

## ЭНЕРГЕТИКА

Научная статья

УДК 621.316.3

<https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-6-741-752>

## Управление мощностью регулируемых конденсаторов в электрических сетях по критерию минимума потерь энергии

Станислав Сергеевич Гиршин<sup>1✉</sup>, Елена Григорьевна Андреева<sup>2</sup>,  
Константин Владимирович Хацевский<sup>3</sup>, Владислав Михайлович Троценко<sup>4</sup>,  
Николай Андреевич Мельников<sup>5</sup>, Елена Владимировна Петрова<sup>6</sup>,  
Владимир Николаевич Горюнов<sup>7</sup>

<sup>1-7</sup> Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

<sup>1</sup>stansg@mail.ru, orcid.org/0000-0002-0650-1880

<sup>2</sup>lenandr02@yandex.ru, orcid.org/0000-0002-1303-669X

<sup>3</sup>xkv-post@rambler.ru, orcid.org/0000-0001-9504-1312

<sup>4</sup>troch\_93@mail.ru, orcid.org/0000-0002-4250-371X

<sup>5</sup>nik\_mel\_98@mail.ru

<sup>6</sup>evpetrova2000@yandex.ru, orcid.org/0000-0002-7866-5630

<sup>7</sup>vladimirgoryunov2016@yandex.ru, orcid.org/0000-0002-4707-2023

**Резюме.** Цель – управление передаваемой реактивной мощностью в электрических сетях с помощью регулируемой конденсаторной батареи по критерию минимума потерь энергии при различных годовых графиках реактивной нагрузки и разном числе регулировочных секций. Основные теоретические соотношения и выводы получены методами математического моделирования и интегрального исчисления с использованием элементов теории оптимального управления. Оценка степени влияния мощности и числа секций конденсаторной батареи на потери энергии в сети производилась с помощью вычислительных экспериментов. Получены выражения для собственных потерь энергии в конденсаторной батарее, а также для снижения потерь энергии в сети, справедливые при линеаризованных графиках нагрузки. Показано, что зависимости собственных потерь энергии в конденсаторной батарее и снижения потерь в сети от мощности секции имеют точки излома и проходят через максимум. Наличие точек излома обусловлено изменением числа секций конденсаторной батареи, работающих в течение всего года. Прохождение зависимостей через максимум объясняется тем, что при повышении мощности конденсаторной батареи уменьшается время работы при полном числе регулировочных секций. Установлено, что батареи статических конденсаторов с двумя регулировочными секциями позволяют снизить потери энергии на передачу реактивной мощности на 90% и более. Для трех- и четырехсекционных батарей статических конденсаторов снижение потерь приближается к 100%. Процент снижения потерь энергии возрастает при увеличении степени заполнения годового графика реактивной нагрузки. Для снижения потерь энергии в электрической сети требуются конденсаторные батареи с числом регулировочных секций не более трех-четырех, а в большинстве случаев достаточно двух секций.

**Ключевые слова:** конденсаторная батарея, потери энергии, график нагрузки, компенсация реактивной мощности, оптимальное управление, регулируемая конденсаторная установка

**Для цитирования:** Гиршин С. С., Андреева Е. Г., Хацевский К. В., Троценко В. М., Мельников Н. А., Петрова Е. В., Горюнов В. Н. Управление мощностью регулируемых конденсаторов в электрических сетях по критерию минимума потерь энергии // iPolytech Journal. 2021. Т. 25. № 6. С. 741–752. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-6-741-752>.

## Power management of variable capacitors in electrical grid systems according to the criterion of minimum energy loss

Stanislav S. Girshin<sup>1✉</sup>, Elena G. Andreeva<sup>2</sup>, Konstantin V. Khatsevskiy<sup>3</sup>,  
Vladislav M. Trotsenko<sup>4</sup>, Nikolay A. Melnikov<sup>5</sup>, Elena V. Petrova<sup>6</sup>, Vladimir N. Goryunov<sup>7</sup>

<sup>1-7</sup>Omsk State Technical University, Omsk, Russia

<sup>1</sup>stansg@mail.ru, orcid.org/0000-0002-0650-1880

<sup>2</sup>lenandr02@yandex.ru, orcid.org/0000-0002-1303-669X

<sup>3</sup>xkv-post@rambler.ru, orcid.org/0000-0001-9504-1312

<sup>4</sup>troch\_93@mail.ru, orcid.org/0000-0002-4250-371X

<sup>5</sup>nik\_mel\_98@mail.ru

<sup>6</sup>evpetrova2000@yandex.ru, orcid.org/0000-0002-7866-5630

<sup>7</sup>vladimirgoryunov2016@yandex.ru, orcid.org/0000-0002-4707-2023

**Abstract.** The aim is to manage the transmitted reactive power in electrical grids using variable capacitor batteries according to the criterion of minimum energy loss under different annual reactive load schedules and different numbers of variable capacitor sections. The main theoretical relations were obtained by the methods of mathematical modelling and integral calculus using the theory of optimal control. The influence of the power and number of sections in a capacitor battery on energy losses in the grid was estimated using computational experiments. Dependencies for energy losses in a capacitor battery, as well as for reducing energy losses in the grid, were obtained. These expressions are valid for linearized load schedules. It is shown that the dependences of energy losses in a capacitor battery and the reduction of losses in the grid on the section power have inflection points and pass through a maximum. The presence of inflection points is associated with a change in the number of capacitor sections operating throughout the year. The presence of a maximum is explained by the fact that, with an increase in the power of the capacitor battery, its operating time decreases under the complete number of variable sections. It is established that the batteries of static capacitors with two variable sections can reduce energy losses when transmitting reactive power by over 90%. For three- and four-section static capacitors, the loss reduction is close to 100%. The reduction in energy losses increases when approaching maximal levels of annual reactive load. Energy losses in electrical grid systems can be reduced by capacitor batteries with no more than three or four variable sections. In most cases, this can be achieved by two-section capacitor batteries.

