

*С.В. Дубинин, К.Н. Маренич, В.Н. Ставицкий, кандидаты техн. наук, М.С. Дубинин  
(Украина, Донецк, Донецкий национальный технический университет)*

## **ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ КОМПЕНСАЦИИ ЕМКОСТНОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ ТОКА УТЕЧКИ НА ЗЕМЛЮ В ЭЛЕКТРОСЕТЯХ С ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯМИ ЧАСТОТЫ**

**Проблема и ее связь с научными и практическими задачами.** В соответствии с «Правилами безопасности» шахтные преобразователи частоты должны оснащаться устройствами защиты от токов утечки на землю. В настоящее время устройства защиты для преобразователей частоты не выпускаются. Это объясняется, в частности, недостаточной изученностью проблемы компенсации емкостной составляющей тока утечки на землю в электрических сетях с преобразователями частоты и препятствует широкому внедрению частотного привода в шахте, что обуславливает актуальность работ в этой области.

**Анализ исследований и публикаций.** В существующих устройствах защиты для ограничения емкостных токов утечки на землю применяются статические и автоматические компенсаторы. Последние выполнены на основе дросселя с подмагничиванием для поддержания резонансной частоты 50 Гц в колебательном контуре: дроссель – емкость сети. Основным недостатком существующих дроссельных компенсаторов является фиксированная частота резонанса 50 Гц. В электрических сетях с преобразователем частоты дроссельный компенсатор с фиксированной частотой резонанса неэффективен вследствие широкого изменения частоты рабочего напряжения. В известных исследованиях предлагаются устройства с переменной частотой резонанса, например [1]. Однако эти устройства имеют низкую эффективность и узкую область применения - сети с малой емкостью относительно земли (до 0,2 мкФ). Поэтому, необходимы дополнительные исследования для обоснования новых методов компенсации емкостных составляющих токов утечки на землю.

**Постановка задачи.** Основными задачами исследований является обоснование методов и технических решений для реализации новой системы компенсации емкостных составляющих токов утечки на землю в сетях с преобразователями частоты.

**Изложение материала и результат.** Для повышения эффективности компенсации необходимо учесть следующее. Принцип действия дроссельного компенсатора основан на вычитании его индуктивной проводимости из емкостной проводимости фаз сети в процессе резонанса при соблюдении условия:  $X_L = -X_C$  (где  $X_L$  и  $X_C$  – реактивные сопротивления, соответственно, компенсатора и изоляции сети). Для эффективной компенсации необходимо, чтобы проводимость компенсатора соответствовала проводимости емкости сети с отрицательным знаком при любой частоте тока утечки. При этом, устройство компенсации емкостной проводимости должно представлять собой двухпо-

люсник, с комплексным сопротивлением, равным эквивалентному ёмкостному сопротивлению сети, взятому с обратным знаком.

Реализация такого двухполюсника возможна посредством конвертора отрицательного сопротивления (КОС) (Рис 1) [2].

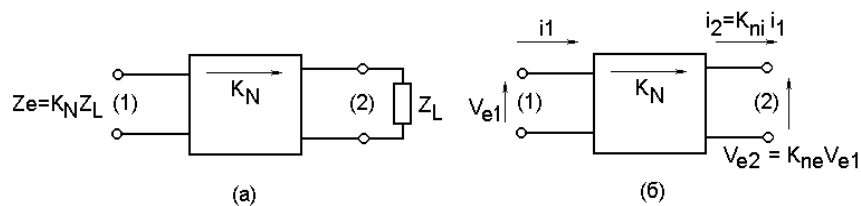


Рис. 1. Конвертор отрицательного сопротивления

КОС инвертирует знак сопротивления, которое подключается к нему в качестве нагрузки, а также может изменять его модуль (рис.1а). Коэффициент конверсии ( $K_N$ ) - безразмерный и имеет отрицательный знак. Четырёхполюсник, эквивалентный КОС (рис.1б), характеризуется двумя следующими уравнениями:

$$\begin{aligned} i_2 &= K_{ni} i_1; \\ V_{e2} &= K_{ne} V_{e1}, \end{aligned}$$

где  $K_N = K_{ni} / K_{ne}$  – величина отрицательная.

$$\begin{aligned} Z_e &= V_{e1} / i_1, \\ Z_L &= V_{e2} / i_2, \\ \frac{Z_e}{Z_L} &= \frac{V_{e1}}{i_1} \frac{K_{ni} i_1}{K_{ne} V_{e1}} = \frac{K_{ni}}{K_{ne}}; \\ Z_e &= K_N Z_L = \frac{K_{ni}}{K_{ne}} Z_L. \end{aligned}$$

Если в уравнениях, описывающих КОС,  $K_{ni} = +1$ , то он характеризуется как конвертор отрицательного сопротивления по напряжению - КОСН, так как токи на входе и выходе конвертора одинаковы, а напряжения в общем случае различны (рис.2).

