

УДК 622.862

## ПРИМЕНЕНИЕ КОНВЕРТОРА ОТРИЦАТЕЛЬНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ДЛЯ КОМПЕНСАЦИИ ЕМКОСТНОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ ТОКА УТЕЧКИ НА ЗЕМЛЮ В ШАХТНОЙ КОМБИНИРОВАННОЙ ЭЛЕКТРОСЕТИ

Маренич К.Н., Дубинин С.В., кандидаты техн. наук,  
Дубинин М.С., аспирант  
Донецкий национальный технический университет

*Обоснован способ компенсации ёмкостных токов утечки на землю в электрических сетях с преобразователями частоты на основе применения конвертора отрицательного сопротивления*

*The method of restriction of current leakage to the ground in electric mains with frequency shifter which is based on using of converter of negative resistor is well-founded*

### ***Проблема и ее связь с научными и практическими задачами.***

Существующий уровень развития силовой преобразовательной техники и потребности в регулировании параметров электроприводов горных машин обусловили рациональность применения преобразователей частоты в составе электротехнических комплексов участков шахт. В соответствии с «Правилами безопасности», рудничные электросети с ПЧ (комбинированные электросети) должны оснащаться устройствами защиты от токов утечки на землю. В настоящее время подобные устройства защиты находятся в стадии разработки. Это объясняется недостаточной изученностью проблемы компенсации ёмкостной составляющей тока утечки на землю в электрических сетях с ПЧ. Отсутствие адаптированной к ПЧ защиты от утечек тока на землю препятствует широкому внедрению частотного привода в шахте, что обуславливает актуальность работ в этой области.

***Анализ исследований и публикаций.*** В существующих устройствах защиты для ограничения ёмкостных 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 – ёмкость сети. Основным недостатком дроссельных компенсаторов является фиксированная частота резонанса 50 Гц. В электросетях с ПЧ дроссельный компенсатор с фиксированной частотой резонанса не-

ефективен вследствие широкого изменения частоты рабочего напряжения. В известных исследованиях предлагаются устройства с переменной частотой резонанса [1]. Однако эти устройства имеют низкую эффективность и узкую область применения - сети с малой ёмкостью относительно земли – не более 0,2 мкФ. Ограниченные возможности известных способов ограничения токов утечки в шахтных электросетях обуславливают актуальность поиска альтернативных способов компенсации ёмкостных составляющих этих токов.

**Постановка задачи.** Задачей исследований является обоснование способа и схемного решения в области компенсации ёмкостных составляющих токов утечки на землю в шахтных комбинированных электросетях с целью расширения области применения преобразователей частоты путём обеспечения электробезопасности их эксплуатации в составе рудничных электротехнических комплексов..

**Основной материал и результаты исследований.** Известно, что принцип действия дроссельного компенсатора основан на вычитании его индуктивной проводимости из ёмкостной 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 ёмкости изоляции сети с отрицательным знаком при любой частоте тока утечки. Поэтому устройство компенсации ёмкостной проводимости должно представлять собой двухполюсник, с комплексным сопротивлением, равным эквивалентному ёмкостному сопротивлению изоляции сети, взятому с обратным знаком.

Вариантом реализации такого двухполюсника является конвертор отрицательного сопротивления (КОС) (рис. 1) [2].

