

УДК 621.311

DOI 10.46960/2658-6754\_2021\_1\_31

## МОДЕЛЬ ДИФФЕРЕНЦИРОВАННОГО ТАРИФА ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ РЕЖИМОМ ПОТРЕБЛЕНИЯ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ

**А.В. Кузнецов**

Ульяновский государственный технический университет  
Ульяновск, Россия  
kav2@ulstu.ru

**Д.А. Ребровская**

Ульяновский государственный технический университет  
Ульяновск, Россия  
diana-06-08@mail.ru

**В.В. Чикин**

Ульяновский государственный технический университет  
Ульяновск, Россия  
chikin\_vladislav@mail.ru

Стимулирующие тарифы давно и успешно широко применяются в мировой практике. В РФ базовый тариф на электроэнергию для потребителей является стимулирующим только для режима потребления активной мощности, который этим тарифом не управляется. Для расширения функциональных возможностей базового тарифа в части управления режимом потребления реактивной мощности предлагается его дифференцирование методом компенсационной составляющей.

Предложенная модель не требует изменений в действующую систему тарифообразования в РФ. Для использования модели требуется только дополнение системы тарифообразования новыми документами, связанными с расчетами и использованием стимулирующей части тарифа, а также его компенсационной составляющей. Предложена методика расчета стимулирующей части тарифа, включающая расчет устанавливаемого тарифа на потребляемую реактивную энергию, обеспечивающего доходность инвестиционного проекта установки компенсирующих устройств.

**Ключевые слова:** активная мощность, базовый тариф, компенсация реактивной мощности, коэффициент мощности, потребитель электроэнергии, реактивная мощность, стимулирующий тариф.

**Для цитирования:** Кузнецов А.В., Ребровская Д.А., Чикин В.В. Модель дифференцированного тарифа для управления режимом потребления реактивной мощности // Интеллектуальная Электротехника. 2021. № 1. С. 31-52. DOI: 10.46960/2658-6754\_2021\_1\_31

## MODEL OF DIFFERENTIATED TARIFF FOR CONTROL OF REACTIVE POWER CONSUMPTION

**A.V. Kuznetsov**

*Ulyanovsk State Technical University*  
Ulyanovsk, Russia  
kav2@ulstu.ru

**D.A. Rebrovskaya**

*Ulyanovsk State Technical University*  
Ulyanovsk, Russia  
diana-06-08@mail.ru

**V.V. Chikin**

*Ulyanovsk State Technical University*  
Ulyanovsk, Russia  
chikin\_vladislav@mail.ru

**Abstract.** Incentive tariffs are widely used in world practice. These tariffs have successfully fulfilled and are fulfilling their purpose, both in the past and at the present time. In the Russian Federation, the base tariff for electricity for consumers is stimulating only for the mode of consumption of active power. The mode of consumption of reactive power is not controlled by this tariff. To expand the functionality of the base rate, in terms of controlling the mode of consumption of reactive power, it is proposed to differentiate it by the method of the compensation component.

The proposed model does not require changes to the current tariff setting system in the Russian Federation. To use the model, it is only necessary to supplement the tariff setting system with new documents related to the calculations and use of the incentive part of the tariff and its compensatory component. A method for calculating the incentive part of the tariff is proposed, including the calculation of the established tariff for consumed reactive energy, which ensures the profitability of the investment project of installing compensating devices.

**Keywords:** active power, base tariff, electricity consumer, incentive tariff, power factor, reactive power, reactive power compensation.

**For citation:** A.V. Kuznetsov, D.A. Rebrovskaya and V.V. Chikin, "Model of differentiated tariff for control of reactive power consumption", *Smart Electrical Engineering*, no. 1, pp. 31-52, 2021. DOI: 10.46960/2658-6754\_2021\_1\_31

## 1. Режим потребления активной и реактивной мощности и его роль в формировании себестоимости производства и передачи электроэнергии

В электротехнической системе производства, передачи и потребления электроэнергии технологический процесс резко отличается от аналогичного для обычных товаров, где затраты определяются производителем. Затраты, связанные с передачей, в последнем случае определяются транспортной компанией и могут оптимизироваться за счет совершенствования организации производства, применения новых технологий и т.д. Особенность технологического процесса производства и передачи электроэнергии заключается в том, что на затраты, связанные с производством и передачей, влияют все участники процесса, в том числе, потребители электроэнергии. От того, как отличается интенсивность потребления электроэнергии в разное время суток, какие электроприемники использует потребитель, какова нагрузка электроприемников и т.п., зависят параметры режима потребления электроэнергии. Роль потребителя в регулировании режимов достаточно велика. Соответственно, велика и его роль в снижении затрат на производство и передачу электроэнергии.

Особенности процесса потребления электроэнергии вызывают характерные специфические затраты на строительство и содержание мощностей, обеспечивающих производство электроэнергии сверх необходимых среднесуточных значений, и требуют затрат на средства регулирования количества произведенной электроэнергии в соответствии с потреблением. Указанные затраты увеличивают себестоимость производства электроэнергии. Ее снижение невозможно без участия потребителей. Именно они определяют суточный график производства электроэнергии, который, как правило, имеет резко выраженный пиковый характер. Его выравнивание позволяет снизить стоимость производства электроэнергии. Степень равномерности суточного графика нагрузки характеризуется коэффициентом заполнения  $k_3$ , представляющим собой отношение потребленной электроэнергии к максимальной мощности, умноженной на время, равное 24 часам. Таким образом, себестоимость производства,  $b_{пр}$  зависит от коэффициента заполнения суточного графика [1]:

$$b_{пр} = F(k_3). \quad (1)$$

Потенциально регулируемым параметром режима потребления электроэнергии, определяющим значение  $k_3$  в (1), является мощность или электроэнергия, потребляемая в часы максимума нагрузки энергосистемы. Организационные мероприятия позволяют снижать потребление в часы максимума нагрузки энергосистемы за счет увеличения потребления в другие часы суток, т.е., увеличивать значение  $k_3$  и снижать значение  $b_{пр}$ .

Процесс передачи электроэнергии характеризуется коэффициентом мощности. Он представляет собой отношение потребляемой реактивной мощности к активной мощности. Электроприемники потребителей, наряду с активной мощностью, потребляют необходимую реактивную мощность из сети. Особенностью процесса передачи электроэнергии является возможность производить реактивную мощность непосредственно потребителями без особых затрат. В этом случае необходимость ее передачи по сетям электросетевой организации (ЭСО) отсутствует. Снижаются потери при передаче активной мощности как по сетям потребителя, так и по сетям ЭСО. Разгрузка сетей от передачи реактивной мощности дает возможность увеличения пропускной способности ЛЭП. Она производится с помощью специальных устройств компенсации реактивной мощности (КРМ), устанавливаемых в сети потребителя.

