

УДК 621.331

А. С. Серебряков, В. Л. Осокин, Д. Е. Дулепов

*Нижегородский государственный инженерно-экономический университет*

## **Переходный процесс в установке компенсации реактивной мощности с последовательным включением конденсаторов при расшунтировании одного из них**

*При проектировании переключаемых установок поперечной емкостной компенсации реактивной мощности в тяговых сетях переменного тока с интеллектуальными системами управления для повышения эксплуатационной надежности компенсирующих установок необходимо рассчитывать как установившиеся, так и переходные процессы в них. Показано, что в некоторых случаях расчет по известному классическому методу дает результаты, отличные от действительных значений. В качестве примера рассмотрен переходный процесс в цепи RC, включенной на переменное напряжение при изменении параметров цепи. Это вызвано тем, что при изменении тяговой нагрузки необходимо менять и емкость компенсирующей установки за счет шунтирования и расшунтирования одной из двух последовательно включенных секций конденсаторов. Показано, что при расчете переходных процессов в электрических цепях с последовательным включением конденсаторов следует с осторожностью пользоваться классическим методом расчета при расшунтировании одного из них. В этом случае в установившемся режиме на конденсаторах может присутствовать постоянная составляющая, которая повышает на них напряжение.*

*В переключаемых установках поперечной емкостной компенсации реактивной мощности два последовательно включенных конденсатора ведут себя как один эквивалентный конденсатор без постоянной составляющей. Постоянные составляющие на эквивалентном конденсаторе в сумме дают нуль, однако, на каждом из конденсаторов они увеличивают напряжение. Чтобы получить истинные значения напряжений на конденсаторах, следует пользоваться операторным методом или численным методом решения дифференциальных уравнений.*

*Проведенные исследования имеют практическое значение, так как в современных электроустановках в качестве коммутационной аппаратуры используются тиристорные ключи, при которых расшунтирование конденсатора происходит при максимальном напряжении на работающем конденсаторе. В этом случае возможны длительные перенапряжения, превышающие предполагаемые значения, в пределе – до двойного амплитудного значения питающего напряжения.*

### **Установка компенсации реактивной мощности, тяговая сеть переменного тока, численный метод решения дифференциальных уравнений, классический метод расчета переходных процессов, метод Рунге–Кутты, перенапряжение**

При проектировании установок компенсации реактивной мощности (КУ) с интеллектуальными системами управления необходимо рассчитывать как установившиеся, так и переходные процессы. В первую очередь это относится к установкам поперечной емкостной компенсации реактивной мощности в тяговых сетях переменного тока. Вопросы компенсации реактивной мощности в системах тягового электроснабжения переменного тока занимают многие ученые в России и за

рубежом [1]–[4]. При этом для расчета переходных процессов довольно часто используют классический метод. Классический метод расчета переходных процессов в линейных электрических цепях подробно рассмотрен во многих учебниках по теоретическим основам электротехники и другим дисциплинам [5], [6], однако в некоторых случаях расчет по известному классическому методу дает результаты, отличные от действительных значений. В качестве примера рассмотрим

переходный процесс в цепи  $RC$ , включенной на переменное напряжение при изменении параметров цепи (рис. 1). Такая  $RC$ -цепь применяется в установках компенсации реактивной мощности при изменении параметров нагрузки, например в тяговых сетях переменного тока при изменении интенсивности движения поездов [7]–[9].

Когда проходят тяжеловесные поезда и нагрузка в тяговой сети максимальна, емкость установки компенсации реактивной мощности также должна быть максимальной. В этом режиме включен только конденсатор  $C1$ , а конденсатор  $C2$  зашунтирован ключом  $K$  (рис. 1). Когда же нагрузка в тяговой сети уменьшается, емкость компенсирующей установки также должна быть уменьшена. В режиме минимальной мощности в установке компенсации последовательно включены конденсаторы  $C1$  и  $C2$  (ключ  $K$  разомкнут). Установку на рис. 1 называют двухступенчатой КУ. Резистор  $R$  включают только на момент коммутации ключа  $K$  для ограничения тока  $i$ .

Если установка компенсации выполняет еще и роль фильтра высших гармоник в тяговой сети, то в цепь последовательно с резистором  $R$  включают реактор с индуктивностью  $L$ , и установку в этом случае называют двухступенчатой фильтро-компенсирующей установкой (двухступенчатой ФКУ). Ради упрощения здесь рассмотрим процессы в КУ без учета реактора. Ключ  $K$  на рис. 1 включается и выключается автоматически в зависимости от значения тяговой нагрузки.

