценки снижения потерь мощности в сетевой организации при компенсации реактивной мощности в сети потребителя // Электротехника. – 2016. – № 10. – С. 68–73.
10. *Кузнецов А.В., Аргентова И.В., Ребровская Д.А.* Программная модель оценки снижения потерь мощности в сетевой организации при компенсации реактивной мощности в сети потребителя // Промышленная энергетика. – 2016. – № 6. – С. 48–54.
11. *Кузнецов А.В., Ребровская Д.А.* Уточнение модели оценки снижения потерь мощности в сетевой организации при компенсации реактивной мощности в сети потребителя // Промышленная энергетика. – 2018. – № 10. – С. 31–36.
12. *Адлер Ю.П., Грановский Ю.В., Маркова Е.В.* Теория эксперимента: прошлое, настоящее, будущее. – М.: Знание, 1982. – 64 с.
13. О порядке расчета значений соотношения потребления активной и реактивной мощности для отдельных энергопринимающих устройств (групп энергопринимающих устройств) потребителей электрической энергии. Приказ Министерства энергетики РФ от 23 июня 2015 г. № 380 [Электронный ресурс] // СПС Консультант Плюс. – Режим доступа: <http://www.pravo.gov.ru> <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001201507270034>
14. *Кузнецов А.В., Аргентова И.В.* Уточнение методики расчета тарифа на передачу электроэнергии в связи с применением повышающих коэффициентов за потребление реактивной мощно-

- сти // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2014. – № 3 (43). – С. 131–138.
15. Кузнецов А.В., Ребровская Д.А. Управление процессом компенсации реактивной мощности в электроэнергетической системе // Математические методы в технике и технологиях – ММТТ-31: XXXI Междунар. науч. конф. – СПб., 2018. – С. 71–74.

Статья поступила в редакцию 12 февраля 2019 года

DEVELOPMENT AND VERIFICATION FOR THE ADEQUACY OF THE POLYNOMIAL MODEL TO REDUCE THE POWER LOSSES IN THE ALLIED GRID COMPANY AT REACTIVE POWER COMPENSATION OF THE CONSUMER

A.V. Kuznetsov, D.A. Rebrovskaya

Ulyanovsk State Technical University
32, Severniy Venets str., Ulyanovsk, 432027, Russian Federation

Abstract. The paper reveals that the models for assessing the specific contribution of the individual consumer to reducing losses in the network organization when installing compensating devices (CD) have been missed for a long time. This did not allow investors to receive reliable information about the revenue component of the CD installation project; projects were not supported. CD in the networks of consumers ceased to be installed in the required volume, reactive power flows increased, electric power losses increased. The emergence of such a model and its improvement allows us to intensify the activity of installing CD in the networks of electricity consumers. Achieving the goal contributes to the improvement of the model in the direction of its simplification and the creation of simplified engineering techniques. Simplification of the model is possible by converting it into a polynomial one with using the mathematical experimental design theory. For this, the scope of variables is limited by eliminating values that are far from the real ones in practice. Part of the variables is accepted as constants. According to the results of computational experiments, the coefficients of the polynomial model were determined and the adequacy of the program model was tested as per the F-ratio test. It is noted that the proposed polynomial model can be recommended for electric power consumers who are not able to use the mathematical model to obtain important information for the feasibility study of the decision to install the compensating device with a required power.

Keywords: electricity supply system, the allied grid company, mathematical model, the polynomial model, reactive power compensation, the compensating device, Russian Foundation for Basic Research.

REFERENCES

1. Vorotnitskiy V.E. Energy efficiency and reactive power compensation in electrical networks. Problems and solutions. *Energosovet*, 2017. no. 1 (47). Pp. 44–54 (In Russian).
2. Vorotnitskiy V.E., SHakaryan YU.G., Sokur P.V. On the development and coordination of services for reactive power compensation. *Energoekspert*, 2013. no. 5 (40). Pp. 32–37 (In Russian).
3. Kuznetsov A.V., Argentova I.V., Buyankin M.I., Daskal N.V. The assessment of the reduction of power losses in network organization during reactive power compensation in the network of the consum-

Anatoly V. Kuznetsov (Dr. Sci. (Techn.)), Head of Department.
Diana A. Rebrovskaya, Senior Lecturer.