Для достижения максимального эффекта работа компенсирующих устройств должна быть синхронизирована с изменением нагрузки потребителя. В любой момент времени мощность компенсирующих устройств  $Q_k$ , подключенная к сети, должна соответствовать реактивной составляющей потребляемой мощности. Коэффициент мощности поддерживается на уровне нормативного значения [2]. В этом случае потери электроэнергии от источника энергии до места установки компенсирующих устройств минимальны, в противном случае они увеличиваются. Потребитель режимом работы своих компенсирующих устройств оказывает влияние на потери электроэнергии и себестоимость передачи электроэнергии  $b_{пер}$  [1]:

$$b_{пер} = dP(Q_k). \quad (2)$$

Потенциально регулируемые параметрами режима потребления реактивной мощности, определяющими значение  $Q_k$  в (2), являются: значение реактивной мощности в часы максимума нагрузки энергосистемы, потребляемая реактивная энергия в часы больших нагрузок, потребляемая реактивная энергия в часы малых нагрузок, генерируемая в сеть реактивная энергия. Установка в сети компенсирующих устройств и регулирование названных параметров снижает затраты на передачу электроэнергии.

## **2. Дифференцированные тарифы для управления режимом потребления активной мощности**

Несомненна необходимость привлечения потребителей к участию в регулировании режимов потребления активной и реактивной мощности [3]. Нужен специальный механизм. Рыночные взаимоотношения между сбытовыми организациями и потребителями, основанные на конкуренции, не обеспечивают привлечения потребителей к участию в регулировании режимов потребления активной и реактивной мощности. С точки зрения бизнеса, субъекты рынка не заинтересованы в этом: основной задачей коммерческой

организации является получение прибыли. Производителю безразличен режим потребления и передачи, ЭСО заинтересована в увеличении объема передачи электроэнергии. Регулирование режимов связано со снижением объемов производства и передачи, снижением тарифов на электроэнергию. Как производитель, так и ЭСО, не заинтересованы в снижении расхода невосполняемого запаса топлива, снижении потерь.

Для участия в режиме регулирования потребителю необходимы, прежде всего, материальные затраты: установка технических систем мониторинга электроэнергии по структурным подразделениям, установка и эксплуатация компенсирующих устройств. Реализация таких проектов возможна только на основании технико-экономического обоснования, привлечения инвесторов, реализации энергосервисных контрактов. У потребителя нет источника дохода от реализации таких проектов. Как потребитель должен реализовать невыгодный проект? При отсутствии каких-либо механизмов возврата потребителю вложенных средств привлечь потребителей к участию в регулировании режимов невозможно.

В силу изложенных обстоятельств, управление режимами потребления активной и реактивной мощности осуществляется государственными органами. Используется модель тарифообразования, технический регламент и правовые методы воздействия, с учетом этого создаются сложные стимулирующие тарифы. Целью их применения является создание выгодных условий для потребителя, участвующего в регулировании режима. Регулируемый параметр может изменяться потребителем организационными, административными и техническими средствами. Регулируя значение параметра, потребитель уменьшает оплату за электроэнергию. Большая плата за электроэнергию обеспечивается для тех потребителей, которые не принимают участие в регулировании параметров режима, меньшая плата – для потребителей, участвующих в регулировании режимов. Стимулирующие тарифы широко применяются в мировой практике.

Примером тарифа, стимулирующего участие потребителя в регулировании режима потребления активной мощности, служит двухставочный тариф. Он успешно используется в РФ на протяжении длительного периода времени. Регулируемым параметром в тарифе является мощность, потребляемая в часы максимума нагрузки энергосистемы. Потребителю предоставляется возможность снижать потребление мощности при неизменном потреблении электроэнергии за счет выравнивания графика нагрузки или смещения максимума на другие часы суток. При этом повышается значение коэффициента заполнения суточного графика нагрузки  $k_{\text{зап}}$ . Если предположить, что коэффициент заполнения суточного графика  $k_{\text{зап}}$  в течение месяца одинаковый, среднемесячный абонентский тариф  $C_{\text{аб}}$ , руб/кВт·ч при оплате электроэнергии по двухставочному тарифу будет составлять:

$$C_{аб} = \frac{C_m}{k_{зап} \cdot T} + C_3, \quad (3)$$

где  $C_m$  – ставка тарифа за мощность, руб/кВт в месяц;  $C_3$  – ставка тарифа за электроэнергию, руб/кВт·ч;  $T$  – время расчетного периода в часах (число часов в месяце).

Ставка тарифа за мощность определяет значение стимулирующей части тарифа. Например, при увеличении  $k_{зап}$  с 0,25 до 1 средний тариф уменьшается более чем наполовину. Эффективность воздействия двухставочного тарифа достаточно высокая. Другим стимулирующим тарифом является тариф, дифференцированный по зонам суток. Его эффективность обеспечивается повышенной ставкой за потребленную электроэнергию в часы максимума нагрузки энергосистемы. Значение тарифа определяется как:

$$C_{аб} = C_{3,1} \cdot d_1 + C_{3,2} \cdot d_2 + C_{3,3} \cdot d_3, \quad (4)$$

где  $C_{3,1}$ ,  $C_{3,2}$ ,  $C_{3,3}$  – ставки тарифа за электроэнергию по зонам суток (пиковая, полупиковая, ночная зона), руб/кВт·ч;  $d_1$ ,  $d_2$ ,  $d_3$  – доля потребленной электроэнергии по зонам суток ( $d_1 + d_2 + d_3 = 1$ ).

Повышенная ставка тарифа в пиковые часы нагрузки энергосистемы и пониженная ставка в ночные часы стимулирует потребителя снижать потребляемую мощность в часы максимума нагрузки энергосистемы и увеличивать  $k_{зап}$ . Функции (3, 4) представляют собой базовый тариф:

$$C_{аб} = C_{баз}. \quad (5)$$

Он рассчитывается на основании действующей системы тарифообразования. Тариф является индивидуальным и стимулирующим для каждого потребителя. Утверждаемые тарифные ставки являются управляющими факторами.