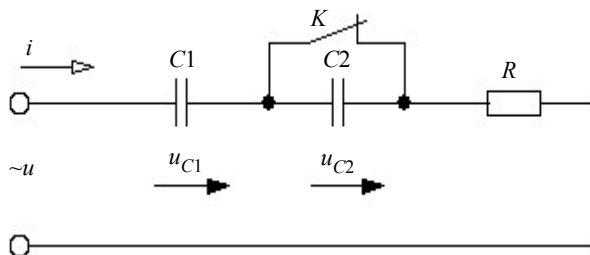


Рис. 1

В [8] указывается, что последовательное включение конденсаторов в установке компенсации реактивной мощности более предпочтительно по сравнению с параллельным включением, поскольку при последовательном включении напряжение на конденсаторах в режиме минимальной мощности меньше, чем при параллельном включении конденсаторов. Известно, что срок службы конденсаторов и их эксплуатационная надежность зависит от приложенного к ним напряжения, поэтому для правильного выбора

параметров конденсаторов чрезвычайно важно знать приложенное к ним напряжение в установившемся и переходном режимах. Цель статьи – дать обоснование правильного выбора метода расчета, применяемого для определения максимального напряжения на конденсаторах. Для этого рассмотрим переходные процессы в простейшей компенсирующей установке, показанной на рис. 1, при размыкании ключа  $K$ .

Процесс шунтирования конденсатора  $C2$  ключом  $K$  при переходе от минимальной мощности к максимальной не вызывает особых вопросов. Этот процесс был рассмотрен в [3]–[10], где было показано, что наиболее благоприятен для шунтирования конденсатора  $C2$  момент времени, когда напряжение на обоих конденсаторах близко к нулю.

Процесс же расшунтирования конденсатора  $C2$  при переходе от максимальной мощности к минимальной требует детального рассмотрения. Проведем анализ процесса расшунтирования известным из учебников классическим методом [5], [6]. Дифференциальное уравнение цепи  $RC$  после расшунтирования конденсатора  $C2$  записывается на основании второго закона Кирхгофа (рис. 1):

$$Ri + u_{C1} + u_{C2} = Ri + \frac{1}{C1} \int i dt + \frac{1}{C2} \int i dt = u = U_m \sin(\omega t + \psi). \quad (1)$$

Здесь  $U_m$  и  $\psi$  – амплитуда и начальная фаза питающего напряжения;  $\omega = 314$  – его угловая частота,  $\text{с}^{-1}$ ;  $u_{C1}$ ,  $u_{C2}$  – напряжения на конденсаторах  $C1$  и  $C2$ , кВ;  $t$  – время, с.

Согласно классическому методу расчета переходных процессов [5], [6] ток  $i$  в цепи и напряжения на конденсаторах  $C1$  и  $C2$  в установившемся режиме определяются только видом действующего в цепи напряжения (или действующей ЭДС). Если напряжение или ЭДС источника питания изменяется во времени по синусоидальному закону, то ток и напряжения в цепи в установившемся режиме должны быть, согласно классическому методу, также синусоидальными функциями времени той же частоты. Отыскание токов и напряжений в установившемся режиме сводится к нахождению частных решений дифференциальных уравнений цепи. Эти частные решения называются установившимися значениями. Полные решения дифференциальных уравнений цепи есть сумма установившихся, или принужденных, составляющих и свободных составляющих:

$$\begin{aligned} i &= i_y + i_{св}; \\ u_{C1} &= u_{C1y} + u_{C1св}; \\ u_{C2} &= u_{C2y} + u_{C2св}. \end{aligned}$$

где  $i$  – ток в цепи;  $i_y$  и  $i_{св}$  – установившаяся и свободная составляющие тока;  $u_{C1y}$  и  $u_{C2y}$  – установившиеся (принужденные) составляющие напряжения на конденсаторах  $C1$  и  $C2$ ;  $u_{C1св}$  и  $u_{C2св}$  – свободные составляющие напряжения на конденсаторах  $C1$  и  $C2$ .

Итак, согласно классическому методу, принужденная составляющая тока  $i$  есть частное решение дифференциального уравнения (1), определяемая видом правой части уравнения. В правой части уравнения (1) присутствует синусоидальное напряжение. Следовательно, принужденная составляющая тока в цепи после коммутации, т. е. после расшунтирования конденсатора  $C2$ , – это синусоидальная функция времени, определяемая по формуле

$$i_y = \frac{U_m \sin(\omega t + \psi + \phi)}{Z} = \frac{U_m \sin(\omega t + \psi + \phi)}{\sqrt{R^2 + \left(\frac{1}{\omega C1} + \frac{1}{\omega C2}\right)^2}},$$

где  $\phi = \arctan\left(\frac{\frac{1}{\omega C1} + \frac{1}{\omega C2}}{R}\right)$  – фазовый параметр

$RC$ -цепи при расшунтированном конденсаторе  $C2$ ;  $Z$  – модуль полного сопротивления цепи при расшунтированном конденсаторе  $C2$ .

