

КОМУТАЦІЙНИЙ ПЕРЕХІДНИЙ ПРОЦЕС В ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНОМУ КОМПЛЕКСІ ДІЛЬНИЦІ ШАХТИ, ЯК ФАКТОР ВПЛИВУ НА ПАРАМЕТРИ ДІЛЬНИЧНОГО АПАРАТУ ЗАХИСТУ ВІД ВИТОКІВ СТРУМУ НА ЗЕМЛЮ

Руссиян С.А. Донецький національний технічний університет

Досліджено вплив комутаційних перехідних процесів в електромережі дільниці шахти при контакторній комутації кабельного відгалуження на параметри стійкості функціонування апарату захисту від струмів витоку на землю

Умовою захисту людини від електроураження при експлуатації електротехнічних комплексів (ЕТК) дільниці шахти є обов'язкове застосування в їх складі апаратів захисту від витоків струму на землю при обов'язковому функціонуванні електромережі дільниці в режимі ізольованої нейтралі трансформатора. У сучасних апаратах захисного відключення (АЗ) реалізується принцип контролю величини оперативного струму, що подається в мережу, і зіставлення її з величиною гранично припустимого струму, що циркулює по внутрішньому контуру АЗ. Чинниками, що призводять до збільшення оперативного струму АЗ, є: погіршення ізоляції у відгалуженні електромережі дільниці шахти або поява однофазного витоку струму на землю, наприклад, унаслідок торкання людиною струмоведучого елемента, що знаходиться під напругою.

Проте є і інші чинники, прояв яких здатний викликати спрацьовування АЗ. До них відносяться комутаційні перенапруги, викликані контакторною комутацією асинхронних двигунів споживачів. Тенденція до збільшення потужності технологічних установок шахт, що існує в даний час, створює передумови для застосування потужніших і більш розгалужених дільничних кабельних мереж, що обумовлює збільшення ємності мережі та сприяє негативному впливу від комутаційних перенапруг. Такі процеси супроводжуються короткочасним підвищенням контрольованого параметра в АЗ і здатні викликати помилкове спрацьовування захисту [1].

Основним комутаційним вузлом низьковольтної електромережі дільниці шахти є контактор пускача. Неодночасність пофазної комутації між силовими контактами призводить до появи різниці потенціалів між нейтраллю мережі і землею, що здатне викликати короткочасне збільшення контрольованого параметра в АЗ і несанкціонованого спрацьовування останнього [2].

Загальні тенденції зміни параметрів комутаційного перехідного процесу в дільничній електромережі шахти встановлені в дослідженнях [1, 3]. Проте вплив параметрів комутаційного перехідного процесу розглянутий відносно застарілих апаратів РУВ, УАКІ, АЗАК, що зняті з виробництва. Тому актуальним є уточнення особливостей впливу параметрів комутаційного перехідного процесу на параметри чутливості реагуючого органу АЗ з метою виявлення факторів, що призводять до самовільного спрацьовування захисту від витоку струму на землю. В якості об'єкта дослідження доцільно прийняти сучасну розробку – апарат захисного відключення типу АЗУР-4 [4].

В попередніх дослідженнях на основі обґрунтування математичної та комп'ютерної моделі об'єкта були отримані окремі результати, що свідчать про ймовірність підвищення напруги на реагуючому органі АЗ внаслідок комутаційних перехідних процесів, що теоретично може спричинити несанкціоноване спрацювання захисту від витоку струму на землю.

Практичний інтерес представляють питання, щодо величини терміну існування підвищеного рівня напруги на реагуючому органі АЗ, та особливостей впливу конфігурації електричної мережі дільниці шахти на характер перехідного процесу зміни падіння напруги на реагуючому органі АЗ. Це є задачею даного дослідження.

З метою її вирішення слід уточнити структуру моделі об'єкта, отримати характеристики існування перехідного процесу зміни падіння напруги на реагуючому органі АЗ і зіставити з експериментальними даними.

Об'єктом дослідження є електротехнічний комплекс технологічної дільниці шахти у стані контакторного відключення відгалуження, що містить АД споживача. Його розрахункова схема наведена на рис. 1. Параметри дільничної трансформаторної підстанції, асинхронного двигуна споживача, ємності ізоляції частин електромережі, що не відключаються та відключаються, представлені відповідними елементами схеми.

