

POLITECHNIKA WARSZAWSKA

DYSCYPLINA NAUKOWA AUTOMATYKA, ELEKTRONIKA,  
ELEKTROTECHNIKA I TECHNOLOGIE KOSMICZNE  
DZIEDZINA NAUK INŻYNIERYJNO-TECHNICZNYCH

**Rozprawa doktorska**

mgr inż. Jolanta Sadura

**Kompatybilność elektromagnetyczna aparatury sterującej badaniami  
w środowisku laboratoriów wielkoprądowych**

**Promotor:**

prof. dr hab. inż. Jan SROKA

**Promotor pomocniczy:**

dr inż. Przemysław SUL

WARSZAWA 2024



*Dedykuję tę pracę moim Rodzicom z wdzięcznością za trud wychowania, jaki włożyli w ukształtowanie mnie, za wsparcie, cierpliwość i dobre słowo.*

Przyjaciele są jak ciche anioły, które podnoszą nas, kiedy nasze skrzydła zapominają jak latać.

Antoine de Saint-Exupéry, 1962



## *Podziękowania*

Najszczerze podziękowania kieruję do mojego promotora, prof. dr hab. inż. Jana Sroki, za nieocenioną pomoc, cenne wskazówki oraz wsparcie, które otrzymałam na każdym etapie mojej pracy. Jego wiedza i doświadczenie były dla mnie nieocenionym źródłem inspiracji.

Nie mogę zapomnieć także o moim promotorze pomocniczym, dr inż. Przemysławie Sulu, który zawsze służył mi radą i pomocą.

Dziękuję również Panu prof. dr hab. inż. Jackowi Starzyńskiemu, dyrektorowi Instytutu Elektrotechniki Teoretycznej i Systemów Informacyjno Pomiarowych, za stworzenie sprzyjającego środowiska do prowadzenia badań oraz za wszelką pomoc w zakresie organizacyjnym i merytorycznym.

Dziękuję dyrekcji Instytutu Energetyki Państwowego Instytutu Badawczego za udostępnienie mi przestrzeni i stworzenie możliwości wykonania badań. Szczególne podziękowania kieruję w stronę Pana mgr. inż. Macieja Owsinińskiego, ówczesnego kierownika laboratorium Wielkopiętowego, który mnie wspierał w rozpoznawaniu Środowiska Laboratorium oraz w stronę mgr. inż. Mariusza Sula, który jako kierownik / operator próby dzielił się swoimi spostrzeżeniami z zebranych podczas wieloletniej pracy doświadczeń z wykonywanych prób zwarciowych.

Dziękuję zespołowi Laboratorium Kompatybilności Elektromagnetycznej w Katedrze Telekomunikacji i Teleinformatyki na Wydziale Elektroniki Politechniki Wrocławskiej, a w szczególności panu dr. inż. Zbigniewowi Jóskiewiczowi, pani dr inż. Monice Szafrąńskiej i panu mgr. inż. Arturowi Florkowi za możliwość przeprowadzenia testów na odporność na oscylacje tłumione oraz cenne uwagi, które pozwoliły mi poprawić kompatybilność mojego nastawnika.

Dziękuję wszystkim osobom, które przyczyniły się do powstania tej pracy, zarówno w zakresie merytorycznym, jak i emocjonalnym.



# *Streszczenie*

## **Kompatybilność elektromagnetyczna aparatury sterującej badaniami w środowisku laboratoriów wielkopiędowych**

Koniec XX wieku to czas upowszechniania elektroniki, która jest obecna nie tylko w aparaturze i sprzęcie niskiego napięcia, ale również w sposób pośredni lub bezpośredni w energetyce średnich czy wielkich mocy, gdzie wielkości elektryczne takie jak natężenie prądu czy napięcie występują jako wielkości kilka tysięcy razy większe niż poziomy tych samych wielkości fizycznych znane z niskonapięciowej techniki sygnałowej. Pogodzenie wielkich mocy z sygnałami cyfrowymi wykorzystywanymi w aparaturze sterowniczej, kontrolnej czy pomiarowej wymaga uwzględnienia zagadnień kompatybilności elektromagnetycznej KEM. Środowisko pracy takiej aparatury nie może być rozpatrywane jako idealne, wolne od pola elektrycznego i magnetycznego, a co za tym idzie wolne od zaburzeń generowanych przez te pola. Dyrektywy Unijne, jak i dokumenty normatywne narzucają konieczność spełnienia określonych wymagań dla aparatów pracujących w warunkach domowych, przemysłowych. Aparatura sterująca badaniami w środowisku laboratoriów wielkopiędowych pracuje w warunkach wielokrotnie przekraczających standardy określone w normie kompatybilnościowej, dedykowanej dla aparatury kontrolno-pomiarowej, jak i dla podstacji, co jest rezultatem wykonywania prób typu dla urządzeń, aparatów, osprzętu dedykowanego dla energetyki niskich, średnich i wielkich napięć. Rozprawa doktorska podejmuje zagadnienia związane z analizą unikatowego środowiska laboratoriów probierczych wymagającego indywidualnego rozpoznania pod kątem występujących w nim zaburzeń związanych z rodzajem prowadzonych tam badań oraz poszczególnymi składowymi obwodami probierczego. Rozpoznanie i analiza występujących zaburzeń pozwala na projektowanie i budowanie aparatury sterującej kompatybilnej ze środowiskiem laboratoriów wielkopiędowych. Ponadto pozwala ona weryfikować kompatybilność elektromagnetyczną tej aparatury i formułować wytyczne dedykowane dla sprzętu kontrolno-pomiarowego stosowanego w tychże laboratoriach oraz wytyczne dotyczące budowy i rozplanowania nowo projektowanych laboratoriów. Powyższa praca uwzględnia zastane warunki, dla których budynki z rozmieszczoną aparaturą probierczą dużych gabarytów nie może być poddany zmianom.

