

УДК 651.3.017

Методика оптимальной компенсации реактивной мощности в сетях распределительных компаний в условиях неопределенности

Савина Н.В., канд. техн. наук, Казакул А.А., асп.

Предлагается методика компенсации реактивной мощности, позволяющая в условиях неполноты и недостоверности исходной информации получать наибольший экономический эффект для распределительных сетевых компаний.

Ключевые слова: компенсация реактивной мощности, неопределённость, напряжение, наблюдаемость, методика, алгоритм.

Optimal Reactive Power Compensation Methods in Networks of Distribution Companies in Condition of Uncertainty

N.V. Savina, Candidate of Engineering, A.A. Kazakul, Post-Graduate Student

Reactive power compensation methodology, which allows in conditions of incompleteness and invalidation of the initial information to get greatest financials benefits for the distribution companies is offered in the article.

Keywords: reactive power compensation, uncertainty, voltage, observability, methodology, algorithm.

В последние годы наблюдается существенное увеличение потребления реактивной мощности. В то же время у потребителей снизился экономический стимул участвовать в компенсации реактивной мощности (КРМ). Это привело к ряду негативных последствий, результатом которых является резкое снижение надежности электроснабжения и экономичности работы электроэнергетической системы.

КРМ является самым эффективным средством повышения технико-экономических показателей распределительных сетевых компаний, уменьшая все виды технологических потерь электроэнергии и капиталовложений в сетевые объекты. Как подтверждает мировой опыт, КРМ позволяет комплексно решать задачи энергосбережения, обеспечения нормированных показателей качества электроэнергии (ПКЭ), повышения уровня надежности. При решении задачи КРМ необходимо учитывать влияние новых экономических отношений в условиях рынка. При рыночной экономике критерием поведения каждого участника рынка электроэнергии, прежде всего, являются собственные эгоистические интересы. В условиях коммерциализации деятельности энергетических компаний необходима разработка новых подходов при решении задач КРМ, в наибольшей степени адаптированных к этим условиям.

Как правило, электрические сети работают в условиях неопределенности, обусловленной как фундаментальными свойствами энергосистем, рыночным механизмом управления энергетикой, так и низкой наблюдаемостью.

Исходя из вышесказанного, целью предлагаемого исследования является раз-

работка методики компенсации реактивной мощности в распределительных сетевых компаниях, обеспечивающей наибольший эффект при неполноте и недостоверности исходной информации.

Для выполнения указанной цели необходимо решить следующие задачи:

- оценка информационной обеспеченности задачи КРМ в распределительных сетях;
- разработка методики оптимальной КРМ в распределительных сетевых компаниях в условиях неопределенности;
- разработка алгоритма оптимальной КРМ.

В распределительных сетях степень неопределенности высока в связи с отсутствием информации в требуемом объеме для решения поставленных задач и ее недостоверностью, обусловленной погрешностью измерительных комплексов, скрытыми ошибками. Реформа в электроэнергетике привела к усилению неопределенности. Как следствие, как схемная, так и режимная информация, используемая при КРМ, в разной степени неопределенна, поэтому ее целесообразно описывать информационными потоками с учетом их качества, обусловленного свойствами информации [1].

Это подтверждается статистическими исследованиями электрических сетей Дальнего Востока, в результате которых выявлено, что распределительные сети частично наблюдаемы, а их некоторые участки являются темными пятнами [2]. Для иллюстрации данных положений в табл. 1 приведена характеристика качества многомерных информационных потоков в распределительных сетях юга Приморского края.

Таблица 1. Структура информационных потоков в распределительных сетях Приморского края

Класс информационного потока	Степень качества информационных потоков	
	110 кВ, %	35 кВ, %
Полный достоверный поток	23,9	7,1
Неполный достоверный поток	31,4	23,8
Неполный недостоверный поток	25,3	38,1
Неопределенный поток	19,4	31,0

Использование информационных потоков низкого качества для задач КРМ приводит к смещению результатов КРМ в неоптимальную область. В связи с этим задачу оптимальной КРМ необходимо решать в условиях неопределенности, так как существующие подходы к КРМ имеют неустранимую методическую погрешность при низком качестве информационных потоков.

