

---

---

## ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

---

---

УДК 621.316.722

DOI 10.46960/2658-6754\_2022\_1\_77

### **ДВУХСТУПЕНЧАТЫЕ ФИЛЬТРОКОМПЕНСИРУЮЩИЕ УСТАНОВКИ С ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫМ СОЕДИНЕНИЕМ СЕКЦИЙ В ТЯГОВОЙ СЕТИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА. АНАЛИЗ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ**

**А.С. Серебряков**

Нижегородский государственный инженерно-экономический университет  
Княгинино, Россия  
ORCID: 0000-0002-7455-2348 e-mail: a.sereb@mail.ru

**Л.А. Герман**

филиал Самарского государственного университета путей сообщения  
в Нижнем Новгороде  
Нижний Новгород, Россия  
e-mail: lagerman@mail.ru

**В.Л. Осокин**

Нижегородский государственный инженерно-экономический университет  
Княгинино, Россия  
ORCID: 0000-0001-8772-4252 e-mail: osokinvl@mail.ru

**Д.Е. Дулепов**

Нижегородский государственный инженерно-экономический университет  
Княгинино, Россия  
ORCID: 0000-0003-1044-1865 e-mail: dulepov.86@mail.ru

Активно-емкостные и индуктивно-емкостные цепи с последовательным включением конденсаторов широко используются в электроэнергетике для компенсации реактивной мощности. В системах тягового электроснабжения железных дорог, электрифицированных на переменном токе, установки компенсации выполняют две задачи: при большой нагрузке они поддерживают заданную пропускную способность железной дороги, а при малой нагрузке снижают потери мощности в тяговой сети. Поэтому установка компенсации в тяговой сети должна быть, по крайней мере, двухступенчатой, т.е. иметь два значения реактивной мощности и соответственно

два значения емкости. Значение реактивной мощности в таких установках регулируется ступенчато за счет переключения отдельных секций конденсаторов, которые включаются последовательно. При переключениях последовательно включенных конденсаторов в цепях синусоидального тока при ненулевых начальных условиях могут возникать неизвестные ранее специфические переходные процессы, вызывающие значительные перенапряжения на конденсаторах. Показано, что при ненулевых начальных условиях расчет переходных процессов в активно-емкостных цепях с последовательно включенными конденсаторами по известному классическому методу дает результаты, отличные от действительных значений.

Цель статьи – дать неизвестное ранее теоретическое обоснование для расчета переходных процессов в электрических цепях, содержащих последовательно включенные конденсаторы. Проведенные исследования имеют практическое значение, так как в современных электроустановках в качестве коммутационной аппаратуры используются тиристорные ключи, при которых расшунтирование одного конденсатора в компенсирующей установке происходит при максимальном напряжении на работающем конденсаторе и при нулевом напряжении на расшунтируемом конденсаторе. В этом случае на конденсаторах возможны перенапряжения, превышающие предполагаемые значения до двух раз. Дано теоретическое обоснование этого явления на примере анализа переходного процесса в активно-емкостной цепи с двумя последовательно включенными конденсаторами.

**Ключевые слова:** компенсация реактивной мощности, конденсаторная установка, метод Рунге–Кутты, переходные процессы, расчет переходных процессов, фильтрокомпенсирующая установка, численные методы.

**Для цитирования:** Серебряков, А.С. Двухступенчатые фильтрокомпенсирующие установки с последовательным соединением секций в тяговой сети переменного тока. Анализ переходных процессов / А.С. Серебряков, Л.А. Герман, В.Л. Осочкин, Д.Е. Дулепов // Интеллектуальная Электротехника. 2022. № 1. С. 77-98. DOI: 10.46960/2658-6754\_2022\_1\_77

## TWO-STAGE FILTER COMPENSATING UNITS WITH SERIES CONNECTION OF SECTIONS IN AC TRACTION NETWORK. TRANSIENT ANALYSIS

**A.S. Serebryakov**

Nizhny Novgorod State Technical University of Engineering and Economics  
Knyaginino, Russia  
ORCID: 0000-0002-7455-2348 e-mail: a.sereb@mail.ru

**L.A. German**

Branch of the Samara State University of Railway Transport in Nizhny Novgorod  
Nizhny Novgorod, Russia  
e-mail: lagerman@mail.ru

**V.L. Osokin**

Nizhny Novgorod State Technical University of Engineering and Economics  
Knyaginino, Russia

ORCID: 0000-0001-8772-4252 e-mail: osokinvl@mail.ru

**D.E. Dulepov**

Nizhny Novgorod State Technical University of Engineering and Economics  
Knyaginino, Russia

ORCID: 0000-0003-1044-1865 e-mail: dulepov.86@mail.ru

**Abstract.** Active-capacitive and inductive-capacitive circuits with series connection of capacitors are widely used in the electric power industry for reactive power compensation. In railways AC traction power supply system compensation units perform two tasks: maintain a given railway throughput under heavy load mode and reduce power losses in the traction network under low load mode. Therefore, the compensation units in the traction network must be at least two-stage, i.e. have two reactive power values and accordingly two capacitance values. The reactive power value in such installations is regulated in steps by switching individual sections of capacitors, which are connected in series. Previously unknown specific transients can occur when switching series-connected capacitors in sinusoidal current circuits with non-zero initial conditions. These transients causing significant overvoltage on the capacitors. It is shown that for non-zero initial conditions, the calculation of transient processes in active-capacitive circuits with capacitors connected in series using the well-known classical method gives results that differ from the actual values.

The purpose of the article is to provide a previously unknown theoretical basis for calculating transient processes in electrical circuits containing capacitors connected in series. The studies carried out are of practical importance, since thyristor switches are used as switching equipment in modern electrical installations. In this case, the shunting of one capacitor in the compensating installation occurs at the maximum voltage on the operating capacitor and at zero voltage on the bypassed capacitor. In this case, overvoltage is possible on the capacitors exceeding the assumed values up to a double value. The theoretical substantiation of this phenomenon is given on the example of the analysis of the transient process in an active-capacitive circuit with two series-connected capacitors.

**Keywords:** compensating unit, filter compensating unit, numerical analysis, reactive power compensation, Runge – Kutta method, transient processes, transient processes calculating.

**For citation:** A.S. Serebryakov, L.A. German, V.L. Osokin and D.E. Dulepov, “Two-stage filter compensating units with series connection of sections in AC traction network. Transient analysis”, *Smart Electrical Engineering*, no. 1, pp. 77-98, 2022.  
DOI: 10.46960/2658-6754\_2022\_1\_77

## 1. Введение

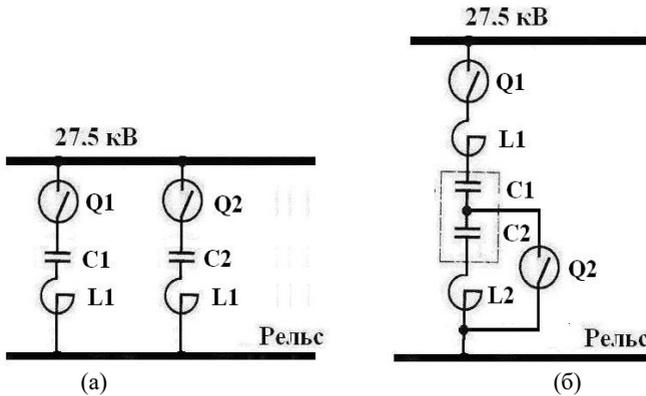
Активно-емкостные цепи с последовательным включением конденсаторов используют в электроэнергетике в установках поперечной емкостной компенсации реактивной мощности. В частности, они применяются в установках компенсации реактивной мощности в системах тягового электроснабжения железных дорог, электрифицированных на переменном токе [1–10]. В связи с возрастанием грузопотока, внедрением более мощного электроподвижного состава, появлением на участках тяжеловесных поездов, включая двоярные, увеличиваются тяговые нагрузки и потери напряжения от них. В результате понижается напряжение на токоприемниках электропоездов и снижается пропускная способность железной дороги.

