

УДК 621.331 :621.311.025

Л.А. Герман¹, А.С. Серебряков², Д.Е. Дулепов²**ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ДВУХСТУПЕНЧАТОЙ
УСТАНОВКЕ ПОПЕРЕЧНОЙ ЕМКОСТНОЙ КОМПЕНСАЦИИ
В СИСТЕМЕ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ**

Нижегородский филиал Московского государственного университета путей сообщения¹,
Нижегородский государственный инженерно-экономический институт²

Исследованы переходные процессы при включении второй ступени двухступенчатой установки поперечной емкостной компенсации (КУ) в тяговых сетях железных дорог. Предложены технические решения для повышения эксплуатационной надежности КУ.

Ключевые слова: поперечная емкостная компенсация, двухступенчатая регулируемая установка, перенапряжения, коммутация, переходные процессы.

Необходимость поперечной емкостной компенсации (КУ) в тяговой сети переменного тока с учетом специфики электроснабжения железных дорог [1] диктуется следующими требованиями:

1. Повышение пропускной способности участков железной дороги. Эта проблема возникает с ростом грузопотока по железной дороге, когда напряжение на токоприемнике электровоза достигает наименьшего допустимого напряжения 21 кВ и ниже.

2. Требования региональных электроснабжающих сетевых компаний по компенсации реактивной мощности до нормированных значений [2]. Для тяговых подстанций 110 кВ нормированное значение характеризуется коэффициентом реактивной мощности $\text{tg}\varphi = 0,5$.

3. Включение КУ позволяет снизить потери мощности и электроэнергии. В частности, в тяговой сети потери мощности от протекания реактивных токов составляют 20...30% от суммарных потерь.

Спецификой тяговой нагрузки является ее неравномерность. Поэтому в связи с постоянно изменяющейся тяговой нагрузкой включение нерегулируемой КУ приводит к повышению напряжения, когда нагрузка уменьшается и становится близкой к нулю. Чтобы не допустить повышения напряжения, мощность КУ в этом случае должна быть снижена. Таким образом, в системе тягового электроснабжения источник реактивной мощности должен быть регулируемым, чтобы генерируемая КУ реактивная мощность была пропорциональна тяговой нагрузке.

Анализ состояния имеющихся технических решений показывает, что в настоящее время и в ближайшей перспективе реально выполнить регулирующую КУ ступенчатой с небольшим числом ступеней [1, 4].

Схема двухступенчатой КУ показана на рис. 1. Обе ступени подключены к шинам 27,5 кВ. Первая ступень настроена на фильтрацию третьей гармоники, а вторая – на фильтрацию пятой гармоники. Для компенсации реактивной мощности сначала всегда включается первая ступень и при повышении тяговой нагрузки к ней подключается вторая. При снижении нагрузки отключается сначала вторая ступень, а затем при необходимости и первая ступень. Порядок включения первой ступени следующий: включается вакуумный выключатель В11 (27,5 кВ), затем включается вакуумный выключатель В12 (10 кВ), шунтирующий демпфирующий резистор R1. Отключение первой ступени происходит в обратном порядке. Вторая ступень, так же как и первая, включается с помощью вакуумного выключателя В21 сначала через демпфирующий резистор R2, который затем шунтируется выключателем В22.

Как показали исследования, проведенные авторами, при включении второй ступени

КУ выключателем В21 и при шунтировании демпфирующего резистора R2 при работе первой ступени в штатном режиме образуется колебательный контур, содержащий последовательно включенные конденсаторы C1 и C2, а также реакторы L1 и L2. Токи реакторов и напряжения на конденсаторах в момент коммутации не равны друг другу. Поэтому в контуре возникает колебательный переходный процесс, причем колебания увеличивают напряжение не только на конденсаторе C2 вводимой в работу второй ступени, но и на конденсаторе C1 первой ступени, работающей в штатном режиме (рис. 2 и рис. 3).

Осциллограммы включения второй ступени КУ (рис. 2 и рис. 3) свидетельствует о перенапряжениях в переходном процессе длительностью до 8 периодов и более. Токи и напряжения i_1, u_{c1} и i_2, u_{c2} относятся соответственно к первой и второй ступеням КУ. Напряжения и токи даны в относительных единицах. За единицу напряжения принято номинальное напряжение контактной сети 27,5 кВ. Напряжение на конденсаторе первой ступени в номинальном режиме составляет 1,146 $U_{ном}$, а на конденсаторе второй ступени - 1,045 $U_{ном}$. За единицу тока принят номинальный суммарный ток КУ при включенной 1-й и 2-й ступенях.