Как показал анализ, методы нелинейного математического программирования обеспечивают требуемую точность оптимизации в условиях полноты и достоверности исходного информационного потока.

Рассматривая КРМ как ярко выраженную системную проблему в условиях неопределенности, целесообразно начать с морфологического анализа. Такой подход позволит осуществить декомпозицию сети по следующим признакам: принадлежность разным собственникам; класс номинального напряжения; качество информационных потоков; конфигурация сети. Это приводит к уменьшению размерности решаемой задачи и обеспечивает гибкость модели, а также возможность сведения сетей разных конфигураций к разомкнутым. Выделение разомкнутых участков производится на основании расчета установившегося режима по эквивалентным нагрузкам, полученным по методике [1]. Из сложноразомкнутых сетей разомкнутые выделяются после расчета установившегося режима по точкам потоко раздела реактивной мощности.

После декомпозиции электрической сети по обозначенному выше принципу необходимо выбрать целевую функцию, которая позволит количественно подтвердить необходимость проведения КРМ на выделенном участке сети.

В задачах оптимизации важен выбор целевой функции и параметров оптимизации. Компенсация реактивной мощности комплексно воздействует на сеть: снижаются потери активной мощности, увеличивается пропускная способность элементов сети, повышается надежность функционирования сети, нормализуются уровни напряжения, а в ряде случаев

появляется возможность избежать затрат на строительство новых линий, установку дополнительных трансформаторов. Степень воздействия на сеть будет зависеть от места установки компенсирующих устройств (КУ) и их мощности. Таким образом, целевая функция представляется следующим функционалом:

$$C = f(Q_{КУ}; N_{КУ}), \quad (1)$$

где $Q_{КУ}$ – мощность КУ; $N_{КУ}$ – место установки КУ.

Так как инвестиции в КУ вкладываются в течение одного года, а динамика изменения эксплуатационных издержек одинакова, то в качестве целевой функции целесообразно использовать эквивалентные среднегодовые затраты, как частный случай дисконтированных затрат [3]:

$$Z = E \cdot K + I, \quad (2)$$

где E – норматив дисконтирования; K – капитальные вложения в КУ; I – эксплуатационные издержки КУ.

В качестве капитальных вложений принимается стоимость КУ с необходимым сопутствующим оборудованием (ячейки для подключения, ТТ, приборы учета, линии для подключения КУ).

В эксплуатационные издержки входят затраты на монтаж и эксплуатацию КУ, амортизационные отчисления с дисконтированной нормой амортизации и стоимость потерь активной энергии в сети при передаче и распределении электроэнергии.

После преобразований целевую функцию эквивалентных среднегодовых затрат (3) для неразветвленной сети с двухобмоточными трансформаторами можно представить в виде

$$Z = (E + \alpha) K_0 Q_{КУi} + c_0 T \times \left[\sum_1^n \frac{P_{ij}^2 + (Q_{ij} - Q_{КУi})^2}{U^2} R_{ij} + \sum_1^{n-1} \frac{P_i^2 + Q_i^2}{U^2} R_{Ti} \right] + \frac{P_n^2 + (Q_n - Q_{КУi})^2}{U^2} R_{Tn}, \quad (3)$$

где α – коэффициент, учитывающий долю отчислений на амортизацию, монтаж, эксплуатацию и ремонт КУ; K_0 – удельные затраты на генерацию реактивной мощности, руб/кВАр (рассчитываются путем определения зависимости цены от мощности КУ по прайсам поставщиков); c_0 – тариф на потери электроэнергии для рассматриваемой сетевой компании, руб/кВт·ч; T – время работы КУ за год, ч; Q_{ij} – поток реактивной мощности по ветви ij , начиная с головного участка, который может быть снижен при установке n -го КУ, Мвар; $Q_{КУi}$ – мощность КУ, устанавливаемого в i -м узле и влияющего на поток реактивной мощности ветви ij , Мвар; Q_n – мощность нагрузки узла n , к которому возможно подключение КУ, Мвар; R_{ij} – активное сопротивление участка ij схемы, Ом; R_{Tn} – активное сопротивление двухобо-

точного трансформатора, к шинам которого подключается КУ, Ом.

