

К.Н. Маренич, С.А. Руссиян, М.С. Дубинин

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЧАСТОТЫ НА ПАРАМЕТРЫ ЭЛЕКТРОБЕЗОПАСНОСТИ ОТХОДЯЩЕГО ПРИСОЕДИНЕНИЯ В СЕТИ УЧАСТКА ШАХТЫ**

**Постановка проблемы.** Проблематика расширения функциональных возможностей, повышения эффективности электроприводов технологических машин и установок шахт обуславливает необходимость широкого применения силовых преобразователей частоты (ПЧ) со звеном постоянного тока в составе участковых электротехнических комплексов (ЭТК). В то же время эксплуатация подобных комбинированных ЭТК в условиях шахты допустима только при соблюдении нормативных требований по электробезопасности. Проведенные ранее исследования (В.П. Колосюк, 1980) выявили принципиальную возможность существенного влияния маловентильных выпрямительных схем на параметры устойчивости участковых аппаратов защиты от токов утечек на землю.

Учитывая, что структура современных ПЧ содержит более развитую полупроводниковую схему (управляемый выпрямитель и автономный инвертор) исследования процессов, влияющих на устойчивость функционирования АЗ в комбинированных ЭТК шахты представляют научную и практическую актуальность.

**Анализ исследований и публикаций.** Ранее установлено влияние на величину тока утечки на землю в сети с изолированной нейтралью трансформатора со стороны высших гармоник напряжения, формируемых при работе автономного инвертора ПЧ [1]. Вопросы воздействия коммутационных переходных процессов на устойчивость функционирования аппарата АЗУР-4 рассмотрены в исследованиях [2].

Однако актуальным представляется проведение комплексного теоретического исследования характера влияния процессов в ответвлении от ПЧ на параметры устойчивости функционирования аппарата защиты от утечек тока на землю.

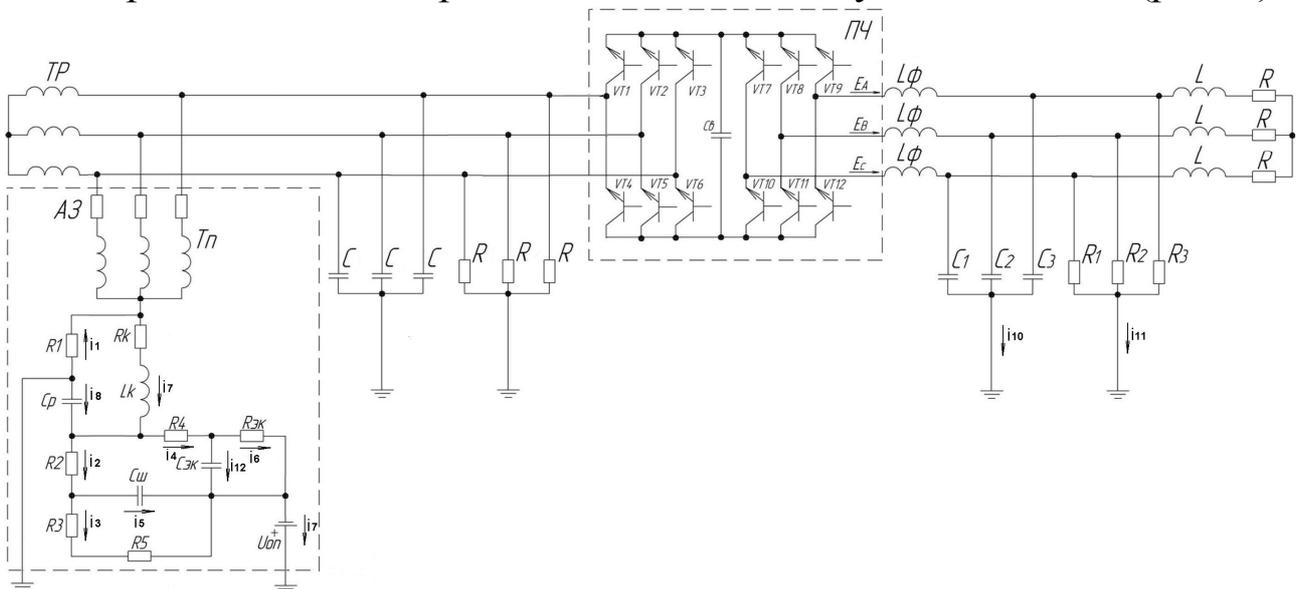
**Цель статьи.** Установление характера влияния коммутационных переходных процессов, обусловленных функционированием ПЧ