При синусоидальном питающем напряжении и синусоидальном токе в цепи принужденные составляющие напряжений на конденсаторах  $C1$  и  $C2$  согласно классическому методу также будут синусоидальными функциями времени, определяемыми по формулам

$$\begin{aligned} u_{C1y} &= \frac{1}{\omega C1} i_y = \frac{1}{\omega C1} \frac{U_m \sin\left(\omega t + \psi + \phi - \frac{\pi}{2}\right)}{\sqrt{R^2 + \left(\frac{1}{\omega C1} + \frac{1}{\omega C2}\right)^2}}; \\ u_{C2y} &= \frac{1}{\omega C2} i_y = \frac{1}{\omega C2} \frac{U_m \sin\left(\omega t + \psi + \phi - \frac{\pi}{2}\right)}{\sqrt{R^2 + \left(\frac{1}{\omega C1} + \frac{1}{\omega C2}\right)^2}}. \end{aligned}$$

Примем, что емкости конденсаторов  $C1$  и  $C2$  равны, поэтому напряжения на них в установившемся режиме будут одинаковыми. В установив-

шемся режиме приложенное к двум конденсаторам напряжение разделится между ними поровну:  $u_{C1y} = u_{C2y}$ . Свободные составляющие определяются как

$$u_{C1св} = A1e^{pt}, \quad u_{C2св} = A2e^{pt}.$$

Здесь  $A1$  и  $A2$  – постоянные интегрирования, определяемые из начальных условий (НУ);

$p = -\frac{1}{R}\left(\frac{1}{C1} + \frac{1}{C2}\right)$  – корень характеристического

уравнения  $R + \frac{1}{pC1} + \frac{1}{pC2} = 0$ , составленного для

последкоммутационной схемы в соответствии с дифференциальным уравнением (1);  $p = 1/(-\tau)$ , где  $\tau$  – постоянная времени для последкоммутационной цепи.

Рассмотрим для определенности результаты анализа электрической цепи, показанной на рис. 1, с конкретными параметрами, характерными для тяговой сети переменного тока. Пусть цепь имеет параметры  $U_m = U\sqrt{2} = 25\sqrt{2} = 35.4$  кВ,  $C1 = C2 = 30$  мкФ =  $30 \cdot 10^{-6}$  Ф,  $X_{C1} = 106$  Ом,  $X_{C2} = 106$  Ом,  $R = 10$  Ом,  $p = -6667$  с $^{-1}$ ,  $\tau = 1/(-p) = 1.5 \cdot 10^{-4}$  с, фазовый параметр при расшунтированном конденсаторе  $C2$

$$\phi = \arctan\left(\frac{\frac{1}{\omega C1} + \frac{1}{\omega C2}}{R}\right) = \arctan\left(\frac{106 + 106}{10}\right) = 87.3^\circ.$$

Начальную фазу  $\psi$  питающего напряжения  $u$  ради упрощения будем считать равной нулю. Далее она будет задаваться моментом коммутации. Для заданных параметров получим выражения для тока и напряжений на конденсаторах  $C1$  и  $C2$  в режиме после коммутации, т. е. после размыкания ключа  $K$  с учетом включенного резистора  $R$ :

$$\begin{aligned} i'_y &= i_y + i_{св} = \frac{U_m \sin(\omega t + \psi + \phi)}{Z} + Ae^{pt} = \\ &= \frac{U_m \sin(\omega t + \psi + \phi)}{\sqrt{R^2 + \left(\frac{1}{\omega C1} + \frac{1}{\omega C2}\right)^2}} + Ae^{pt} = \\ &= \frac{25\,000\sqrt{2} \sin(\omega t + 87.3^\circ)}{212.5} + Ae^{-6667t} = \\ &= 166 \sin(314t + 87.3^\circ) + Ae^{-\frac{t}{0.00015}}; \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned}
 u_{C1} &= u_{C1y} + u_{C1cb} = \\
 &= \frac{1}{\omega C1} \frac{U_m \sin\left(\omega t + \phi - \frac{\pi}{2}\right)}{\sqrt{R^2 + \left(\frac{1}{\omega C1} + \frac{1}{\omega C2}\right)^2}} + A1e^{pt} = \\
 &= 17.7 \sin(314t - 2.7^\circ) + A1e^{-6667t} = \\
 &= 17.7 \sin(314t - 2.7^\circ) + A1e^{-\frac{1}{0.00015}}, \quad (3)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 u_{C2} &= u_{C2y} + u_{C2cb} = \\
 &= \frac{1}{\omega C2} \frac{U_m \sin\left(\omega t + \phi - \frac{\pi}{2}\right)}{\sqrt{R^2 + \left(\frac{1}{\omega C1} + \frac{1}{\omega C2}\right)^2}} + A2e^{pt} = \\
 &= 17.7 \sin(314t - 2.7^\circ) + A2e^{-6667t} = \\
 &= 17.7 \sin(314t - 2.7^\circ) + A2e^{-\frac{1}{0.00015}}. \quad (4)
 \end{aligned}$$