**Keywords:** capacitor bank, energy losses, load graph, reactive power compensation, optimal control, adjustable capacitor unit

**For citation:** Girshin S. S., Andreeva E. G., Khatsevskiy K. V., Trotsenko V. M., Melnikov N. A., Petrova E. V., Goryunov V. N. Power management of variable capacitors in electrical grid systems according to the criterion of minimum energy loss. *iPolytech Journal*. 2021;25(6):741-752. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-6-741-752>.

### ВВЕДЕНИЕ

Компенсация реактивной мощности представляет собой одно из наиболее эффективных мероприятий по снижению потерь энергии в электрических сетях<sup>8</sup> [1–6]. При этом большинство современных компенсирующих устройств позволяет осуществлять управление реактивной мощностью [7–10]. Средства управления, с одной стороны, дают возможность дополнительного снижения потерь энергии, но, с другой – приводят к увеличению стоимости компенсирующих устройств. Чтобы осуществить технико-экономическое сравнение компенсирующих устройств оди-

наковой мощности, но с разными системами управления, требуется решить следующие задачи:

- определить критерии и закон управления реактивной мощностью компенсирующих устройств;

- произвести анализ влияния системы управления реактивной мощностью на потери энергии.

Развитие методов оптимального выбора компенсирующих устройств идет в направлении учета топологии сети, дискретности номинальных мощностей и некоторых других факторов [4, 6, 11–13]. Оптимальное управ-

<sup>8</sup> РТМ 36.18.32.6-92. Указания по проектированию установок компенсации реактивной мощности в электрических сетях общего назначения промышленных предприятий. Введ. 01.01.1993. М., 1993. 32 с.

ление реактивной мощностью играет важную роль для надежной и оптимальной работы энергосистемы. За последние годы разработан целый ряд стратегий для решения проблемы оптимального управления реактивной мощностью. Ввиду особой важности количество публикаций по данному направлению не уменьшается и в настоящее время. Заслуживает внимание работа [14], в которой для решения задачи оптимизации предложена математическая модель, учитывающая зависимость мощности от напряжения сети. Целевая функция включает в себя капитальные затраты для батареи статических конденсаторов (БСК) с возможностью переключения по ступеням, а также эксплуатационные расходы, зависящие от потерь энергии. В работе [15] для определения оптимального места установки и мощности БСК реализована математическая модель, основанная на методе множества (роя) частиц. На базе использования модели отмечаются улучшения уровня напряжения в системе, минимизация потерь энергии в линиях и повышение коэффициента мощности. В исследованиях, приведенных в [16], предлагается система коррекции коэффициента мощности в режиме реального времени. Система основана на использовании многоступенчатых БСК в совокупности с резонансными фильтрами. Результаты, полученные в [17], связаны с реализацией актуальной современной тенденции одновременного управления БСК, генераторами и конфигурацией сети. Отмечается преимущество предложенного метода над существующими алгоритмами в плане повышения эффективности передачи энергии. В обзоре [18] представлен обширный перечень статей по современным методам решения задач оптимизации реактивной мощности. Аналитический обзор, представленный в работе [19], можно рассматривать как универсальный источник информации по методам оптимального распределения реактивной мощности. Несмотря на большое количество статей по рассматриваемой проблеме, различию между регулируемыми и нерегулируемыми БСК с точки зрения потерь энергии не уделялось достаточного внимания. Такой подход неизбежно приводит к тому, что оптимальными

для установки оказываются конденсаторные батареи с минимальным количеством секций, так как они имеют меньшую стоимость. Фактически это будет верно только при равномерных графиках нагрузки. Во всех остальных случаях часть времени конденсаторные установки будут работать с неполным количеством секций, что приведет к существенным закономерностям в изменениях потерь энергии. В статье рассмотрены энергетические эффекты применения регулируемых конденсаторных установок и проведен анализ соответствующих закономерностей.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Рассмотрим электрическую сеть, содержащую линию  $W$  и трансформатор  $T$ , к шинам низкого напряжения (НН) которого подключена БСК (рис. 1). Пусть управление БСК осуществляется по критерию минимума потерь энергии в сети с учетом собственных потерь в БСК:

$$\Delta W(Q_{БСК}) = \int_0^{8760} \left( \frac{(Q(t) - Q_{БСК})^2}{U^2} R + p_{yo} Q_{БСК} \right) dt \Rightarrow \min, \quad (1)$$

где  $p_{yo}$  – удельные потери активной мощности в конденсаторной батарее;  $R$  – суммарное активное сопротивление линии и трансформатора;  $U$  – напряжение в узле нагрузки (обычно приведенное к высокой стороне).

Перекомпенсацию будем считать недопустимой, то есть между реактивной мощностью нагрузки  $Q(t)$  и рабочей мощностью БСК  $Q_{БСК}$  в любой момент времени  $t$  должно выполняться соотношение:  $Q(t) \geq Q_{БСК}$ .

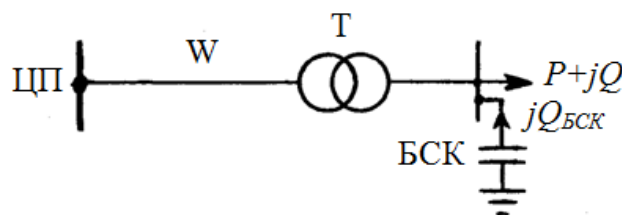


Рис. 1. Электрическая сеть  
Fig. 1. Power grid

Как показано в [20], выполнение этого условия является также и критерием оптимального управления. Если реактивная мощность нагрузки уменьшается со временем, то очередная секция БСК должна отключаться только при достижении полной компенсации  $Q(t) = Q_{БСК}$ , ( $\cos \varphi = 1$ ). Собственные потери активной мощности в БСК малы, поэтому суммарные потери в режиме полной компенсации будут меньше, чем потери при отключении еще одной секции БСК. Таким образом, любое управление БСК по критерию поддержания  $\cos \varphi$  на уровне меньше единицы заведомо не является оптимальным.