Решение задачи оптимальной КРМ приведено на примере неразветвленной сети с двухобмоточными трансформаторами.

Для сети с трехобмоточными трансформаторами или трансформаторами с расщепленными обмотками целевая функция имеет аналогичную структуру, изменяются только составляющие, связанные с потоками реактивной мощности, протекающими по обмоткам трансформаторов, которые формируются на основе их схем замещения. При поиске оптимальной степени КРМ в разветвленных магистралях учитываются коэффициенты токораспределения, которые находятся по соотношению активных сопротивлений участков магистрали в соответствии с законами электротехники.

В качестве метода оптимизации мощности и места установки КУ принят метод условного экстремума. Это обусловлено тем, что при оптимизации целевой функции отсутствуют ограничения. Перекомпенсация в узле может служить формальным признаком того, что сечение воздушной линии (ВЛ) или номинальная мощность трансформатора не соответствуют экономичным условиям эксплуатации. С помощью рассмотренного метода составляется система уравнений следующего вида:

$$[Q_{KY}] \cdot [Y] = [X], \quad (4)$$

где $[Q_{KY}]$ – столбцовая матрица мощностей КУ, Мвар; $[Y]$ – квадратная матрица активных сопротивлений, Ом; $[X]$ – столбцовая матрица коэффициентов.

Каждое из уравнений системы (4) раскрывается следующим образом:

$$(E + \alpha)K_0 + c_0 T \left[- \sum_1^n \frac{R_{ij}(Q_{ij} - Q_{KYi})}{U^2} R_{ij} - \frac{2(Q_n - Q_{KY})}{U^2} R_{Tn} \right] = 0. \quad (5)$$

Введем коэффициент A для упрощения системы уравнений:

$$A = \frac{[(E + \alpha)K_0 + \Delta P_{y\partial} C_0] U^2}{2 c_0 T}.$$

Окончательно система имеет вид

$$\begin{cases} A_1 - \sum \left(Q_{ij} - \sum_{i=1}^n Q_{KYi} \right) R_{ij} - (Q_1 - Q_{KY1}) R_{T1} = 0; \\ \dots \\ A_n - \sum \left(Q_{ij} - \sum_{i=1}^n Q_{KYi} \right) R_{ij} - (Q_n - Q_{KYn}) R_{Tn} = 0. \end{cases} \quad (6)$$

Решение данной системы уравнений позволяет получить места и мощности КУ, максимально снижающие целевую функцию – Z .

После определения места установки и мощности КУ производится выбор числа и типа серийно выпускаемых КУ и рассчитывается его эффективность для рассматриваемого участка сети. Как уже было отмечено, КУ воздействуют на сеть в комплексе, увеличивая пропускную способность и разгружая элементы распределительной сети, но наиболее всеобъемлющим и важным параметром, подтверждающим эффективность КРМ, являются потери активной мощности (энергии).

Снижение потерь активной мощности в сети после установки КУ в i -м узле можно определить по выражению:

$$\begin{aligned} \delta \Delta P_i &= \Delta P_i - \Delta P_i^{KY} = \\ &= \frac{Q_{KYi} \left[\sum_{i=1}^n (2Q_{ij} - Q_{KYi}) R_{ij} + (2Q_i - Q_{KYi}) R_{Ti} \right]}{U^2}, \end{aligned} \quad (7)$$

где $\delta \Delta P_i$ – величина снижения активных потерь мощности от установки i -го КУ, МВт; U – напряжение источника питания ветви, полученное из расчета режима до КРМ, кВ.