Мощным средством усиления существующих систем электроснабжения с повышением пропускной способности железной дороги являются установки поперечной емкостной компенсации (КУ), комплексно воздействующие на все показатели режима тяговой сети.

В отличие от расчетов предыдущих лет, когда выполнялись требования энергосистемы и мощность КУ определялась «по разности тангенсов» [5] с 2010 г. расчет КУ производится с целью повышения пропускной способности железной дороги [6]. При этом мощность КУ увеличивается по сравнению с [5] в 1,5-2 раза и более, а установки выполняют требования двух документов [5] и [6]. В этом случае при снижении тяговой нагрузки, что обычно бывает при отсутствии тяжеловесных поездов, наступает режим перекомпенсации реактивной мощности с возрастанием напряжения в тяговой сети вплоть до предельно допустимого напряжения 29 кВ. Поэтому КУ, рассчитанные для повышения пропускной способности, обязательно должны быть регулируемы. Сегодня разработаны для тяговых сетей два варианта регулируемых установок: плавнорегулируемые и дискретно регулируемые, или переключаемые двухступенчатые КУ с параллельным или последовательным соединением секций (рис. 1) [12].

Каждая секция двухступенчатой КУ представляет последовательно соединенные конденсаторную батарею  $C1$  или  $C2$  и реактор  $L1$  или  $L2$ , настроенные на частоту менее 150 Гц [12]). В первом варианте (рис. 1, а) при параллельном соединении секций с увеличением тяговой нагрузки включаются обе секции. При последовательном соединении секций (рис. 1, б) при увеличении нагрузки шунтируется вторая секция выключателем  $Q2$  и в работе остается только одна первая секция. Возможен вариант, когда при двух последовательно включенных секций один реактор обеспечивает настройку на третью гармонику с эквивалентной емкостью двух секций.

Опираясь на опыт успешной эксплуатации КУ с последовательным соединением секций на тяговой подстанции Шумерля Горьковской железной дороги можно сделать вывод о том, что такой вариант КУ является наиболее экономичным вариантом по стоимостным показателям [11, 12].



**Рис.1. Двухступенчатые установки поперечной компенсации реактивной мощности в тяговой сети с включением секций: параллельно (а); последовательно (б)**

**Fig. 1. Two-stage units of transverse reactive power compensation in a traction network with connection of sections: parallel (a); series (b)**

Сегодня главный вопрос при эксплуатации КУ с последовательным соединением секций – замена коммутационного аппарата второй секции (вакуумный выключатель 10 кВ) на тиристорный ключ и соответствующее упрощение схемы подключения второй секции. Попытки включения тиристорного ключа на действующей установке на подстанции Шумерля, к сожалению, положительного эффекта не дали. Повреждение тиристорного ключа в течение года экспериментальной проверки заставило нас провести дополнительные исследования электромагнитных процессов при коммутации секций КУ. Ниже приведены результаты этих исследований. При переключениях последовательно включенных конденсаторов в активно-емкостной цепи могут возникать специфические переходные процессы, вызывающие значительные перенапряжения на конденсаторах.

Цель работы – рассмотреть неизвестное ранее теоретическое обоснования для расчета переходных процессов в электрических цепях синусоидального тока, содержащих последовательно включенные конденсаторы,

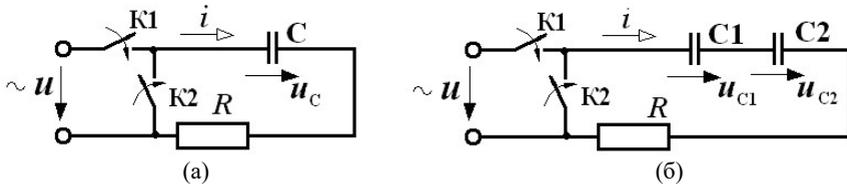
поскольку специфика переходных процессов в электрических цепях с последовательно соединенными конденсаторами в учебниках по теоретическим основам электротехники [13-14] не рассматривается.

## II. Методы исследования

Для расчета переходных процессов в электрических цепях чаще всего используют классический метод, который подробно рассмотрен во многих учебниках по теоретическим основам электротехники [13-14]. Однако, в некоторых случаях расчет по известному классическому методу дает результаты, отличные от действительных значений. В [13-14] показано, что при расчете переходного процесса классическим методом, ток и напряжения на отдельных элементах цепи в установившемся режиме в цепи определяются видом функции приложенного напряжения  $u(t)$ . Эти составляющие тока и напряжений находят как частные решения дифференциального уравнения цепи. Полное решение складывается из частного и общего решения, получаемого, если положить  $u(t) = 0$ . Зная ток в цепи, можно найти напряжения на отдельных элементах цепи. Для расчета установившихся значений напряжений и токов цепях синусоидального тока обычно также применяют комплексный (символический) метод, полагая, что установившиеся значения токов и напряжений не зависят от начальных условий (НУ) и являются синусоидальными функциями времени.

Однако, если электрическая цепь содержит два или более последовательно включенных конденсатора, в установившемся режиме значения напряжений на отдельных конденсаторах при синусоидальном питающем напряжении и синусоидальном токе могут в зависимости от НУ содержать и постоянные составляющие. Такие режимы могут возникнуть, например, в ступенчато регулируемых установках компенсации реактивной мощности при коммутации последовательно включенных конденсаторов. Пари этом возможны случаи, когда при синусоидальном токе и ненулевых НУ установившиеся значения напряжений на конденсаторах оказываются несинусоидальными. Рассмотрим этот вопрос подробнее на примерах расчета активно-емкостных цепей при питании их от источника синусоидального напряжения.

Для понятия существа вопроса и обоснования метода расчета цепи  $RC$  при включении ее на синусоидальное напряжение и при коммутации конденсаторов рассмотрим сначала переходный процесс в простейшей линейной цепи  $RC$  при включении ее на синусоидальное напряжение (рис. 2, а). После окончания кратковременного переходного процесса в цепи наступает установившийся режим. Напряжение на конденсаторе и ток, протекающий через конденсатор в установившемся режиме, будут синусоидальными величинами.