Предположим, что годовой график реактивной мощности можно аппроксимировать линейной функцией следующего вида [21]:

$$Q(t) = Q_{\max} \left( 1 - \frac{t}{t_0} \right), \quad (2)$$

$$0 \leq t \leq \min \{t_0, 8760 \text{ ч}\},$$

где  $Q_{\max}$  – годовой максимум реактивной мощности;  $t_0$  – параметр графика, характеризующий степень его заполнения.

Предложенная аппроксимация дает достаточно хорошие результаты при расчете потерь энергии. Использование функции (2)

позволяет представить процесс оптимального управления БСК графически (рис. 2).

**Потери энергии в батарее статических конденсаторов.** Введем следующие обозначения:  $Q_{БСК, \text{ном}}$  – номинальная мощность БСК;  $n$  – число секций БСК;  $Q_c$  – мощность одной секции;  $p_{\text{уд}}$  – удельные потери активной мощности в БСК (на единицу вырабатываемой реактивной мощности);  $Q_{\min}$  – годовой минимум реактивной мощности нагрузки.

Число неотключаемых секций (находящихся в работе круглый год) можно определить по выражению:

$$k = \text{int} \left( \frac{Q_{\min}}{Q_c} \right), \text{ но не более чем } n. \quad (3)$$

Значение  $Q_{\min}$  в рамках принятой модели графика нагрузки определяется по формуле (2) при подстановке верхнего предела времени  $t$ . Если  $t_0 \leq 8760 \text{ ч}$  (что соответствует времени использования максимума реактивной нагрузки  $T_{\max, Q} \leq 4380 \text{ ч}$ ), то формула (2) дает  $Q_{\min} = 0$ . Этот результат может не соответствовать реальным условиям. Однако если фактическое значение  $Q_{\min}$  не больше,

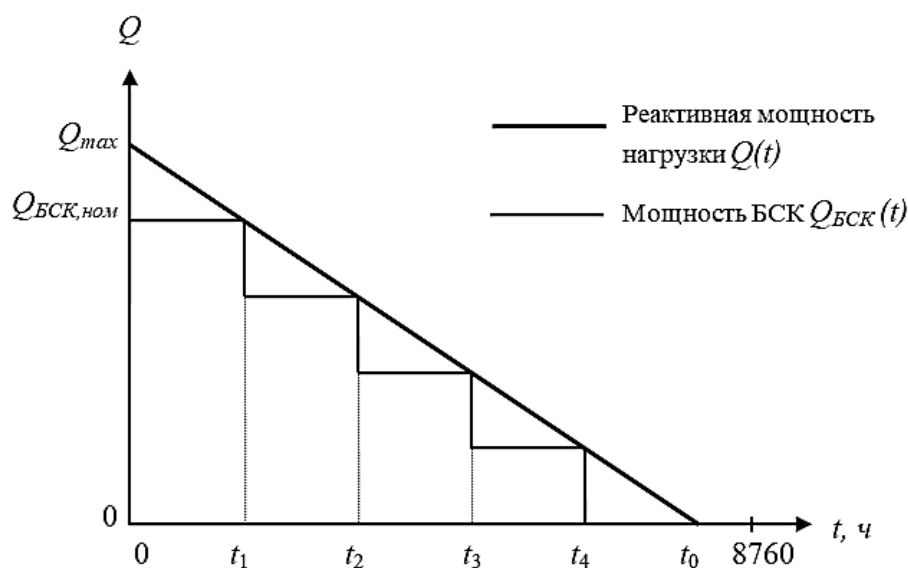


Рис. 2. Пример годовой диаграммы оптимального управления батареями статических конденсаторов  
 Fig. 2. Example of an annual diagram for optimal control of a static capacitor bank

чем мощность секции БСК, то погрешность при этом не вносится, так как режим полного отключения БСК не влияет на рассмотренные ниже составляющие потерь.

Потери активной мощности в БСК в каждый момент времени пропорциональны вырабатываемой реактивной мощности:

$$\Delta P_{БСК}(t) = p_{yo} Q_{БСК}(t). \quad (4)$$

Годовые потери энергии в БСК определяются интегралом вида:

$$\Delta W_{БСК} = p_{yo} \int_0^{8760} Q_{БСК}(t) dt. \quad (5)$$

Фактически интегрирование сводится к суммированию произведений потерь мощности на каждой ступени годового графика мощности БСК на продолжительность ступени (см. рис. 2). Границы между ступенями  $t_i$  представляют собой условные моменты отключения  $i$ -й секции БСК. Из рис. 2 непосредственно следует, что

$$t_i = t_0 \left( 1 - (n - i + 1) \frac{Q_c}{Q_{\max}} \right). \quad (6)$$

Выполнив интегрирование, после некоторых преобразований можно получить следующую формулу для годовых потерь энергии в БСК:

$$\Delta W_{БСК} = p_{yo} t_0 (n - k) Q_c - p_{yo} t_0 \frac{n(n+1) - k(k+1)}{2} \frac{Q_c^2}{Q_{\max}^2} + 8760 p_{yo} k Q_c. \quad (7)$$

Первые два слагаемых в совокупности представляют собой потери энергии в отключаемых секциях, а последнее – потери в секциях, работающих без отключения. На рис. 3 показан пример зависимости потерь энергии в БСК от мощности секции для четырехсекционной БСК при  $t_0 = 12000$  ч (по площади под графиком нагрузки это соответствует  $T_{\max, Q} \leq 5560$  ч). Потери энергии выражены в процентах от потерь, которые возникли бы круглогодичной работе БСК мощностью  $Q_{\max}$