### 3. Дифференцированный тариф для управления режимом потребления реактивной мощности

К сожалению, в настоящее время действующая система тарифообразования не предусматривает дифференцирование тарифа на составляющие, связанные с передачей потребителю реактивной мощности. Работы по дифференцированию базового тарифа на составляющие ведутся [4, 5]. Они связаны с созданием новой модели тарифообразования и являются важными и необходимыми как с теоретической, так и с эмпирической точек зрения. Практического применения эти разработки пока не получили.

Попытки управления режимом потребления реактивной мощности в сети потребителя посредством скидок и надбавок к базовому тарифу имели место в РФ на рубеже перехода к рыночной экономике [6]. Впоследствии скидки (надбавки) были отменены как не соответствующие действующему

законодательству [7]. В настоящее время уровни реактивной мощности в электроэнергетической системе регулируются техническим регламентом [2]. Применение повышающих коэффициентов к базовому конечному тарифу для потребителя предусмотрено в [8, п. 16] и [9]. Однако действие [9] фактически приостановлено [10]. Применение надбавки к конечному тарифу в виде повышающего коэффициента трактуется потребителем как оплата передаваемой ему реактивной мощности сверх нормативных значений. При этом потребитель уже оплатил эту услугу в базовом конечном тарифе. Двойная оплата одной и той же услуги отрицает правомерность применения повышающих коэффициентов [11]. Взимание платы за передачу сверхнормативных значений реактивной мощности в виде надбавки может не вызывать сомнения, если базовый тариф не будет включать в себя эту оплату. Это возможно при дифференцировании базового тарифа на составляющие, одна из которых будет стимулирующей, учитывающей затраты сетевой организации на передачу потребителю сверхнормативных значений реактивной мощности.

На практике до настоящего времени механизм стимулирования потребителей отсутствует [10]. Потребители не устанавливают компенсирующие устройства, потери в электроэнергетической системе возрастают. Есть необходимость вернуться к обозначенной теме [12].

#### **4. Классическая схема разложения базового тарифа на необходимые составляющие**

Классическая схема разложения базового тарифа на необходимые составляющие, обеспечивающие регулирование режима потребления реактивной мощности, представлена на рис. 1. Базовый тариф на электроэнергию является довольно сложным и содержит затраты на производство электроэнергии и на ее передачу, которые включают в себя затраты на содержание электрических сетей, оплату потерь электроэнергии, возникающих при ее передаче, затраты на диспетчерские услуги и бытовую надбавку. На рис. 1 базовый абонентский тариф на производство и передачу активной и реактивной энергии разложен на составляющие. Первая составляющая связана с затратами на производство электроэнергии, вторая – с затратами на передачу активной и реактивной энергии до нормативных значений, третья составляющая представляет усредненные затраты на передачу сверхнормативных значений реактивной энергии всеми потребителями ЭСО. Она разлагается на ряд составляющих для каждого конкретного потребителя, являющихся стимулирующей частью базового тарифа.

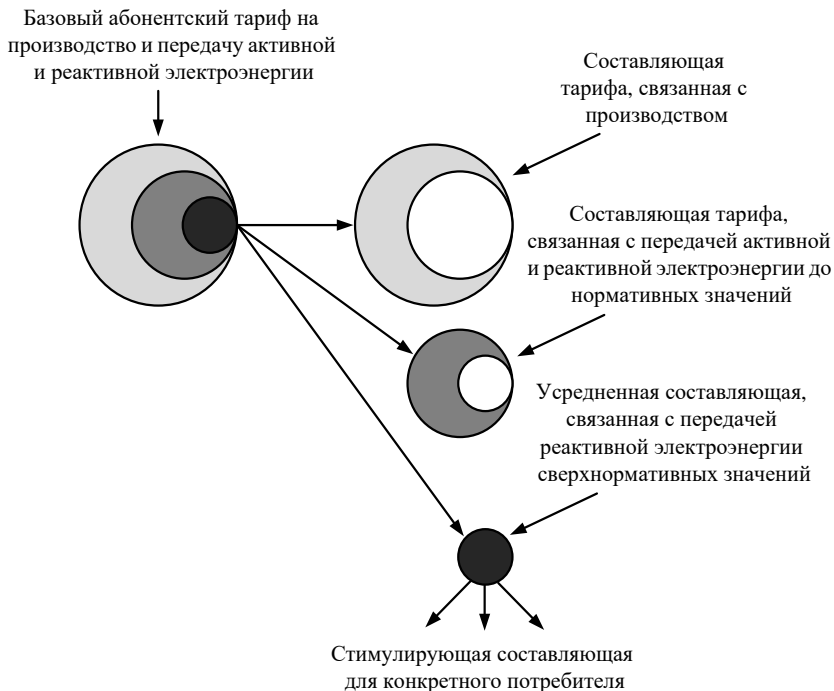


Рис. 1. Традиционный метод дифференцирования тарифа

Fig. 1. Traditional method of tariff differentiation

Определение значений составляющих связано с большими трудностями. Составляющие, связанные с передачей реактивной энергии, растворяются в базовом тарифе. Их значения невозможно определить без пересмотра системы тарифообразования. Однако замена системы тарифообразования на новую – процесс сложный, с возможными непредсказуемыми проблемами. Он требует времени, соответствующей ситуации, например, когда имеющаяся система тарифообразования потеряет эффективность и будет непригодна для дальнейшего использования. Система тарифообразования содержит методики расчета двухставочного тарифа и тарифа, дифференцированного по зонам суток. Эти методики долгое время совершенствовались, прошли проверку временем, успешно используются на практике.



## 5. Схема разложения базового тарифа методом компенсационной составляющей

Авторами предлагается не ломать кардинально систему тарифообразования и не менять методики расчета базового тарифа. Путь решения поставленной задачи представлен на рис. 2.