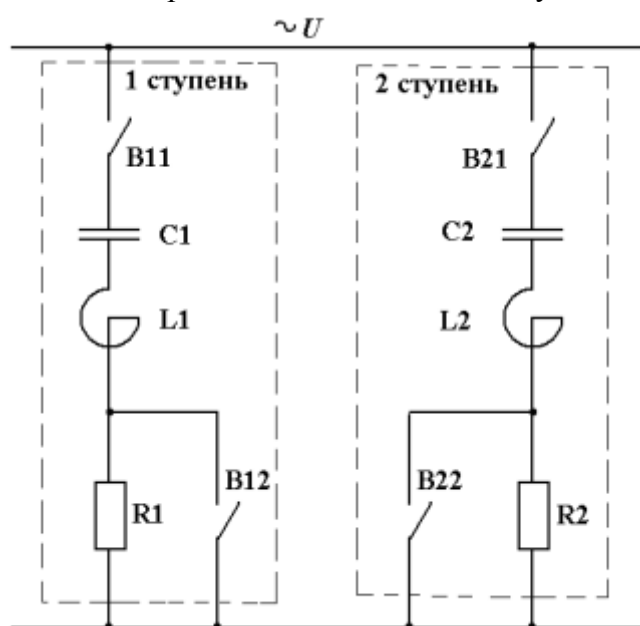


Рис. 1. Схема двухступенчатой КУ

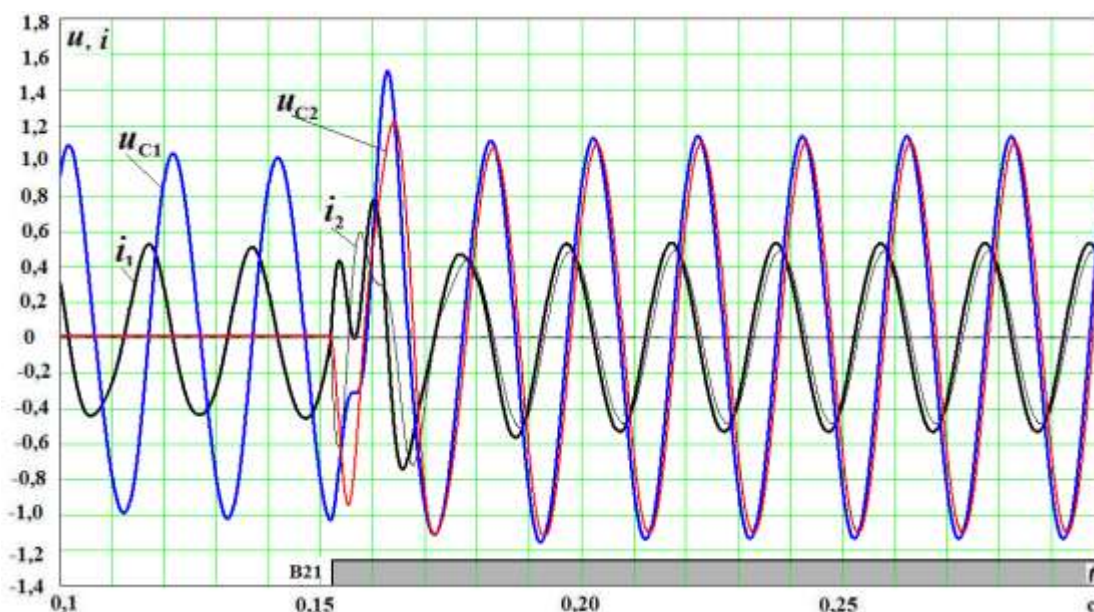


Рис. 2. Переходный процесс при включении второй ступени двухступенчатой КУ и включенной в штатном режиме первой ступени