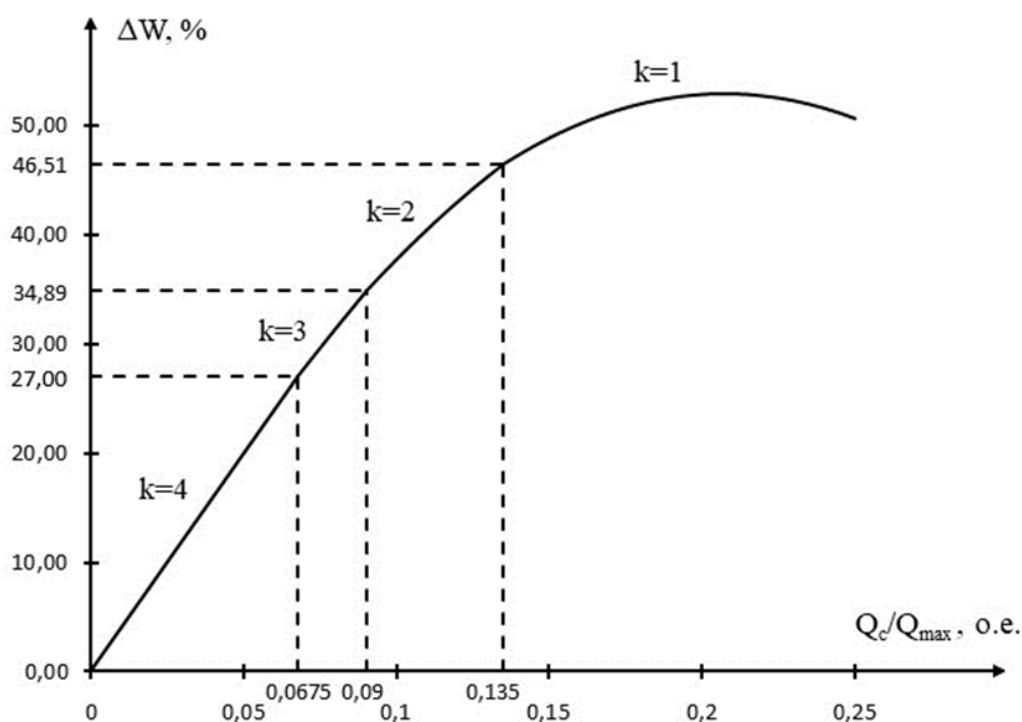


Рис. 3. Зависимость потерь энергии в четырехсекционной батарее статических конденсаторов от мощности секции

Fig. 3. Energy losses in a four-section static capacitor bank vs section power

Зависимость разделяется на четыре участка, отличающихся друг от друга числом секций  $k$ , работающих без отключения. Полной компенсации соответствует значение при (т.е. при полной компенсации) равных

$$8760 p_{yo} Q_{\max} \cdot \frac{Q_c}{Q_{\max}} = 0,25. \text{ Так как оно меньше}$$

отношения минимальной мощности нагрузки к максимальной (0,27 по формуле (2)), то участок, где  $k = 0$ , в данном случае отсутствует.

Участки с разным числом  $k$  разделены точками излома. При  $k = 4$  зависимость линейна. На последующих участках появляются отключаемые секции, и зависимость становится нелинейной вследствие того, что при увеличении мощности секций снижается продолжительность их работы. При  $k = 1$  фактор времени становится настолько значимым, что зависимость переходит через максимум и начинает убывать. Максимальные потери в рассматриваемом случае составляют 52,9% и наблюдаются при

$$\frac{Q_c}{Q_{\max}} = 0,207.$$

Рассмотрим влияние регулируемой БСК на потери энергии в сети от центра питания (ЦП) до шин НН трансформаторной подстанции (см. рис. 1). Строго говоря, это влияние распространяется как на нагрузочные потери, так и на потери холостого хода, и обусловлено не только изменением реактивной мощности, но и изменением напряжения в узле нагрузки. Однако напряжение в узле нагрузки зависит не только от мощности БСК, но и от способа регулирования напряжения в центре питания, а также от режимов энергосистемы в целом. Будем считать, что в центре питания осуществляется встречное регулирование напряжения, при котором напряжение в некотором эквивалентном узле нагрузки поддерживается на постоянном уровне. Пусть шины НН рассматриваемой подстанции примерно соответствуют этому узлу. Такое допущение позволяет исключить влияние напряжения на потери энергии. В результате можно будет считать, что БСК влияет только на нагрузочные потери энергии, обусловленные передачей только реактивной мощности.

Необходимо заметить, что при изменениях напряжения будет изменяться как мощность БСК (пропорционально квадрату напряжения), так и реактивная мощность нагрузки (в соответствии со статическими характеристиками по напряжению). Статические характеристики реактивной мощности по напряжению обычно близки к квадратичным зависимостям. Поэтому отношение мощностей БСК и нагрузки, используемые в дальнейших выкладках, при изменении напряжения остаются примерно постоянными.

При выборе БСК имеет значение не абсолютная величина потерь энергии в сети, а их снижение. С учетом принятых допущений потери активной мощности в линии и трансформаторе (см. рис. 1) при установке БСК в каждый момент времени снижаются на величину:

$$\delta P(t) = \frac{Q^2(t) - (Q(t) - Q_{БСК}(t))^2}{U^2} R. \quad (8)$$

Годовое снижение потерь энергии в линии и трансформаторе равно интегралу от снижения потерь мощности:

$$\delta W = \int_0^{8760} \delta P(t) dt. \quad (9)$$

После интегрирования и преобразований окончательно получим:

$$\begin{aligned} \delta W = & \frac{Q_c Q_{\max}}{U^2} R \times \\ & \times \left[ t_0 n - \frac{(8760 - t_0)^2}{t_0} k - \right. \\ & - \frac{Q_c}{Q_{\max}} (t_0 n^2 + (8760 - t_0) k^2) + \\ & \left. + \frac{1}{3} \left( \frac{Q_c}{Q_{\max}} \right)^2 t_0 (n^3 - n - k^3 + k) \right]. \end{aligned} \quad (10)$$

На рис. 4 показана зависимость снижения потерь энергии в сети от мощности секции БСК, построенная при тех же условиях, что и