**Рис. 2. Принципиальная схема на синусоидальном токе линейной  $RC$  цепи с конденсаторами: одним (а); двумя, соединенными последовательно (б)**

**Fig. 2. Schematic diagram for sinusoidal current of a linear  $RC$  circuit with capacitors: one capacitor (a); two connected in series (b)**

### III. Основные расчеты

Поскольку ток является общим для всех участков цепи  $RC$ , начальную фазу для него обычно выбирают равной нулю [13]. Тогда начальная фаза  $\varphi$  питающего напряжения будет равна фазовому параметру нагрузки, т.е. фазовому параметру  $RC$  цепи  $\varphi = a \cdot \tan(-1/\omega CR)$ . Однако, в реальных случаях начальная фаза тока не всегда оказывается равной нулю. Поэтому для общего случая выражения для питающего напряжения и тока в переходном режиме запишем в виде:

$$u = U_m \sin((\omega \cdot t + \psi));$$

$$i = i_y + i_{св} = I_m \sin((\omega t + \psi - \varphi) + A e^{\frac{t}{RC}}), \quad (1)$$

здесь  $U_m$  и  $I_m$  – амплитуды питающего напряжения  $U$  и тока  $I$ ;  $i_y$  и  $i_{св}$  – установившаяся и свободная составляющие тока  $i$ ;  $\omega$  – угловая частота;  $A$  – постоянная интегрирования.

Дифференциальное уравнение для рассматриваемой цепи с последовательно включенными элементами  $R$  и  $C$  имеет вид:

$$u_R + u_C = Ri + u_C = Ri + \frac{1}{C} \int i dt + u_C(0) = U_m \sin((\omega t + \psi)), \quad (2)$$

где  $u_C(0)$  – напряжение на конденсаторе  $C$  в начальный момент времени.

Установившийся ток определяется видом действующего напряжения, то есть видом правой части дифференциального уравнения (2). Если приложенное напряжение изменяется по синусоидальному закону, то и

установившийся ток тоже будет изменяться по синусоидальному закону с той же частотой. Свободный ток представляет собой затухающую экспоненту, которая очень быстро затухает, так как значение питающего напряжения в этом случае считается равным нулю ( $u(t) = 0$ ). Подставив выражение (1) для тока в (2), получим:

$$RI_m \sin(\omega t + \psi - \varphi) + \frac{1}{C} \int_0^t I_m \sin(\omega t + \psi - \varphi) dt + \frac{1}{C} \int_0^t A e^{-\frac{t}{RC}} dt + u_c(0) = \quad (3)$$

$$= U_m \sin((\omega t + \psi)).$$

После интегрирования уравнения (3), считая, что установившийся режим наступает при затухании экспоненты, т.е. при  $t \rightarrow \infty$ , получим:

$$RI_m \sin(\omega t + \psi - \varphi) - \frac{1}{\omega C} I_m \cos(\omega t + \psi - \varphi) + \quad (4)$$

$$+ \frac{1}{\omega C} I_m \cos(\psi - \varphi) + AR + u_c(0) = U_m \sin((\omega t + \psi)).$$

Связь между амплитудами тока и напряжения записывается на основании известного закона Ома:

$$I_m = \frac{U_m}{Z} = \frac{U_m}{\sqrt{R^2 + \left(-\frac{1}{\omega C}\right)^2}}. \quad (5)$$

Поскольку правая часть (4) не содержит постоянных составляющих, то сумма всех постоянных составляющих в левой части этого уравнения также должна быть равна нулю:

$$\frac{1}{\omega C} I_m \cos(\psi - \varphi) + AR + u_c(0) = 0. \quad (6)$$

Из (6) определим постоянную интегрирования  $A$ :

$$A = -\frac{\frac{U_m}{\omega C} \cos(\psi - \varphi) + u_c(0)}{R} = -\frac{\frac{U_m}{\omega C \cdot Z} \cos(\psi - \varphi) + u_c(0)}{R} = \frac{U_m \sin(\varphi) \cos(\psi - \varphi) - u_c(0)}{R}. \quad (7)$$

Окончательное выражение для тока буде иметь вид:

$$\begin{aligned} i &= i_y + i_{cb} = I_m \sin((\omega t + \psi - \varphi) + Ae^{\frac{t}{RC}} = \\ &= I_m \sin((\omega t + \psi - \varphi) - \frac{\frac{U_m}{\omega C \cdot Z} \cos(\psi - \varphi) + u_c(0)}{R} e^{\frac{t}{RC}}. \end{aligned} \quad (8)$$

Напряжение на конденсаторе  $C$  определится по формуле:

$$\begin{aligned} u_c &= \frac{1}{C} \int_0^t idt + u_c(0) = \frac{1}{C} \int_0^t \left( I_m \sin((\omega t + \psi - \varphi) + Ae^{\frac{t}{RC}} \right) dt + u_c(0) = \\ &= \frac{1}{C} \int_0^t \frac{U_m}{Z} \sin(\omega t + \psi - \varphi) dt + \frac{1}{C} \int_0^t Ae^{\frac{t}{RC}} dt + u_c(0) = \\ &= -\frac{U_m}{\omega CZ} \cos(\omega t + \psi - \varphi) + \frac{U_m}{\omega CZ} \cos(+\psi - \varphi) - AR e^{\frac{t}{RC}} + AR + u_c(0). \end{aligned} \quad (9)$$

Подставив значение постоянной интегрирования  $A$  из (7) в (9), получим выражение для напряжения на конденсаторе  $C$ :

$$\begin{aligned} u_c &= -\frac{U_m}{\omega CZ} \cos(\omega t + \psi - \varphi) + \frac{U_m}{\omega CZ} \cos(\psi - \varphi) - \\ &- \left( \frac{-U_m}{\omega C \cdot Z} \cos(\psi - \varphi) - u_c(0) \right) e^{\frac{t}{RC}} + \left( \frac{-U_m}{\omega C \cdot Z} \cos(\psi - \varphi) - u_c(0) \right) + u_c(0) = \\ &= -\frac{U_m}{\omega CZ} \cos(\omega t + \psi - \varphi) + \left( \frac{U_m}{\omega C \cdot Z} \cos(\psi - \varphi) + u_c(0) \right) e^{\frac{t}{RC}}. \end{aligned} \quad (10)$$

Как видно из (10), установившееся напряжение на конденсаторе  $C$  синусоидальное. Оно не зависит от начального напряжения  $u_c(0)$  на конденсаторе  $C$ . Начальное напряжение  $u_c(0)$  на конденсаторе  $C$  в соответствии с (7) влияет только на постоянную интегрирования  $A$ . При отключении ключа  $K1$  и замыкания ключа  $K2$  конденсатор  $C$  разряжается до нуля.

Совсем другой результат получается при включении на синусоидальное напряжение цепи с двумя последовательно соединенными конденсаторами (рис. 1, б). По отношению к оставшейся части цепи два соединенные последовательно конденсатора  $C1$  и  $C2$  можно заменить одним эквивалентным конденсатором  $C$ , емкость которого  $C = \frac{C1 \cdot C2}{C1 + C2}$ .

Как и ранее, начальные фазы питающего напряжения и тока примем в соответствии с (1). Напряжение на эквивалентном конденсаторе  $C$  в начальный момент времени будет равно  $u_c(0) = u_{c1}(0) + u_{c2}(0)$ . Постоянная интегрирования  $A$  будет определяться, как и ранее по (7), а ток в цепи – по (8).