Для подтверждения эффективности вложения инвестиций в КРМ необходим интегральный параметр, позволяющий определить срок возврата средств и возможную прибыль. Так как инвестирование мероприятий по КРМ производится одновременно (в течение одного года), то избран статический показатель – срок окупаемости [3]. По величине данного параметра принимается окончательное решение по установке этого устройства. Расчет срока окупаемости КУ производится по известной формуле:

$$T_{ок} = \frac{C_{KY}}{(\delta \Delta P - \Delta P_{KY} Q_{KY}) c_0 T}, \quad (8)$$

где C_{KY} – стоимость КУ, руб; ΔP_{KY} – удельные потери в КУ, в зависимости от их производителя (кВт/кВАр).

Таким образом, получив расчетные значения мест установки, мощности, а также эффективности КУ, производится их ранжирование по срокам закупки и монтажа.

На основе предложенной методики разработан алгоритм оптимальной КРМ для распределительных сетевых компаний в условиях неопределенности, который представлен в виде укрупненной блок-схемы на рис. 1.

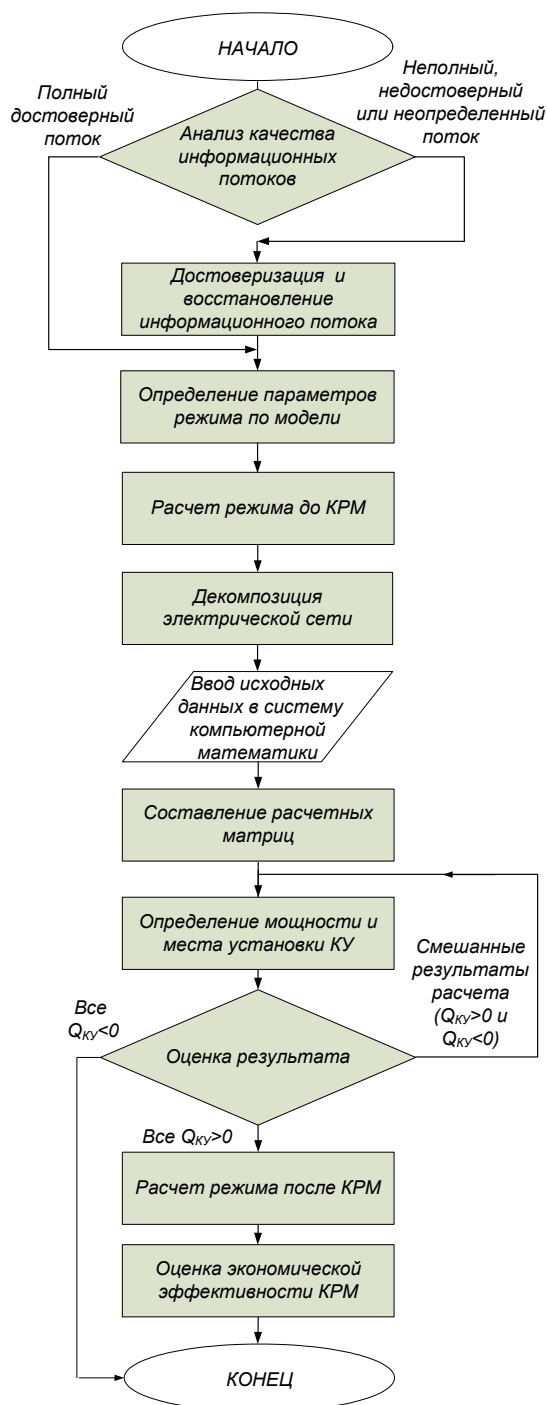


Рис. 1. Блок-схема алгоритма оптимальной КРМ

Поясняя предложенную блок-схему, необходимо отметить следующее: для потоков низкого качества первым шагом является их достоверизация в случае недостоверных потоков и восстановление в случае неполных потоков по методикам [1] и получение эквивалентных значений активной и реактивной мощностей, необходимых для КРМ.