- er. *Energoberezhnie v gorodskom khozyaystve energetike promyshlennosti: Sedmaya Mezhdunarodnaya nauchno-tehnicheskaya konferentsiya*. Ulyanovsk, UISTU, 2017. Vol. 2. P. 260–265 (In Russian).
4. Kuznetsov A.V., Rebrovskaya D.A. Refinement of methods of assessing financial efficiency of the installation of compensating devices in the network consumer. *Vestnik Ulyanovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2017. № 3 (79). Pp. 51–56 (In Russian).
5. Kuznetsov A.V., Rebrovskaya D.A. Refined estimation of efficiency of installation of compensating devices in the network consumer of electricity. *Aktualnye problemy energetiki v APK: IX Mezhdunarodnaya nauchno prakticheskaya konferentsiya*. Saratov, 2018. P. 85–86 (In Russian).
6. Kuznetsov A.V., Rebrovskaya D.A. Features of mathematical modeling of reactive power compensation conditions of affiliation of electric networks. *Informatsionnye tekhnologii v elektrotekhnike i elektroenergetike: materialy IX Vseros. nauch.-tekhn. konf.* CHEboksary, 2018. P. 345–346 (In Russian).
7. Kuznetsov A.V., Magazinnik L.T. Increase of efficiency of functioning of control devices of electric power transmission in systems of power supply of consumers. Ulyanovsk, UISTU, 2013. 144 p. (In Russian).
8. Kuznetsov A.V., Argentova I.V. Legal aspects of application of raising factors to tariffs for the reactive energy consumption. *Industrial Power Engineering*, 2013. no. 3. Pp. 17–20 (In Russian).
9. Kuznetsov A.V., Argentova I.V. Mathematical model for estimation of the power losses enhancement in a grid company with power factor compensation in a consumer's network. *Electrical Engineering*, 2016. no. 10. Pp. 68–73 (In Russian).
10. Kuznetsov A.V., Argentova I.V., Rebrovskaya D.A. Software model for estimation of the power losses enhancement in a grid company with power factor compensation in a consumer's network. *Industrial Power Engineering*, 2016. no. 6. Pp. 48–54 (In Russian).
11. Kuznetsov A.V., Rebrovskaya D.A. Refinement of the model for estimation of the power losses enhancement in a grid company with power factor compensation in a consumer's network. *Industrial Power Engineering* 2018. no. 10. Pp. 31–36 (In Russian).
12. Adler YU.P., Granovsky YU.V., Markova E.V. Theory of experiment: past, present, future. M.: Knowledge, 1982. 64 p. (In Russian).
13. Regarding the procedure for calculating the ratio of consumption of active and reactive power for individual power receivers (groups of power receivers) of electric power consumers. Order of the Ministry of Energy of the Russian Federation dated June 23, 2015 N 380 // SPS Consultant Plus. <http://www.pravo.gov.ru> <http://publication.pravo.gov.ru> / Document / View / 0001201507270034 (In Russian).
14. Kuznetsov A.V., Argentova I.V. Clarifying the methods for calculating tariffs for electricity transmission in connection with the use of raising factors for the consumption of reactive power. *Vestnik SamGTU. Ser. Tekhnicheskije nauki*, 2014. № 3 (43). Pp. 131–138 (In Russian).
15. Kuznetsov A.V., Rebrovskaya D.A. Process control of reactive power compensation in electrical power system. *Matematicheskie metody v tekhnike i tekhnologiyakh – MMTT-31 XXXI Mezhdunarodnaya nauchnaya konf.* St. Petersburg, 2018. Pp. 71–74 (In Russian).