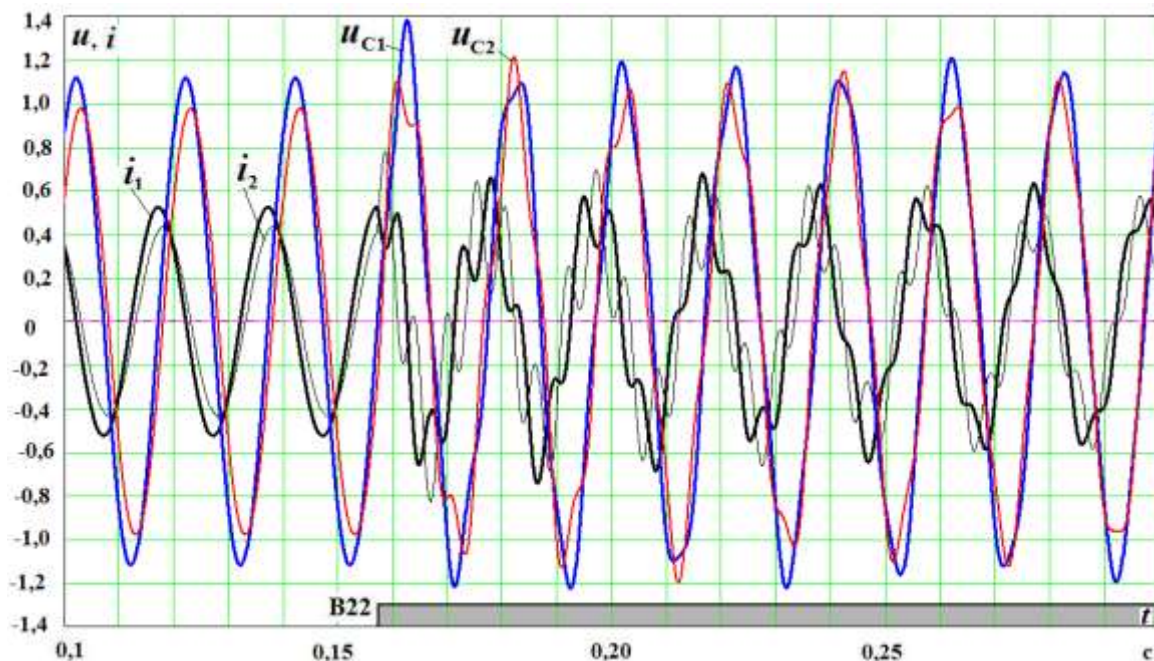


Рис. 3. Переходный процесс при шунтировании демпфирующего резистора второй ступени двухступенчатой КУ и включенной в штатном режиме первой ступени

Как видно из осциллограмм, пиковые значения перенапряжений достигали 1,3 $U_{ном}$ в первой и несколько ниже во второй ступени. Так как переключений КУ в течение года будет не меньше 1000 раз, то возникающие перенапряжения приведут к ускоренному старению конденсаторных батарей и выходу их из строя. На основании действующих нормативных документов и, учитывая опыт эксплуатации КУ на сети железных дорог, необходимо обеспечить значения перенапряжений на конденсаторах в переходном периоде при подключении второй ступени КУ – на уровне не более чем 1,1 $U_{ном}$.

Расчет переходного процесса при включении второй ступени КУ

$$\psi := \frac{60 \cdot \pi}{180} \quad u(t) := \sqrt{2} \cdot 29000 \cdot \sin(314 \cdot t + \psi)$$

$$R0 := 8 \quad L0 := 0.075 \quad R1(t) := \text{if}(t < 0.133, 70, 0.2) \quad R2(t) := \text{if}(t < 0.1927, 65, 0.15)$$

$$C1 := 13.6 \cdot 10^{-6} \quad XC1 := \frac{1}{314C1} \quad XC1 = 234.17 \quad L1 := 0.095 \quad XL1 := 314L1 \quad XL1 = 29.83 \quad x := \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$C2 := 12.89 \cdot 10^{-6} \quad XC2 := \frac{1}{314C2} \quad XC2 = 247.069 \quad L2 := 0.034 \quad XL2 := 314L2 \quad XL2 = 10.676$$

$$D(t, x) := \begin{bmatrix} \frac{[u(t) - x_2 - (R1(t) \cdot x_0) - R0 \cdot (x_0 + x_1)] \cdot (L0 + L2) - [u(t) - x_3 - (R2(t) \cdot x_1) - R0 \cdot (x_0 + x_1)] \cdot (L0)}{(L0 + L1) \cdot (L0 + L2) - L0^2} \\ \frac{[u(t) - x_2 - (R1(t) \cdot x_0) - R0 \cdot (x_0 + x_1)] \cdot (-L0) - [u(t) - x_3 - (R2(t) \cdot x_1) - R0 \cdot (x_0 + x_1)] \cdot (L0 + L1) \cdot (-1)}{(L0 + L1) \cdot (L0 + L2) - L0^2} \\ \frac{x_0}{C1} \\ \frac{x_1}{C2} \end{bmatrix}$$

$$Z := \text{rkfixed}(x, 0, 0.6, 6000, D) \quad n := 0..6000 \quad i1_n := Z_{n,1} \quad i2_n := Z_{n,2} \quad u1_n := Z_{n,3} \quad u2_n := Z_{n,4}$$

Рис. 4. Программа расчета переходного процесса при включении второй ступени КУ в интегрированном пакете MATCAD

Чтобы ответить на вопрос, можно ли обеспечить такой гарантированно низкий уровень перенапряжений на конденсаторах, авторами были проведено моделирование процессов в двухступенчатой КУ.