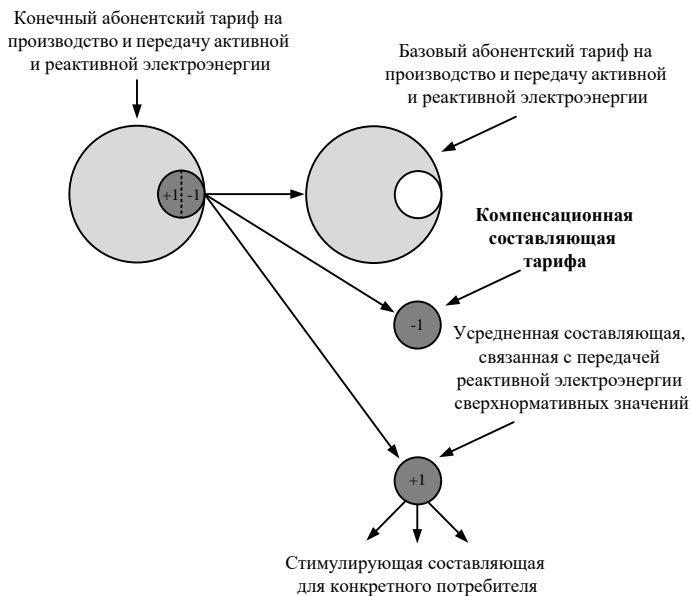


Рис. 2. Дифференцирование тарифа методом компенсационной составляющей

Fig. 2. Differentiation of the tariff using the compensation component method

Целесообразно оставить базовый тариф без изменения и рассматривать его как одну из составляющих формулы конечного абонентского тарифа. Второй составляющей является та, которая связана с усредненными затратами на передачу реактивной энергии сверх нормативных значений всем потребителям ЭСО. Она разлагается на ряд составляющих, представляющих стимулирующую часть тарифа для каждого конкретного потребителя. Очевидно, что их сумма превышает значение базового тарифа, и необходимо ее сбалансировать дополнительным слагаемым с отрицательным

знаком. Его можно назвать компенсационной составляющей тарифа, значение которой принимается равным значению второй составляющей связанной с усредненными затратами на передачу реактивной энергии сверх нормативных значений всем потребителям ЭСО.

Регулируемым параметром в тарифе удобнее всего принять значение реактивной энергии, потребляемой сверхнормативных значений. В настоящее время нормативное значение определяется значением предельного  $\text{tg}\varphi$  [2]. Составляющую тарифа, связанную с усредненными затратами на передачу реактивной энергии сверхнормативных значений всем потребителям ЭСО, можно представить как:

$$C_{\text{аб,пер,}Q} = C_{W,Q} \cdot \frac{\sum_1^n \Delta W_{Q,i}}{\sum_1^n W_{P,i}}, \quad (6)$$

где  $C_{W,Q}$  – тариф на потребляемую за расчетный период реактивную энергию  $W_{Q,i}$ , руб/квар·ч;  $W_{P,i}$  – потребляемая за расчетный период активная энергия, кВт;  $\Delta W_{Q,i}$  – превышение фактически потребляемой за расчетный период реактивной энергии  $W_{\phi,i}$  над нормируемым значением  $W_{\text{норм},i}$ , квар:

$$\Delta W_{Q,i} = W_{\phi,i} - W_{\text{норм},i}. \quad (7)$$

Значение потребляемой реактивной энергии  $W_{\phi,i}$  определяется по приборам учета. На рис. 3 представлено дифференцирование базового тарифа на составляющие. Составляющая (6) базового тарифа представляется затратами, связанными исключительно с передачей сверхнормативных значений реактивной энергии. Вторая составляющая тарифа определяется по остаточному принципу. Ее можно трактовать как не связанную с затратами на передачу сверхнормативных значений реактивной мощности:

$$C_{\text{аб,ОСТ}} = C_{\text{баз}} - C_{\text{аб,пер,}Q}. \quad (8)$$

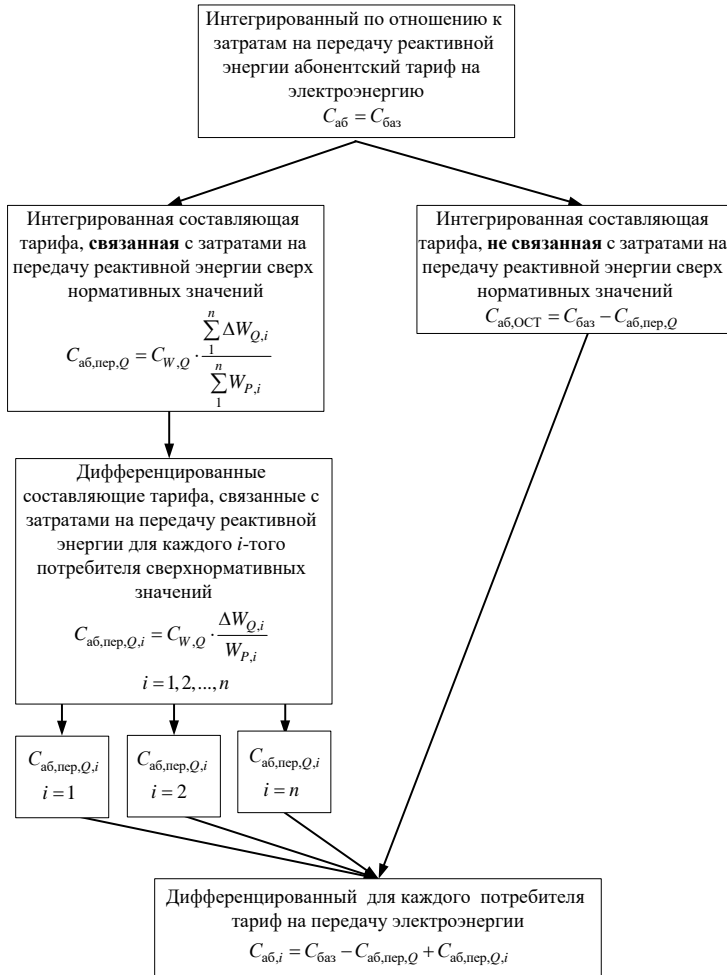


Рис. 3. Дифференцирование базового тарифа на составляющие

Fig. 3. Differentiation of the base tariff into components

Очевидно, что составляющая (6) не обладает управляющим эффектом для каждого из потребителей, ее необходимо дифференцировать в пределах ЭСО.

### 6. Дифференцирование тарифа на передачу сверхнормативных значений реактивной электроэнергии между потребителями

Составляющая (6) базового тарифа может быть дифференцирована для каждого потребителя ЭСО следующим образом. Определяется доход ЭСО  $D_1$  от применения (6):

$$D_1 = C_{W,Q} \cdot \frac{\sum_1^n \Delta W_{Q,i}}{\sum_1^n W_{P,i}} \cdot \sum_1^n W_{P,i} = C_{W,Q} \cdot \sum_1^n \Delta W_{Q,i}. \quad (9)$$

Полученное значение дохода распределяется между потребителями ЭСО:

$$D_i = C_{W,Q} \cdot \Delta W_{Q,i}. \quad (10)$$

Тогда стимулирующая часть тарифа для каждого потребителя будет равна:

$$C_{аб,пер,Q,i} = C_{W,Q} \cdot \sum_1^n \frac{\Delta W_{Q,i}}{W_{P,i}}. \quad (11)$$