В (2) для тока питающее напряжение выражено в вольтах, а в (3) и (4) для напряжений на конденсаторах – в киловольтах. На рис. 2 приведены зависимости тока в цепи и напряжений на конденсаторах  $C1$  и  $C2$  в соответствии с выражениями (2)–(4). Расшунтирование конденсатора  $C2$  происходит в момент максимального напряжения на конденсаторе  $C1$  (в момент времени  $t = 0.045$ с), когда мгновенные значения питающего напряжения  $u$  и напряжения на конденсаторе  $C1$  близки к амплитудным значениям, если пренебречь ради наглядности небольшой погрешностью в несколько градусов ( $2.7^\circ$ ). Начальные условия будут такими:  $t_0 = 0.045$  с,  $u(t_0) = 35.4$  кВ,  $u_{C1}(t_0) = 35.4$  кВ,  $u_{C2}(t_0) = 0$  кВ,  $i_0 = 0$ . Следовательно, постоянная интегрирования  $A$  будет равна нулю, а постоянные интегрирования  $A1$  и  $A2$ , определенные из (3) и (4),

будут равны по модулю и противоположны по знаку:  $A1 = 17.7$  кВ,  $A2 = -17.7$  кВ.

В (2)–(4) отсчет времени начинается с нуля при  $t_0 = 0.045$  с. Замкнутое положение ключа  $K$  на рис. 2 показано затемненной полосой внизу графика. На рисунке показаны расчетные кривые переходного процесса при расшунтировании конденсатора  $C2$ , полученные решением дифференциальных уравнений классическим методом. Как видно из рисунка, напряжения на конденсаторах  $C1$  и  $C2$  после коммутации спустя короткое время, равное  $3\tau = 4.5 \cdot 10^{-4}$  с, изменяются по синусоидальному закону от значения, близкого к  $U_m/2 = 17.7$  кВ, до значения, близкого к  $-U_m/2 = -17.7$  кВ. Действующие значения напряжений на конденсаторах будут близки к значению  $U/2$ , т. е. примерно равны 12.5 кВ. Переходный процесс заканчивается очень быстро, так как мала постоянная времени  $\tau = 1/(-p) = 1.5 \cdot 10^{-4}$  с.

В действительности же процесс расшунтирования, как показывает эксперимент, протекает иначе. На рис. 3 приведены зависимости напряжения на конденсаторах  $C1$ ,  $C2$  и тока в цепи, полученные методом численного решения дифференциальных уравнений, записанных в форме Коши, для послеконмутационной схемы на рис. 1:

$$\frac{du_{C1}}{dt} = \frac{1}{C1} i = \frac{u - u_{C1} - u_{C2}}{C1R}; \quad (5)$$

$$\frac{du_{C2}}{dt} = \frac{1}{C2} i = \frac{u - u_{C1} - u_{C2}}{C2R}. \quad (6)$$

Ток в цепи определялся по формуле

$$i = \frac{u - u_{C1} - u_{C2}}{R}.$$

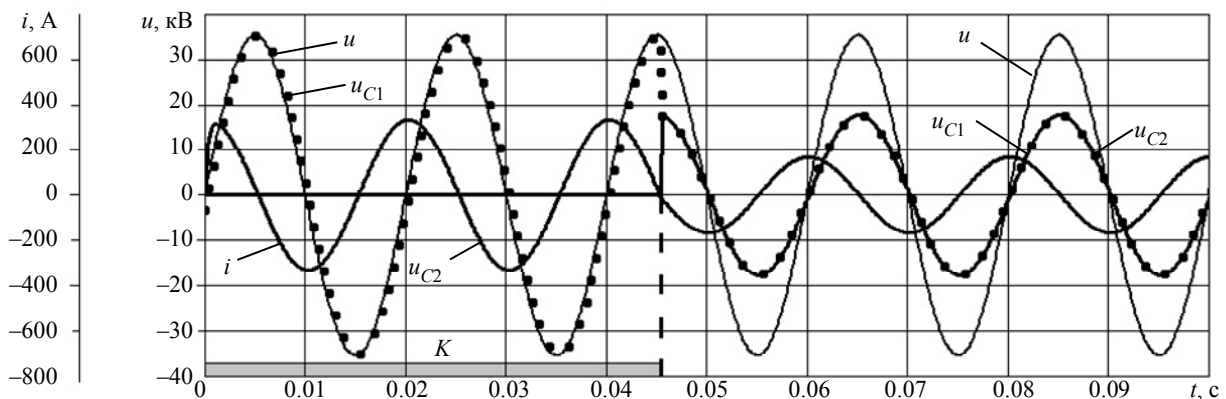


Рис. 2

Интегрирование дифференциальных уравнений (5) и (6) проводилось в интегрированном пакете MathCad численным методом Рунге–Кутты четвертого порядка с фиксированными шагом интегрирования [11]. Для этого использовалась стандартная программа *rkfixed*. Замкнутое положение ключа *K* на рис. 3, как и на рис. 2, показано затемненной полосой. Экспериментальные кривые совпадают с расчетными кривыми на рис. 3.

