

УДК 621.316

А. В. КУЗНЕЦОВ, Д. А. РЕБРОВСКАЯ, А. С. БИРКОВ

## СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ СНИЖЕНИЯ ПОТЕРЬ МОЩНОСТИ В СЕТЕВОЙ ОРГАНИЗАЦИИ ПРИ КОМПЕНСАЦИИ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ В СЕТИ ПОТРЕБИТЕЛЯ

*Во многих случаях потребитель электроэнергии не имеет возможности воспользоваться известной математической моделью для оценки снижения потерь мощности в смежной сетевой организации при установке компенсирующих устройств (КУ) в своей сети. Для потребителей нужен простой и доступный инструмент, не требующий высокой квалификации, затрат времени на обучение и освоение и, наконец, материальных ресурсов на сертификацию и покупку программы. Таким инструментом может быть линейная полиномиальная модель зависимости, созданная на основе программной модели. Преобразование математической модели в полиномиальную возможно путём применения математической теории планирования эксперимента.*

*При разработке полиномиальной модели необходимо стремиться к сокращению числа переменных факторов, часть параметров программной модели желательно принять константами. Это несколько упрощает модель и увеличивает вероятность получения компактной и адекватной модели. Из семи переменных известной математической модели при создании линейной полиномиальной модели можно учитывать только четыре, остальные переменные можно принять константами.*

Ключевые слова: сетевая организация, потребители, потери электрической энергии, компенсация реактивной мощности (КРМ), математическая модель.

*Работа выполняется при финансовой поддержке РФФИ (договор №18-48-730025/18 от 11.06.2018 г.*

Известная математическая и программная модель снижения потерь мощности в сетевой организации [2, 3, 4] позволяет производить расчёты и получать зависимость снижения потерь  $\delta\Delta P_{KV}^*$  в сетевой организации от степени компенсации реактивной мощности (КРМ) в сети потребителя. Результаты расчёта в виде графической зависимости позволяют определить снижение потерь, обусловленных имеющимися установленными КУ, а также возможное снижение потерь при установке дополнительно новых КУ. Это необходимо прежде всего для технико-экономического обоснования проекта установки КУ и принятия решения о его реализации.

Математическая модель представляет собой схему замещения сетевой организации в виде трёх сопротивлений, соединённых по схеме «звезда». Одно из сопротивлений является сопротивлением ветви 1, питающей исследуемого потребителя электроэнергии, второе сопротивление – это эквивалентное сопротивление ветви 2, питающей эквивалентного потребителя мощностью, равной сумме мощностей всех потребителей сетевой организации, кроме первого. Третье сопротивление представляет собой эквивалентное сопротивление питающей ветви 3 и соединено с источником питания. В преобразованном виде модель представляет собой зависимость

$$\delta\Delta P_{KV}^* = f\left(P_1^*, \frac{\Delta P_1}{P_1}, \frac{\Delta P_2}{P_2}, \frac{\Delta P_3}{P_1+P_2}, \operatorname{tg} \varphi_1, \operatorname{tg} \varphi_2, Q_{KV}^*\right). \quad (1)$$

Исходными данными для расчёта  $\delta\Delta P_{KV}^*$  являются семь независимых переменных (воздействующих факторов).

$P_1^*$  – доля мощности первого потребителя в сумме мощностей всех потребителей сетевой организации;

$\frac{\Delta P_1}{P_1}$ ,  $\frac{\Delta P_2}{P_2}$ ,  $\frac{\Delta P_3}{P_1 + P_2}$  – потери мощности в ветвях, относительно передаваемой по ним мощности;

$\operatorname{tg} \varphi_1$ ,  $\operatorname{tg} \varphi_2$  – коэффициенты мощности первого и второго эквивалентного потребителя;

$Q_{KV}^* = \frac{Q_{1,KK}}{Q_1}$  – степень КРМ, представляющая собой величину, равную отношению планируемой

к установке мощности КУ  $Q_{KV}$  к потребляемой реактивной мощности  $Q_1$ .

Применение математической известной модели требует достаточно высокой квалификации персонала энергоснабжающих организаций и энергетических служб потребителей. Для энергоснабжающей организации производство и передача электроэнергии является основным видом деятельности. Снижение потерь электроэнергии в сетевой организации – значимый фактор, имеющий первостепенное значение для снижения себестоимости продукции. Практически весь персонал энергоснабжающих организаций занят вопросами производства и передачи электроэнергии. Вопросы расчёта и снижения потерь решаются соответствующими службами на профессиональном уровне. Нет сомнения, что с использованием предложенной математической и программной модели у энергоснабжающих организаций не возникает проблем.