Сумма дохода от применения стимулирующей части тарифа:

$$D_2 = C_{W,Q} \cdot \sum_1^n \frac{\Delta W_{Q,i}}{W_{P,i}} \cdot W_{P,i} = C_{W,Q} \cdot \sum_1^n \Delta W_{Q,i}. \quad (12)$$

Равенство доходов (9) от применения (6) и дохода (12) от применения (11) подтверждают корректность дифференцирования составляющей тарифа (6). Далее, при сложении двух составляющих  $C_{аб,пер,Q,i}$  и  $C_{аб,пер,ост}$  тарифа после простейших математических преобразований получим выражения для дифференцированного тарифа, включающего в себя стимулирующую составляющую  $C_{аб,пер,Q,i}$  для каждого потребителя ЭСО:

$$C_{аб,i} = C_{баз} - C_{аб,пер,Q} + C_{аб,пер,Q,i}. \quad (13)$$

### 7. Анализ формулы дифференцированного тарифа для управления режимом потребления реактивной мощности

В (13):  $C_{\text{баз},i}$  – базовая составляющая тарифа, представляющая собой действующий тариф за электроэнергию для потребителя. Он может быть одноставочным, двухставочным, дифференцированным по зонам суток.  $C_{\text{баз},i}$  рассчитывается, утверждается и применяется в соответствии с действующими нормативными документами на розничном рынке. Этот тариф отражает затраты на производство и передачу электроэнергии как активной, так и реактивной. Он включает оплату передачи реактивной энергии как до нормативных значений, так и превышений до фактических значений, затраты на диспетчерские услуги и сбытовую надбавку.  $C_{\text{аб,пер},Q,i}$  – это стимулирующая составляющая, представляющая собой оплату превышения потребления реактивной энергии за расчетный период каждым потребителем.

$$O_{W,Q,i} = C_{\text{аб,пер},Q,i} \cdot W_{P,i} = C_{W,Q} \cdot \Delta W_{Q,i} = d_{1,i} \cdot C_{W,Q} \cdot \sum_1^n \Delta W_{Q,i}, \quad (14)$$

где  $d_{1,i} = \frac{\Delta W_{Q,i}}{\sum_1^n \Delta W_{Q,i}}$  – доля превышения нормативного значения реактивной

энергии  $i$ -тым потребителем ЭСО,  $\sum_1^n d_{1,i} = 1$ .

Стимулирующая составляющая  $C_{\text{аб,пер},Q,i}$  тарифа индивидуальна для каждого потребителя. Оплата по ней зависит от установленного тарифа на передачу реактивной энергии  $C_{W,Q}$  и объема превышения потребляемой реактивной энергии над нормативным значением  $\Delta W_{Q,i}$ . Она может быть уменьшена в результате установки компенсирующих устройств в системе электроснабжения потребителя до нулевого значения. Этим достигается управляющий эффект, стимулирующий потребителя участвовать в регулировании режима потребления реактивной мощности. Для ЭСО эта оплата представляется доходом, сумма которого составляет:

$$\sum_1^n O_{W,Q,i} = C_{\text{аб,пер},Q} \cdot \sum_1^n W_{P,i} = C_{W,Q} \cdot \sum_1^n \Delta W_{Q,i}. \quad (15)$$

Очевидно, что доход (15) предусмотрен в базовом тарифе  $C_{\text{аб,баз}}$  и оплачивается потребителем. Применение же (11) дополнительно к базовому тарифу связано с повторной оплатой услуги по передаче реактивной мощности. Это недопустимо и противоречит здравому смыслу. Чтобы не допустить этого, предусматривается компенсационная составляющая тарифа.  $C_{\text{аб,пер},Q}$  – компенсационная составляющая тарифа (отрицательный тариф). Ее связь с тарифом  $C_{\text{аб,пер},Q,i}$  выражается следующим соотношением:

$$\frac{C_{\text{аб,пер},Q,i}}{C_{\text{аб,пер},Q}} = \frac{d_{1,i}}{d_{2,i}}, \quad (16)$$

где  $d_{2,i} = \frac{W_{P,i}}{\sum_1^n W_{P,i}}$  – доля потребления  $i$ -тым потребителем ЭСО активной

электроэнергии,  $\sum_1^n d_{2,i} = 1$ .

Оплата по составляющей  $C_{\text{аб,пер},Q}$  тарифа предусмотрена как бы потребителю от ЭСО. Возврат части дохода от применения  $C_{\text{аб,пер},Q,i}$ . Эта часть определяется долевым участием потребителя в потреблении активной электроэнергии.

$$O_{W,Q,i} = C_{\text{аб,пер},Q} \cdot W_{P,i} = C_{W,Q} \cdot \sum_1^n \Delta W_{Q,i} \cdot d_{2,i}, \quad (17)$$

Сложив доходы каждого потребителя от ЭСО, получим значение компенсации:

$$\sum_1^n O_{W,Q,i} = C_{W,Q} \cdot \sum_1^n \Delta W_{Q,i} \cdot \sum_1^n d_{2,i} = C_{W,Q} \cdot \sum_1^n \Delta W_{Q,i}. \quad (18)$$

Отсюда следует, что компенсационная составляющая полностью обеспечивает компенсацию доходов ЭСО, полученных от применения  $C_{\text{аб,пер},Q,i}$  (11).

Выражение  $C_{\text{аб},P,i} = C_{\text{баз}} - C_{\text{аб,пер},Q}$  представляет оплату производства и передачи активной и реактивной электроэнергии, но только до нормативных значений всеми потребителями ЭСО. Эта часть тарифа вычислена по остаточному принципу. Она могла бы быть утверждаемым тарифом для потребителей вместо  $C_{\text{баз}}$ . В таком случае компенсационная составляющая не будет отражаться в тарифе, однако это связано с рядом неудобств. Одно из них – утверждение тарифа, отличного от базового. Каким образом уменьшить тариф, если он двухставочный или дифференцированный по зонам суток? Требуется пересмотр методики расчета базового тарифа, т.е., некоторые изменения в систему тарифообразования, хотя бы частичные.

Другой вариант: компенсационная составляющая тарифа должна присутствовать в тарифе для потребителей, наряду с базовой и оплатой, потребляемой сверхнормативных значений реактивной энергии. При применении такого тарифа необходимо разъяснить потребителям и общественности физический смысл всех его составляющих. Базовый тариф в разъяснениях не нуждается. Стимулирующую составляющую можно трактовать как надбавку к базовому тарифу за потребление сверхнормативных значений

реактивной энергии. Тогда компенсационная составляющая может трактоваться как скидка к базовому тарифу за участие в регулировании режима реактивной мощности в электроэнергетической системе. Она представляет собой возврат части дохода ЭСО каждому потребителю от применения надбавок к тарифу.