в составе шахтного участкового ЭТК, на параметры устойчивости функционирования аппарата защиты от утечек тока на землю.

**Результаты исследования.** Поставленная задача может быть решена на основе исследования математической модели комбинированного ЭТК участка шахты средствами компьютерного моделирования. Структура ЭТК включает модели: кабельной сети с параметрами активных и ёмкостных сопротивлений изоляции относительно земли; ПЧ с учётом применения фильтра высших частот; цепи оперативного тока участкового аппарата защиты от утечек тока на землю (на примере схемы аппарата АЗУР-4).

Приняты следующие допущения: параметры кабельной электрической сети являются сосредоточенными, параметры упрощенной модели асинхронного двигателя нагрузки – постоянными величинами, индуктивность  $L$ -фильтра на выходе преобразователя частоты – линейной, идеальной. Для упрощения математической модели, рассмотрен частный случай, в котором трансформаторная подстанция находится вблизи ПЧ, т.е. длина кабеля до ПЧ минимальна ( $C = 0$  мкФ/фазу,  $R = \infty$ ).

С учётом принятых допущений объект исследований может быть представлен электрической схемой ЭТК участка шахты (рис. 1).



$E_A, E_B, E_C$  – фазные ЭДС ПЧ;  $L_\phi$  – заграждающий фильтр;  $R, L$  – эквивалентные приведенные активные сопротивления и индуктивности обмоток асинхронного двигателя;  $C_1, C_2, C_3$  – ёмкости изоляции фаз относительно земли;  $R_1, R_2, R_3$  – активные сопротивления фаз сети относительно земли

Рисунок 1 – Схема комбинированного электротехнического комплекса участка шахты

Исходя из анализа схемы контроля сопротивления изоляции участковой сети в аппарате АЗУР – 4, в качестве параметра, воздействующего на его исполнительный функциональный узел, может быть принято падение напряжения на резисторе  $R_5$ .

Процессы в рассматриваемой схеме комбинированного ЭТК участка шахты могут быть описаны с использованием законов Кирхгофа. Система дифференциальных уравнений (1) описывает процессы в ответвлении электросети с АД и составлена относительно производных соответствующих токов и напряжений [3]. После приведения к нулевым начальным условиям эта система имеет вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dI_A}{dt} = \frac{5U_{C2} + U_{C1} - R_1 i_{R1} + 3R_2 i_{R2} - 8R_3 i_{R3} + 8E_A - 10E_B + 2E_C}{6L_\Phi} \\ \frac{dI_B}{dt} = \frac{U_{C1} - U_{C2} + R_1 i_{R1} - 3R_2 i_{R2} + 2R_3 i_{R3} - 2E_A + 4E_B - 2E_C}{6L_\Phi} \\ \frac{dI_C}{dt} = \frac{U_{C2} - U_{C1} - R_1 i_{R1} + R_3 i_{R3} - E_A - E_B + 2E_C}{3L_\Phi} \\ \frac{di_a}{dt} = \frac{7U_{C1} - 7U_{C2} - 7R_1 i_{R1} + 3R_2 i_{R2} + 4R_3 i_{R3} + 6Ri_b - 6Ri_c + 2E_C}{6L} \\ \frac{di_b}{dt} = \frac{5U_{C1} - 5U_{C2} - 5R_1 i_{R1} + 3R_2 i_{R2} + 2R_3 i_{R3} + 6Ri_b + 4E_A + 4E_B - 2E_C}{6L} \\ \frac{di_c}{dt} = \frac{U_{C2} - U_{C1} - R_1 i_{R1} + R_3 i_{R3} - 3Ri_c - 2E_A - 2E_B + 2E_C}{3L} \\ \frac{dU_{C1}}{dt} = C_1 i_{C1} \\ \frac{dU_{C2}}{dt} = C_2 i_{C2} \\ \frac{dU_{C3}}{dt} = C_3 i_{C3} \end{array} \right. \quad (1)$$