Таким образом, исходная информация любого качества приводится к привычному виду для расчета установившихся режимов. Реализацию метода можно осуществлять с помощью систем компьютерной математики Mathcad и любых программ для расчета уста-

новившихся режимов (например, SDO-6 или RastrWin).

При составлении систем уравнений для множества схем была выявлена следующая зависимость, позволяющая составлять расчетные матрицы по топологии сети и направлению потоков реактивной мощности: главная диагональ матрицы [Y] состоит из активных сопротивлений от источника реактивной мощности до питающего узла (по реактивной мощности), остальные элементы матрицы равны параметрам элементов, на которые влияют смежные КУ; элементы матрицы [X] состоят из суммы А-коэффициента для рассматриваемого КУ и суммы произведений потока реактивной мощности по элементу и активного сопротивления, причем элементы, «входящие» в сумму, разгружаются за счет установки рассматриваемого КУ.

Пользуясь данным формальным признаком, составляются матрицы [X] и [Y].

Расчет оптимальной степени КРМ по предложенной методике продемонстрирован на примере части распределительной сети 110 кВ энергосистемы Приморского края, принадлежащей Дальневосточной распределительной сетевой компании. Граф сети 110 кВ приведен на рис. 2.

Данный участок выбран в виду его низкой наблюдаемости. Информационные потоки, используемые для КРМ, неполные, поэтому на первом этапе они восстанавливаются. В табл. 2 показаны восстановленные эквивалентные значения активной и реактивной мощностей, полученные по моделям [1].

По итогам расчета установившегося режима с помощью ПВК SDO-6 определено, что шины Артёмовской ТЭЦ являются источником активной мощности, а реактивная мощность стекает на них. Полный достоверный массив исходных данных по сети приведен в табл. 2.

Таблица 2. Исходные данные для расчета КУ

ПС		№ узла	P, кВт	Q, кВАр	tgφ до КРМ
Чайка	T1 35 кВ	23	14223	6969	0,49
	T2 35 кВ	24	3616	1772	0,49
	T1 6 кВ	21	3817	420	0,11
	T2 6 кВ	22	1320	30	0,03
Спутник	T2 35 кВ	34	10161	2333	0,23
	T1 6 кВ	31	4550	500	0,11
Пром-узел	T2 6 кВ	32	5970	1100	0,18
	T1 6 кВ	41	5707	1567	0,28
	T2 6 кВ	42	5153	1373	0,27

Исходя из значений коэффициентов реактивной мощности до КРМ (табл. 2), для данной схемы определено пять возможных узлов установки КУ – узлы 23, 24, 34, 41, 42.

Для участка сети (рис. 2), с учетом направления потока реактивной мощности от первого к пятому узлу, описанные матрицы имеют следующий вид:

$$Y = \begin{bmatrix} R_{12} + R_{2_23} & R_{12} & R_{12} \\ R_{12} & R_{12} + R_{2_24} & R_{12} \\ R_{12} & R_{12} & R_{12} + R_{23} + R_{3_34} \\ R_{12} & R_{12} & R_{12} + R_{23} \\ R_{12} & R_{12} & R_{12} + R_{23} \\ R_{12} & R_{12} & R_{12} \\ R_{12} + R_{23} & R_{12} + R_{23} \\ R_{12} + R_{23} + R_{34} + R_{4_41} & R_{12} + R_{23} + R_{34} \\ R_{12} + R_{23} + R_{34} & R_{12} + R_{23} + R_{34} + R_{4_42} \end{bmatrix}, \tag{9}$$

