

А.В. Кожевников, канд. техн. наук

(Украина, Днепрпетровск, Национальный горный университет)

АНАЛИЗ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В СИЛОВОЙ ЦЕПИ СИСТЕМЫ ЧАСТОТНОЙ ЗАЩИТЫ ПОДЗЕМНОГО ЭЛЕКТРОВОЗНОГО ТРАНСПОРТА ПРИ КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЯХ

Принцип действия систем частотной защиты (СЧЗ) в тяговых сетях электровазного транспорта основан на контроле токов утечки по оперативной составляющей частотой 5 – 14 кГц, вводимой в силовую цепь подстанционным устройством [1, 2]. Для исключения утечек по оперативному току через цепи штатных силовых потребителей используют заградители, включаемые последовательно с потребителями. Различают пассивные заградители – параллельные LC контуры, обладающие высоким сопротивлением на оперативной частоте, и активные, вырабатывающие запирающее напряжение оперативной частоты в заграждаемой цепи. В режимах коротких замыканий в силовых цепях СЧЗ могут возникать перенапряжения на активных элементах подстанционного устройства и (или) заградителя, что обуславливает необходимость исследования таких режимов.

На рис. 1 представлена схема замещения тяговой сети, для анализа переходных процессов при различных вариантах коротких замыканий.

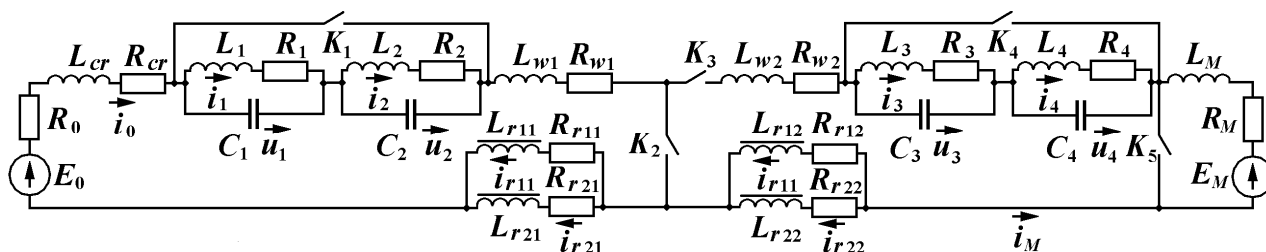


Рис. 1. Схема замещения тяговой сети для анализа переходных процессов при различных вариантах коротких замыканий

Ключи K_2 и K_5 служат для отображения коротких замыканий в сети и двигателе, соответственно. Остальные ключи служат для изменения топологии схемы, что позволяет сделать ее более универсальной и применять для описания различных вариантов замыканий. На рис.1 приняты следующие обозначения: E_0 и R_0 – ЭДС тягового преобразователя и его внутреннее сопротивление; L_{cr} , R_{cr} , L_{w1} , R_{w1} , L_{w2} , R_{w2} – индуктивности и омические сопротивления токоограничивающего реактора, участка тяговой сети от преобразователя до точки замыкания и от точки замыкания до нагрузки, соответственно; L_{r11} , L_{r21} , R_{r11} , R_{r21} – индуктивности и омические сопротивления ветвей эквивалентной схемы участка рельсовой цепи от преобразователя до точки замыкания; L_{r12} , L_{r22} , R_{r11} , R_{r22} – соответствующие величины для участка от точки замыкания до нагрузки; i_0 , i_M , i_{r11} , i_{r21} , i_{r12} , i_{r22} – мгновенные значения токов тягового преобразователя, двига-

теля (после замыкания в сети) и соответствующих ветвей эквивалентной схемы рельсовой цепи, в которой учитываются вихревые токи, поверхностный эффект и явление насыщения материала рельсов [3]. Шунтирующее влияние почвы выработки, а также собственные емкости тягового преобразователя и рассматриваемого участка сети считаются пренебрежимо малыми. Коллекторный двигатель последовательного возбуждения представлен источником противо-ЭДС E_M , суммарными индуктивностями L_M и омическими сопротивлениями R_M обмоток якоря и возбуждения. Силовая цепь подстанционного устройства СЧЗ включает параллельные резонансные контуры L_1C_1 и L_2C_2 , посредством которых вводится и контролируется оперативное напряжение, а цепь заградителя – соответственно контуры L_3C_3 и L_4C_4 аналогичного назначения. Мгновенные значения напряжений на емкостях контуров СЧЗ обозначены как u_1, u_2, u_3, u_4 , а мгновенные значения токов дросселей контуров – i_1, i_2, i_3, i_4 . Для учета потерь в дросселях контуров, в эквивалентную схему введены сопротивления потерь $R_1 - R_4$. Поскольку дроссели рассчитаны на пропускание силового тока, они выполняются из медного провода с площадью поперечного сечения $S \sim (0,5 - 1)10^{-4} \text{ м}^2$. Для проводников с таким сечением на частоте оперативного сигнала доминирующий вклад в потери вносят вихревые токи. По этой причине, а также с учетом дополнительного влияния поверхностного эффекта сопротивления потерь дросселей резонансных контуров СЧЗ на частоте оперативного сигнала в несколько раз превышают соответствующие значения на постоянном токе, что подтверждается экспериментально.