Поясним происходящие в цепи процессы. 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 и емкости конденсаторов равны, то насколько разрядится конденсатор *C1*, т. е. насколько понизится его напряжение, настолько же зарядится конденсатор *C2* и ровно настолько же повысится его напряжение. Конденсаторы практически не перезаряжаются. Они работают только в одной полярности напряжения. Каждый из конденсаторов имеет одинаковую по модулю постоянную составляющую  $U = U_m/2$ , равную половине мгновенного значения напряжения на конденсаторе *C1* или половине питающего напряжения в момент коммутации. Однако знаки этих постоянных составляющих противоположны:  $u_{C1} = 17.7$  кВ,  $u_{C2} = -17.7$  кВ. Поэтому в результирующем напряжении  $u_{C1} + u_{C2} = 0$  и постоянная составляющая на эквивалентном конденсаторе, образованном двумя последовательно включенными конденсаторами, отсутствует. Максимальное по модулю значение напряжения на каждом конденсаторе близко к амплитуде питающего напря-

жения. Действующее значение напряжения на каждом конденсаторе составляет на самом деле не 0.5, а, как показывают расчеты, 0.86*U*.

Сравнивая рис. 2 и 3, отметим, что значения тока на обоих рисунках совпадают, а значения напряжений на конденсаторах сильно различаются. Это объясняется тем, что при составлении дифференциального уравнения (1) и при решении задачи классическим методом начальные условия не учитываются. Они учитываются только при определении постоянных интегрирования *A1* и *A2*. Именно неучет начальных условий при составлении уравнений приводит к тому, что при решении (1) последовательно соединенные конденсаторы *C1* и *C2* формально становятся как бы одним эквивалентным конденсатором, емкость которого определяется по формуле

$$C = \frac{C1 C2}{C1 + C2}.$$

Поскольку постоянные интегрирования *A1* и *A2* в сумме дают нуль и не наблюдаются на эквивалентном конденсаторе, то получается ошибочный вывод о том, что на каждом из конденсаторов постоянная составляющая отсутствует.

В действительности же 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. Этот заряд никуда не исчезает, он остается в системе на все оставшееся время. Он форми-

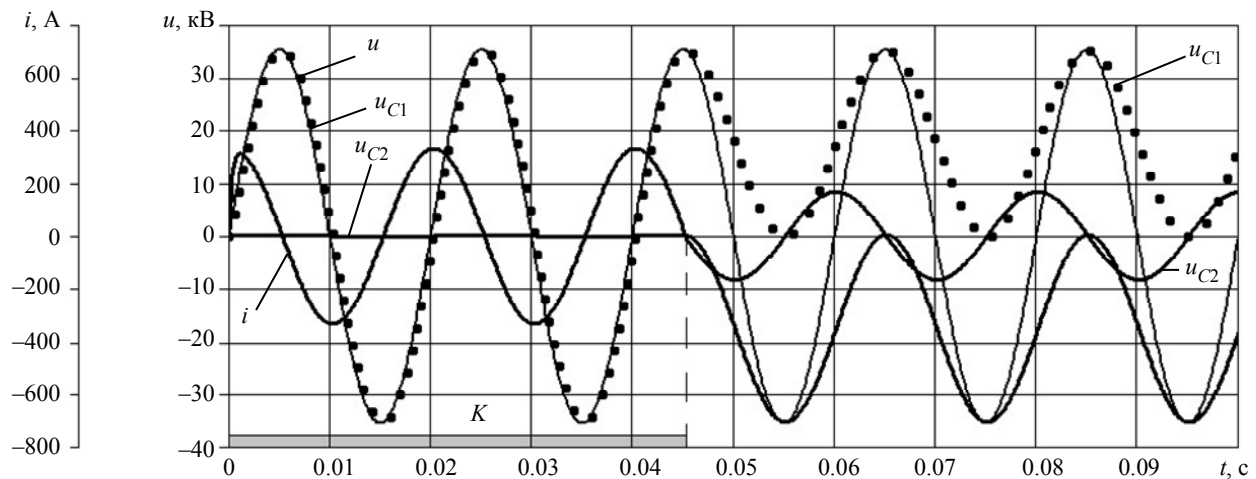


Рис. 3

руется 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.

На рис. 4 приведены кривые переходного процесса при расшунтировании конденсатора  $C_2$ , также полученные решением дифференциальных уравнений (5) и (6) численным методом, но при других начальных условиях. Расшунтирование конденсатора  $C_2$  происходит в момент времени  $t_0 = 0.04$  с, когда питающее напряжение и напряжения на обоих конденсаторах равны нулю. Тогда практически сразу наступает установившийся режим, в котором постоянные составляющие на обоих конденсаторах равны нулю.