При такой методике ток в цепи будет определяться правильно. Однако, напряжения на каждом из конденсаторов могут при этом содержать в установившемся режиме постоянные составляющие и оказаться несинусоидальными, если НУ не нулевые и заряды на конденсаторах не равные, т.е.  $q_{c1}(0) = C1 \cdot u_{c1}(0) \neq q_{c2}(0) = C2 \cdot u_{c2}(0)$ . Правильные результаты для напряжений на конденсаторах можно получить только в том случае, если каждый конденсатор при расчетах учитывается как отдельный элемент схемы. Покажем это для случая двух последовательно соединенных конденсаторов (рис. 1, б). Напряжение на конденсаторе  $C1$  будет определяться в течение переходного процесса и в установившемся режиме по формуле:

$$\begin{aligned} u_{c1} &= \frac{1}{C1} \int_0^t i dt + u_{c1}(0) = \frac{1}{C1} \int_0^t \left( \frac{U_m}{Z} \sin((\omega t + \psi - \varphi) + A e^{-\frac{t}{RC}}) \right) dt + u_{c1}(0) = \\ &= -\frac{U_m}{\omega \cdot C1 \cdot Z} \cos(\omega t + \psi - \varphi) + \frac{U_m}{\omega \cdot C1 \cdot Z} \cos(\psi - \varphi) + \frac{A}{C1} (-RC) e^{-\frac{t}{RC}} - \\ &- \frac{A}{C1} (-RC) e^0 + u_{c1}(0) = -\frac{U_m}{\omega \cdot C1 \cdot Z} \cos(\omega t + \psi - \varphi) + \frac{U_m}{\omega \cdot C1 \cdot Z} \cos(\psi - \varphi) - \\ &- \frac{A}{C1} (RC) e^{-\frac{t}{RC}} + \frac{A}{C1} (RC) + u_{c1}(0). \end{aligned} \quad (11)$$

Подставив в (11) значение постоянной интегрирования  $A$  из (7)

$$A = \frac{-\frac{U_m}{\omega C \cdot Z} \cos(\psi - \varphi) - u_c(0)}{R},$$

получим выражение для напряжения  $u_{c1}$  на конденсаторе  $C1$  в течение переходного процесса и в установившемся режиме:

$$\begin{aligned}
u_{C1} &= -\frac{U_m}{\omega \cdot C1 \cdot Z} \cos(\omega t + \psi - \varphi) + \frac{U_m}{\omega \cdot C1 \cdot Z} \cos(\psi - \varphi) - \frac{A}{C1} (RC) e^{-\frac{t}{RC}} + \\
&+ \frac{A}{C1} (RC) + u_{C1}(0) = -\frac{U_m}{\omega \cdot C1 \cdot Z} \cos(\omega t + \psi - \varphi) + \frac{U_m}{\omega \cdot C1 \cdot Z} \cos(\psi - \varphi) - \\
&- \frac{\frac{U_m}{\omega C \cdot Z} \cos(\psi - \varphi) - u_c(0)}{C1} C e^{\frac{t}{RC}} + \frac{\frac{U_m}{\omega C \cdot Z} \cos(\psi - \varphi) - u_c(0)}{C1} C + \\
&+ u_{C1}(0) = -\frac{U_m}{\omega \cdot C1 \cdot Z} \cos(\omega t + \psi - \varphi) + \frac{U_m}{\omega \cdot C1 \cdot Z} \cos(\psi - \varphi) + \\
&+ \left( \frac{U_m}{\omega \cdot C1 \cdot Z} \cos(\psi - \varphi) + \frac{u_{C1}(0) + u_{C2}(0)}{C1} C \right) e^{-\frac{t}{RC}} - \frac{U_m}{\omega C1 \cdot Z} \cos(\psi - \varphi) - \\
&- \frac{u_{C1}(0) + u_{C2}(0)}{C1} \cdot C + u_{C1}(0) = -\frac{U_m}{\omega \cdot C1 \cdot Z} \cos(\omega t + \psi - \varphi) + \\
&+ \frac{u_{C1}(0) C1 - u_{C2}(0) C2}{C1 + C2} + \left( \frac{U_m}{\omega \cdot C1 \cdot Z} \cos(\psi - \varphi) + \frac{(u_{C1}(0) + u_{C2}(0)) C}{C1} \right) e^{-\frac{t}{RC}}.
\end{aligned} \tag{12}$$

Аналогично получим выражение для напряжения  $u_{C2}$  на конденсаторе  $C2$ :

$$\begin{aligned}
u_{C2} &= -\frac{U_m}{\omega \cdot C2 \cdot Z} \cos(\omega t + \psi - \varphi) + \frac{u_{C2}(0) C2 - u_{C1}(0) C1}{C1 + C2} + \\
&+ \left( \frac{U_m}{\omega \cdot Z \cdot C2} \cos(\psi - \varphi) + \frac{u_{C1}(0) + u_{C2}(0)}{C1 + C2} C1 \right) e^{-\frac{t}{RC}}.
\end{aligned} \tag{13}$$

Выражения (12) и (13) можно записать:

$$u_{C1} = u_{C1,y\Box} + u_{C1,y=} + u_{C1,ев}; \tag{14}$$

$$u_{C2} = u_{C2,y\Box} + u_{C2,y=} + u_{C2,ев} = u_{C2,y\Box} - u_{C1,y=} + u_{C2,ев}, \tag{15}$$

где  $u_{C1,y=} = \frac{u_{C1}(0) C1 - u_{C2}(0) C2}{C1 + C2}$  и  $u_{C2,y=} = \frac{u_{C2}(0) C2 - u_{C1}(0) C1}{C1 + C2} = -u_{C1,y=} -$

постоянные составляющие установившегося напряжения на конденсаторах  $C1$  и  $C2$ . Для расчета постоянных составляющих при расшунтировании секции  $C2$  в нуль тока можно использовать формулу  $u_{C1,y=} = -u_{C2,y=} = U_m \cdot n2 / (n1 + n2)$ , где  $n1$  и  $n2$  – количество рядов конденсаторов в секциях  $C1$  и  $C2$ .

Как видно из (14) и (15), напряжения на конденсаторах  $C1$  и  $C2$  содержат не только установившиеся синусоидальные составляющие  $u_{C1,y\sim}$  и  $u_{C2,y\sim}$ , но и установившиеся постоянные составляющие  $u_{C1,y=}$  и  $u_{C2,y=} = -u_{C1,y=}$ , причем, постоянные составляющие, равные по значению и противоположные по знаку.

#### IV. Математическая модель

Для подтверждения полученных положений и выводов проведем анализ переходных процессов в схеме на рис. 1, б методом численного решения дифференциальных уравнений в интегрированном пакете *Mathcad*. На рис. 3 приведена программа расчета переходного процесса при включении двух последовательно включенных конденсаторов с НУ на синусоидальное напряжение с последующим отключением их от источника напряжения и разрядом [15].

Дифференциальные уравнения, записанные в форме Коши для плоскокоммутиционной схемы на рис. 1, б имеют вид:

$$\frac{du_{c1}}{dt} = \frac{1}{C1} i = \frac{u(t) - u_{c1} - u_{c2}}{C1 \cdot R}; \quad (16)$$

$$\frac{du_{c2}}{dt} = \frac{1}{C2} i = \frac{u(t) - u_{c1} - u_{c2}}{C2 \cdot R}. \quad (17)$$

Ток в цепи определялся по формуле:

$$i = \frac{u(t) - u_{c1} - u_{c2}}{R}. \quad (18)$$

Решение системы двух дифференциальных уравнений (16)–(17) в интегрированном пакете *Mathcad* производится численным методом Рунге-Кутты четвертого порядка. Для решения используется стандартная функция *rkfixed* интегрирования дифференциальных уравнений в форме Коши с фиксированным шагом. Здесь введены следующие компьютерные переменные:  $x_0 = u_{C1}$  и  $x_1 = u_{C2}$  [15].