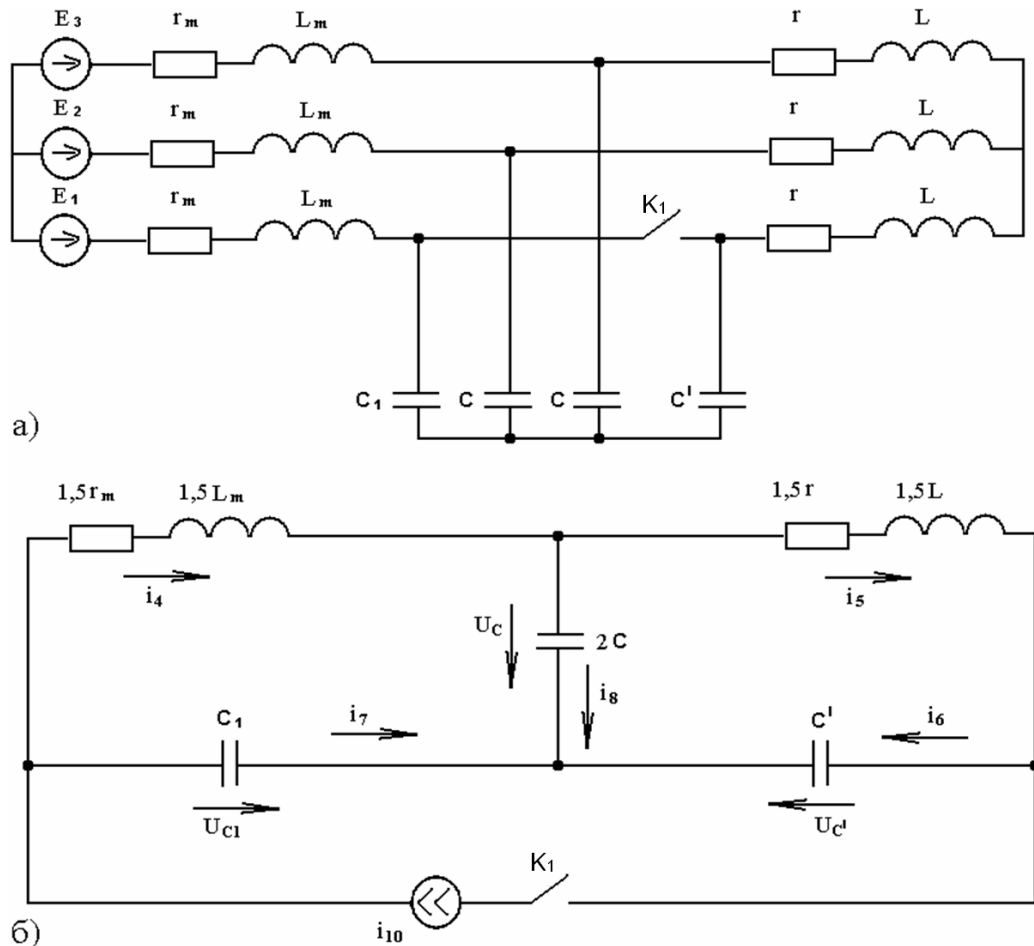


Рисунок 1. Розрахункова схема ЕТК дільниці шахти після початку відключення електродвигуна (а) і еквівалентна схема заміщення (б)

Процеси до комутації силових ланцюгів навантаження відрізняються симетрією фазних струмів у приєднанні ЕТК. Неодночасність роз'єднання фаз силового контактора може бути імітована роз'єднанням контакту K_1 .

Аналітичний опис процесів в даній схемі полягає в наступному:

а) стан “до комутації”:

$$I_m = \frac{E_{1m}}{r_m + j\omega L_m + r + j\omega L}; \quad (1)$$

$$\varphi_{am} = I_m (r + j\omega L); \quad (2)$$

$$\varphi_a(t) = \text{Im } \varphi_{am} e^{j\omega t}, \quad (3)$$

де r_m, L_m, r, L - активні опори індуктивності трансформатора і асинхронного двигуна;

б) у стані “після комутації” - стосовно схеми заміщення (рис. 1. б), математична модель процесу описується такими рівняннями:

$$\left. \begin{cases} i_5 = i_6 - i_{10}; \\ i_{10} = i_7 + i_4; \\ i_4 = i_8 + i_5; \end{cases} \right\} \text{— рівняння по вузлах}$$

$$\left. \begin{cases} U_C - U_{C1} + 1,5i_4 r_m + 1,5L_m \frac{di_4}{dt} = 0; \\ 1,5ri_5 + 1,5L \frac{di_5}{dt} + U_C - U_C = 0, \end{cases} \right\} \text{— рівняння по контурах}$$

де $i_6 = C' \frac{dU_{C'}}{dt}$; $i_7 = C_1 \frac{dU_{C1}}{dt}$; $i_8 = 2C \frac{dU_C}{dt}$;
 $i_4(0_+) = 0$; $i_5(0_+) = 0$; $U_C(0_+) = 0$; $U_{C1}(0_+) = 0$; $U_{C'}(0_+) = 0$.

Тоді напруга на ємкості частини мережі, що не відключається, набуває значення:

$$U_{C1np} = \varphi_a + U_{C1}. \quad (5)$$

Виходячи з електричної схеми апарату захисту типу АЗУР – 4 [4], доцільно виділити ланцюг контролю ізоляції мережі (рис. 2). Параметрами апарату АЗУР-4, які характеризують реакцію схеми на комутаційний перехідний процес в мережі, є напруга реагуючого елемента R_{45} і вихідна напруга компаратора $DA5$.