В этом случае перенапряжений не возникает, но отключить ключ  $K$  при максимальном значении тока на практике очень сложно, особенно если это биполярный тиристорный ключ.

На рис. 5 приведены кривые переходного процесса при расшунтировании конденсатора  $C_2$ ,

также полученные решением дифференциальных уравнений (5) и (6) численным методом, но расшунтирование конденсатора  $C_2$  здесь происходит в момент времени  $t_0 = 0.042$  с. Постоянные составляющие  $u_{C1} = 7.2$  кВ,  $u_{C2} = -7.2$  кВ; напряжение на конденсаторе  $C_1$  при  $t_0 = 0.042$  с равно 14.34 кВ.

Дальнейший анализ показал, что здесь можно сделать следующий вывод. Если конденсаторы имеют одинаковые емкости, то после расшунтирования ранее замкнутого конденсатора  $C_2$  в установившемся режиме на каждом конденсаторе  $C_1$  и  $C_2$  будут одинаковые по модулю постоянные составляющие напряжения, практически равные половине значения напряжения на незашунтированном конденсаторе  $C_1$  в момент коммутации. Знаки этих постоянных составляющих будут противоположны, причем знак постоянной составляющей напряжения на конденсаторе  $C_1$  всегда такой же, как и знак напряжения на нем в момент