$$X = \begin{bmatrix} -A_{23} + Q_{12} R_{12} + Q_{23} R_{2_23} \\ -A_{24} + Q_{12} R_{12} + Q_{24} R_{2_24} \\ -A_{34} + Q_{12} R_{12} + Q_{23} R_{23} + Q_{23} R_{3_34} \\ -A_{41} + Q_{12} R_{12} + Q_{23} R_{23} + Q_{34} R_{34} + Q_{41} R_{4_41} \\ -A_{42} + Q_{12} R_{12} + Q_{23} R_{23} + Q_{34} R_{34} + Q_{42} R_{4_42} \end{bmatrix}. \tag{10}$$

Для подтверждения формального признака, предложенного для составления матриц, ниже приведена система уравнений, полученная по выше приведенной методике, для участка сети, изображенного на рис. 2:

$$\begin{cases} A_{23} - (Q_{12} - Q_{КУ23} - Q_{КУ24} - Q_{КУ34} - Q_{КУ41} - Q_{КУ42})R_{12} - (Q_{23} - Q_{КУ23})R_{2_23} = 0, \\ A_{24} - (Q_{12} - Q_{КУ23} - Q_{КУ24} - Q_{КУ34} - Q_{КУ41} - Q_{КУ42})R_{12} - (Q_{24} - Q_{КУ24})R_{2_24} = 0, \\ A_{34} - (Q_{12} - Q_{КУ23} - Q_{КУ24} - Q_{КУ34} - Q_{КУ41} - Q_{КУ42})R_{12} - (Q_{23} - Q_{КУ34} - Q_{КУ41} - Q_{КУ42})R_{23} - (Q_{34} - Q_{КУ34})R_{3_34} = 0, \\ A_{41} - (Q_{12} - Q_{КУ23} - Q_{КУ24} - Q_{КУ34} - Q_{КУ41} - Q_{КУ42})R_{12} - (Q_{23} - Q_{КУ34} - Q_{КУ41} - Q_{КУ42})R_{23} - (Q_{34} - Q_{КУ41} - Q_{КУ42})R_{34} - (Q_{41} - Q_{КУ41})R_{4_41} = 0, \\ A_{42} - (Q_{12} - Q_{КУ23} - Q_{КУ24} - Q_{КУ34} - Q_{КУ41} - Q_{КУ42})R_{12} - (Q_{23} - Q_{КУ34} - Q_{КУ41} - Q_{КУ42})R_{23} - (Q_{34} - Q_{КУ41} - Q_{КУ42})R_{34} - (Q_{42} - Q_{КУ42})R_{4_42} = 0. \end{cases} \tag{11}$$

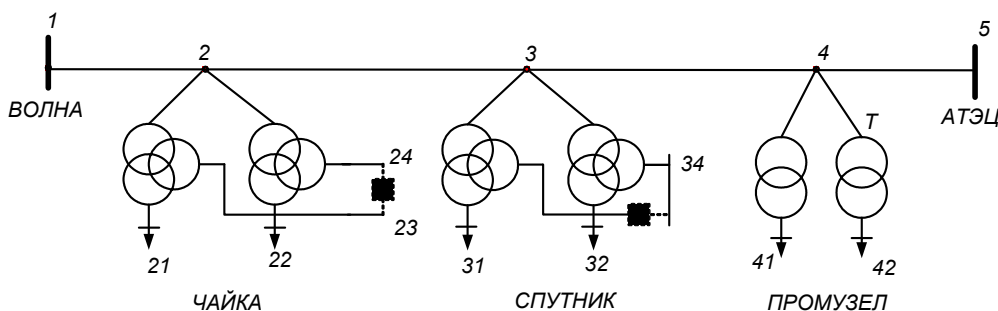


Рис. 2. Участок сети 110 кВ

В результате решения системы уравнений (4) определены следующие места и мощности КУ, Мвар:

$$\begin{pmatrix} Q_{КУ23} \\ Q_{КУ24} \\ Q_{КУ34} \\ Q_{КУ41} \\ Q_{КУ42} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2,624 \\ -1,635 \\ 2,927 \\ 1,561 \\ 1,599 \end{pmatrix}. \tag{12}$$