В табл.1 представлены положения ключей схемы замещения тяговой сети (рис.1) для анализа переходных процессов при различных вариантах коротких замыканий, где хх – холостой ход сети; н – сеть под нагрузкой, с – сеть; д – двигатель, +/- – ключ замкнут/разомкнут; ± – при коротком замыкании ключ замыкается; о – положение ключа несущественно.

Таблица 1

Положения ключей для схемы замещения тяговой сети на рис.1

| № варианта | Режим работы сети до замыкания | Наличие контуров СЧЗ | Место замыкания | Положение ключей | | | | |
|------------|--------------------------------|----------------------|-----------------|------------------|-------|-------|-------|-------|
| | | | | K_1 | K_2 | K_3 | K_4 | K_5 |
| 1 | хх | Есть | с | – | ± | – | о | о |
| 2 | н | –//– | с | – | ± | + | – | – |
| 3 | н | –//– | д | – | – | + | – | ± |
| 4 | хх | Нет | с | + | ± | – | о | о |
| 5 | н | –//– | с | + | ± | + | + | – |
| 6 | н | –//– | д | + | – | + | + | ± |

Переходный процесс при третьем варианте замыкания описывается системой дифференциальных уравнений, вытекающей из уравнений Кирхгофа для цепи

$$\begin{aligned}
E_0 &= i_0(R_0 + R_{cr} + R_w) + (L_{cr} + L_w) \frac{di_0}{dt} + i_{r1}R_{r1} + L_{r1}(i_{r1}) \frac{di_{r1}}{dt} + u_1 + u_2 + u_3 + u_4; \\
i_{r1}R_{r1} + L_{r1}(i_{r1}) \frac{di_{r1}}{dt} &= i_{r2}R_{r2} + L_{r2}(i_{r2}) \frac{di_{r2}}{dt}; \quad i_{r2} = i_0 - i_{r1} \\
\frac{di_1}{dt} &= \frac{u_1 - i_1R_1}{L_1}; \quad \frac{di_2}{dt} = \frac{u_2 - i_2R_2}{L_2}; \quad \frac{di_3}{dt} = \frac{u_3 - i_3R_3}{L_3}; \quad \frac{di_4}{dt} = \frac{u_4 - i_4R_4}{L_4}; \\
\frac{du_1}{dt} &= \frac{i_0 - i_1}{C_1}; \quad \frac{du_2}{dt} = \frac{i_0 - i_2}{C_2}; \quad \frac{du_3}{dt} = \frac{i_0 - i_3}{C_3}; \quad \frac{du_4}{dt} = \frac{i_0 - i_4}{C_4},
\end{aligned} \tag{1}$$

при начальных условиях

$$\begin{aligned}
i_0(0) &= \frac{E_0}{R_0 + R_{cr} + R_w + R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_M + \frac{R_{r1}R_{r2}}{R_{r1} + R_{r2}}}; \\
i_{r1}(0) &= \frac{R_{r2}}{R_{r1} + R_{r2}} i_0(0); \quad i_1(0) = i_2(0) = i_3(0) = i_4(0) = i_0(0);
\end{aligned} \tag{2}$$

$$u_1(0) = i_0(0)R_1; \quad u_2(0) = i_0(0)R_2; \quad u_3(0) = i_0(0)R_3; \quad u_4(0) = i_0(0)R_4.$$

При записи соотношений (1) и (2) участки тяговой сети с параметрами L_{w1}, R_{w1} , и L_{w2}, R_{w2} , показанные на рис. 1 отдельно, объединены в один участок с параметрами L_w, R_w . Аналогично для рельсовой цепи участки с параметрами $L_{r11}, L_{r21}, R_{r11}, R_{r21}$ и $L_{r12}, L_{r22}, R_{r21}, R_{r22}$ объединены в один участок с параметрами $L_{r1}, L_{r2}, R_{r1}, R_{r2}$. Через i_{r1} и i_{r2} обозначены токи в ветвях схемы замещения рельсовой цепи, полученной после такого объединения.