В скобках функции *rkfixed* перечисляются через запятую: вектор НУ  $x$  для искомым переменных ( $x_0(0) = u_{C1}(0) = 40$  В и  $x_1(0) = u_{C2}(0) = 0$  В), начальная 0 и конечная 2 точки интервала интегрирования, выраженные в секундах, число точек 200000, не считая нулевой точки, и вектор  $D$  первых производных искомым функций. Для вектора  $D$  первых производных искомым функций в скобках сначала указывается переменная, по которой берется производная (в данном случае это время  $t$ ), и через запятую указывается вектор функций, от которых берутся производные (это  $x$ ).

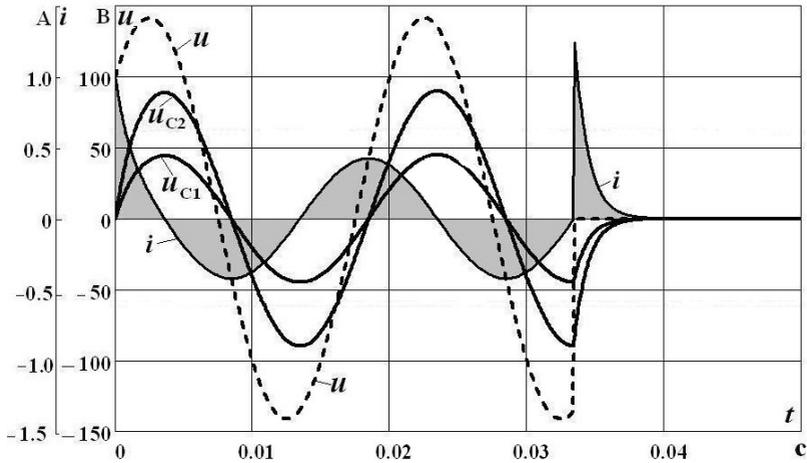
$$\begin{aligned}
 f &:= 50 & \omega &:= 2\pi \cdot f & \psi &:= 45 & U_m &:= 100\sqrt{2} = 141.421 \\
 u(t) &:= \text{if}(t \leq 0.0334, 100\sqrt{2} \sin(314t + \psi \text{ deg}), 0) \\
 R &:= 100 & C1 &:= 30 \cdot 10^{-6} & C2 &:= 15 \cdot 10^{-6} \\
 x &:= \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix} & D(t, x) &:= \begin{bmatrix} \frac{1}{C1} \cdot \left( \frac{u(t) - x_0 - x_1}{R} \right) \\ \frac{1}{C2} \cdot \left( \frac{u(t) - x_0 - x_1}{R} \right) \end{bmatrix} \\
 Z &:= \text{rkfixed}(x, 0, 1, 10000, D) & n &:= 0..10000 \\
 t_n &:= Z_{n,0} & uc1_n &:= Z_{n,1} & uc2_n &:= Z_{n,2} \\
 u_n &:= \text{if}(t_n \leq 0.0334, 100\sqrt{2} \sin(314t_n + \psi \text{ deg}), 0) \\
 i_n &:= \frac{u_n - uc1_n - uc2_n}{R} \\
 \frac{x_0 \cdot C1 - x_1 \cdot C2}{C1 + C2} &= 0 & \frac{x_1 \cdot C2 - x_0 \cdot C1}{C1 + C2} &= 0
 \end{aligned}$$

**Рис. 3. Программа расчета переходного процесса при включении двух последовательно включенных конденсаторов на синусоидальное напряжение с последующим их отключением от источника и разрядом:**  
 $C1 = 30 \text{ мкФ}$ ,  $C2 = 15 \text{ мкФ}$ ,  $uc1(0) = 0 \text{ В}$ ,  $uc2(0) = 0 \text{ В}$

**Fig. 3. The program for calculating the transient process when two capacitors connected in series are connected to a sinusoidal voltage followed by their disconnection from the voltage source and discharge:**

$$C1 = 30 \mu\text{F}, C2 = 15 \mu\text{F}, uc1(0) = 0 \text{ V}, uc2(0) = 0 \text{ V}$$

Включение и выключение ключей K1 и K2 в программе задается с помощью функции **if** с условием. Если время  $t < 0,0334 \text{ с}$  ( $< 33,4 \text{ мкс}$ ), то включен ключ K1 и питающее напряжение равно 100 В. Если же это условие не соблюдается ( $t \geq 0,0334 \text{ с}$ ), то  $U = 0$ , т.е. ключ K1 разомкнут, а ключ K2 замкнут. На рис. 4 приведены результаты расчета. В установившемся режиме ток в цепи синусоидальный. Его значение в установившемся режиме не зависит от начальных значений напряжений на конденсаторах C1 и C2, а зависит только от параметров питающего напряжения и параметров элементов электрической цепи.



**Рис. 4. Переходный процесс при включении двух последовательно включенных конденсаторов на синусоидальное напряжение с последующим их отключением от источника и разрядом:**

$$C1 = 30 \text{ мкФ}, C2 = 15 \text{ мкФ}, u_{C1}(0) = 0 \text{ В}, u_{C2}(0) = 0 \text{ В}$$

**Fig. 4. Transient process when two capacitors connected in series are connected to a sinusoidal voltage followed by their disconnection from the voltage source and discharge:**

$$C1 = 30 \text{ }\mu\text{F}, C2 = 15 \text{ }\mu\text{F}, u_{C1}(0) = 0 \text{ V}, u_{C2}(0) = 0 \text{ V}$$

Установившиеся напряжения на конденсаторах  $C1$  и  $C2$  также синусоидальные. После разряда (ключ  $K1$  выключен, а ключ  $K2$  включен) напряжения на конденсаторах становятся равными нулю. Для расчета установившегося тока и установившихся напряжений на конденсаторах в этом случае можно использовать комплексный (символический) метод. Свободные составляющие тока и напряжений имеют вид затухающих экспонент. Иной характер носит процесс, если НУ не нулевые, и заряды на конденсаторах  $C1$  и  $C2$  имеют разные значения. В этом случае в установившемся режиме напряжения на конденсаторах имеют не только синусоидальные составляющие, но и постоянные составляющие в соответствии с (12) и (13). Напряжения на конденсаторах в установившемся режиме оказываются несинусоидальными.