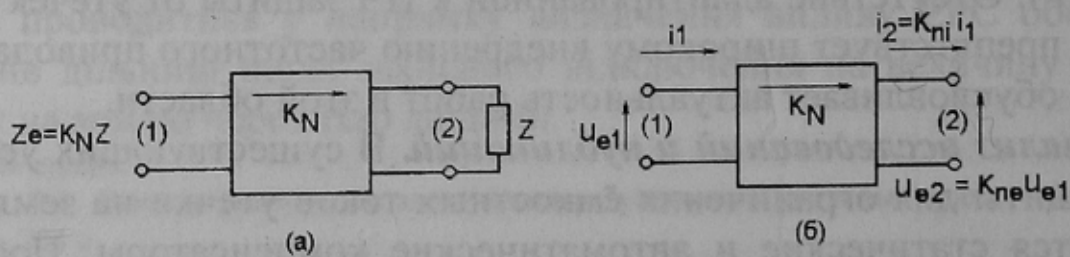


Рисунок 1 – Конвертор отрицательного сопротивления

КОС преобразует комплексное сопротивление  $Z$ , подключенное к нему в качестве нагрузки, в  $Z_e$  и изменяет его абсолютную величину и знак (рис. 1а). Коэффициент конверсии  $K_N = K_{ni} / K_{ne}$  – безразмерный и отрицательный,  $K_{ni}$  – коэффициент усиления по току,  $K_{ne}$



– коэффициент усиления по напряжению. Четырёхполюсник, эквивалентный КОС (рис.1б), характеризуется уравнениями:

$$i_2 = K_{ni} i_1; \tag{1}$$

$$u_{e2} = K_{ne} u_{e1}, \tag{2}$$

$$Z_e = u_{e1} / i_1 \text{ и } Z_L = u_{e2} / i_2 \tag{3}$$

$$\frac{Z_e}{Z} = \frac{u_{e1}}{i_1} \frac{K_{ni} i_1}{K_{ne} u_{e1}} = \frac{K_{ni}}{K_{ne}}; \tag{4}$$

$$Z_e = K_N Z = \frac{K_{ni}}{K_{ne}} Z. \tag{5}$$

Если в уравнениях, описывающих КОС, принять  $K_{ni} = +1$ , то данная схема будет представлена как конвертор сопротивления, отрицательного по напряжению (КОСН), где токи на входе и выходе схемы одинаковы, а напряжения, в общем случае, различны (рис.2).

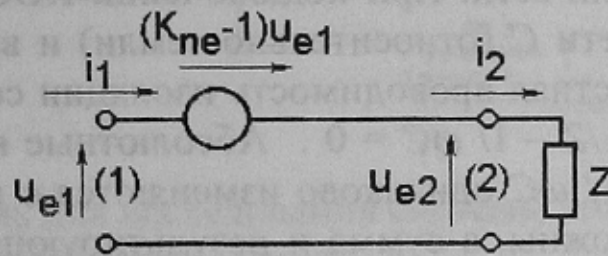


Рисунок 2 – Эквивалентная схема КОСН

Таким образом, для КОСН справедливо:  $i_1 = i_2; u_{e2} = K_{ne} u_{e1}$ ,

$$K_{ne} < 0; Z_e = \frac{u_{e1}}{i_1} = \frac{Z}{K_{ne}}.$$

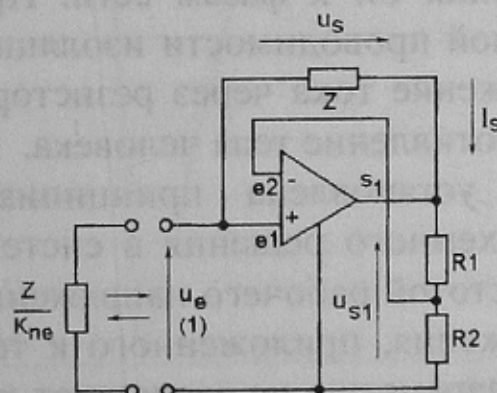


Рисунок 3 – Схема КОСН с незаземленной нагрузкой

Поэтому коэффициенту  $K_{ne} = -1$ , соответствует соотношение:  $Z_e = -Z$ . Для реализации КОСН можно использовать дифференциальный усилитель с заданным коэффициентом передачи (рис.3):

Из анализа схемы следует:

$$u_{s1} = \frac{R_1 + R_2}{R_2} u_e = A_{u_r} u_e; \quad u_s = u_{s1} - u_e; \quad I_e = -\frac{u_s}{Z},$$

откуда,

$$Y_e = \frac{1}{Z} (1 - A_{u_r}) \quad \text{и} \quad Z_e = \frac{Z}{K_{ne}},$$

где  $K_{ne} = 1 - A_{u_r}$ , ( $A_{u_r}$  – коэффициент усиления замкнутого усилителя).