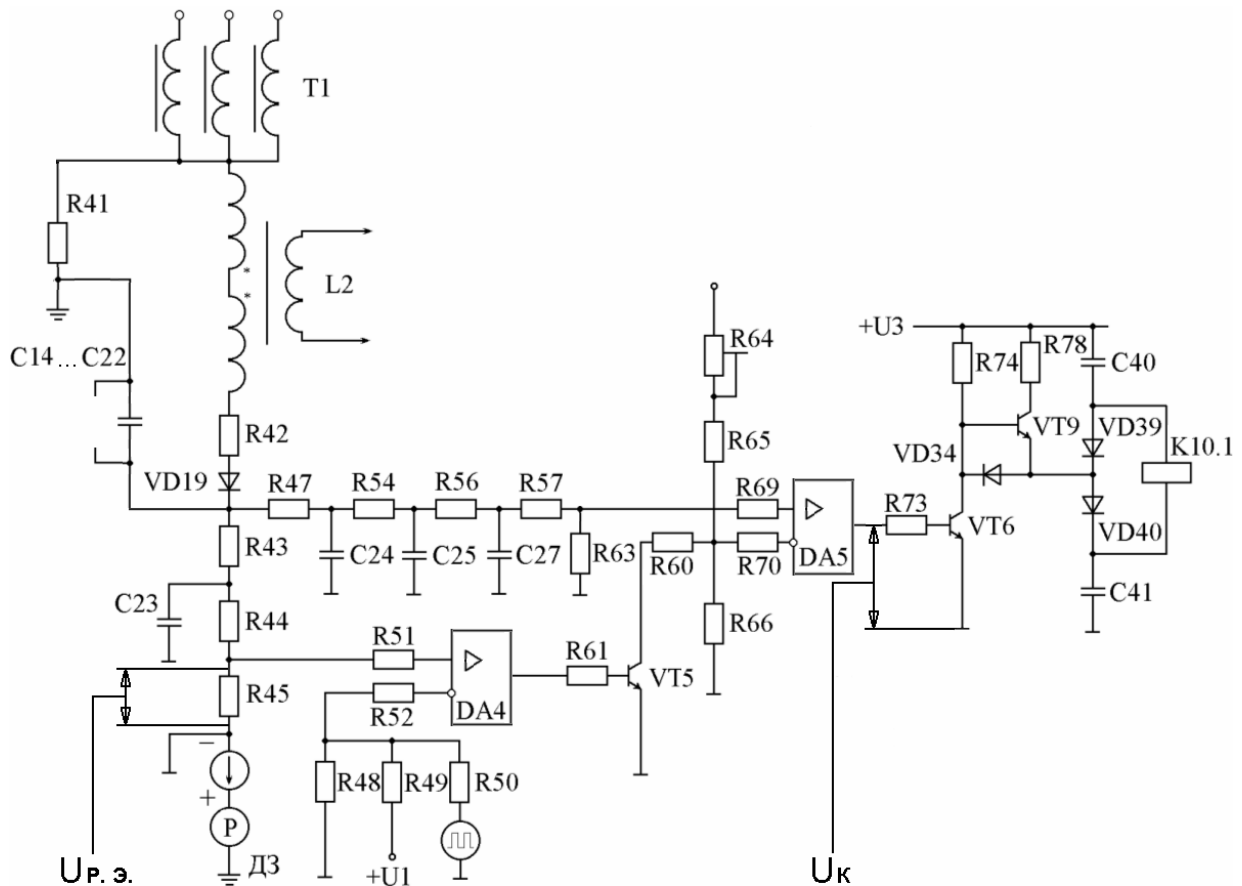


Рисунок 2 - Спрощена принципова схема пристрою контролю ізоляції в апараті захисту АЗУР – 4 з вказівкою контрольованих точок при перехідному процесі

З урахуванням структури схеми пристрою контролю ізоляції апарату АЗУР-4 (рис. 2) і конфігурації схеми технологічної дільниці шахти у стані контакторного відключення відгалуження мережі (мал. 1), коректується схема заміщення ЕТК дільниці шахти (рис. 3). Параметром, що викликає спрацьовування АЗ є зростання напруги на

резисторі, що створюється оперативним струмом. При перевищенні напруги на резисторі R_{45} величини $U_{CP}=2,4$ В [4] відбувається формування команди на захисне відключення мережі, унаслідок чого напруга на виході операційного підсилювача DA5 зникає, і обмотка реле $K10.1$ знеструмлюється. Заряд ємності C_C у момент початку її комутації визначається формулою (5).

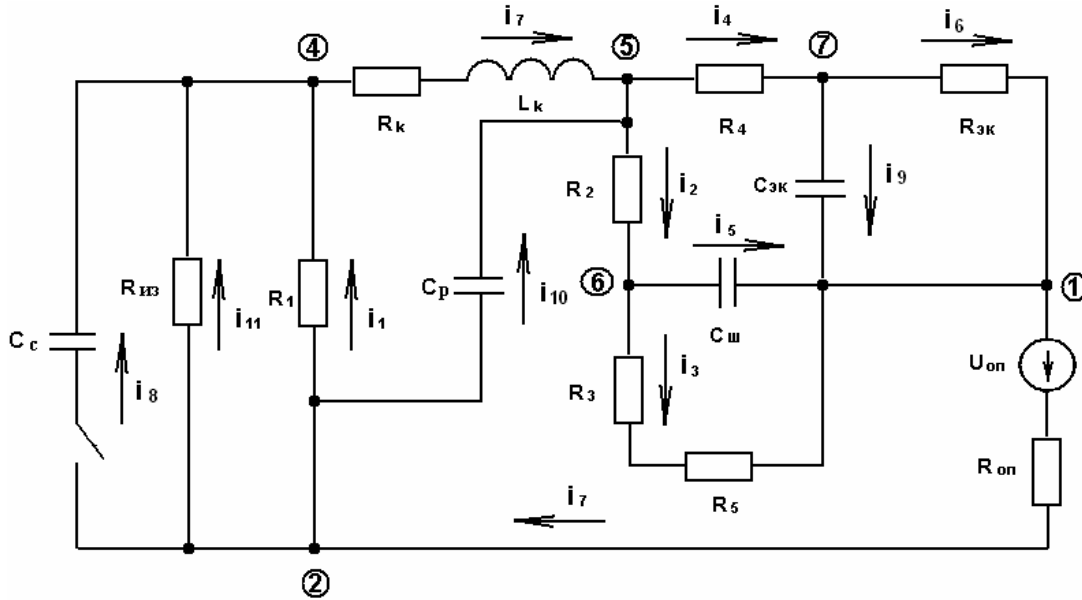


Рисунок 3 – Схема заміщення електротехнічного комплексу дільниці шахти з елементами ланцюга оперативного струму апарату АЗУР-4