В данном случае в систему тарифообразования потребуется внести некоторые дополнения, связанные с надбавками и скидками. Тарифы  $C_{аб,пер,Q,i}$  и  $C_{аб,пер,Q}$  должны рассчитываться и утверждаться государственными органами регулирования тарифов на региональном уровне (ранее – Региональная энергетическая комиссия, Региональная служба по тарифам, ныне – Департамент по регулированию цен и тарифов) подобно базовому тарифу. При этом региональные органы регулирования должны руководствоваться методикой расчета  $C_{аб,пер,Q,i}$  и  $C_{аб,пер,Q}$ , которая разрабатывается и утверждается органами регулирования тарифов на федеральном уровне (Федеральная энергетическая комиссия, Федеральная служба по тарифам, ныне – Федеральная антимонопольная служба).

Региональным органом, наряду с утверждением базового тарифа, утверждается значение  $C_{аб,пер,Q}$  и методика расчета  $C_{аб,пер,Q,i}$  для потребителей региона на период регулирования. Расчеты за потребление электроэнергии ведутся по традиционной установившейся схеме с энергоснабжающей организацией (гарантирующий поставщик, сбытовая организация и т.д.) по составляющим тарифа, включающим в себя базовый тариф,  $C_{аб,пер,Q,i}$  и  $C_{аб,пер,Q}$ . Необходимые для расчета  $C_{аб,пер,Q,i}$  и  $C_{аб,пер,Q}$  значения потребленной активной и реактивной мощности и энергии определяются по приборам коммерческого учета.

Указанные дополнения не требуют изменения структуры тарифообразования, методики расчета и механизма применения базового тарифа на практике. Данный вариант является более предпочтительным. Немаловажным для стимулирующего эффекта является значение стимулирующей составляющей тарифа.

## **8. Расчет значения стимулирующей составляющей дифференцированного тарифа**

Степень эффективности управляющего воздействия на потребителя в части установки компенсирующих устройств определяется значением стимулирующей составляющей тарифа (11). Ее же значение напрямую зависит от устанавливаемого значения тарифа на потребляемую реактивную энергию  $C_{w,Q}$ . Именно эта величина является управляющим фактором, обеспечивающим стимулирующий эффект [13]. Он обеспечивается, если срок окупаемости инвестиционного проекта установки компенсирующих устройств будет приемлемым для инвестора. В период плановой экономики

нормативный срок окупаемости составлял 8 лет. В настоящее время для инвестора приемлемым сроком окупаемости можно считать срок не более 3 лет. Срок окупаемости проекта установки компенсирующих устройств для ЭСО в целом можно определить следующим образом:

$$T_{\text{ок}} = \frac{\sum_1^n I_{\text{КУ}}}{C_{W,Q} \cdot \sum_1^n \Delta W_{Q,\text{год}} - \sum_1^n I_{\text{ЭКСПЛ}}}, \quad (19)$$

где  $\sum_1^n I_{\text{КУ}}$  – инвестиции в установку компенсирующих устройств, мощность которых  $\sum_1^n Q_{\text{КУ}}$  обеспечивает компенсацию реактивной энергии у потребителей до нормативных значений, руб;  $\sum_1^n I_{\text{ЭКСПЛ}}$  – эксплуатационные издержки на обслуживание компенсирующих устройств, руб/год.

Из (19) получаем:

$$C_{W,Q} = \frac{\sum_1^n I_{\text{КУ}}}{T_{\text{ок}} \cdot \sum_1^n \Delta W_{Q,\text{год}}} + \frac{\sum_1^n I_{\text{ЭКСПЛ}}}{\sum_1^n \Delta W_{Q,\text{год}}}. \quad (20)$$

Тариф на реактивную энергию включает в себя инвестиции. Они могут определяться из следующих соображений: это мощность, обеспечивающая КРМ в ЭСО до нормативных значений. Очевидно, что в часы максимума нагрузки энергосистемы потребляемая реактивная мощность достигает максимальных значений. Для ее компенсации до нормативных значений требуется определенная мощность компенсирующих устройств. Такая мощность и должна быть установлена в ЭСО и распределена среди потребителей. Эта мощность в другие часы суток может регулироваться в соответствии с потреблением реактивной мощности путем отключения части конденсаторных батарей. Необходимая мощность компенсирующих устройств в ЭСО определяется следующим образом.

Ставится задача скомпенсировать реактивную электроэнергию до нормативного значения. При этом потребуются компенсирующие устройства, суммарная мощность которых в ЭСО определяется как:

$$\sum_1^n Q_{\text{КУ}} = \sum_1^n Q_{\text{МАКС}} - \sum_1^n Q_{\text{НОРМ}} = \sum_1^n P_{\text{М}} \cdot \text{tg}\varphi_{\text{ф}} - \sum_1^n P_{\text{М}} \cdot \text{tg}\varphi_{\text{НОРМ}}. \quad (21)$$



Для определения инвестиций или стоимости компенсирующих устройств, суммарная мощность которых составляет  $\sum_1^n Q_{KV}$ , удобно пользоваться удельной стоимостью компенсирующих устройств  $\alpha$  (руб/квар). Во времена плановой экономики этот показатель широко использовался для экономических расчетов. В настоящее время при свободных ценах на товарную продукцию этот показатель не является постоянным и изменяется в соответствии с конъюнктурой рынка. Тем не менее, он может быть определен и корректироваться с течением времени. При использовании этого показателя инвестиции в компенсирующие устройства можно определить следующим образом:

$$\sum_1^n I_{KV} = \alpha \cdot \sum_1^n Q_{KV}. \quad (22)$$

Эксплуатационные расходы приближенно могут быть оценены процентным соотношением к инвестициям, например, равным 10 % от стоимости компенсирующих устройств. Тогда:

$$C_{W,Q} = \frac{1,1 \cdot \alpha \cdot \sum_1^n Q_{KV}}{T_{ок} \cdot \sum_1^n \Delta W_{Q,год}}. \quad (23)$$

Полученное значение обеспечивает значительный стимулирующий эффект.

## 9. Выводы

Особенности технологии производства и передачи электроэнергии требуют активного участия в этом процессе потребителей, что обеспечивается использованием стимулирующих тарифов, технического регламента и правовых методов воздействия. Стимулирующие тарифы широко применяются в мировой практике. Примером служит двухставочный тариф и тариф, дифференцированный по зонам суток, применяемые давно и успешно.