Таким образом, на основе КОСН можно реализовать двухполюсник с комплексной проводимостью  $-1/Z$ , равной ёмкостной проводимости сети  $1/\omega C$ , взятой с обратным знаком, где  $\omega$  – круговая частота напряжения сети. При подключении КОСН параллельно ёмкости изоляции сети  $C$  (относительно земли) и выполнении условия  $1/Z = -1/\omega C$ , ёмкостная проводимость изоляции сети полностью компенсируется, т.е.  $1/Z - 1/\omega C = 0$ . Абсолютные величины проводимостей  $1/Z$  и  $1/\omega C$  одинаково изменяются с ростом частоты. Их знаки противоположны, а сумма и результирующая реактивная проводимость контура будет стремиться к нулю при любой частоте рабочего напряжения сети.

Компьютерная модель компенсатора (рис.5) состоит из КОСН на усилителе  $A1$ , ёмкости  $C1$ , высоковольтного каскада  $A2$  [3]. Проводимость ёмкости  $C1$  конвертируется и на выходе двухполюсника 1, 2 преобразуется в отрицательную ёмкость, подключенную через конденсаторы присоединения  $Cn$  к фазам сети. Проводимость КОСН вычитается из ёмкостной проводимости изоляции сети, чем достигается эффективное снижение тока через резистор  $Rч = 1\text{кОм}$ , имитирующий активное сопротивление тела человека.

Исследованиями установлена принципиальная возможность применения данного схемного решения в системе компенсации для сетей с переменной частотой рабочего напряжения. Переходный процесс изменения напряжения, приложенного к телу человека, представлен на рис.6. Его параметры не зависят от частоты рабочего напряжения и в основном определены быстродействием устройства.

Применительно к сетям напряжения до 1140 В включительно количество электричества, 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 ёмкости изоляции сети относительно земли от 0,1 до 1,5 мкФ на фазу. Это соответствует требованиям Правил безопасности [4].