На рис. 5 приведена программа расчета переходного процесса при включении двух последовательно включенных конденсаторов  $C1$  и  $C2$  на синусоидальное напряжение с последующим их отключением от источника напряжения и разрядом при ненулевых НУ:  $u_{C1}(0) = 90 \text{ В}$ ,  $u_{C2}(0) = 0 \text{ В}$ . На рис. 6 приведены результаты расчета.

$$\begin{aligned}
 f &:= 50 & \omega &:= 2\pi \cdot f & \psi &:= 45 & U_m &:= 100\sqrt{2} = 141.421 \\
 u(t) &:= \text{if}(t \leq 0.0334, 100\sqrt{2} \sin(314t + \psi \cdot \text{deg}), 0) \\
 R &:= 100 & C1 &:= 30 \cdot 10^{-6} & C2 &:= 15 \cdot 10^{-6} \\
 x &:= \begin{pmatrix} 90 \\ 0 \end{pmatrix} & D(t, x) &:= \begin{bmatrix} \frac{1}{C1} \cdot \left( \frac{u(t) - x_0 - x_1}{R} \right) \\ \frac{1}{C2} \cdot \left( \frac{u(t) - x_0 - x_1}{R} \right) \end{bmatrix} \\
 Z &:= \text{rkfixed}(x, 0, 1, 10000, D) & n &:= 0..10000 \\
 t_n &:= Z_{n,0} & uc1_n &:= Z_{n,1} & uc2_n &:= Z_{n,2} \\
 u_n &:= \text{if}(t_n \leq 0.0334, 100\sqrt{2} \sin(314t_n + \psi \cdot \text{deg}), 0) \\
 i_n &:= \frac{u_n - uc1_n - uc2_n}{R} \\
 \frac{x_0 \cdot C1 - x_1 \cdot C2}{C1 + C2} &= 60 & \frac{x_1 \cdot C2 - x_0 \cdot C1}{C1 + C2} &= -60
 \end{aligned}$$

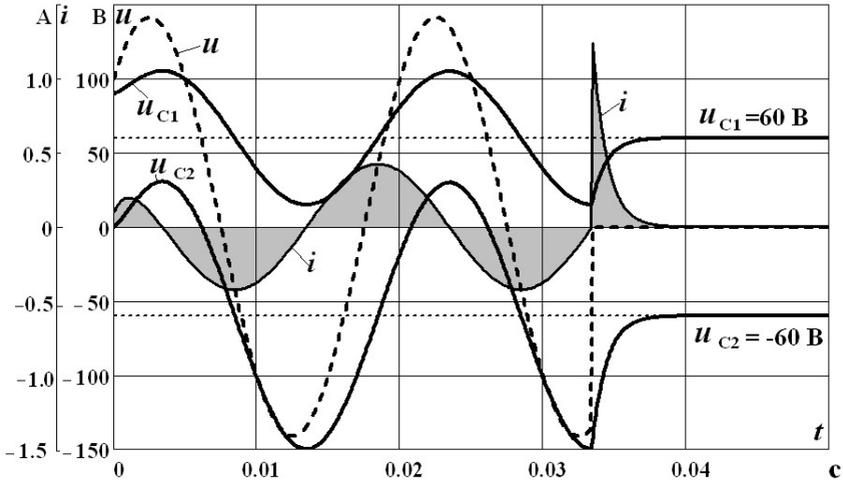
**Рис. 5. Программа расчета переходного процесса при включении двух последовательно включенных конденсаторов на синусоидальное напряжение с последующим их отключением от источника и разрядом:**  
 $C1 = 30 \text{ мкФ}$ ,  $C2 = 15 \text{ мкФ}$ ,  $uc1(0) = 90 \text{ В}$ ,  $uc2(0) = 0 \text{ В}$

**Fig. 5. The program for calculating the transient process when two capacitors connected in series are connected to a sinusoidal voltage followed by their disconnection from the voltage source and discharge:**

$$C1 = 30 \mu\text{F}, C2 = 15 \mu\text{F}, uc1(0) = 90 \text{ V}, uc2(0) = 0 \text{ V}$$

### V. Обсуждение результатов

Как видно из рис. 6, в установившемся режиме ток  $i$  в цепи по-прежнему синусоидальный. Его значение в установившемся режиме не зависит от начальных значений напряжений на конденсаторах  $C1$  и  $C2$ , а зависит только от параметров питающего напряжения и параметров элементов электрической цепи.



**Рис. 6. Переходный процесс при включении двух последовательно включенных конденсаторов на синусоидальное напряжение с последующим их отключением от источника и разрядом:**  
 $C1 = 30 \text{ мкФ}$ ,  $C2 = 15 \text{ мкФ}$ ,  $u_{C1}(0) = 90 \text{ В}$ ,  $u_{C2}(0) = 0 \text{ В}$

**Fig. 6. Transient process when two capacitors connected in series are connected to a sinusoidal voltage followed by their disconnection from the voltage source and discharge:**  
 $C1 = 30 \text{ }\mu\text{F}$ ,  $C2 = 15 \text{ }\mu\text{F}$ ,  $u_{C1}(0) = 90 \text{ V}$ ,  $u_{C2}(0) = 0 \text{ V}$

Напряжения на конденсаторах  $C1$  и  $C2$ , как видно из рис. 6, кроме принужденных синусоидальных составляющих содержат постоянные принужденные составляющие, которые определяются по формулам:

$$u_{C1,y} = \frac{u_{C1}(0) \cdot C1 - u_{C2}(0) \cdot C2}{C1 + C2} = \frac{(90 \cdot 30 - 0 \cdot 15) \cdot 10^{-6}}{(30 + 15) \cdot 10^{-6}} =$$

$$= \frac{90 \cdot 30 - 0 \cdot 15}{(30 + 15)} = \frac{2700}{45} = 60 \text{ В.}$$

$$u_{C2,y} = \frac{u_{C2}(0) \cdot C2 - u_{C1}(0) \cdot C1}{C1 + C2} = \frac{(0 \cdot 15 - 90 \cdot 30) \cdot 10^{-6}}{(30 + 15) \cdot 10^{-6}} =$$

$$= \frac{0 \cdot 15 - 90 \cdot 30}{(30 + 15)} = \frac{-2700}{45} = -60 \text{ В.}$$

Кривые тока и напряжений на конденсаторах  $C1$  и  $C2$ , рассчитанные по (8), (12) и (13) совпадают с кривыми на рис. 4 и 6, полученными в интегрированном пакете *Mathcad* методом численного интегрирования дифференциальных уравнений. Таким образом, наличие дополнительных постоянных составляющих в напряжениях на конденсаторах делает напряжения на конденсаторах несинусоидальными и увеличивает их действующие значения. При равных значениях  $C1$  и  $C2$  действующие значения напряжений на конденсаторах в установившемся режиме будут не  $0,5U$ , а  $\sqrt{(0,5U)^2 + (0,5U \cdot \sqrt{2})^2} = 0,866U$ , т.е. увеличатся в 1,73 раза по сравнению с ожидаемым значением. Это необходимо учитывать при расчетах и при проектировании установок компенсации реактивной мощности.

Рассмотрим с учетом полученных соотношений для цепей с последовательно включенными конденсаторами, как протекает процесс переключения КУ с максимальной мощности на минимальную мощность. Для анализа переходного процесса используем схему замещения КУ на рис. 7.