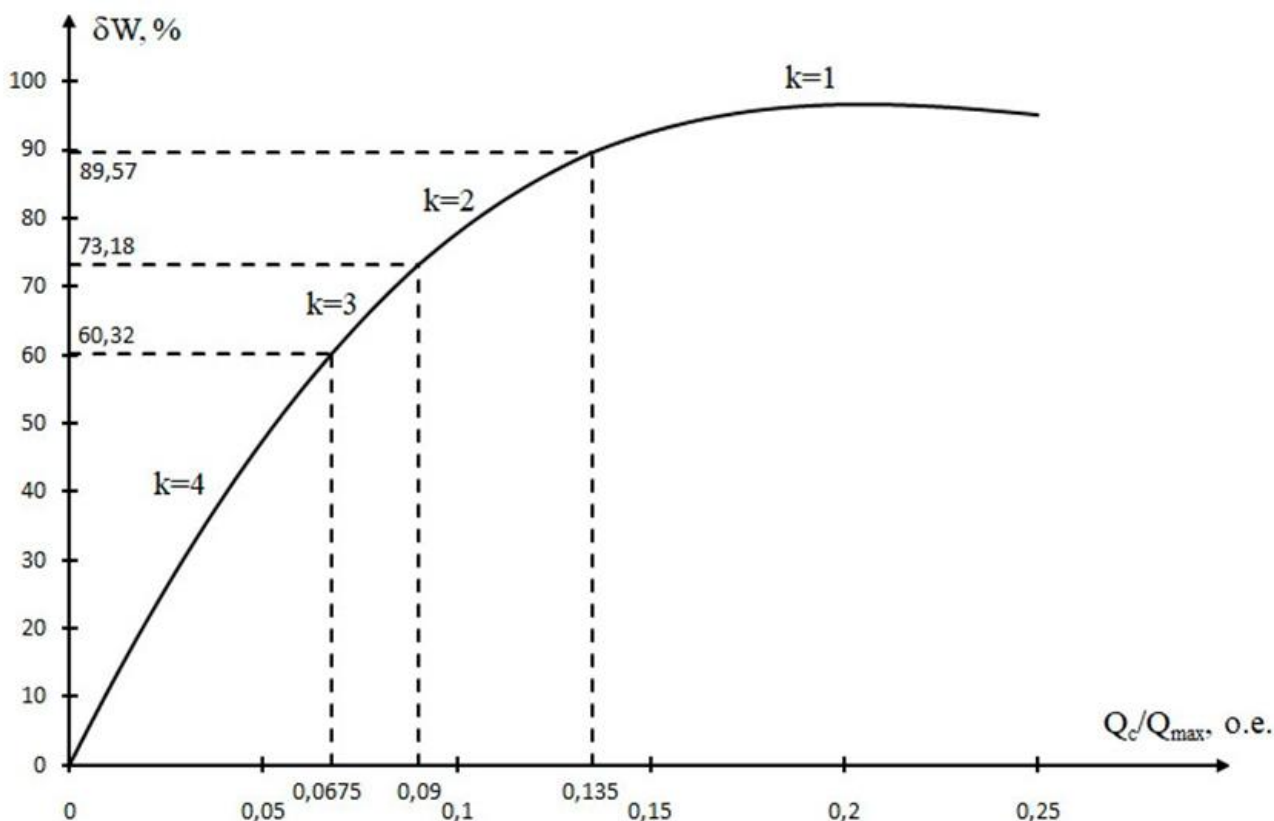


Рис. 4. Зависимость снижения потерь энергии в сети от мощности секции четырехсекционной батареи статических конденсаторов  
Fig. 4. Reduction of grid energy losses vs section power of a four-section static capacitor bank

рис. 3. Снижение потерь энергии выражено в процентах от потерь на передачу реактивной мощности до установки БСК (в исходном режиме), которые равны

$$\delta W_{исх} = \frac{R}{U^2} \int_0^{8760} Q^2(t) dt = \frac{Q_{max}^2}{U^2} R \left[ 1 - \frac{8760}{t_0} + \frac{1}{3} \left( \frac{8760}{t_0} \right)^2 \right] 8760. \quad (11)$$

Полученная зависимость проходит через максимум при  $\frac{Q_c}{Q_{max}} = 0,207$ . Максимальное снижение потерь составляет 96,8%.

**Влияние числа секций на максимальное снижение потерь.** Запишем снижение выражения потерь энергии в относительных единицах в явной форме, разделив (10) на (11):

$$\delta W_{отн} = \frac{\delta W}{\delta W_{исх}} = \frac{aQ_{отн}^3 - bQ_{отн}^2 + cQ_{отн}}{1 - \frac{1}{t_{отн}} + \frac{1}{3t_{отн}^2}}. \quad (12)$$

Здесь введены следующие обозначения:

$$Q_{отн} = \frac{Q_c}{Q_{max}} \text{ (мощность секции в о.е.);} \quad (13)$$

$$t_{отн} = \frac{t_0}{8760}; \quad (14)$$

$$a = \frac{t_{отн}}{3} (n^3 - n - k^3 + k); \quad (15)$$

$$b = t_{отн} n^2 + (1 - t_{отн}) k^2; \quad (16)$$

$$c = t_{отн} n - \left( t_{отн} + \frac{1}{t_{отн}} - 2 \right) k. \quad (17)$$

Согласно формуле (12), зависимость снижения потерь от мощности секции в общем случае представляет собой кубическую параболу, которая проходит через максимум в точке:

$$Q_{отн,экстр} = \begin{cases} \frac{b - \sqrt{b^2 - 3ac}}{3a}, & a \neq 0, \\ \frac{c}{2b}, & a = 0. \end{cases} \quad (18)$$

Формула (18) справедлива в том случае, если полученное значение попадает на участок зависимости  $\delta W(Q_c)$ , соответствующий принятому значению  $k$ . В противном случае максимальное снижение потерь будет находиться либо на другом участке зависимости, либо в точке излома (на границе участков).