Стосовно схеми заміщення (рис. 3) можуть бути визначені параметри процесу і складені рівняння по вузлах і контурах.

$$\begin{cases}
 \frac{1}{C_8 R_{он}} i_8 - R_1 \left(\frac{di_7}{dt} - \frac{di_8}{dt} - \frac{di_{11}}{dt} \right) = 0; \\
 R_K \frac{di_7}{dt} + L_K \frac{di_7}{dt} + R_2 \left(\frac{di_5}{dt} - \frac{1}{C_5 (R_3 + R_5)} i_5 \right) + \frac{1}{C_5} i_5 + (R_{из} + R_1) \left(\frac{di_7}{dt} - \frac{di_8}{dt} - \frac{di_{11}}{dt} \right) = 0; \\
 \frac{di_9}{dt} + \frac{1}{C_9 R_{эж}} i_9 - \frac{di_7}{dt} - \frac{di_{10}}{dt} - \frac{1}{C_5 (R_3 + R_5)} i_5 + \frac{di_5}{dt} = 0; \\
 \frac{1}{C_{10}} i_{10} + R_2 \left(\frac{di_5}{dt} - \frac{1}{C_5 (R_3 + R_5)} i_5 \right) + \frac{1}{C_5} i_5 = 0; \\
 R_4 \left(\frac{di_7}{dt} + \frac{di_{10}}{dt} + \frac{1}{C_5 (R_3 + R_5)} i_5 - \frac{di_5}{dt} \right) - R_2 \left(\frac{di_5}{dt} - \frac{1}{C_5 (R_3 + R_5)} i_5 \right) - \frac{1}{C_5} i_5 + \frac{1}{C_9} i_9 = 0.
 \end{cases} \quad (6)$$

$i_5(0_+) = 0$; $i_7(0_+) = 0$; $i_8(0_+) = 0$; $i_9(0_+) = 0$; $i_{10}(0_+) = 0$;

де $i_8 = C_C \frac{du_{c8}}{dt}$; $U_5 = i_3 R_5$; $i_5 = C_{ш} \frac{du_{cш}}{dt}$; $i_9 = C_{эж} \frac{du_{c12}}{dt}$; $i_{10} = C_P \frac{du_{c10}}{dt}$.

Результати математичного моделювання дозволили отримати масив рішень для зміни напруги на резисторі оперативного ланцюга АЗУР-4 (контрольований параметр), обумовленого комутаційним перехідним процесом. Графічне зображення залежності напруги на резисторі R_5 від зміни активного опору ізоляції кабеля (при $C_C=0,3$ мкФ/фаза) і ємності ізоляції кабеля (при $R_{из}=35$ кОм/фаза), наведено відповідно на рисунку 4а,б. В обох двох випадках ємність не вимкненої частини дільниці шахти - $C_C=0,5$ мкФ/фаза.