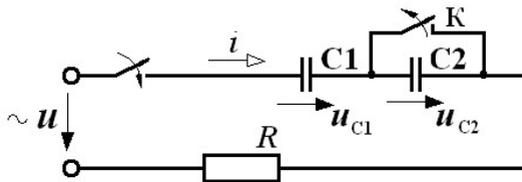


Рис. 7. Схема замещения двухступенчатой КУ

Fig. 7. Equivalent circuit of a two-stage compensating unit

Для перехода с максимальной мощности на минимальную мощность замкнутый ключ  $K$  размыкается и конденсатор  $C2$  расшунтируется. Если в качестве ключа  $K$  используется биполярный тиристорный ключ, то выключение его происходит в момент перехода тока через нуль, т.е. когда напряжение на конденсаторе  $C1$  близко к амплитудному значению. На рис. 8 приведены расчетные кривые для реальных параметров КУ: напряжение питания тяговой сети 25 кВ,  $C1 = 12$  мкФ,  $C2 = 24$  мкФ,  $R = 10$  Ом. В установившемся режиме напряжения на конденсаторах содержат постоянную составляющую, равную в соответствии с (12) и (13):  $u_{C1} = -u_{C2} = 25\sqrt{2} \cdot 12 / (12 + 24) = 11,8$  кВ, увеличивающую напряжения на конденсаторах.

После коммутации в момент времени  $t_0 = 0,045$  с заряженный до максимального значения конденсатор  $C1$  будет разряжаться через конденсатор  $C2$ , заряжая его. Поскольку конденсаторы соединены последовательно, то какой заряд потеряет при разряде конденсатор  $C1$ , в точности такой заряд и получит конденсатор  $C2$ .

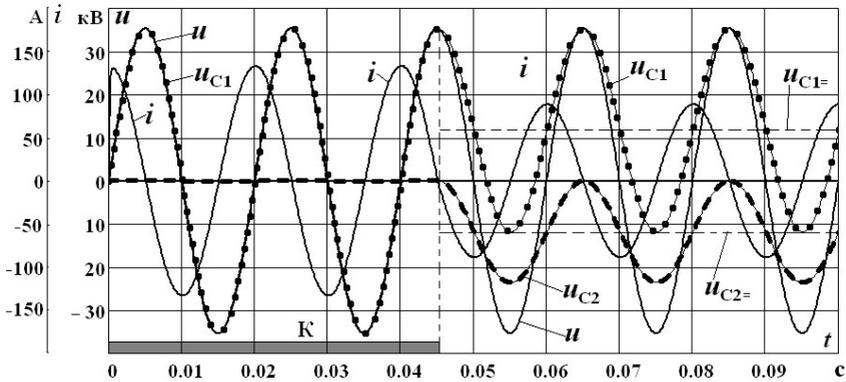


Рис. 8. Расчетные кривые переключения КУ с максимальной мощности на минимальную мощность

Fig. 8. Calculated curves for switching the compensating unit from maximum power to minimum power

Таким образом, в системе из двух последовательно включенных конденсаторов оказывается заряд внутреннего поглощения или заряд абсорбции, который из этой системы не исчезает в течение всего установившегося режима и не отдается во внешнюю цепь. Он лишь переходит от первого конденсатора ко второму, затем наоборот, и так далее в течение всего времени работы. Он формируется в начале переходного процесса за счет того, что заряды на конденсаторах в момент коммутации не равны. И это неравенство остается существовать в течение всего оставшегося времени.

Отметим, что в экспериментальных исследованиях на реальных электроустановках компенсации реактивной мощности указанные постоянные составляющие трудно обнаружить, так как при высоких значениях порядка 25 кВ напряжения на конденсаторах измеряют с помощью трансформаторов напряжения, которые постоянную составляющую не меняют.

## VI. Заключение

В тяговом электроснабжении с целью повышения пропускной способности предложен вариант установки поперечной емкостной компенсации с последовательным включением секций конденсаторов, успешно работающей много лет в тяговой сети, когда при снижении напряжения на электроподвижном составе увеличивается мощность

установки путем шунтирования второй секции. В настоящее время необходимо заменить коммутационную аппаратуру на вакуумных выключателях для переключения секций на тиристорный ключ 10 кВ. В связи с этим, потребовалась необходимость исследовать электромагнитные процессы при работе переключаемой фильтрокомпенсирующей установки.

При расчете переходных процессов в электрических цепях с последовательным включением конденсаторов следует с осторожностью пользоваться классическим методом расчета при включении цепи на переменное напряжение, а также при расшунтировании одного из конденсаторов. В установившемся режиме на конденсаторах может присутствовать постоянная составляющая.

По отношению к оставшейся части схемы два последовательно включенных конденсатора ведут себя как один эквивалентный конденсатор без постоянной составляющей. Поэтому нет и постоянной составляющей в токе. Постоянные составляющие на эквивалентном конденсаторе в сумме дают ноль, но на каждом из конденсаторов они увеличивают напряжение. В этом случае возможны перенапряжения, превышающие предполагаемые значения, в пределе до двойного значения. Их необходимо предвидеть и по возможности их избегать. В качестве меры для устранения постоянной составляющей можно рекомендовать кратковременное шунтирование конденсаторов резисторами. Чтобы получить истинные значения напряжений на конденсаторах, следует пользоваться численным методом решения дифференциальных уравнений или операторным методом.

© Серебряков А.С., 2022

© Герман Л.А., 2022

© Осокин В.Л., 2022

© Дулепов Д.Е., 2022

*Поступила в редакцию 24.02.2022*

*Received 24.02.2022*

### **Библиографический список**

- [1] Стратегия научно-технического развития холдинга «Российские железные дороги» на период до 2020 года и перспективу на 2025 года. «Белая книга». ОАО «РЖД», 2015. – 68 с. [Электронный ресурс]. URL: [http://www.rzd-expro.ru/innovation/BelKniga\\_2015.pdf](http://www.rzd-expro.ru/innovation/BelKniga_2015.pdf) (дата обращения 01.02.2022).
- [2] Правила устройства системы тягового электроснабжения железных дорог Российской Федерации. ЦЭ-462. М.: МПС, 1997. – 78 с.
- [3] Марквардт К.Г. Электроснабжение электрических железных дорог. М.: Транспорт, 1982 – 528 с.
- [4] Железко Ю.С. Потери электроэнергии. Реактивная мощность. Качество электроэнергии. М.: ЭНАС, 2009. – 456 с.

- [5] Приказ Министерства Промышленности и энергетики Российской Федерации № 49 от 22 февраля 2007 г «О порядке расчета значений соотношения потребления активной и реактивной мощности для отдельных энергопринимающих устройств (групп энергопринимающих устройств) потребителей электрической энергии, применяемых для определения обязательств сторон в договорах об оказании услуг по передаче электрической энергии (договорах электроснабжения)».
- [6] СТО РЖД 07.022.2-2015. Система тягового электроснабжения железной дороги переменного тока. Методика выбора мест размещения и мощности установки продольной и поперечноомпенсации реактивной мощности.
- [7] Довгун В.П., Егоров Д.Э., Важенина И.Г., Синяговский А.Ф. Регулируемые фильтрокомпенсирующие устройства для систем тягового электроснабжения // Омский научный вестник. 2018. № 5 (161). С. 45-50. DOI: 10.25206/1813-8225-2018-161-45-50
- [8] Ковалев И.Н. Выбор компенсирующих устройств при проектировании электрических сетей. М.: Энергоатомиздат, 1990. – 200 с.
- [9] Железко Ю.С. Компенсация реактивной мощности и повышение качества электроэнергии. М.: Энергоатомиздат, 1985. – 224 с.
- [10] Правила устройств электроустановок (ПУЭ). М.: Кнорус, 2009. – 488 с.
- [11] Герман Л.А., Серебряков А.С., Максимова А.А. Фильтрокомпенсирующие установки в тяговых сетях переменного тока // Вестник научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. 2016. Т. 75. № 1. С. 26-34.
- [12] Герман Л.А., Серебряков А.С., Дулепов Д.Е. Фильтрокомпенсирующие установки в системах тягового электроснабжения железных дорог. Книгинино: НГИЭУ, 2017. – 402с.
- [13] Нейман Л.Р., Демирчян К.С. Теоретические основы электротехники: В 2-т. Том 1. 3-е изд. Л.: Энергоиздат. Ленинградское отд-ние, 1981. – 536 с.
- [14] Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи. 12-е изд. М.: Изд-во Юрайт, 2014. – 701 с.
- [15] Кудрявцев Е.М. Mathcad 11: Полное руководство по русской версии. М.: ДМК Пресс, 2005. – 592 с.