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В таблице представлены результаты расчета максимального снижения потерь  $\delta W_{отн,макс}$  при разном времени использования максимума реактивной нагрузки  $T_{макс,Q}$  и при

различных числах секций. Значения  $t_0$  определялись исходя из равенства площадей под графиками нагрузки по формуле:

$$t_0 = \frac{8760^2}{2(8760 - T_{макс,Q})}. \quad (19)$$

Расчет производился в диапазоне  $T_{макс,Q}$  от 4380 до  $0,875 \cdot 8760 = 7665$  ч. Значение 4380 ч соответствует максимальному диапазону изменения реактивной мощности нагрузки. При меньших значениях  $T_{макс,Q}$  будут наблюдаться те же условия, что и при 4380 ч, но с уменьшенным масштабом времени. Предельное значение  $T_{макс,Q} = 8760$  ч не рассматривалось, так как при этом график нагрузки становится равномерным, и БСК будет работать без регулирования.

Максимальное снижение потерь на передачу реактивной мощности изменяется от 75% при нерегулируемой БСК и  $T_{макс,Q} = 8760$  ч до 98% при четырехсекционной БСК и  $T_{макс,Q} = 7665$  ч. В первом случае

Результаты расчета максимального снижения потерь в сети  
 Results of calculating the maximum reduction of losses in the grid

$T_{макс,Q}, ч / h$	$t_0, ч / h$	$t_{отн}$	$n$	$k$	$Q_{отн,экстр}$	$\delta W_{отн,макс}$		Тип точки
						о.е. / р.и.в.	%	
$0,5 \cdot 8760 = 4380$	8760	1	1	0	1/2	3/4	75	экстремум
			2	0	1/3	8/9	88,89	
			3	0	1/4	15/16	93,75	
			4	0	1/5	24/25	96	
$0,625 \cdot 8760 = 5475$	11680	4/3	1	0	1/2	16/21	76,19	экстремум = излом
			2	0	1/3	0,903	90,3	
			3	1	1/4	20/21	95,23	
			4	1	0,2052	0,9679	96,79	
$0,75 \cdot 8760 = 6570$	17520	2	1	1	1/2	6/7	85,71	экстремум = излом
			2	1	0,3629	0,9248	92,48	экстремум
			3	2	1/4	27/28	96,43	экстремум = излом
			4	2	0,2103	0,9747	97,47	экстремум
$0,875 \cdot 8760 = 7665$	35040	4	1	1	3/4	36/37	97,3	излом
			2	2	3/8	36/37	97,3	
			3	3	1/4	36/37	97,3	
			4	3	0,2147	0,9801	98,01	



реактивная нагрузка в течение года меняется на 100%, во втором случае – на 25% от максимальной мощности. При  $T_{\max, Q} = 7665$  ч максимальное снижение потерь практически не зависит от числа секций, а при числе секций  $n = 4$  максимальное снижение потерь практически не зависит от  $T_{\max, Q}$ , т.е. от графика реактивной нагрузки. Наиболее существенный эффект наблюдается при переходе от нерегулируемой БСК к БСК с двумя секциями.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Зависимость снижения потерь энергии в сети от мощности БСК с учетом регулирования проходит через максимум, причем мощность БСК в точке максимума не достигает наибольшей мощности нагрузки. Это значит,

что полная компенсация реактивной мощности нецелесообразна даже в тех случаях, когда собственные потери в БСК малы, а ее стоимость по тем или иным причинам можно не учитывать. В равной степени это справедливо также для нерегулируемых БСК. Исключением является равномерный график нагрузки.

2. БСК с двумя секциями позволяют снизить потери энергии на передачу реактивной мощности на 90% и более почти при любых графиках нагрузки. Для трех- и четырехсекционных БСК снижение потерь приближается к 100%. Таким образом, для снижения потерь энергии требуется не более трех-четырех секций, а в большинстве случаев достаточно одной-двух секций. Большее число секций оправданно только в тех случаях, когда это необходимо для регулирования напряжения.

## Список источников

1. Бигун А. Я., Гиршин С. С., Петрова Е. В., Горюнов В. Н. Учет температуры проводов повышенной пропускной способности при выборе мероприятий по снижению потерь энергии на примере компенсации реактивной мощности // Современные проблемы науки и образования. 2015. № 1-1. С. 212.
2. Михеев Г. М., Атаманов М. Н., Афанасьева О. В., Дрей Н. М. О компенсации реактивной мощности в системах электроснабжения с косинусными конденсаторами // Электротехника. 2019. № 4. С. 32–41.
3. Girshin S. S., Bigun A. Ay., Ivanova E. V., Petrova E. V., Goryunov V. N., Shepelev A. O. The grid element temperature considering when selecting measures to reduce energy losses on the example of reactive power compensation // Przegląd Elektrotechniczny. 2018. Vol. 94. № 8. P. 101–104. <https://doi.org/10.15199/48.2018.08.24>.
4. Железко Ю. С. Компенсация реактивной мощности в сложных электрических системах. М.: Энергоиздат, 1981. 200 с.
5. Арион В. Д., Каратун В. С., Пасинковский П. А. Компенсация реактивной мощности в условиях неопределенности исходной информации // Электричество. 1991. № 2. С. 6–11.
6. Ильяшов В. П. Конденсаторные установки промышленных предприятий. М.: Энергоиздат, 1983. 152 с.
7. Воротицкий В. Э., Жабин К. В., Колибаба В. И. Сравнительный анализ управления реактивной мощностью на электроэнергетических рынках зарубежных стран и России // Электрические станции. 2020. № 5. С. 8–19.
8. Петухов Р. А., Сизганова Е. Ю., Сизганов Н. В., Филатов А. Н. К вопросу автоматизации управления потоками реактивной мощности в системах электро-
9. снабжения // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. Т. 22. № 7. С. 123–146. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2018-7-123-146>.
9. Насыров Р. Р., Альдженди Р. Выбор емкости конденсатора активного фильтра и метода управления его контроллером // Электротехника. 2020. № 1. С. 51–55.
10. Воротников И. Н., Мастепаненко М. А., Габриелян Ш. Ж., Шунина А. А. Модифицированный алгоритм управления компенсатором реактивной мощности для нестационарных нагрузок // Электротехника. 2019. № 3. С. 11–14.
11. Трубицын М. А., Микаэльян Е. Ю. Расчет удельных приростов потерь при оптимизации реактивных мощностей в сложной электросети // Инженерный вестник Дона. 2019. № 6. С. 41.
12. Шпиганович А. Н., Рычков А. В. Оптимизация компенсации реактивной мощности в системах электроснабжения со специфичной нагрузкой // Вести высших учебных заведений Черноземья. 2016. № 1. С. 28–32.
13. Арион В. Д., Журавлев В. Г., Ставровский А. Н. Оптимизация выбора источников реактивной мощности в электроэнергетических системах. М.: Изд-во ВИНТИ, 1984. 63 с.
14. Home-Ortiz J. M., Vargas R., Macedo L. H., Romero R. Joint reconfiguration of feeders and allocation of capacitor banks in radial distribution systems considering voltage-dependent models // International Journal of Electrical Power & Energy Systems. 2019. Vol. 107. P. 298–310. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2018.11.035>.
15. Gonzalo G., Aguila A., Gonzalez D., Ortiz L. Optimum location and sizing of capacitor banks using VOLT VAR compensation in micro-grids // IEEE Latin America Transactions. 2020. Vol. 18. Iss. 3. P. 465–472.