На рис. 4 приведена программа расчета переходного процесса при включении второй ступени КУ в интегрированном пакете MATCAD численным методом Рунге-Кутты четвертого порядка. При моделировании исследованы переходные процессы в КУ без учета внешней нагрузки. Для решения системы дифференциальных уравнений, записанных в форме Коши, использована функция **rkfixed**, интегрирующая дифференциальные уравнения с постоянным шагом. При решении введены следующие компьютерные переменные x_0 и x_1 – токи i_1 и i_2 первой и второй ступеней, x_2 и x_3 – напряжения u_{C1} и u_{C2} на конденсаторах первой и второй ступеней. Начальные условия задаются вектором x , а производные функций – вектором $D(t,x)$. Для моделирования процесса шунтирования демпфирующего резистора R2 использована функция с условием **if** (условие, выражение 1, выражение 2). Если условие, записанное в скобках выполняется, то функция принимает значение, равное выражению 1. В противном случае она принимает значение выражения 2.

Реактивная мощность первой ступени КУ равна $3,7 M_{вар}$ ($C1=13,6$ мкФ, $L1=0,095$ Гн, активное сопротивление $0,20$ м), а второй ступени – $3,2 M_{вар}$ ($C1=12,89$ мкФ, $L1=0,034$ Гн, активное сопротивление $0,150$ м). Напряжение питающей системы, приведенное к напряжению тяговой сети, взято равным 29 кВ. Приведенные параметры питающей системы и тяговой сети до места установки КУ $R0=8$ Ом, $L0=0,075$ Гн. Эти параметры соответствуют случаю, когда КУ установлена в конце участка при одностороннем питании.

На рис. 5 приведены результаты расчета переходных процессов в двухступенчатой КУ при разных параметрах демпфирующего резистора R2 и разных фазах его шунтирования. Коэффициенты $k_{U1BKЛ}$ и $k_{U2BKЛ}$ показывает кратность перенапряжения на конденсаторах C1 и C2 первой и второй ступенях при подключении второй ступени с демпфирующим резистором R2. Цифрой 1 для кривых $k_{U1BKЛ}$ и $k_{U2BKЛ}$ обозначен режим, когда первая ступень работает в штатном режиме, то есть без демпфирующего резистора. Цифрой 2 для этих же кривых кл обозначен режим, когда в первой ступени включен демпфирующий резистор.