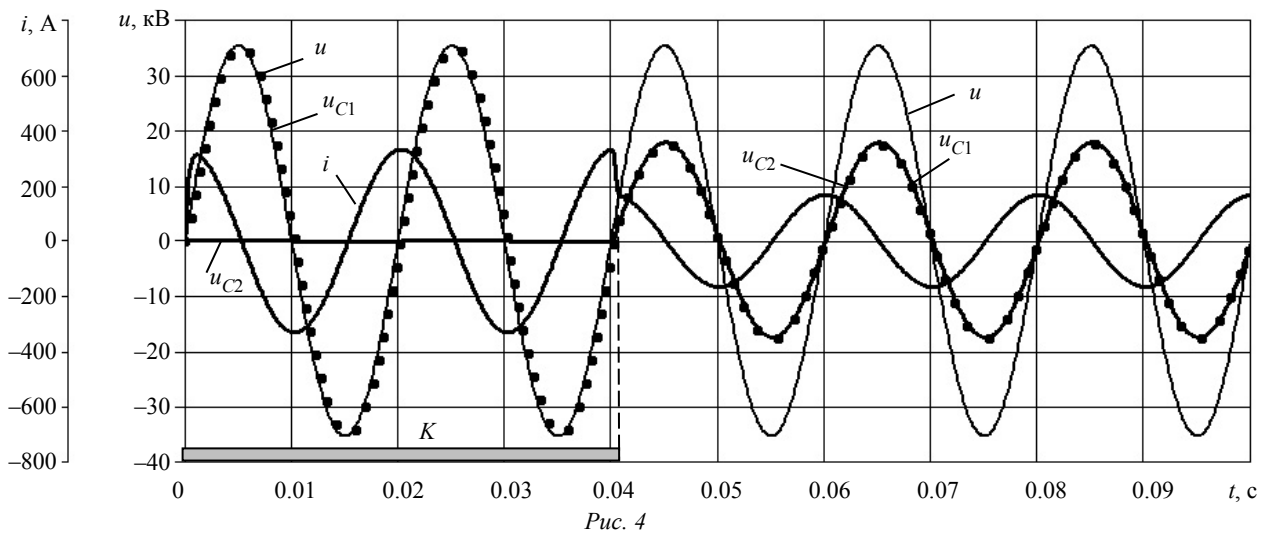


Рис. 4

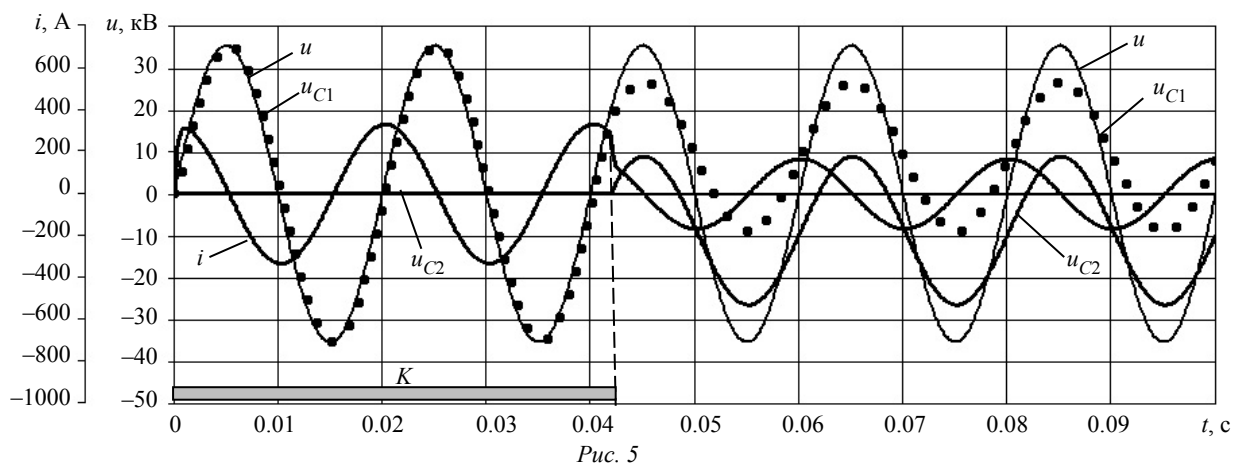


Рис. 5

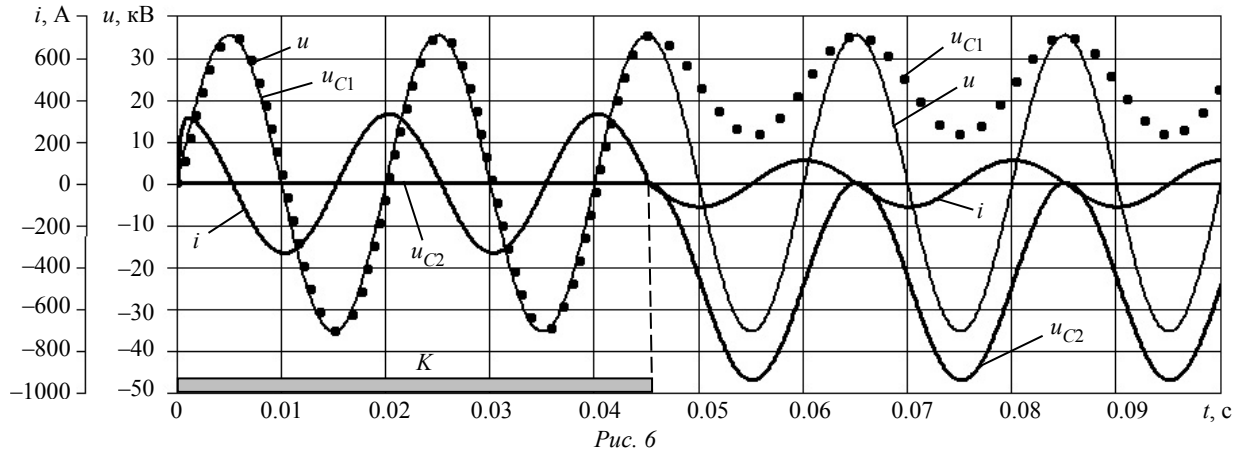


Рис. 6

расшунтирования конденсатора  $C2$ , а знак постоянной составляющей напряжения на конденсаторе  $C2$  – противоположный.

На рис. 5 приведены кривые переходного процесса при расшунтировании конденсатора  $C2$ , полученные решением дифференциальных уравнений численным методом при не нулевых начальных условиях и не равных емкостях конденсаторов. Емкость расшунтируемого конденсатора  $C2$  меньше емкости работающего конденсатора  $C1$ . Как видно из рис. 6, в этом случае максимальное значение на конденсаторе  $C2$  в установившемся режиме после его расшунтирования может значительно превышать амплитуду питающего напряжения. Здесь постоянные составляющие на конденсаторах будут равны, а синусоидальные составляющие будут обратно пропорциональны их емкостям. При большом различии в значениях емкостей конденсаторов в случае меньшего значения емкости расшунтируемого конденсатора  $C2$  напряжение на нем может превысить питающее напряжение, в пределе – до его двойного амплитудного значения.

Начальные условия не нулевые. Конденсаторы имеют разные емкости ( $C1 = 30$  мкФ,  $C2 = 15$  мкФ).

Отметим, что в экспериментальных исследованиях на реальных электроустановках компенсации реактивной мощности в тяговых сетях переменного тока указанные постоянные составляющие трудно обнаружить, так как при высоких напряжениях на конденсаторах (порядка 25 кВ) напряжения на них измеряют с помощью трансформаторов напряжения, которые постоянную составляющую не трансформируют, и на осциллограмме она не видна.

При расчете переходных процессов в электрических цепях с последовательным включением конденсаторов следует с осторожностью пользоваться классическим методом расчета 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 постоянной составляющей в токе нет. Постоянные составляющие на эквивалентном конденсаторе в сумме дают нуль, но на каждом из конденсаторов они увеличивают напряжение.

Чтобы получить истинные значения напряжений на конденсаторах, следует пользоваться численным методом решения дифференциальных уравнений или операторным методом.