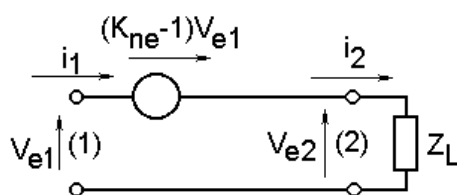


Рис. 2. Эквивалентная схема КОСН

Таким образом, для КОСН справедливо:

$$i_1 = i_2; \quad (7)$$

$$V_{e2} = K_{ne} V_{e1}, \quad (8)$$

где  $K_{ne} < 0$ ,

$$Z_e = \frac{V_{e1}}{i_1} = \frac{Z_L}{K_{ne}}.$$

В частном случае, при  $K_{ne} = -1$ , получим  $Z_e = -Z_L$ . Для реализации конвертора отрицательного сопротивления по напряжению можно использовать дифференциальный усилитель с заданным коэффициентом передачи (рис.3).

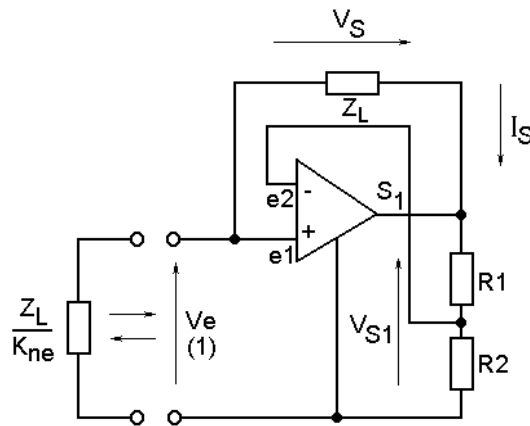


Рис. 3. Схема КОСН с незаземленной нагрузкой

Из схемы рис.3 видно, что

$$V_{S1} = \frac{R_1 + R_2}{R_2} V_e = A_{Vr} V_e;$$

$$V_S = V_{S1} - V_e;$$

$$I_e = -\frac{V_S}{Z_L},$$

следовательно,

$$Y_e = \frac{1}{Z_L} (1 - A_{Vr});$$

$$Z_e = \frac{Z_L}{K_{ne}},$$

где  $K_{ne} = 1 - A_{Vr}$ ,  $A_{Vr}$  – усиление замкнутого усилителя (управляемого источника).

Таким образом, на базе КОСН можно реализовать двухполюсник с проводимостью, равной  $1/X = -\omega C$ , подключив в качестве  $Z_L$  сопротивление ёмкости  $C$ . В этом случае, при подключении КОСН параллельно емкости сети и при выполнении условия  $|-Z_L| = Z_c$ , (где  $Z_c$ - емкостное сопротивление сети относительно земли) емкостная проводимость сети компенсируется. Как видно из рис.5, абсолютная величина емкостной проводимости сети  $1/Z_c$  и проводимости двухполюсника  $-1/Z_L$  одинаково увеличивается с ростом частоты. А так, как знаки у них противоположны, то их сумма и результирующая проводимость будет стремиться к нулю при любой частоте рабочего напряжения или его гармоник.

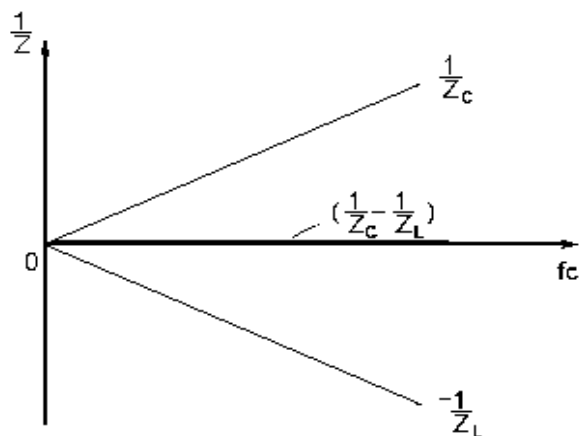


Рис. 5. Результирующая зависимость емкости сети и проводимости КОСН от частоты

Для разработки и исследования параметров компенсатора проведено компьютерное моделирование средствами пакета программ схемотехнического моделирования «Electronics Workbench» [3].

Модель компенсатора (рис.6) состоит из КОСН на операционном усилителе А1, емкости  $C1$ , высоковольтного каскада А2. В модели проводимость емкости  $C1$  конвертируется и на выходе двухполюсника 1, 2 преобразуется в отрицательную емкость, подключенную через конденсаторы присоединения  $Cп$  к фазам сети. При этом, проводимость КОСН вычитается из емкостной проводимости сети, чем достигается эффективное снижение тока через тело человека (через резистор  $Rч = 1кОм$ ).