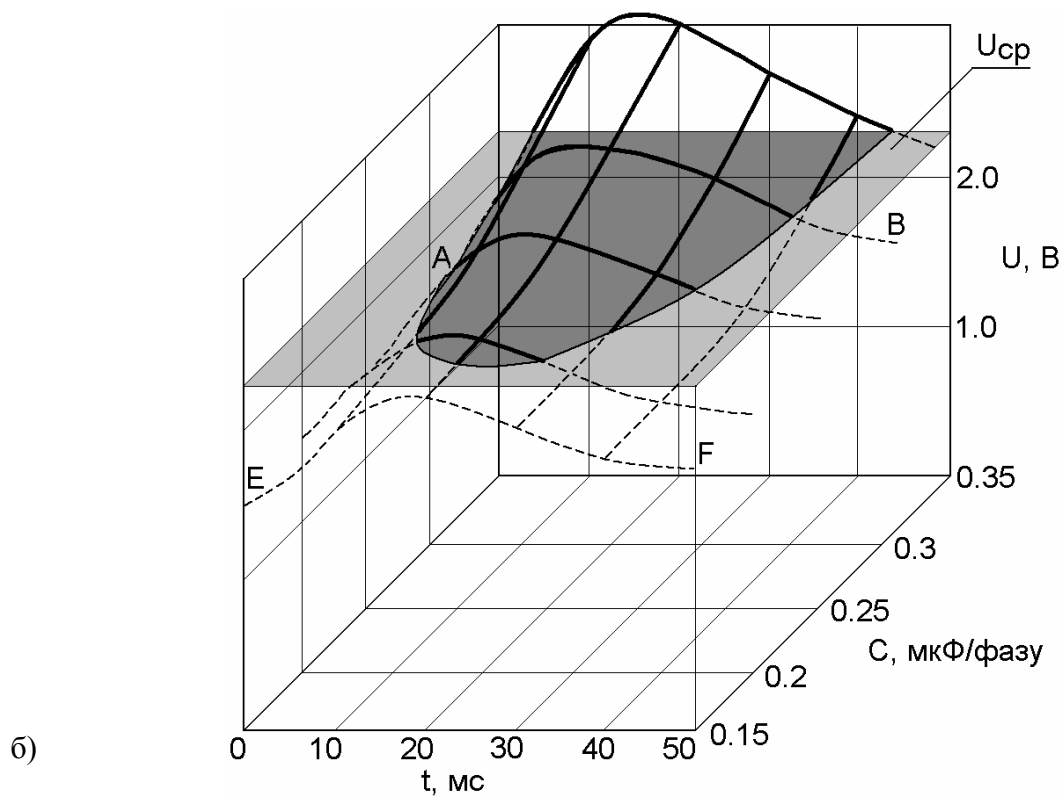
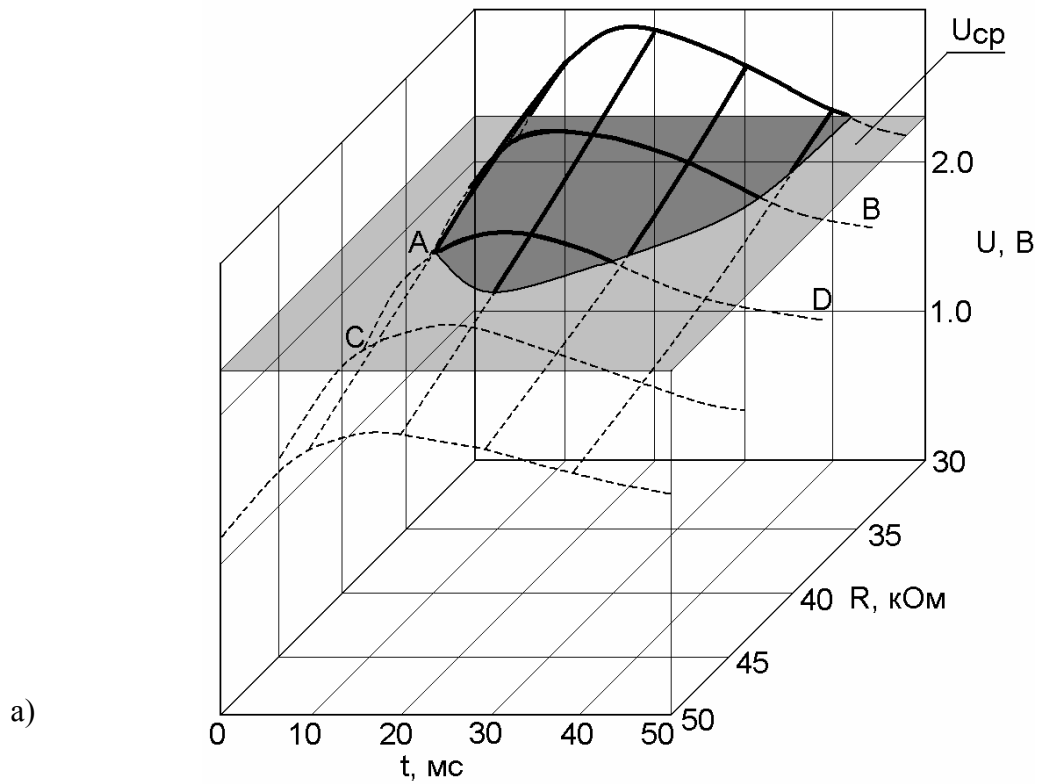


Рисунок 4 – Залежність амплітуди струму на реагуючому органі АЗ при зміні активного опору ізоляції кабеля і $C_C=0,3$ мкФ/фазу (а), та зміні ємності кабеля при $R_{из}=35$ кОм/фазу (б)

З метою перевірки результатів, отриманих при математичному моделюванні розроблений стенд (рис. 5), що створює розряд заздалегідь зарядженої трифазної групи ємностей на ланцюг оперативного струму АЗ (відповідно до апробованої методики [1]). Осцилограми параметрів в контрольованих точках (рис. 2) наведені на рис. 6, 7, 8.

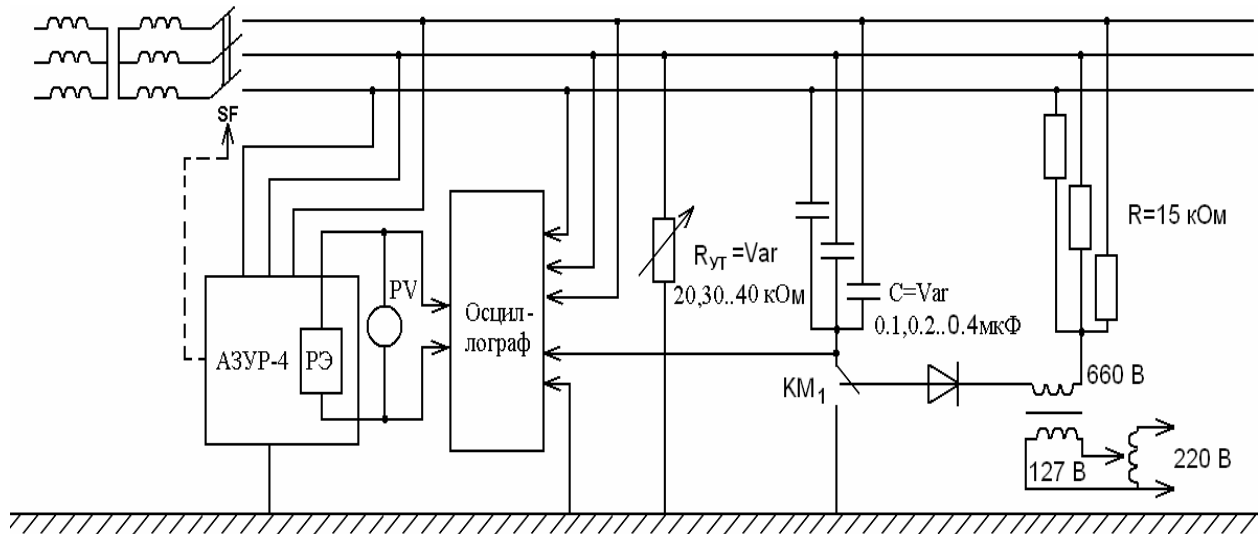


Рисунок - 5 Схема стенду для дослідження впливу розряду ємності залишкової напруги на процеси в реагуючому органі АЗ