В силу объективных обстоятельств вопросы передачи и покупки электроэнергии для потребителя не являются первостепенными. Главное для потребителей – это производство продукции. Значимость вопросов снижения цены на электроэнергию определяется её долей в себестоимости продукции. Высокая доля наблюдается на металлургических производствах с использованием дуговых плавильных печей, на электролизных производствах и т. п. Вместе с тем значительная часть промышленных производств имеет низкую долю стоимости электроэнергии в себестоимости продукции. Главными составляющими себестоимости для таких потребителей являются стоимость сырья, материалов, оборудования, людские ресурсы и т. п. Штатный персонал энергетических служб таких потребителей малочислен и сосредоточен главным образом на обеспечении надёжности электроснабжения, предотвращении аварийных ситуаций и их ликвидации в случае возникновения. Вопросы снижения оплаты за электроэнергию для этих потребителей отодвинуты на второй план.

Во многих случаях потребитель не имеет возможности воспользоваться как математической, так и программной моделью. Для потребителей нужен простой и доступный инструмент, не требующий высокой квалификации, затрат времени на обучение и освоение и, наконец, материальных ресурсов на сертификацию и покупку программы.

Таким инструментом может быть линейная полиномиальная модель зависимости, созданная на основе программной модели. Преобразование математической модели в полиномиальную возможно путём применения математической теории планирования эксперимента. Для этого на математической модели проводятся серия вычислительных экспериментов при определённом сочетании верхних и нижних пределов варьирования факторов. При полнофакторном эксперименте число вычислительных экспериментов может быть ограничено значением  $2^N$ , где  $N$  – число независимых факторов. По результатам вычислительных экспериментов вычисляются коэффициенты полиномиальной модели и производится её проверка на адекватность программной модели.

При разработке модели необходимо стремиться к сокращению числа переменных факторов, часть параметров программной модели желательно принять константами. Это несколько упрощает модель и увеличивает вероятность получения компактной и адекватной модели.

Одной из переменных модели (1), которую можно принять константой, может быть коэффициент реактивной мощности (РМ) в сети потребителя –  $\operatorname{tg} \varphi_1$ . В реальности значение коэффициента реактивной мощности в сети потребителя может изменяться от натурального  $\operatorname{tg} \varphi_{1,нам}$  при отключённых КУ до нулевого при условии полной КРМ. При подключении имеющихся у потребителя КУ значение  $\operatorname{tg} \varphi_1$  уменьшается до фактического значения  $\operatorname{tg} \varphi_{1,\phi}$ . Дальнейшее увеличение мощности КУ снижает  $\operatorname{tg} \varphi_1$  вплоть до нулевого значения. Начальное значение диапазона изменения зависит от характера нагрузки потребителя. В сетевой организации натуральные значения  $\operatorname{tg} \varphi_{i,нам}$  потребителей разные. Но оно, как правило, меньше 1. Приняв за константу  $\operatorname{tg} \varphi_{\phi,1} = 1$ , мы искусственно завышаем потребляемую РМ потребителя. Для компенсации этого завышения требуется искусственное, виртуаль-

ное значение мощности КУ, при котором  $tg\varphi_i$  становится равным  $tg\varphi_{i,нам}$ . Этому значению будет соответствовать виртуальное снижение потерь мощность в сетевой организации. При исследовании модели применительно к конкретному потребителю необходимо учитывать это виртуальное значение  $\delta\Delta P_{KV,вирт}^*$ , полученное при изменении мощности КУ от нулевого значения соответствующего  $tg\varphi_{нач,i} = 1$  до виртуального  $Q_{KV,i} = Q_{KV,вирт,i}$ , соответствующего  $tg\varphi_{нам,i}$ . Полученный результат вычисления по модели  $\delta\Delta P_{KV,м,i}^*$  необходимо скорректировать на величину поправки  $\delta\Delta P_{KV,вирт}^*$ .

$$\delta\Delta P_{KV,i}^* = \delta\Delta P_{KV,м,i}^* - \delta\Delta P_{KV,вирт,i}^* . \quad (2)$$