К сожалению, в РФ базовый тариф на электроэнергию для потребителей является стимулирующим только для режима потребления активной мощности. Режим потребления реактивной мощности этим тарифом не управляется. Для расширения функциональных возможностей базового тарифа, в части управления режимом потребления реактивной мощности, предлагается его дифференцирование методом компенсационной составляющей.

Получена модель дифференцированного тарифа, обладающая стимулирующим эффектом для потребителей как в части режима потребления активной мощности, так и в части реактивной мощности. Она основана на разложении базового тарифа методом компенсационной составляющей, по этой причине не требует изменений в действующую систему тарифообразования в РФ. Для использования модели требуется только дополнение системы тарифообразования новыми документами, связанными с расчетами и использованием стимулирующей части тарифа, а также его компенсационной составляющей.

Предложена методика расчета стимулирующей части тарифа, включающая в себя расчет устанавливаемого тарифа на потребляемую реактивную энергию, обеспечивающего доходность инвестиционного проекта установки компенсирующих устройств.

*Работа выполняется при финансовой поддержке РФФИ (договор № 18-48-730025/18 от 11.06. 2018 г.)*

© Кузнецов А.В., 2021

© Ребровская Д.А., 2021

© Чикин В.В., 2021

*Поступила в редакцию 03.03.2021*

*Received 03.03.2021*

### **Библиографический список**

- [1] Кузнецов А.В., Магазинник Л.Т. Повышение эффективности функционирования устройств управления передачей электроэнергии в системах электроснабжения потребителей. Ульяновск: УлГТУ, 2013. – 144 с.
- [2] 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. N 380 // СПС Консультант Плюс. [Электронный ресурс]. URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001201507270034> (дата обращения 01.02.2021).
- [3] Воротников В.Э., Жабин К.В., Колибаба В.И. Сравнительный анализ управления реактивной мощностью на электроэнергетических рынках зарубежных стран и России // Электрические станции. 2020. № 5 (1066). С. 8-19.
- [4] Бартоломей П.И., Паздерин А.А., Паздерин А.В. Направления совершенствования системы оплаты услуг на передачу электроэнергии с учетом международного опыта // Электроэнергия. Передача и Распределение, 2019. № 5 (56). С. 66-71.

- [5] Паздерин А.В., Шевелев И.В., Паздерин А.А., Морозенко Н.А. Надбавки и скидки к тарифам на передачу электроэнергии // Электроэнергия. Передача и распределение. 2018. №5 (50). С. 38-43.
- [6] Правила применения скидок и надбавок к тарифам на электрическую энергию за потребление и генерацию реактивной энергии // Промышленная энергетика. 1998. № 10. С. 43-52.
- [7] О правомерности применений положений Инструкции о порядке расчетов за электрическую и тепловую энергию, утвержденной Госкомцен и Минтопэнерго России 30 ноября 1993 г. (№ 01-17/1443-11, ВК-7539). Информационный бюллетень Федеральной энергетической комиссии Российской Федерации, 2000, 13 июня. № 11.
- [8] Об утверждении Правил недискриминационного доступа к услугам по передаче электрической энергии и оказания этих услуг, Правил недискриминационного доступа к услугам по оперативно-диспетчерскому управлению в электроэнергетике и оказания этих услуг, Правил недискриминационного доступа к услугам администратора торговой системы оптового рынка и оказания этих услуг и Правил технологического присоединения энергопринимающих устройств потребителей электрической энергии, объектов по производству электрической энергии, а также объектов электросетевого хозяйства, принадлежащих сетевым организациям и иным лицам, к электрическим сетям. Постановление Правительства РФ от 27.12.2004 N 861 (ред. от 02.03.2021) [Электронный ресурс]. URL: [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_51030/](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_51030/) (дата обращения 02.03.2021).
- [9] Об утверждении Методических указаний по расчету повышающих (понижающих) коэффициентов к тарифам на услуги по передаче электрической энергии в зависимости от соотношения потребления активной и реактивной мощности для отдельных энергопринимающих устройств (групп энергопринимающих устройств) потребителей электрической энергии, применяемых для определения обязательств сторон по договорам об оказании услуг по передаче электрической энергии по единой национальной (общероссийской) электрической сети (договорам энергоснабжения). Приказ ФСТ России от 31.08.2010 №219-э/6 (ред. от 31.08.2010). [Электронный ресурс]. URL: <https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=1&documentId=165067> (дата обращения 02.03.2021).
- [10] Воротицкий В.Э. Энергетическая эффективность и компенсация реактивной мощности в электрических сетях. Проблемы и пути решения // Энергосовет. 2017. №1 (47). С. 44-53.
- [11] Кузнецов А.В., Аргентова И.В. Правовые аспекты применения повышающих коэффициентов к тарифам за потребление реактивной энергии // Промышленная энергетика. 2013. № 3. С. 17-20.
- [12] Кузнецов А.В., Чикин В.В., Ребровская Д.А. Модель формирования стимулирующего тарифа для управления потоками реактивной мощности и качеством электроэнергии // Электроэнергия. Передача и Распределение. 2021. №1 (64). С. 16-22.

- [13] Кузнецов А.В., Ребровская Д.А. Уточнение методики оценки финансовой эффективности установки компенсирующих устройств в сети потребителя // Вестник Ульяновского государственного технического университета. 2017. № (79). С. 51-56.