<https://doi.org/10.1109/TLA.2020.9082717>.

16. Abdelhady S., Osama A., Shaban A., Elbayoumi M. A Real-time optimization of reactive power for an intelligent system using genetic algorithm // IEEE Access. 2020. Vol. 8. P. 11991–12000. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2965321>.

17. Fetouh T., Elsayed A. M. Optimal control and operation of fully automated distribution networks using improved tunicate swarm intelligent algorithm // IEEE Access. 2020. Vol. 8. P. 129689–129708. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3009113>.

18. Muhammad Ya., Khan R., Raja M. A. Z., Ullah F., Chaudhary N. I., He Yigang. Solution of optimal reactive power dispatch with FACTS devices: a survey // Energy Reports. 2020. Vol. 6. P. 2211–2229. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2020.07.030>.

19. Saddique M. Sh., Bhatti A. R., Haroon Sh. S., Sattar M. K., Amin S., Sajjad I. A., et al. Solution to optimal reactive power dispatch in transmission system using meta-heuristic techniques – Status and technological review // Electric Power Systems Research. 2020. Vol. 178. P. 106031. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2019.106031>.

20. Гиршин С. С., Горюнов В. Н., Шепелев А. О. Оптимальное управление конденсаторными батареями в распределительных сетях // Ученые Омска – региону: матер. II Регион. науч.-техн. конф. (г. Омск, 6–7 июня 2017 г.). Омск: Изд-во ОмГТУ, 2017. С. 75–79.

21. Гиршин С. С., Горюнов В. Н., Ширяев А. С., Коваленко Д. В. Выбор конденсаторных батарей в электрических сетях с учетом отключения при малых нагрузках // Промышленная энергетика. 2019. № 12. С. 12–18.

## References

1. Bigun A. Ya., Girshin S. S., Petrova E. V., Goryunov V. N. Accounting conductor temperature increased bandwidth when selecting measures to reduce energy loss by the example of reactive power compensation. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya = Modern problems of science and education*. 2015;1-1:212. (In Russ.).

2. Mikheev G. M., Atamanov M. N., Afanasieva O. V., Drey N. M. On reactive power compensation in power supply systems with cosine capacitors. *Elektrotehnika = Electrical Engineering*. 2019;4:32-41. (In Russ.).

3. Girshin S. S., Bigun A. Ay., Ivanova E. V., Petrova E. V., Goryunov V. N., Shepelev A. O. The grid element temperature considering when selecting measures to reduce energy losses on the example of reactive power compensation. *Przegląd Elektrotechniczny*. 2018;94(8):101-104. <https://doi.org/10.15199/48.2018.08.24>.

4. Zhelezko Yu. S. *Reactive power compensation in complex electrical systems*. Moscow: Energoatomizdat; 1981, 200 p. (In Russ.).

5. Arion V. D., Karatun V. S., Pasinkovskij P. A. Reactive power compensation in conditions of initial information uncertainty. *Elektrichestvo*. 1991;2:6-11. (In Russ.).

6. Il'yashov V. P. *Condenser installations of industrial enterprises*. Moscow: Energoatomizdat; 1983, 152 p. (In Russ.).

7. Vorotnitskiy V. E., Zhabin K. V., Kolibaba V. I. Comparative analysis of reactive power control in foreign electric power markets and in Russia. *Elektricheskie stantsii = Power Technology and Engineering*. 2020;5:8-19. (In Russ.).

8. Petukhov R. A., Sizganova E. Yu., Sizganov N. V., Filatov A. N. To the problem of automated control of reactive power flows in electrical energy supply systems. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2018;22(7):123-146. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2018-7-123-146>. (In Russ.).

9. Nasyrov R. R., Al'dzhendi R. Selection of the capacitance of an active filter capacitor and the control method for its controller. *Elektrotehnika = Electrical Engineering*.

2020;1:51-55. (In Russ.).

10. Vorotnikov I. N., Mastepanenko M. A., Gabrielyan Sh. Zh., Shunina A. A. A modified algorithm for controlling a reactive power compensator for transient loads. *Elektrotehnika = Electrical Engineering*. 2019;3:11-14. (In Russ.).

11. Trubitsin M. A., Mikael'yan E. Yu. Calculation of specific gains of losses in the optimization of reactive power in a complex power grid. *Inzhenernyy vestnik Dona = Don's Engineering Gazette*. 2019;6:41. (In Russ.).

12. Shpiganovich A. N., Rychkov A. V. Optimization of reactive power compensation with a specific load power supply systems. *Vesti vysshikh uchebnykh zavedeniy Chernozem'ya = News of higher educational institutions of the Chernozem region*. 2016;1:28-32. (In Russ.).