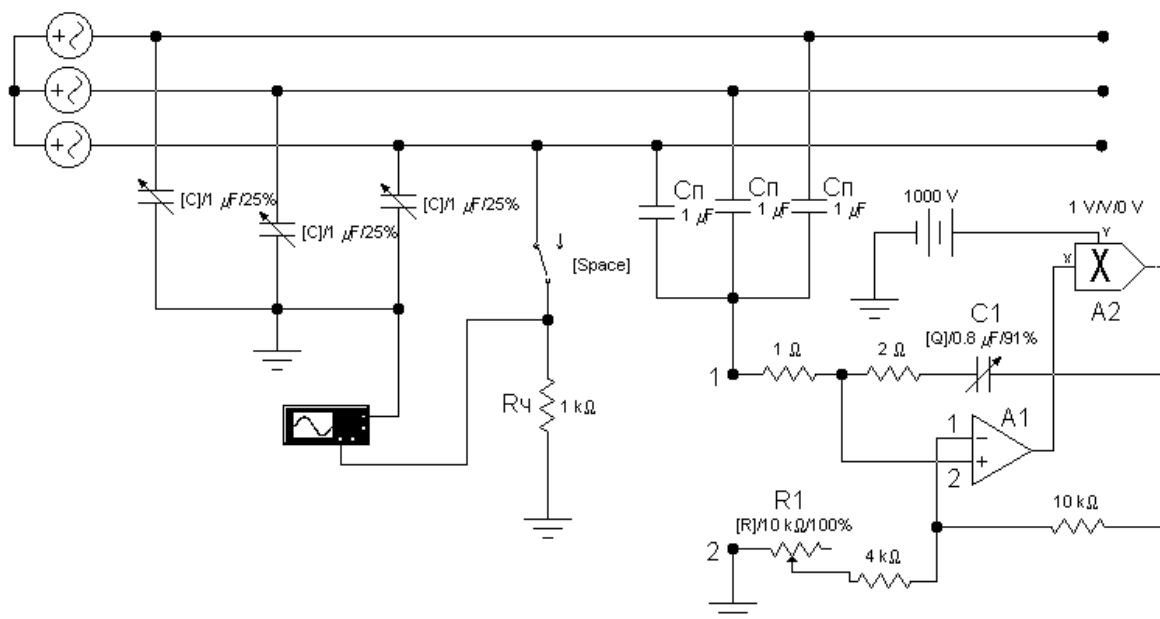


Рис. 6. Модель для исследования системы компенсации емкостной составляющей токов утечки

Переходный процесс изменения напряжения, приложенного к телу человека, представлен на рис.7. Его параметры практически не зависят от частоты рабочего напряжения и в основном определены быстродействием устройства.

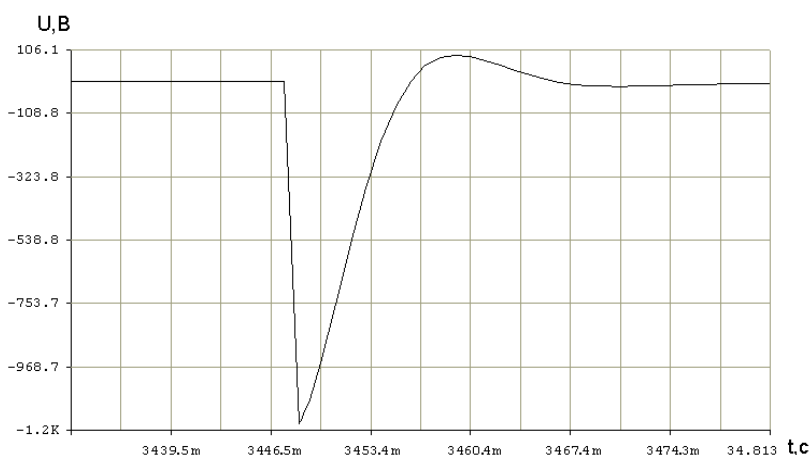


Рис. 7. Осциллограмма переходного процесса при внезапном касании человека фазы сети с КОСН

Для сетей 380 - 1140В, количество электричества, проходящего через нагрузку в 1кОм за период времени 0,5 с, не превышает 15 мА\*с при изменении частоты рабочего напряжения от 0 до 150 Гц и емкости сети от 0,1 до 1,5 мкФ на фазу, что полностью соответствует требованиям безопасности.

**Выводы и направление дальнейших исследований.** Таким образом, исследования показали, что эффективную компенсацию емкостных токов утечки можно обеспечить при помощи конвертора отрицательного сопротивления КОС. Компенсатор на основе КОС можно реализовать, применив электронный

дифференциальный усилитель. Исследования, проведенные при помощи компьютерного моделирования, показали, что качественные характеристики предлагаемой системы компенсации удовлетворяют требованиям безопасности. Это позволяет достичь цели работы, а именно - расширить область применения преобразователей частоты для применения в шахтных условиях.

Дальнейшие исследования целесообразно проводить в области научного обоснования рациональных параметров системы компенсации и методов автоматической настройки при изменении конфигурации электрической сети.

### **Список литературы**

1. Щуцкий В.И., Бабокин Г.И., Ставцев В.А. Повышение надежности и безопасности электромеханических систем с преобразователями частоты. - М.: Недра, 1996. – 169с.
2. Марше Ж. Операционные усилители и их применение. Пер. с франц. Л., Энергия, 1974. – 216 с.
3. Панфилов Д.И. и др. Электротехника и электроника в экспериментах и упражнениях: Практикум на Electronic Workbench. Т1. Электротехника. – М.: ДОФЭКА, 1999. – 304 с.