Учитывая это, можно в модели принять переменную  $tg\varphi_i$  константой

$$tg\varphi_i = tg\varphi_{нач,i} = 1 . \quad (3)$$

Другой переменной модели, которую реально представляется возможным принять константой, является эквивалентный  $tg\varphi_{\phi,2}$ , смежных с исследуемым потребителем сетевой организации. В реальности это значение не является постоянным. Оно соответствует степени КРМ у потребителей сетевой организации на текущий момент времени. Очевидно, что со временем смежные потребители могут менять потребление реактивной мощности путём установки новых КУ, их отключения в результате выхода из строя или демонтажа. Параметры модели изменяются с течением времени. Вместе с тем существуют определённые нормативные значения, которые в конечном счёте потребители должны выполнять. В дальнейшем с течением времени параметры такой модели не будут претерпевать изменений. Такое возможно для момента времени, когда все потребители выполняют условия КРМ, предписанные нормативно-правовыми документами. Этими условиями являются нормированные значения степени КРМ каждым потребителем. Во времена плановой экономики нормировался  $\cos\varphi = 0,92$ , впоследствии это было экономическое значение реактивной мощности  $Q_3$  и электроэнергии  $W_{q,э}$  [1] в настоящее время это предельное значение тангенса  $tg\varphi_{пред}$  [5].

Нормированные предельные значения  $tg\varphi_{пред}$  в соответствии [5] при напряжении 110 (154), 1-35 кВ, ниже 1 кВ соответственно равны 0,5; 0,4; 0,35. Если рассматривать сетевую организацию с напряжением одного класса, например 1–35 кВ, то можно принять константой

$$tg\varphi_{\phi,2} = 0,4 . \quad (4)$$

Далее рассуждаем следующим образом. Потери в схеме замещения сетевой организации это сумма трёх независимых величин – потерь в каждом из трёх сопротивлений схемы замещения

$$\frac{\sum_1^3 \Delta P_i}{(P_1 + P_2)} = \frac{\Delta P_1}{P_1 + P_2} + \frac{\Delta P_2}{P_1 + P_2} + \frac{\Delta P_3}{P_1 + P_2} . \quad (5)$$

В общем случае каждая из трёх переменных может принимать значения от нуля до предельно возможного и допустимого на практике, если принять предельно допустимое значение в электрических сетях равным 5%

$$\frac{\Delta P_1}{P_1 + P_2} = 0,05; \quad \frac{\Delta P_2}{P_1 + P_2} = 0,05; \quad \frac{\Delta P_3}{P_1 + P_2} = 0,05 , \quad (6)$$

то общие потери в схеме замещения достигнут

$$\frac{\sum_1^3 \Delta P_i}{(P_1 + P_2)} = 0,15 (15\%) . \quad (7)$$

Это явно превышает нормативы технологических потерь в электрических сетях всех классов напряжений. Область определения и использования модели явно превышает необходимую для практических расчётов. Необходимо сузить область определения модели. Привести её в соответствие области изменения параметров, соответствующих действующим системам электроснабжения.

Выражение (5) представится одним уравнением с тремя неизвестными, решить которое невозможно. Сочетание переменных предполагает множество вариантов значений. Как известно, с тремя неизвестными решается система как минимум из трёх уравнений. Представить систему трёх уравнений не представляется возможным. Необходимо принять часть переменных константами. Причём как минимум две. Только в этом случае получим уравнение с одним неизвестным, из которого получается

аналитическая явная зависимость функции от аргумента. Любому диапазону изменения аргумента будет соответствовать определённый диапазон изменения функции.

Необходимо, чтобы уравнение (5) содержало только одну переменную. Остальные приходится принять константами. Примем константой сумму потерь в первой и второй ветви [2].

$$b = \frac{\Delta P_1}{P_1 + P_2} + \frac{\Delta P_2}{P_1 + P_2} = const. \quad (8)$$

Тогда уравнение (5) примет следующий вид:

$$\frac{\sum_1^3 \Delta P_i}{(P_1 + P_2)} = b + \frac{\Delta P_3}{P_1 + P_2}, \quad (9)$$

где  $b = \frac{\Delta P_1}{P_1 + P_2} + \frac{\Delta P_2}{P_1 + P_2}$ .