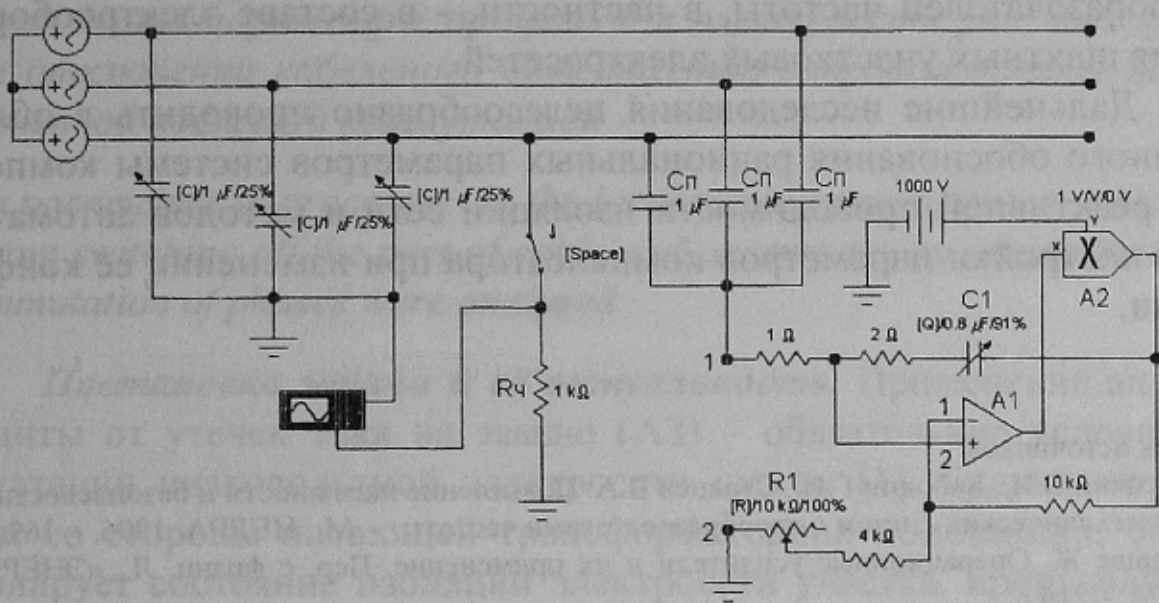


Рисунок 5 – Модель для исследования системы компенсации ёмкостной составляющей токов утечки

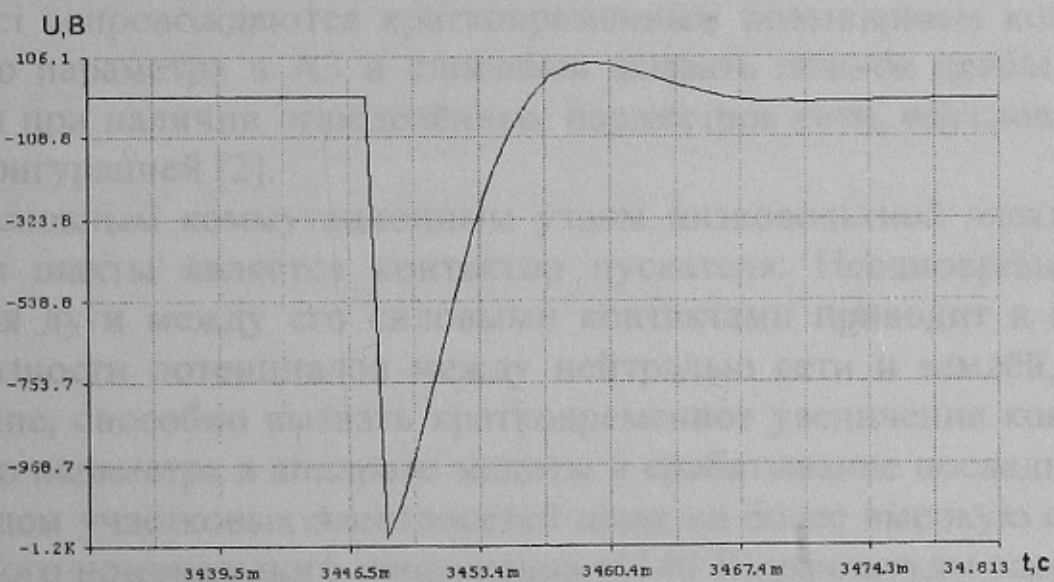


Рисунок 6 – Осциллограмма переходного процесса при внезапном касании человеком фазы сети с КОСН



**Выводы и направление дальнейших исследований.** Исследованиями установлена возможность эффективной компенсации ёмкостных токов утечки посредством конвертора отрицательного сопротивления. Компенсатор на его основе можно реализовать, применив электронный дифференциальный усилитель. Полученные характеристики предлагаемой системы компенсации удовлетворяют требованиям безопасности. Это позволяет расширить область применения преобразователей частоты, в частности, - в составе электрооборудования шахтных участковых электросетей.

Дальнейшие исследования целесообразно проводить в области научного обоснования рациональных параметров системы компенсации реактивной проводимости изоляции сети и методов автоматической настройки параметров компенсатора при изменении её конфигурации.

Список источников

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.: ДОДЭКА, 1999. - 304с.
4. ГОСТ 22929-78 „Аппараты защиты от токов течи рудничные для сетей напряжением до 1200 В”. - 16 с.