где  $I_A(0) = 0$ ,  $I_B(0) = 0$ ,  $I_C(0) = 0$ ,  $i_a(0) = 0$ ,  $i_b(0) = 0$ ,  $i_c(0) = 0$ ,  $U_{C1}(0) = 0$ ,  $U_{C2}(0) = 0$ ,  $U_{C3}(0) = 0$ .

Для моделирования ЭДС ПЧ использована математическая модель ПЧ с квазиоднополосной модуляцией [4]. Реализуется многоканальный способ преобразования параметров электромагнитной энергии сети, при котором в блоке силовых модуляторов осуществляется разветвленная пофазная модуляция напряжений  $E_i$ , частоты  $\omega_1$  трехфазной сети соответствующими им эквивалентными модулирующими воздействиями  $\Psi_{M(i)}^\ominus(N, t, i)$  трёхфазной системы частоты  $\omega_2$ . Модель

включает многопараметрическое алгоритмическое уравнение, описывающее процессы формирования выходных напряжений  $E_j(N, t)$  ПЧ с КМ:

$$E_j(N, t) = \sum_{i=1}^3 u(i, t) \psi_{M(i)}^{\vartheta}(N, t, i) \quad (2)$$

где  $u(i, t) = E_m \sin\left(\omega_1 t - \frac{2(i-1)\pi}{3}\right)$  мгновенные значения фазных напряжений сети,  $i = 1, 2, 3$ ;

$E_m$  – амплитудное значение фазного напряжения,

$N$  – число инверторов переменного напряжения силового модулятора напряжения сети  $i$ -ой фазы.

Для силового модулятора напряжения любой из фаз, состоящего из  $N$  инверторов, эквивалентное модулирующее воздействие любого  $n$ -ого из них представляется модулирующей функцией вида:

$$\psi_{M(i)}^{\vartheta}(n, N, t) = \sum_2 \text{sign}\left(\sin\left[\omega_2 t \pm \alpha_0 \pm \alpha_1(t) + (n-1)\beta_n - \frac{2(i-1)\pi}{3}\right]\right) \quad (3)$$

где  $\alpha_0$  – половина временного интервала длительности нулевой паузы в кривой выходного напряжения  $n$ -ого инвертора;

$\beta_n$  – начальная фаза выходного напряжения  $n$ -ого инвертора;

$\alpha_1(t)$  – угол управления, изменение которого обеспечивает регулирование величины выходного напряжения каждого из инверторов.

Учитывая структурную организацию такого ПЧ, подключенного к трёхфазной сети, эквивалентное модулирующее воздействие любого из трёх силовых модуляторов описывается выражением:

$$\psi_{M(i)}^{\vartheta}(N, t, i) = \sum_{n=1}^N \sum_2 \text{sign}\left(\sin\left[\omega_2 t \pm \alpha_0 \pm \alpha_1(t) + (n-1)\beta_n - \frac{2(i-1)\pi}{3}\right]\right) \quad (4)$$

Подставляя (4) в (2), получим математическую модель процесса формирования выходных ЭДС. Записывая алгоритмическое уравнение (2) относительно конкретного фазного напряжения с учётом (3), получаем промежуточный результат многоступенчатого процесса формирования ЭДС. При соответствующей нормировке выражение (4) относительно питающего напряжения может быть использовано в

качестве математической модели при описании электромагнитных процессов в двухзвенных ПЧ с трёхфазного напряжения.

Подставляя полученные значения фазных напряжений ПЧ в систему (1), получаем математическую модель системы ПЧ-АД.