Принимая во внимание реальные значения технологических потерь, можно считать

$$b = 0,05; \quad \frac{\Delta P_3}{P_1 + P_2} = 0,05. \quad (10)$$

Тогда

$$\frac{\sum_1^3 \Delta P_i}{(P_1 + P_2)} = 0,10 \text{ (10\%)}. \quad (11)$$

То есть сумма потерь мощности в сети не будет превышать 10%. Принятие условия 8 позволило приблизить значение потерь в схеме замещения к реальному значению. Снизить потери с 15% до 10%. Решение о принятии условия (8) является целесообразным. Таким образом, принимаем константами.

$$tg \varphi_1 = 1,0; \quad tg \varphi_2 = 0,4 ;$$

$$b = \frac{\Delta P_1}{P_1 + P_2} + \frac{\Delta P_2}{P_1 + P_2}. \quad (12)$$

При этом в одном варианте полиномиальной модели  $b$  можно принять равной 0,01. В другом варианте 0,02, в третьем 0,03, в четвёртом 0,04, в пятом 0,05.  
 $b = 0,01, b = 0,02, b = 0,03, b = 0,04, b = 0,05$ .

Сокращённое число переменных

$$P_1^*, \quad \frac{\Delta P_1}{P_1}, \quad \frac{\Delta P_2}{P_2}, \quad \frac{\Delta P_3}{P_1 + P_2}, \quad Q_{KV}^*. \quad (13)$$

Принятие  $b = \frac{\Delta P_1}{P_1 + P_2} + \frac{\Delta P_2}{P_1 + P_2}$  константой позволяет ввести в математическую модель пере-

менную  $\frac{\sum_1^3 \Delta P_i}{(P_1 + P_2)}$ , а переменную  $\frac{\Delta P_2}{P_2}$  и переменную  $\frac{\Delta P_3}{P_1 + P_2}$  исключить.

При этом исключённые переменные станут зависимыми и их можно вычислять в программной модели при проведении вычислительного эксперимента.

$$\frac{\Delta P_3}{P_1 + P_2} = \frac{\sum_1^3 \Delta P_i}{(P_1 + P_2)} - b. \quad (14)$$

Переменную  $\frac{\Delta P_2}{P_2}$  нет необходимости вычислять. В математической модели используется вы-

ражение  $P^* \cdot \frac{\Delta P_2}{P_2}$ , которое представляет собой потери мощности в ветви 2 по отношению к суммарной нагрузке. В программной модели они могут вычисляться как

$$P^* \cdot \frac{\Delta P_2}{P_2} = b - (1 - P^*) \cdot \frac{\Delta P_1}{P_1}. \quad (15)$$

Новый набор переменных будет следующим.

$$P_1^* (0 \div 1), \quad \frac{\Delta P_1}{P_1} (0 \div a), \quad \frac{\sum_1^3 \Delta P_i}{(P_1 + P_2)}, \quad Q_{KV}^* (0 \div 1). \quad (16)$$

Сокращение числа переменных снижает универсальность модели. Если одна из важных переменных становится константой, возникает необходимость рассматривать несколько вариантов значений этой константы. Сокращение числа переменных вынуждает увеличивать число полиномиальных уравнений. Для каждого значения константы составляется своё уравнение. В нашем случае их будет пять. При  $b = 0,01$ ,  $b = 0,02$ ,  $b = 0,03$ ,  $b = 0,04$ ,  $b = 0,05$ .

Выводы:

1. Во многих случаях потребитель электроэнергии не имеет возможности воспользоваться известной математической моделью. Для потребителей нужен простой и доступный инструмент, не требующий высокой квалификации, затрат времени на обучение и освоение и, наконец, материальных ресурсов на сертификацию и покупку программы.

2. Таким инструментом может быть линейная полиномиальная модель зависимости, созданная на основе программной модели. Преобразование математической модели в полиномиальную возможно путём применения математической теории планирования эксперимента.

3. При разработке модели необходимо стремиться к сокращению числа переменных факторов, часть параметров программной модели желательно принять константами. Это несколько упрощает модель и увеличивает вероятность получения компактной и адекватной модели.

4. Из семи переменных известной математической модели при создании линейной полиномиальной модели можно учитывать только четыре, остальные переменные можно принять константами.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кузнецов А. В., Магазинник Л. Т. Повышение эффективности функционирования устройств управления передачей электроэнергии в системах электроснабжения потребителей. – Ульяновск : УлГТУ, 2013. – 144 с.

2. 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.

3. 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.

4. 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.

5. О порядке расчёта 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.

#### REFERENCES

1. Kuznetsov A. V., Magazinnik L. T. *Povyshenie ehffektivnosti funkcionirovaniya ustrojstv upravleniya peredachej ehlektroehnergii v sistemah ehlektrosnabzheniya potrebitelej* [Increase of efficiency of functioning of control devices of electric power transmission in systems of power supply]. Ul'yanovsk: UIGTU, 2013, 144 p.