13. Arion V. D., Zhuravlev V. G., Stavrovskij A. N. *Selection optimization of reactive power sources in electric power systems*. Moscow: All-Russian Institute for Scientific and Technical Information of the Russian Academy of Sciences; 1984, 63 p. (In Russ.).

14. Home-Ortiz J. M., Vargas R., Macedo L. H., Romero R. Joint reconfiguration of feeders and allocation of capacitor banks in radial distribution systems considering voltage-dependent models. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 2019;107:298-310. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2018.11.035>.

15. Gonzalo G., Aguila A., Gonzalez D., Ortiz L. Optimum location and sizing of capacitor banks using VOLT VAR compensation in micro-grids. *IEEE Latin America Transactions*. 2020;18(3):465-472. <https://doi.org/10.1109/TLA.2020.9082717>.

16. Abdelhady S., Osama A., Shaban A., Elbayoumi M. A real-time optimization of reactive power for an intelligent system using genetic algorithm. *IEEE Access*. 2020;8:11991-12000. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2965321>.

17. Fetouh T., Elsayed A. M. Optimal control and operation of fully automated distribution networks using improved tunicate swarm intelligent algorithm. *IEEE Access*. 2020;8:129689-129708. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3009113>.

18. Muhammad Ya., Khan R., Raja M. A. Z., Ullah F., Chaudhary N. I., He Yigang. Solution of optimal reactive power dispatch with FACTS devices: a survey. *Energy Reports*. 2020;6:2211-2229. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2020.07.030>.
19. Saddique M. Sh., Bhatti A. R., Haroon Sh. S., Sattar M. K., Amin S., Sajjad I. A., et al. Solution to optimal reactive power dispatch in transmission system using meta-heuristic techniques – status and technological review. *Electric Power Systems Research*. 2020;178:106031. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2019.106031>.
20. Girshin S. S., Goryunov V. N., Shepelev A. O. Optimal

control of capacitor banks in distribution networks. *Uchenye Omska – regionu: materialy II Regional'noj nauchno-tekhnicheskoy konferencii = Scientists of the city of Omsk to the region: materials of II regional scientific and technical conference*. 6–7 June 2017, Omsk. Omsk: Omsk State Technical University; 2017, p. 75-79. (In Russ.).

21. Girshin S. S., Goryunov V. N., Shiryayev A. S., Kovalenko D. V. Selecting capacitor banks in electrical networks taking into account shutdowns at low loads. *Promyshlennaya energetika*. 2019;12:12-18. (In Russ.).

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

**Гиршин Станислав Сергеевич,**

кандидат технических наук, доцент,  
доцент кафедры электроснабжения промышленных предприятий,  
Энергетический институт,  
Омский государственный технический университет,  
644050, г. Омск, пр. Мира, 11, Россия

**Андреева Елена Григорьевна,**

доктор технических наук, профессор,  
профессор кафедры электрической техники,  
Энергетический институт,  
Омский государственный технический университет,  
644050, г. Омск, пр. Мира, 11, Россия

**Хацевский Константин Владимирович,**

доктор технических наук, доцент,  
профессор кафедры электрической техники,  
Энергетический институт,  
Омский государственный технический университет,  
644050, г. Омск, пр. Мира, 11, Россия

**Троценко Владислав Михайлович,**

ассистент кафедры электроснабжения  
промышленных предприятий,  
Энергетический институт,  
Омский государственный технический университет,  
644050, г. Омск, пр. Мира, 11, Россия

**Мельников Николай Андреевич,**

студент,  
Энергетический институт,  
Омский государственный технический университет,  
644050, г. Омск, пр. Мира, 11, Россия

**Петрова Елена Владимировна,**

доцент кафедры электроснабжения промышленных предприятий,  
Энергетический институт,  
Омский государственный технический университет,  
644050, г. Омск, пр. Мира, 11, Россия

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Stanislav S. Girshin,**

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,  
Associate Professor of the Department of Power Supply  
for Industrial Enterprises,  
Energy Institute,  
Omsk State Technical University,  
11 Mira Ave., Omsk, 644050, Russia

**Elena G. Andreeva,**

Dr. Sci. (Eng.), Professor,  
Professor of the Department of Electrical Engineering,  
Energy Institute,  
Omsk State Technical University,  
11 Mira Ave., Omsk 644050, Russia

**Konstantin V. Khatsevskiy,**

Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor,  
Professor of the Department of Electrical Engineering,  
Energy Institute,  
Omsk State Technical University,  
11 Mira Ave., Omsk 644050, Russia

**Vladislav M. Trotsenko,**

Assistant Professor of the Department of Power Supply  
for Industrial Enterprises,  
Energy Institute,  
Omsk State Technical University,  
11 Mira Ave., Omsk, 644050, Russia

**Nikolay A. Melnikov,**

Student,  
Energy Institute,  
Omsk State Technical University,  
11 Mira Ave., Omsk 644050, Russia

**Elena V. Petrova,**

Associate Professor of the Department of Power Supply  
for Industrial Enterprises,  
Energy Institute,  
Omsk State Technical University,  
11 Mira Ave., Omsk 644050, Russia

**Горюнов Владимир Николаевич,**

доктор технических наук, профессор,  
заведующий кафедрой электроснабжения  
промышленных предприятий,  
Энергетический институт,  
Омский государственный технический университет,  
644050, г. Омск, пр. Мира, 11, Россия

**Vladimir N. Goryunov,**

Dr. Sci. (Eng.), Professor,  
Head of the Department of Power Supply for Industrial  
Enterprises,  
Energy Institute,  
Omsk State Technical University,  
11 Mira Ave., Omsk 644050, Russia

**Вклад авторов**

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

**Contribution of the authors**

The authors contributed equally to this article.

**Конфликт интересов**

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Conflict of interests**

The authors declare no conflicts of interests.

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

*The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.*

**Информация о статье**

Статья поступила в редакцию 19.10.2021; одобрена после рецензирования 25.11.2021; принята к публикации 28.12.2021.

**Information about the article**

The article was submitted 19.10.2021; approved after reviewing 25.11.2021; accepted for publication 28.12.2021.