При построении математической модели цепи оперативного тока АЗ необходимо использовать параметр напряжения смещения нейтрали при однофазной утечке тока на землю в сети, после ПЧ:

$$U_{kNN} = (E_{kA} Y_{kA} + E_{kB} Y_{kB} + E_{kC} Y_{kC}) (Y_{kA} + Y_{kB} + Y_{kC})^{-1}, \quad (5)$$

где  $E_{kA} = E_A e^{j\varphi_{0kA}}$ ,  $E_{kB} = E_B e^{j(\varphi_{0kB} - 120^\circ)}$ ,  $E_{kC} = E_A e^{j(\varphi_{0kC} + 120^\circ)}$  - комплексы действующих значений выходного напряжения ПЧ;

$$\begin{aligned} Y_{kA} &= (R_{ym} + R_A) R_{ym} R_A + jk\omega_1 C_A = q_{ym} + q_A + jk\omega_1 C_A; \\ Y_{kB} &= 1/R_B + jk\omega_1 C_B = q_B + jk\omega_1 C_B; \\ Y_{kC} &= 1/R_C + jk\omega_1 C_C = q_C + jk\omega_1 C_C; \end{aligned} \quad (6)$$

где  $\omega_1 = 2\pi f_{н.ч.}$  - круговая частота первой гармоники напряжения ПЧ;

$q_A = 1/R_A$ ,  $q_B = 1/R_B$ ,  $q_C = 1/R_C$  - активные проводимости изоляции кабеля относительно земли;

$$R_A = R_B = R_C = R; \quad C_A = C_B = C_C = C; \quad \varphi_A = \varphi_B = \varphi_C = \varphi;$$

$$E_A = E_B = E_C = E; \quad q_A = q_B = q_C = q.$$

После подстановки (6) в (5) последнее выражение преобразуется к виду, позволяющему определить параметры процесса:

$$U_{kNN} = E e^{j\varphi_{0k}} q_{ym} (q_{ym} + 3q + jk\omega_1 C)^{-1}. \quad (7)$$

На основании полученных выражений, используя методы расчёта, изложенные в [2] и учитывая конфигурацию схемы аппарата защиты (см. рисунок 1), получаем систему уравнений (8).

$$\left. \begin{array}{l}
 i_6 + i_{12} - i_4 = 0 \\
 i_7 - i_1 - i_8 - i_{11} = 0 \\
 i_2 + i_4 - i_7 = 0 \\
 i_3 + i_5 - i_2 = 0 \\
 i_{11} + i_9 - i_{10} = 0 \\
 i_{11}R_{VT} - U_{C8} + U_9 = 0 \\
 i_1R_1 - U_{C8} = 0 \\
 i_7R_k + L_k \frac{di_7}{dt} + i_2R_2 + U_{CIII} = 0 \\
 i_3(R_3 + R_5) + U_{CIII} = 0 \\
 i_4R_4 + U_{C12} - U_{CIII} - i_2R_2 = 0 \\
 i_6R_{ЭК} - U_{C12} = 0
 \end{array} \right\} \begin{array}{l}
 \text{— уравнения по узлам} \\
 \text{— уравнения по контурам}
 \end{array} \quad (8)$$

$$U_{C8}(0_+) = 0; \quad U_{CIII}(0_+) = 0; \quad U_{C12}(0_+) = 0; \quad i_7(0_+) = 0,$$

$$\text{де } i_8 = C_{ym1} \frac{du_{c8}}{dt}; \quad U_5 = i_3R_5; \quad i_5 = C_w \frac{du_{cu}}{dt}; \quad i_{12} = C_{ЭК} \frac{du_{c12}}{dt}.$$

Параметром срабатывания АЗУР-4 является значение напряжения на резисторе  $R_5$ , создаваемое оперативным током. Формирование команды на защитное отключение сети происходит вследствие превышения этим напряжением величины  $U_{CP} = 2,4$  В. Результаты моделирования позволили получить графики изменения во времени напряжения на резисторе  $R_5$  оперативной цепи (контролируемый параметр) с учетом емкости изоляции ответвления от ПЧ относительно земли (рисунок 2).