2. Kuznestov A.V., Argentova I. V. *Matematicheskaya model' ocenki snizheniya poter' moshchnosti v setевой organizacii pri kompensacii reaktivnoj moshchnosti v seti potrebitelya* [Mathematical model of evaluation of reduction of power losses in network organization during reactive power compensation in the network user] // *Ehlektrrotekhnika* [Electrical engineering], 2016, №10, pp. 68–73.

3. Kuznestov A.V., Argentova I. V., Rebrovskaya D. A. *Programmnaya model' ocenki snizheniya poter' moshchnosti v setевой organizacii pri kompensacii reaktivnoj moshchnosti v seti potrebitelya* [The programming model of evaluation of reduction of power losses in network organization during reactive power compensation in the network user] // *Promyshlennaya ehnergetika* [Industrial energy], 2016, №6, pp. 48–54.

4. Kuznestov A.V., Rebrovskaya D. A. *Utochnenie modeli ocenki snizheniya poter' moshchnosti v setевой organizacii pri kompensacii reaktivnoj moshchnosti v seti potrebitelya* [Refinement of the model of

evaluation of reduction of power losses in network organization during reactive power compensation in the network user] // *Promyshlennaya ehnergetika* [Industrial energy], 2018, №10, pp. 31–36.

5. *O poryadke rascheta znachenij sootnosheniya potrebleniya aktivnoj i reaktivnoj moshchnosti dlya otdel'nyh ehnergoprimayushchih ustrojstv (grupp ehnergoprimayushchih ustrojstv) potrebitelej ehlektricheskoy ehnergii. Prikaz Ministerstva ehnergetiki RF ot 23 iyunya 2015 g., №380* [On the procedure of calculation of values of correlation of consumption of active and reactive power for separate power receiving devices (groups of power accepting devices) the consumers of electric energy. Order of the Ministry of energy of the Russian Federation from June 23, 2015, №380].

•••••

**Кузнецов Анатолий Викторович**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Электроснабжение» энергетического факультета УлГТУ.

**Ребровская Диана Андреевна**, старший преподаватель кафедры «Электроснабжение» энергетического факультета УлГТУ.

**Бирков Александр**, магистрант 2-го курса энергетического факультета УлГТУ.

Поступила 19.02.2019 г.

УДК 621.311

А. В. КУЗНЕЦОВ, В. В. ЧИКИН

## ПРАВОВЫЕ АСПЕКТЫ УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ

*В настоящее время управление качеством электроэнергии в электроэнергетической системе осуществляется посредством широкого спектра нормативно-правовых документов. При этом только одним документом предполагается экономическое воздействие на потребителей и энерго-снабжающую организацию. Это статья 542 Гражданского кодекса РФ. Отмечено, что эффективность воздействия этой статьи ограничена случаем, когда виновником искажения показателей качества электроэнергии является энергоснабжающая организация.*

*По большинству же показателей, виновником искажения которых является потребитель, управление полностью отсутствует. Предложено повысить эффективность управления за счёт дополнения статьи 542 ГК РФ новым содержанием, формулировка которого должна защищать права энергоснабжающей организации в случае, когда она вынуждена в силу специфики процесса передачи и потребления электроэнергии подавать электроэнергию плохого качества и возмещать ущерб потребителям при отсутствии своей вины.*

Ключевые слова: качество электроэнергии, показатель качества, энергоснабжающая организация, потребитель, управление, государство.

Любой товар, поставляемый на рынок, должен соответствовать требованиям качества, это применительно и к производству, и передаче электрической энергии. Потребление некачественной электроэнергии может вызывать сбои оборудования, брак продукции, отрицательным образом сказываться на режиме работы электроприёмников, снижает срок службы их изоляции и т. п., наносит ущерб. Вопросы повышения качества электроэнергии (КЭ) должны интересовать всех участников процесса производства,

передачи и потребления электроэнергии. Это генерирующие компании, сетевые компании, потребители электроэнергии. Однако в условиях рынка каждый субъект рыночных отношений имеет собственные интересы, направленные на получение прибыли. Рыночные механизмы регулирования КЭ, основанные на конкуренции, для энергоснабжающих организаций не действуют. Их интересы никак не связаны с повышением КЭ. Деятельность по передаче электроэнергии относится к сфере деятельности естественных монополий. Регулирование её деятельности не возможно без участия государства.

© Кузнецов А. В., Чикин В. В., 2019