Проведенные исследования имеют практическое значение, так как в современных электроустановках часто в качестве коммутационной аппаратуры используются тиристорные ключи, которые включаются в момент подачи управляющего сигнала, а выключаются при прохождении тока через нуль, т. е. в емкостных цепях выключение тиристорных ключей и расшунтирование конденсаторов происходит при нулевом токе и максимальном напряжении на работающем конденсаторе. В этом случае возможны перенапряжения, превышающие предполагаемые значения, в пределе – до двойного амплитудного значения питающего напряжения. Эти перенапряжения необходимо предвидеть и по возможности их избегать. В качестве меры для устранения постоянной составляющей можно рекомендовать кратковременное шунтирование конденсаторов резисторами.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Das J. Passive filters – potentialities and limitations // IEEE. Transactions on Industry Applications. 2004. Vol. 40, № 1. P. 232–241.
2. Регулируемые фильтрокомпенсирующие устройства для систем тягового электроснабжения / В. П. Довгун, Д. Э. Егоров, И. Г. Важенина, А. Ф. Синяговский // Омский науч. вестн. 2018. № 5 (161). С. 45–50.
3. Двухступенчатая установка поперечной емкостной компенсации в тяговых сетях железных дорог / А. С. Серебряков Л. А. Герман, Д. В. Якунин, В. А. Маралова, А. А. Максимова // ЭЭТ – Электроника и электрооборудование транспорта. 2016. № 4. С. 27–31.
4. Герман Л. А., Серебряков А. С., Максимова А. А. Фильтрокомпенсирующие установки в тяговых сетях переменного тока // Вестн. науч.-исслед. ин-та ж.-д. трансп. 2016. Т. 75, № 1. С. 26–34.
5. Нейман Л. Р., Демирчян К. С. Теоретические основы электротехники: в 2 т. Учеб. для вузов. Т. 1. 3-е изд., перераб. и доп. Л.: Энергоиздат Ленингр. отд-ние, 1981.
6. Бессонов Л. А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи: учебн. для бакалавров. 12-е изд., исправ. и доп. М.: Изд-во Юрайт, 2014.
7. Доманский И. В. Режимы работы системы тягового электроснабжения переменного тока с устройствами компенсации реактивной мощности // Электротехника и электромеханика. 2015. № 3. С. 59–66.
8. Герман Л. А., Серебряков А. С., Дулепов Д. Е. Фильтрокомпенсирующие установки в системах тягового электроснабжения железных дорог / НГИЭУ. Княгинино, 2017.
9. Доманский И. В. Режимы работы системы тягового электроснабжения переменного тока с устройствами компенсации реактивной мощности // Электротехника и электромеханика. 2015. № 3. С. 59–66.
10. Серебряков А. С., Герман Л. А., Осокин В. Л. Исследование переходных процессов в переключаемой фильтрокомпенсирующей установке // Интеллектуальная электротехника. 2018. № 2. С. 84–92.
11. Серебряков А. С. MATHCAD и решение задач электротехники: учеб. пособие. 2-е изд., перераб. и доп. / Учеб.-метод. центр по образованию на ж.-д. транспорте. М., 2019.

A. S. Serebryakov, V. L. Osokin, D. E. Dulepov  
Nizhny Novgorod State Engineering and Economic

### TRANSIENT PROCESS IN REACTIVE POWER COMPENSATION UNIT WITH SERIES CONNECTION OF CAPACITORS WHEN ONE OF THEM IS DISCONNECTED

*When designing switchable installations of transverse capacitive reactive power compensation in AC traction networks with intelligent control systems, it is necessary to calculate both steady-state and transient processes in them to increase the operational reliability of compensating installations.*

*It is shown that in some cases, the calculation using the well-known classical method gives results that differ from the actual values. As an example, the transient process in RC circuit connected to alternating voltage (when the circuit parameters change) is considered. This is due to the fact that when changing the traction load, it is necessary to change the capacity of the compensating installation by shunting and disconnecting one of the two series-connected sections of capacitors.*

*It is shown that when calculating transients in electrical circuits with series capacitors switching on, it is necessary to use the classical calculation method with caution when one of the capacitors is disconnected. In this case, in steady-state mode, a constant component may be present on the capacitors, which increases the voltage on the capacitors.*

*According to the remaining portion of the circuit, the two series-connected capacitors behave as one equivalent capacitor without a constant component. The constant components on the equivalent capacitor add up to zero. However, they increase the voltage on each of the capacitors. To obtain true voltage values on capacitors, you should use the operator method or the numerical method for solving differential equations.*

*The conducted research is of practical importance, because in modern electrical installations thyristor switches are used as switching equipment, in which the capacitor is disconnected at the maximum voltage on the operating capacitor. In this case, long-term overvoltages exceeding the expected values are possible, in the limit up to double amplitude value of the supply voltage.*

**Reactive power compensation unit, AC traction network, numerical method for solving differential equations, classical method for calculating transients, Runge–Kutta method, overvoltage**