Из графиков следует, скорость нарастания напряжения на реагирующем элементе мало зависит от емкости сети после ПЧ. Это объясняется рациональной схемой подключения аппарата защиты и малым значением постоянной времени заряда емкости сети оперативным током. При этом быстродействие реагирования соответствует ГОСТ 22929-78.

Исследованиями математической модели структуры ЭТК участка шахты, содержащий ПЧ установлено, что работа преобразователя частоты в рабочем диапазоне частот выходного напряжения не оказывает существенного влияния на чувствительность участкового аппарата защиты от утечек тока на землю. В диапазоне низких частот (от 0 до 10 Гц) тенденция к снижению чувствительности АЗ может быть устранена применением компенсатора емкости сети.

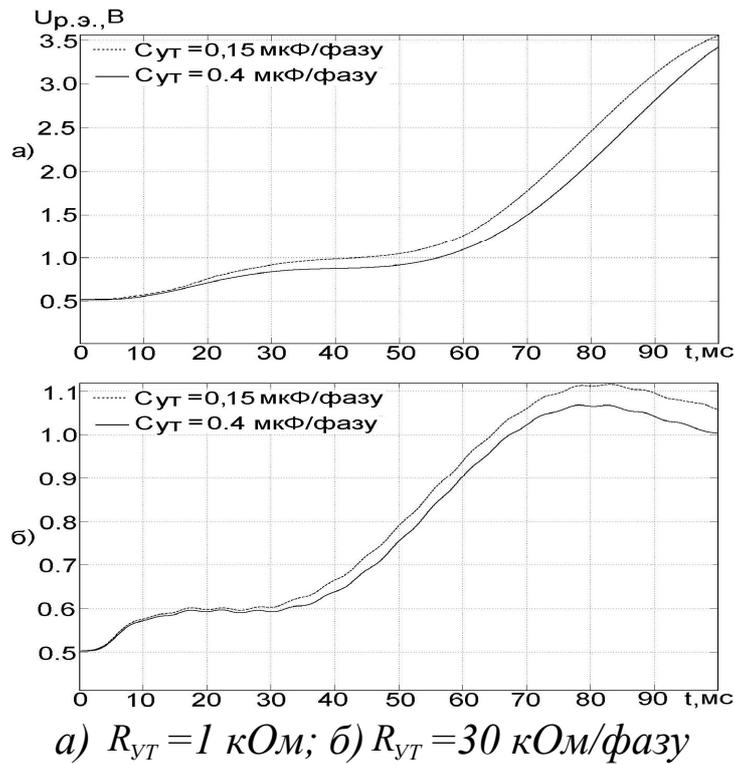


Рисунок 2 – Графики изменения во времени напряжения на резисторе  $R_5$  оперативной цепи аппарата защиты при сопротивлении утечки на землю