Для других вариантов замыкания системы дифференциальных уравнений, описывающих переходные процессы в цепях тягового преобразователя и двигателя имеют аналогичный вид.

На рис. 2 изображены графики временных зависимостей токов короткого замыкания в силовой цепи СЧЗ, а на рис.3 – начальные фрагменты графиков временных зависимостей напряжений на контурах системы при различных вариантах замыканий, полученных классическим методом. Графики построены в предположении, что после короткого замыкания защитного отключения тягового преобразователя не производится и что при замыканиях в сети, работающей под нагрузкой, противоЭДС двигателя, вращающегося по инерции, остается постоянной в течении всего времени расчета.

Расчет произведен для следующих значений параметров сети: $E_0 = 300$ В; $R_0 = 0,025$ Ом; $L_{cr} = 10^{-3}$ Гн; $R_{cr} = 0,025$ Ом; $\frac{dR_w}{dl} = 0,172$ Ом/км; $\frac{dL_w}{dl} = 1,88 \cdot 10^{-3}$ Гн/км;

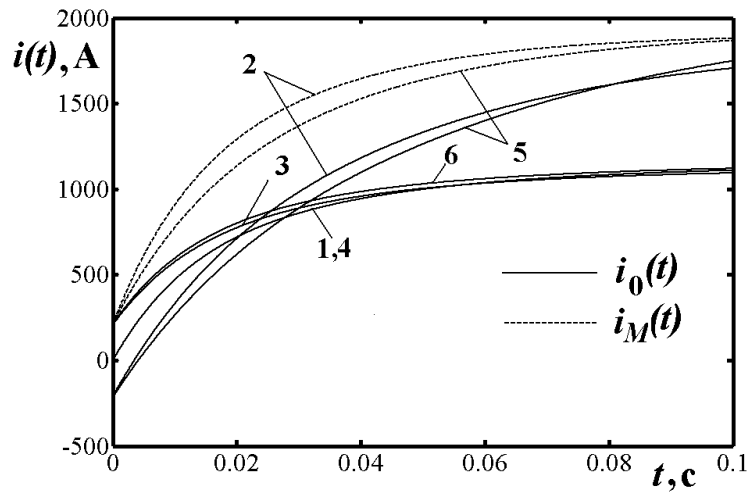


Рис. 2. Графики временных зависимостей токов короткого замыкания в силовой цепи СЧЗ (цифрами указаны варианты замыканий согласно табл. 1)

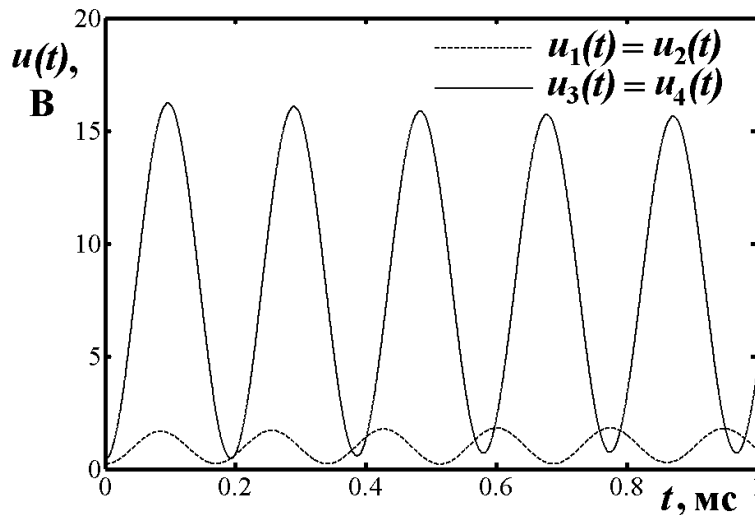


Рис. 3. Начальные фрагменты графиков временных зависимостей напряжений на контурах СЧЗ (вариант замыкания 3 выполнен согласно табл. 1)

$$\frac{dR_{r1}}{dl} = 0,047 \quad \text{Ом/км}; \quad \frac{dR_{r2}}{dl} = 0,202 \quad \text{Ом/км}; \quad \frac{dL_{r1}(0)}{dl} = 5,3 \cdot 10^{-3} \quad \text{Гн/км};$$

$$\frac{dL_{r2}(0)}{dl} = 2,65 \cdot 10^{-3} \quad \text{Гн/км}. \quad \text{Для параметров двигателя и контуров системы защи-}$$