Зіставлення отриманих теоритичних кривих з результатами експериментальних осцилограм напруги на реагуючому елементі (в електротехнічному комплексі з аналогічними параметрами) свідчить, що форма експериментальних осцилограм відповідає отриманим даним в результаті моделювання комутаційного процесу. Відповідні теоретичні (рис. 4 а, б) та експериментальні (рис. 6, 7, 8) інтервали комутаційного перехідного процесу на реагуючому органі АЗ позначені однаковими літерами.

У електричних мережах лінійної напруги 660 В при ємності ізоляції одного відгалуження, що не перевершує 0,15 мкФ/фазу (при величині активного опору, що перевищує 30 кОм/фазу) повністю виконуються вимоги ГОСТ 22929-78 відносно стійкості апаратів захисту від витоків струму на землю до помилкових спрацьовувань при контакторній комутації силових ланцюгів споживачів [5].

У мережах лінійної напруги 660 В з ємністю ізоляції кабелю одного приєднання відносно землі, що перевищує 0,2 мкФ/фазу, зафіксовано формування апаратами захисту від витоків струму на землю короткочасних імпульсів на відключення автоматичних вимикачів при контакторних комутаціях силових ланцюгів споживачів. У випадках, коли активний опір ізоляції був менш, ніж 40 кОм/фазу, а ємність ізоляції кабелю перевищувала 0,25 мкФ/фазу зафіксовані відключення автоматичних вимикачів (як результат помилкових спрацьовувань апаратів АЗУР-4).

Встановлено, що продовження існування напруги на реагуючому органі АЗ, що перевищує $U_{CP} = 2,4В$, більш ніж на 12 мс здатно привести до помилкового спрацьовування апарату АЗУР-4 (рис. 6).