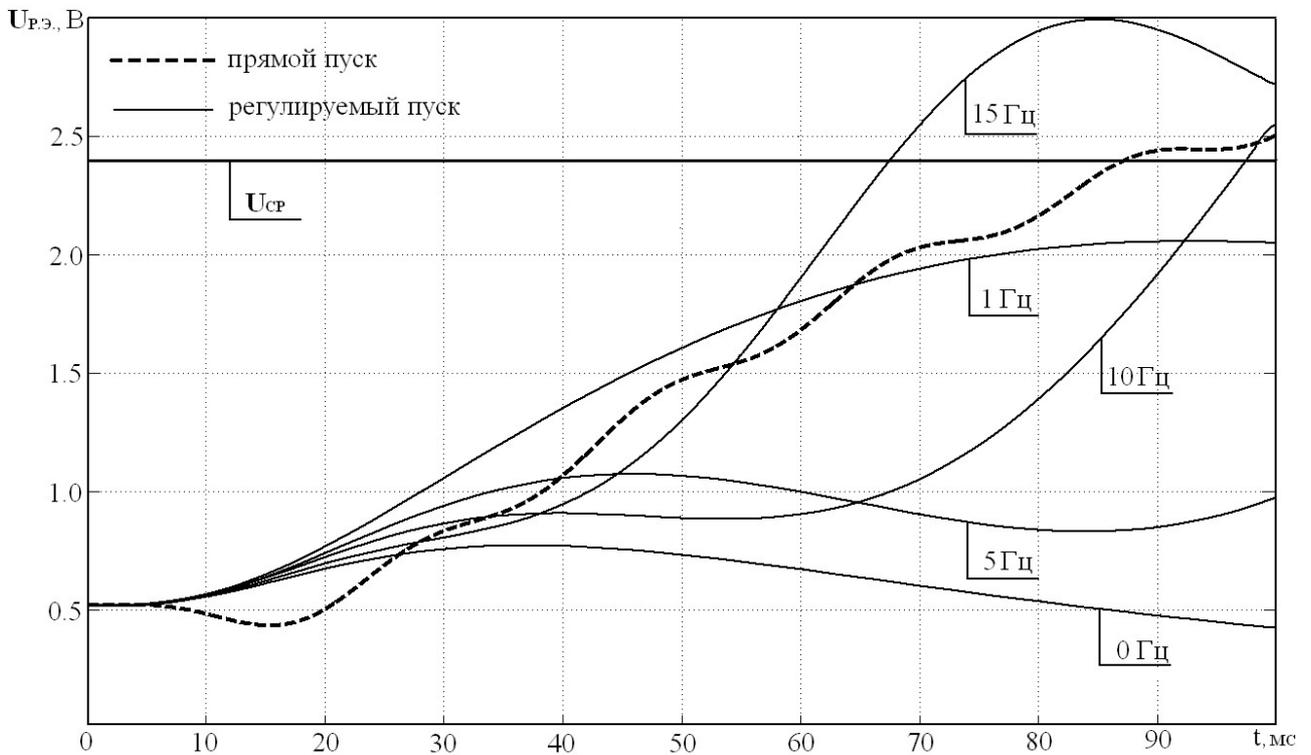


Рисунок 3 – Зависимость напряжения на резисторе  $R_5$  от частоты выходного напряжения ПЧ  $R_{UT} = 1 \text{ кОм}$

### **Выводы:**

1. Обоснована математическая модель комбинированного ЭТК участка шахты, содержащего ПЧ со звеном постоянного тока. Установлен характер влияния преобразователя (при формировании рабочего диапазона частот напряжений) на оперативный параметр реагирующего элемента участкового аппарата защиты АЗУР-4. Обоснована необходимость разработки дополнительных технических решений обеспечения работоспособности аппаратуры защиты от утечек тока на землю в случае применения ПЧ со звеном постоянного тока в составе ЭТК участка шахты.

2. Дальнейшим направлением исследований является изучении рациональных способов управления ПЧ и компенсации емкостных составляющих токов утечки, исключаящих существенное изменение параметров участковой аппаратуры защиты от утечек тока на землю.

### Список источников.

1. Товстик Ю.В., Савицкий В.Н. Проблемы защиты от утечек тока на землю распределительных сетей угольных шахт, с силовыми полупроводниковыми элементами// Гірнична електротехніка та автоматика.: Наук. техн. зб. – 2005. – Вип.. №74.-с.36-42
2. Маренич К.Н., Руссиян С.А. О влиянии параметров участковой электросети шахты на устойчивость работы аппарата АЗУР-4 при включении кабельного ответвления. Взрывозащищённое электрооборудование: Сб. науч. тр. УкрНИИВЭ/ Под ред. В.С. Дзюбана. – Донецк: ООО “Юго-Восток, Лтд.”, 2005, - с.84-88.
3. Дубинин М.С. Исследование процессов компенсации емкостных токов утечки на землю в комбинированном электротехническом комплексе участка шахты. Наукові праці ДонНТУ. Серія „Гірничо-електро-механічна”. Вип. 14 (127), Донецьк, ДонНТУ, 2007 р, с. 167-174
4. Макаренко Н.П. Сетевые преобразователи электроэнергии комплексов технических средств промышленных предприятий //Вісник УБЕНТЗ.-1999.-№1.-с.13-17.