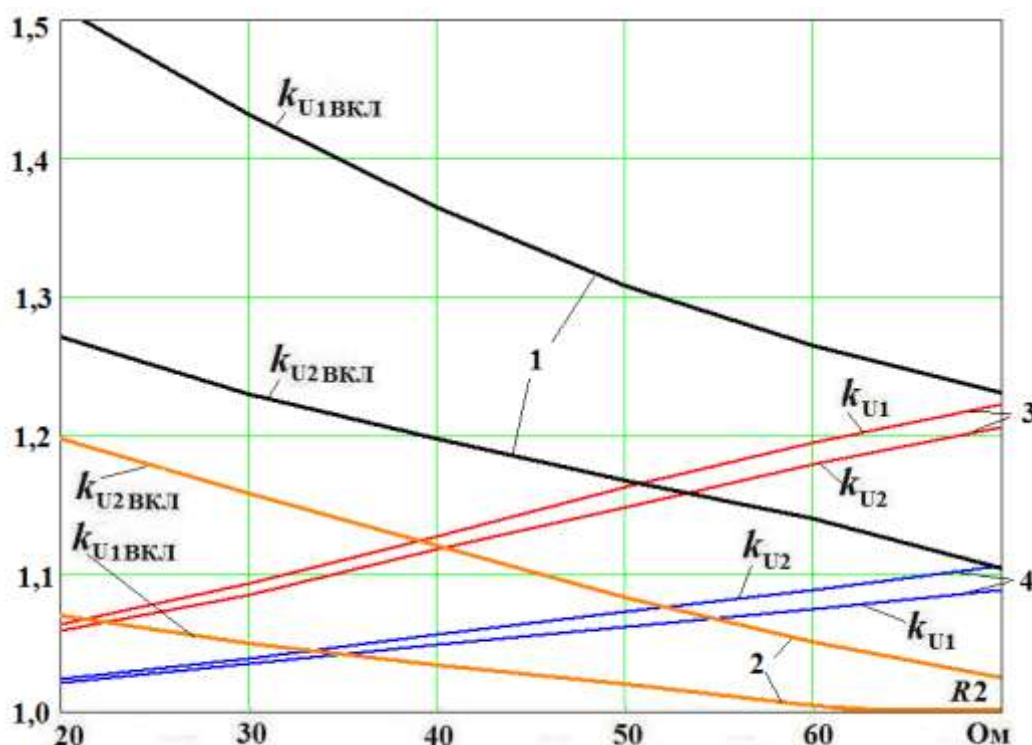


Рис. 5. Кратности перенапряжений на конденсаторах первой и второй ступеней при включении второй ступени

Из рис. 5 видно, что чем больше значение демпфирующего резистора, тем меньше кратность перенапряжения. При исследовании считаем, что выключатель В21 несинхронизированный и включение его происходит в максимум напряжения, что вызывает максимальные перенапряжения. Коэффициенты k_{U1} k_{U2} показывают кратность перенапряжения на конденсаторах С1 первой и С2 второй ступеней при шунтировании демпфирующего резистора в максимум тока (кривые 1) и в нуль тока (кривые 11). Из рис. 5 видно, что если взять значение демпфирующего резистора равным 65 Ом и шунтировать его при нуле тока, то перенапряжения на конденсаторе второй ступени не превысят значение $1,1 U_{ном}$. Напряжение на конденсаторе первой ступени будет ниже.

Для включения В12 в нуль тока выключатель должен быть синхронизированным, что выполняется, например, тиристорным выключателем [5] или гибридным выключателем [6]. Кроме того, для повышения эффективности снижения перенапряжений предлагается ещё одно техническое решение. Перед включением второй ступени следует ввести в работу демпфирующий резистор первой ступени, т. е. расшунтировать R1, отключив В12. Указанные мероприятия позволяют снизить перенапряжения на конденсаторах при включении второй ступени КУ до $1,1 U_{ном}$, что обеспечивает высокую эксплуатационную надежность регулируемых КУ.

Библиографический список

1. **Бородулин, Б.М.** Конденсаторные установки электрифицированных железных дорог / Б.М. Бородулин, Л.А. Герман, Г.А. Николаев. – М.: Транспорт, 1983.
2. Инструкции о порядке выбора параметров и мест размещения установок продольной и поперечной емкостной компенсации в системах тягового электроснабжения переменного тока. Департамент электрификации и электроснабжения ОАО «РЖД». Утверждена 20 октября 2010 г.
3. Приказ Минпромэнерго №49 от 22 февраля 2007г «О порядке расчета значений соотношения потребления активной и реактивной мощности ...»
4. **Герман, Л.А.** Регулируемая установка поперечной емкостной компенсации для тяговых сетей переменного тока / Л.А. Герман, А.С. Серебряков // ЭЛЕКТРО. 2009. № 6. С. 29–35.
5. **Серебряков, А.С.** Современная схема установки поперечной емкостной компенсации / А.С. Серебряков, Л.А. Герман, И.А. Балуева // Электроника и электрооборудование транспорта. 2009. №2–3. С. 17–22.
6. **Герман, Л.А.** Синхронизированные выключатели для регулирования поперечной емкостной компенсации в тяговой сети / Л.А. Герман [и др.] // Локомотив. 2011. № 1.

Дата поступления
в редакцию 18.10.2011

L.A. German, A.S. Serebryakov, D.E. Dulepov

THE RESEARCH OF INITIATION TRANSIENTS OF TWO-STAGE CROSSOVER CAPACITIVE COMPENSATION FACILITY IN RAILWAY POWER SUPPLY SYSTEM

There were explored initiation transients of second stage of two-stage crossover capacitive compensation facility (CF) in railway electric-traction network. There were proposed technical solutions to improve the reliability of CF.

Key words: Crossover capacitive compensation, two-stage controllable facility, excess voltages, commutation, transient process.