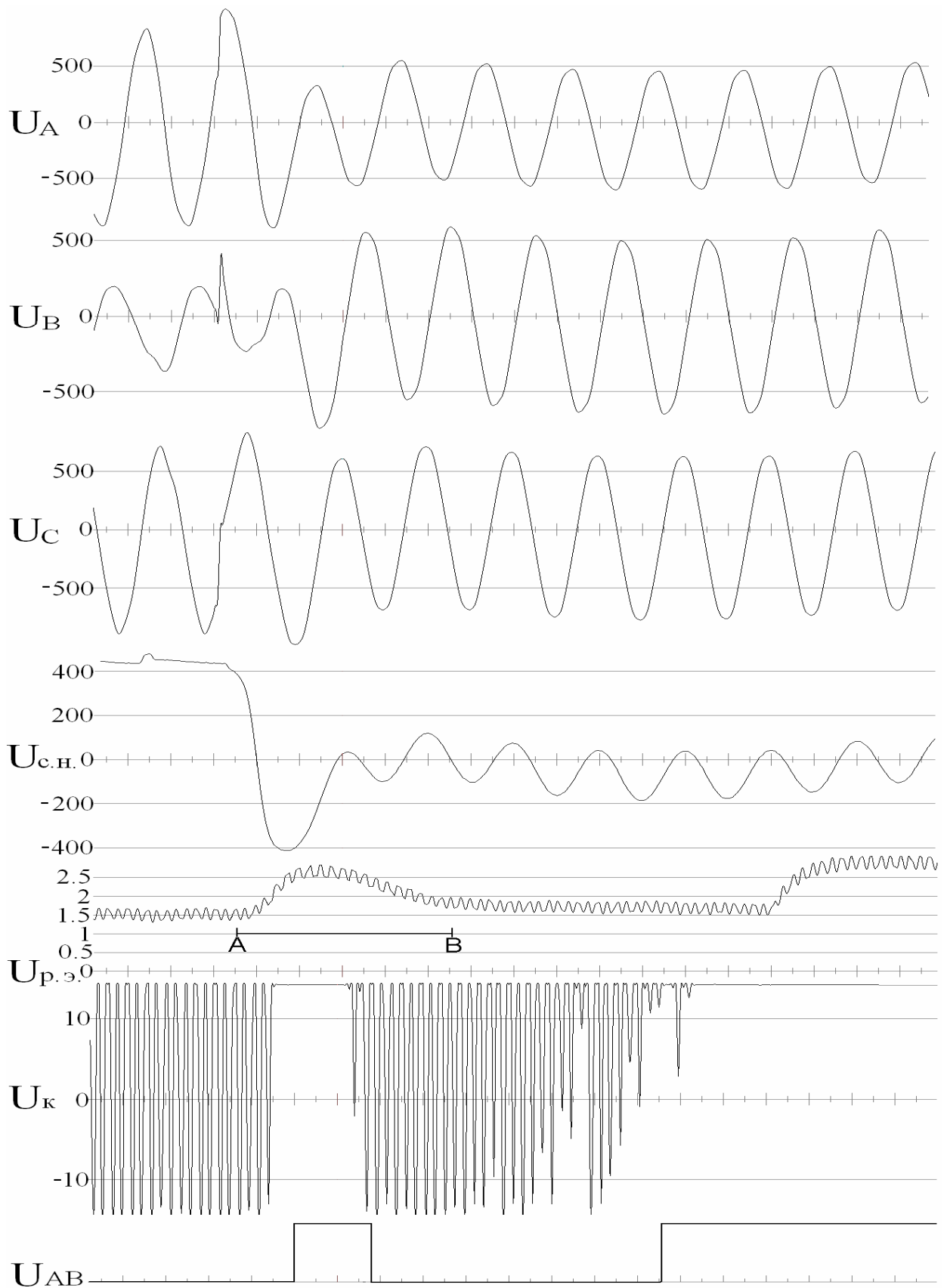


Рисунок – 6 Осцилограми параметрів в контрольованих точках($C_C=0,3$ мкФ/фазу, $R_{ИЗ}=35$ кОм/фазу): u_A, u_B, u_C - напруга фази А, В, С; $U_{C.H.}$ - напруги зсуву нейтралі; $U_{P.Э.}$ - напруга на реагуючому елементі А3; U_K - напруга виходу компаратора А3; U_{AB} - напруга датчика спрацьовування автоматичного вимикача мережі

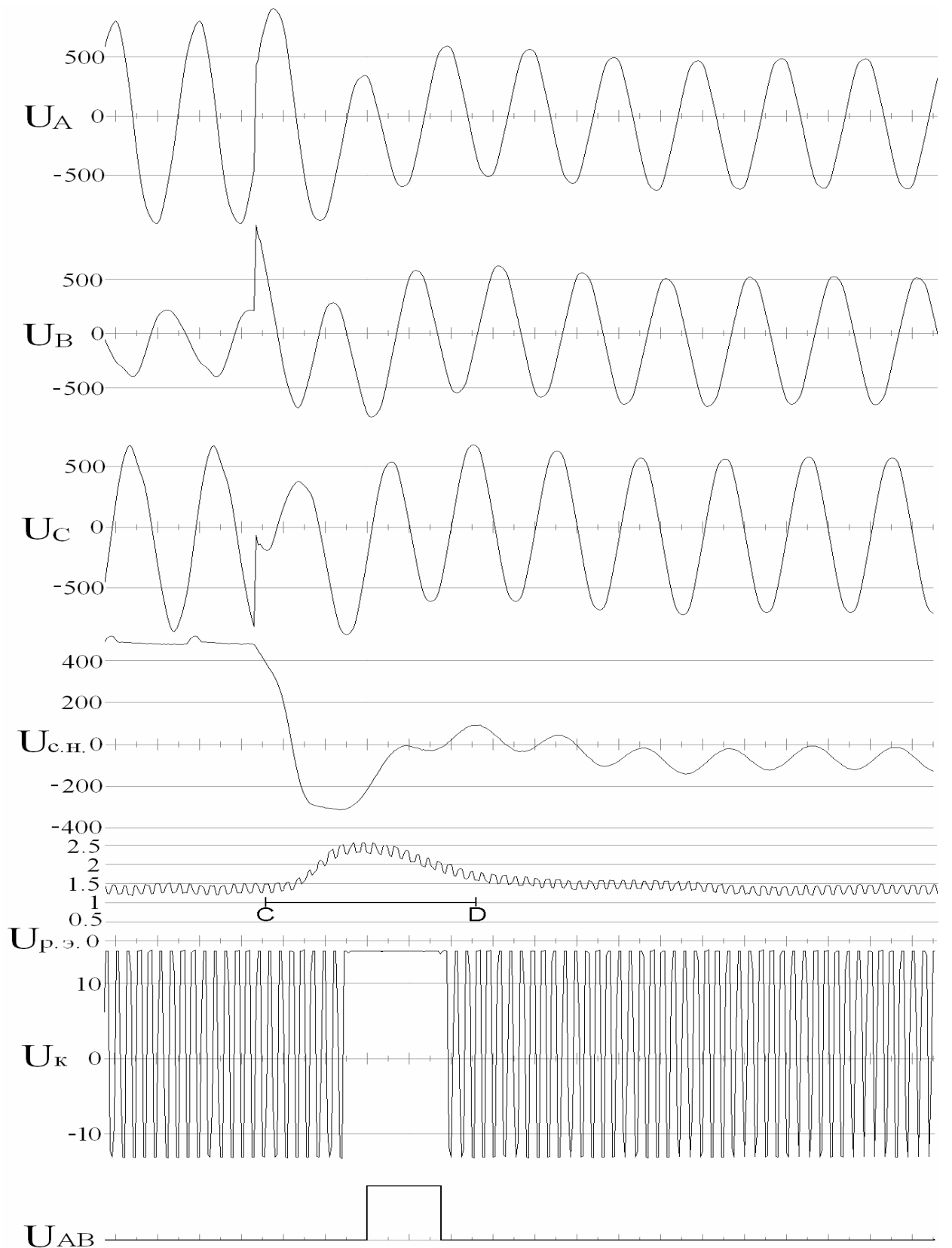


Рисунок – 7 Осцилограми параметрів в контрольованих точках ($C_C = 0,3$ мкФ/фазу, $R_{ИЗ} = 40$ кОм/фазу): u_A , u_B , u_C - напруга фази А, В, С; $U_{C.H.}$ - напруги зсуву нейтралі; $U_{P.Э.}$ - напруга на реагуючому елементі А3; U_K - напруга виходу компаратора А3; U_{AB} - напруга датчика спрацьовування автоматичного вимикача мережі