Так как один из пяти элементов результирующей матрицы получился отрицательным, производится вторая итерация расчета. При этом исключаются строки и столбцы исходных матриц, отражающие уравнение для отрицательного КУ. По итогам расчета второй итерации получают окончательные значения КУ, Мвар:

$$\begin{pmatrix} Q_{КУ23} \\ Q_{КУ34} \\ Q_{КУ41} \\ Q_{КУ42} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2,282 \\ 2,624 \\ 1,44 \\ 1,485 \end{pmatrix}. \tag{13}$$

Выбираются ближайшие к расчетным параметрам серийно выпускаемые КУ, производится расчет режима после компенсации для определения системного эффекта. Определяются снижение потерь активной мощности (энергии за год) и коэффициенты реактивной мощности после компенсации. Далее производится технико-экономическая оценка целесообразности установки КУ на каждой ПС по сроку окупаемости. Результаты расчета сведены в табл. 3.

Таблица 3. Результат выбора КУ по участку сети 110 кВ и оценка экономического эффекта

Место установки	$Q_{КУрасч.}$ Мвар	$Q_{КУфакт.}$ Мвар	$tg\phi$ после КРМ	$T_{ок.}$ лет
Чайка Т1 35 кВ	1,716	1,8	0,36	3,4
Спутник Т2 35 кВ	2,139	2,25	0,01	3,5
Промузел Т1 6 кВ	1,185	1,35	0,03	2,5
Промузел Т2 6 кВ	1,44	1,35	0,00	2,2

Анализ полученных результатов (табл. 3) показал, что $tg\varphi$ после КРМ в некоторых узлах близок к нулю, что свидетельствует о несоответствии принятых сечений ВЛ экономичному режиму работы (участки ВЛ выполнены проводом М-70 и АС-120).

С помощью описанной методики были оптимизированы потоки реактивной мощности в распределительных сетях 35–110 кВ Приморского края. Расчетный суммарный срок окупаемости по южному району данных сетей с учетом системного эффекта при одновременном внедрении составил 2 года, при этом общесистемный эффект оценивается в 5 млн руб. в год. В настоящее время в данном районе распределительных сетей осуществляется монтаж конденсаторных установок (по нашим рекомендациям).

Заключение

Разработанная методика КРМ для распределительных электрических сетей позволя-

ет в условиях информационных потоков низкого качества получать оптимальные значения КУ.

Выделение формального признака позволяет производить оптимизацию КРМ без составления систем уравнений, что значительно облегчает работу и сокращает время при формировании расчетной модели.

Произведенная формализация метода выбора оптимальной КРМ и предлагаемый алгоритм позволяют использовать общепринятые программные средства.

Список литературы

1. **Савина Н.В.** Системный анализ потерь электроэнергии в электрических распределительных сетях. – Новосибирск: Наука, 2008.
2. **Гамм А.З., Голуб И.И.** Сенсоры и слабые места в электроэнергетических системах. – Иркутск, 1996.
3. **Кожовников Н.Н., Чинакаева Н.С., Чернова Е.В.** Практические рекомендации по использованию методов оценки экономической эффективности инвестиций в энергосбережение: Пособие для вузов. – М.: Изд-во МЭИ, 2000.

Савина Наталья Викторовна,
Амурский государственный университет,
кандидат технических наук, декан энергетического факультета,
телефон (4162) 394-631,
e-mail: power@amursu.ru

Казакул Алексей Александрович,
Амурский государственный университет,
аспирант, ассистент кафедры энергетика,
телефон 8-924-670-67-80,
адрес: г. Благовещенск, ул. Партизанская, д. 22/2, кв. 39,
e-mail: 0311343@gmail.com