### References

- [1] A.V. Kuznetsov and L.T. Magazinnik, *Povyshenie effektivnosti funkcionirovaniya ustrojstv upravleniya peredachej elektroenergii v sistemah elektrosnabzheniya potrebitelej* [Increasing of the efficiency of the electric energy transfer control devices in the systems of the consumers' electric supply]. Ulyanovsk: Ulyanovsk State Technical University, 2013 (in Russian).
- [2] “O Poryadke rascheta znachenij sootnosheniya potrebleniya aktivnoj i reaktivnoj moshchnosti dlya otdel'nyh energoprinyimayushchih ustrojstv (grupp energoprinyimayushchih ustrojstv) potrebitelej elektricheskoy energii [About the procedure for calculating the ratio of the consumption of active and reactive power for individual energy receivers (groups of energy receivers) of consumers of electric energy]”. Order of the Ministry of Energy of the Russian Federation of June 23, 2015 N 380. [Online]. Available at: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001201507270034> [Accessed: Feb. 1, 2021] (in Russian).
- [3] V.E. Vorotnitskii, K.V. Zhabin and V.I. Kolibaba, “Comparative analysis of reactive power control in the electric power markets of foreign countries and Russia”, *Electrical Stations*, no. 5 (1066), pp. 8-19, 2020.
- [4] P.I. Bartolomej, A.A. Pazderin and A.V. Pazderin, “Directions of improving the electric energy transmission tariff system taking into account international experience”, *Electric Power. Transmission and Distribution*, no. 5 (56), pp. 66-71, 2019.
- [5] A.V. Pazderin, I.V. Shevelev, A.A. Pazderin, N.A. Morozenko, “Surcharges and discounts on electricity transmission tariffs”, *Electric Power. Transmission and Distribution*, no. 5 (50), pp. 38-43, 2018.
- [6] “Pravila primeneniya skidok i nadbavok k tarifam na elektricheskuyu energiyu za potreblenie i generaciyu reaktivnoj energii [Rules for the application of discounts and surcharges to tariffs for electric energy for the consumption and generation of reactive energy]”, *Industrial Power Engineering*, no. 10, pp. 43-52, 1998 (in Russian).
- [7] “O pravomernosti primenenij polozhenij Instrukcii o poryadke raschetov za elektricheskuyu i teplovuyu energiyu, utverzhdennoj Goskomcen i Mintopenergo Rossii 30 Noyabrya 1993 g. (N 01-17/1443-11, VK-7539) [On the legality of the application of the provisions of the Instruction on the procedure for payments for electricity and heat, approved by the State Committee for Prices and the Ministry of Fuel and Energy of Russia on November 30, 1993 (No. 01-17/1443-11, VK-7539)]”. Information bulletin of the Federal Energy Commission of the Russian Federation on June 13, 2000 N 11 (in Russian).
- [8] “Ob utverzhdenii Pravil nediskriminacionnogo dostupa k uslugam po peredache elektricheskoy energii i okazaniya etih uslug, Pravil nediskriminacionnogo dostupa k uslugam po operativno-dispatcherskomu upravleniyu v elektroenergetike i okazaniya etih uslug, Pravil nediskriminacionnogo dostupa k uslugam administratora torgovoj sistemy optovogo rynka i okazaniya etih uslug i Pravil tekhnologicheskogo prisoedineniya energoprinyimayushchih ustrojstv potrebitelej elektricheskoy energii, ob"ektov

- po proizvodstvu elektricheskoy energii, a takzhe ob"ektov elektrossetevogo hozyajstva, prinadlezhashchih setevym organizatsiyam i inym licam, k elektricheskim setyam [On approval of the Rules for non-discriminatory access to services for the transmission of electrical energy and the provision of these services, the Rules for non-discriminatory access to services for operational dispatch management in the power industry and the provision of these services, the Rules for non-discriminatory access to the services of the administrator of the wholesale market trading system and the provision of these services and the Rules for technological connection of power receivers of electrical energy consumers, facilities for the production of electrical energy, as well as power grid facilities belonging to grid organizations and other persons to power grids]". Resolution of the Government of the Russian Federation of December 27, 2004 N 861 (revised on March 2, 2021). [Online]. Available at: [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_51030/](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_51030/) [Accessed: March 2, 2021] (in Russian).
- [9] "Ob utverzhdenii Metodicheskikh ukazaniy po raschetu povyshayushchih (ponizhayushchih) koeffitsientov k tarifam na uslugi po peredache elektricheskoy energii v zavisimosti ot sootnosheniya potrebleniya aktivnoy i reaktivnoy moshchnosti dlya otdel'nykh energoprinyimayushchih ustrojstv (grupp energoprinyimayushchih ustrojstv) potrebitelej elektricheskoy energii, primenyaemykh dlya opredeleniya obyazatel'stv storon po dogovoram ob okazanii uslug po peredache elektricheskoy energii po edinoj nacional'noj (obshcherossijskoj) elektricheskoy seti (dogovoram energosnabzheniya) [On approval of the methodological guidelines for the calculation of increasing (reducing) ratios to tariffs for electric power transmission services depending on the ratio of active and reactive power consumption for individual power receivers (groups of power receivers) of consumers of electrical energy used to determine the obligations of the parties under contracts for the provision of services for the transmission of electrical energy through the unified national (all-Russian) electrical network (power supply contracts)]". Order of the Federal Tariff Service of Russia on August 31, 2010 N 219-e/6 (revised on August 31, 2010). [Online]. Available at: <https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=1&documentId=165067> [Accessed: March 2, 2021] (in Russian).
- [10] V.E. Vorotnitsky, "Energeticheskaya effektivnost' i kompensatsiya reaktivnoj moshchnosti v elektricheskikh setyah. Problemy i puti resheniya [Energy efficiency and reactive power compensation in electrical networks. Problems and solutions]", *Energosovet [Energy Council]*, no. 1 (47), pp. 44-53, 2017 (in Russian).
- [11] A.V. Kuznetsov and I.V. Argentova, "Pravovye aspekty primeneniya povyshayushchih koeffitsientov k tarifam za potreblenie reaktivnoy energii [Legal aspects of the application of increasing coefficients to tariffs for the consumption of reactive energy]", *Industrial Power Engineering*, no. 3, pp. 17-20, 2013 (in Russian).
- [12] A.V. Kuznetsov, V.V. Chikin, D.A. Rebrovskaya, "Incentive tariff formation model for reactive power flows and electricity quality management", *Electric Power. Transmission and Distribution*, no. 1 (64), pp. 16-22, 2021.
- [13] A.V. Kuznetsov and D.A. Rebrovskaya, "Specification of the methodology of estimation of financial efficiency of installation of compensator devices in the consumer network", *Journal of Ulyanovsk State Technical University*, no. 79, pp. 51-56, 2017.

**ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ  
INFORMATION ABOUT THE AUTHORS**

**Кузнецов Анатолий Викторович**, доктор технических наук, профессор Ульяновского государственного технического университета, г. Ульяновск, Российская Федерация.

**Anatoliy V. Kuznetsov**, D. Sci. (Eng.), professor of the Ulyanovsk State Technical University, Ulyanovsk, Russian Federation.

**Ребровская Диана Андреевна**, старший преподаватель Ульяновского государственного технического университета, г. Ульяновск, Российская Федерация.

**Diana A. Rebrovskaya**, senior lecturer of the Ulyanovsk State Technical University, Ulyanovsk, Russian Federation.

**Чикин Владислав Владимирович**, аспирант Ульяновского государственного технического университета, г. Ульяновск, Российская Федерация.

**Vladislav V. Chikin**, postgraduate student of the Ulyanovsk State Technical University, Ulyanovsk, Russian Federation.