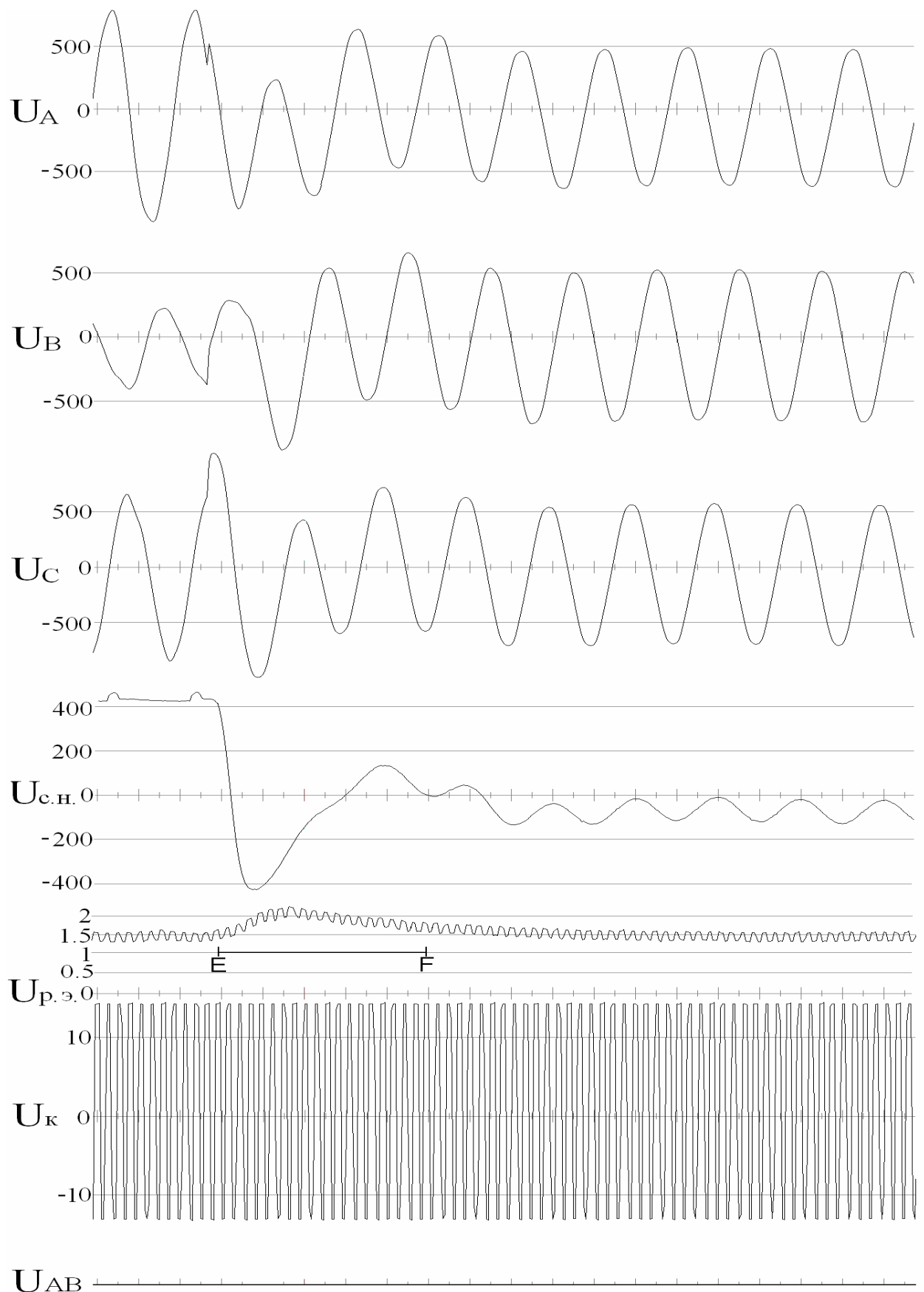


Рисунок – 8 Осцилограми параметрів в контрольованих точках ($C_C = 0,15$ мкФ/фазу, $R_{IB} = 35$ кОм/фазу): u_A , u_B , u_C - напруга фази А, В, С; $U_{C.N.}$ - напруги зсуву нейтралі; $U_{P.Э.}$ - напруга на реакуючому елементі АЗ; U_K - напруга виходу компаратора АЗ; U_{AB} - напруга датчика спрацьовування автоматичного вимикача мережі

Розроблена розрахункова схема і прийнята методика дослідження можуть бути застосовані надалі для вивчення характеру впливу комутаційних перехідних процесів, пов'язаних із застосуванням силових тиристорних апаратів на стійкість роботи апарата АЗУР-4.

Список літератури

1. Дзюбан В.С. Аппараты защиты от токов утечки в шахтных электрических сетях / Дзюбан В.С.// М.: Недра. 1982. с. 87-106.
2. Маренич К.Н. Моделирование коммутационного процесса как фактора нестабильности параметров защиты электросети./ Маренич К.Н., Руссиян С.А.//Математические методы в технике и технологиях: Сб. научн. тр. ММТТ 20, том 4., Ярославль 2007, - с.184-187.
3. Колосюк В.П. Защитное отключение рудничных электроустановок/ Колосюк В.П.// М.: Недра, 1980.- 334 с. 271-283.
4. ПИЖЦ 648513.002
5. Аппараты защиты от токов утечки рудничные для сетей напряжением до 1200 В. Общие технические условия: ГОСТ 22929-78. – [Действующий с 1978]. – М.: Издательство стандартов, 1978. – 16 с.