ты приняты следующие значения: $E_M = 240$ В; $R_M = 0,02$ Ом; $L_M = 2 \cdot 10^{-3}$ Гн; $L_1 = L_2 = 6,33 \cdot 10^{-6}$ Гн; $L_3 = L_4 = 1,45 \cdot 10^{-4}$ Гн; $C_1 = C_2 = 120$ мкФ; $C_3 = C_4 = 7$ мкФ; активные сопротивления дросселей на постоянном токе $R_1 = R_2 = 10^{-3}$ Ом; $R_3 = R_4 = 2 \cdot 10^{-3}$ Ом, а на частоте оперативного напряжения $R_1^f = R_2^f = 3 \cdot 10^{-3}$ Ом, $R_3^f = R_4^f = 6 \cdot 10^{-3}$ Ом. Для расчетов медленных переходных процессов по токам короткого замыкания использовались значения сопротивлений дросселей на постоянном токе, а для описания быстрых колебаний в контурах – значения сопротивлений на частоте оперативного сигнала. Для случаев работы тяговой сети на холостом ходу (вар. № 1, 4, табл.1), а также при замыканиях в двигателе (вар. № 3,

б) предполагалось, что расстояние от тягового преобразователя до точки замыкания $l=1$ км и что в остальных случаях замыкание в сети имеет место ровно посередине участка между тяговым преобразователем и нагрузкой, причем участок имеет ту же длину.

Полученные результаты для случаев отсутствия контуров СЧЗ соответствуют приведенным в работе [3].

Решение характеристического уравнения ассоциированной однородной части системы дифференциальных уравнений, описывающих переходный процесс, позволяет в линейном приближении частоты свободных колебаний, которые могут возникать в цепи

$$f_j = \frac{1}{2\pi} |\operatorname{Im}(p_j)|, \quad j = 1, \dots, m, \quad (3)$$

где m – число различных пар комплексно сопряженных корней характеристического уравнения; p_j – один из корней j -й комплексно сопряженной пары. В табл. 2 приведены частоты свободных колебаний, которые могут возникать в резонансных контурах СЧЗ, рассчитанные с использованием соотношения (3). Собственная резонансная частота для всех рассмотренных контуров СЧЗ составляет 5 кГц.

Таблица 2

Частоты свободных колебаний, которые могут возникать в резонансных контурах СЧЗ

| № варианта замыкания | Частоты колебаний, кГц |
|----------------------|----------------------------|
| 1 | 5,775; 5,782 |
| 2 | 5,013; 5,199; 5,802; 5,815 |
| 3 | 4,996; 5,148; 5,775; 5,784 |

Таким образом, применение в тяговой сети подземного электротранспорта параллельных резонансных контуров СЧЗ для введения и снятия оперативного сигнала практически не меняет характер переходного процесса, а также амплитудных и временных характеристик токов короткого замыкания тягового преобразователя. Указанное положение справедливо как при работе контактной сети в режиме холостого хода, так и под нагрузкой. При коротких замыканиях в контурах подстанционного устройства и заградителя возникают колебания с частотами, близкими к резонансной частоте контуров. Амплитуды напряжений на контурах при таких колебаниях могут в несколько раз превышать номинальные значения оперативного напряжения. В связи с этим необходимы дополнительные схемотехнические решения по защите от перенапряжений цепей генератора оперативного напряжения, подстанционного измерительного устройства, а также выходного усилителя и цепи обратной связи заградителя. Таким решением может быть, например, использование пар встречно включенных стабилитронов, установленных параллельно защищаемым резонансным контурам.

Список литературы

1. Бунько В.А., Волотковский С.А., Пивняк Г.Г. Повышение безопасности рудничной электровозной откатки – М.: Недра, 1978. – 200 с.
2. Колосюк В.П. Защитное отключение рудничных электроустановок. – М.: Недра, 1980. – 334 с.
3. Алексеев Н.И. Оптимизация систем электрической тяги в подземных выработках. – М.: Недра, 1979. – 252 с.