## References

- [1] Strategiya nauchno-tekhnicheskogo razvitiya kholdinga «Rossiyskie zheleznye dorogi» na period do 2020 goda i perspektivu na 2025 goda. «Belaya kniga» [The strategy of scientific and technical development of the “Russian Railways” holding for the period up to 2020 and the prospect for 2025. “White paper”]. Russian Railways, 2015 (in Russian).
- [2] *Pravila ustroystva sistemy tyagovogo elektrosnabzheniya zheleznykh dorog Rossiyskoy federatsii. CE-462 [Rules for the construction of a traction power supply system for railways of the Russian Federation]*. Moscow: MPS, 1997 (in Russian).
- [3] K.G. Markvardt, *Elektrosnabzhenie elektricheskikh zheleznykh dorog [Power supply of electric railways]*. Moscow: Transport, 1982 (in Russian).

- [4] Yu.S. Zhelezko, *Poteri elektroenergii. Reaktivnaya moshchnost'. Kachestvo elektroenergii [Loss of electricity. Reactive power. Power quality]*. Moscow: ENAS, 2009 (in Russian).
- [5] Order of the Ministry of Industry and Energy of the Russian Federation No. 49 dated February 22, 2007 “O poryadke rascheta znacheniy sootnosheniya potebleniya aktivnoy i reaktivnoy moshchnosti dlya otdel'nykh energoprimimayushchikh ustroystv (grupp energoprimimayushchikh ustroystv) potebiteley elektrocheskoy energii, primenyaemykh dlya opredeleniya obyazatel'stv storon v dogovorakh ob okazanii uslug po peredache elektricheskoy energii (dogovorakh elektrosnabzheniya) [On the procedure for calculating the values of the ratio of consumption of active and reactive power for individual power receivers (groups of power receivers) of consumers of electric energy used to determine the obligations of the parties in contracts for the provision of services for the transmission of electrical energy (power supply contracts)]” (in Russian).
- [6] STO RZD 07.022.2-2015. Sistema tyagovogo elektrosnabzheniya zheleznoy dorogi peremennogo toka. Metodika vybora mest razmeshcheniya i moshchnosti ustanovki prodol'noy i poperechnoompensatsii reaktivnoy moshchnosti [AC railway traction power supply system. Methodology for selecting locations and capacity of the installation of longitudinal and transverse reactive power compensation] (in Russian).
- [7] V.P. Dovgun, D.E. Egorov, I.G. Vazhenina and A.F. Sinyagovskiy, “Adjustable harmonic filters for traction supply systems”, *Omsk Scientific Bulletin*, no. 5 (161), pp. 45-50, 2018. DOI: 10.25206/1813-8225-2018-161-45-50
- [8] I.N. Kovalev, *Vybor kompensiruyushchikh ustroystv pri proektirovanii elektricheskikh setey [The choice of compensating devices in the design of electrical networks]*. Moscow: Energoatomizdat, 1990 (in Russian).
- [9] Yu.S. Zhelezko, *Kompensatsiya reaktivnoy moshchnosti i povyshenie kachestva elektroenergii [Reactive power compensation and power quality improvement]*. Moscow: Energoatomizdat., 1985 (in Russian).
- [10] *Pravila ustroystv elektroustanovok (PUE) [Rules for electrical installations (PUE)]*. Moscow: Knorus, 2009 (in Russian).
- [11] L.A. German, A.S. Serebryakov and A.A. Maksimova, “Fitler compensating installations in AC traction networks”, *VNIIZHT Scientific Journal*, vol. 75, no. 1, pp. 26-34, 2016.
- [12] L.A. German, A.S. Serebryakov and D.E. Dulepov, *Fil'trokompensiruyushchie ustanovki v sistemakh tyagovogo elektrosnabzheniya zheleznykh dorog [Filter compensating installations in traction power supply systems of railways]*. Knyaginino: NGIEU, 2017 (in Russian).
- [13] L.R. Neyman and K.S. Demirchyan, *Teoreticheskie osnovy elektrotehniki [Theoretical foundations of electrical engineering]*. Vol. 1. 3rd ed. Leningrad: Energoizdat. Leningrad branch, 1981 (in Russian).
- [14] L.A. Bessonov, *Teoreticheskie osnovy elektrotehniki. Elektricheskie tsepi [Theoretical foundations of electrical engineering. Electrical circuits]*. 12th ed. Moscow: Yurayt, 2014 (in Russian).
- [15] E.M. Kudryavtsev, *Mathcad 11: Polnoe rukovodstvo po russkots versii [Mathcad 11: The complete guide to the Russian version]*. Moscow: DMK Press, 2005 (in Russian).

**ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ**  
**INFORMATION ABOUT THE AUTHORS**

**Серебряков Александр Сергеевич**, доктор технических наук, профессор Нижегородского государственного инженерно-экономического университета, г. Княгинино, Нижегородская область, Российская Федерация

**Aleksandr S. Serebryakov**, D. Sci. (Eng.), professor of the Nizhny Novgorod State Technical University of Engineering and Economics, Knyaginino, Nizhny Novgorod Region, Russian Federation

**Герман Леонид Абрамович**, доктор технических наук, профессор филиала Самарского государственного университета путей сообщения в Н. Новгороде, г. Нижний Новгород, Российская Федерация

**Leonid A. German**, D. Sci. (Eng.), professor of the Branch of the Samara State University of Railway Transport in N. Novgorod, Nizhny Novgorod, Russian Federation

**Осокин Владимир Леонидович**, кандидат технических наук, доцент Нижегородского государственного инженерно-экономического университета, г. Княгинино, Нижегородская область, Российская Федерация

**Vladimir L. Osokin**, Cand. Sci. (Eng.), associate professor of the Nizhny Novgorod State Technical University of Engineering and Economics, Knyaginino, Nizhny Novgorod Region, Russian Federation

**Дулупов Дмитрий Евгеньевич**, кандидат технических наук, заведующий кафедрой Нижегородского государственного инженерно-экономического университета, г. Княгинино, Нижегородская область, Российская Федерация

**Dmitriy E. Dulepov**, Cand. Sci. (Eng.), head of department of the Nizhny Novgorod State Technical University of Engineering and Economics, Knyaginino, Nizhny Novgorod Region, Russian Federation