**Słowa kluczowe:** obwody probiercze, KEM, laboratorium zwarciove, aparaty łączeniowe SN, oscylacje tłumione, aparatura kontrolno - sterująca





# *Abstract*

## **Electromagnetic compatibility of test control apparatus in the environment of high-current laboratories**

The end of the  $XX^{th}$  century is pronounced with broadening electronics operated not only in typical domestic and industrial environments but also in the middle voltage and high voltage power engineering systems where currents and voltages are thousandfold and even bigger than levels applied by signal processing. Harmless operation of digital electronics applied in the environment of high power systems makes consideration of electromagnetic compatibility indispensable. The electromagnetic environment of a high-current test laboratory is not free from unintended electric and magnetic fields, which can be sources of electromagnetic disturbances. Directives of the European Union and harmonized standards accompanying them defines requirements that equipment operated in domestic and industrial environments must fulfill. Control equipment operated in the environment of high-current test laboratories is stressed with much higher levels of disturbances than that to which conventional control equipment must be immune. Moreover they are subjected to another electromagnetic phenomena because tests are performed for apparatus dedicated for operation by high currents and by low, middle and high voltages. The dissertation identifies the unique electromagnetic environment of the high-current test laboratory. The origin of untypical disturbances is localized. Then, expected severity levels are defined, other than in a typical environment. The new electronic equipment for supervising the tests in the current laboratory is developed, built, and tested. Electromagnetic compatibility of the new supervising equipment, according to an expanded list of tests suitable for the unique electromagnetic environment of the high current test laboratory, is completed. In conclusion, recommendations for designing and building the supervising equipment and layout of the high-current test laboratory are formulated. In the dissertation, existing laboratory in which apparatus and cable layout cannot be modified is under consideration.

**Keywords:** type test circuit, EMC, short circuit laboratory, MV switching apparatus, damped oscillatory waves (DOW), control equipment



# Spis treści

<b>Streszczenie</b>	<b>vii</b>
<b>Abstract</b>	<b>ix</b>
<b>Spis skrótów</b>	<b>xiii</b>
<b>Spis oznaczeń</b>	<b>xv</b>
<b>1 Wprowadzenie</b>	<b>1</b>
1.1 Wyjaśnienie tytułu dysertacji . . . . .	1
1.2 Motywacja . . . . .	1
1.3 Cel, teza i wartość naukowa pracy . . . . .	3
<b>2 LWP jako specyficzne środowisko pracy aparatury kontrolno-sterującej</b>	<b>7</b>
2.1 Próby wytrzymałości zwarciowej . . . . .	7
2.1.1 Stanowisko badawcze do prób zwarciowych w odniesieniu do LWP . . . . .	7
2.1.2 Procedura próby zwarciowej . . . . .	11
2.2 Plan sytuacyjny Laboratorium Wielkopiędowego IEN-PIB, a strefy narażenia . . . . .	14
<b>3 Pomiary i analiza pola elektromagnetycznego w laboratorium wielkopiędowym</b>	<b>19</b>
3.1 Identyfikacja zjawisk przejściowych . . . . .	19
3.1.1 Wstępne rozpoznanie charakteru analizowanego zaburzenia. . . . .	19
3.1.2 Pomiary pola elektrycznego i pola magnetycznego . . . . .	27
<b>4 Badania jednoczesności załączania styków wyłącznika próżniowego SN</b>	<b>39</b>
<b>5 Symulacje numeryczne obwodów probierczych</b>	<b>45</b>
<b>6 Badanie kompatybilności aparatury kontrolno-sterującej w LWP</b>	<b>65</b>
<b>7 Wytyczne dla badań kompatybilności aparatury kontrolno-sterującej w LWP</b>	<b>71</b>
7.1 Badanie emisji . . . . .	71
7.2 Badanie odporności . . . . .	72

7.2.1	Tryb pracy, monitoring i kryteria oceny funkcjonowania nastawnika . . .	72
<b>8</b>	<b>Opracowanie, budowa i uruchomienie nowego nastawnika czasowo-fazowego</b>	<b>77</b>
<b>9</b>	<b>Badania EMC nowego nastawnika</b>	<b>85</b>
9.1	Pomiar emisji radioelektrycznej . . . . .	85
9.1.1	Emisja przewodzona . . . . .	86
9.1.2	Emisja promieniowana . . . . .	88
9.2	Badania odporności . . . . .	90
9.2.1	Poprawa odporności na wyładowania elektryczności statycznej . . . . .	97
9.2.2	Poprawa odporności na szybkie, elektryczne stany przejściowe . . . . .	99
<b>10</b>	<b>Zakończenie</b>	<b>101</b>
10.1	Wytyczne dotyczące budowy aparatury sterującej i rozplanowania laboratorium	103
10.1.1	Budowa aparatury sterującej . . . . .	103
10.1.2	Plan sytuacyjny laboratorium . . . . .	104
10.2	Dalsze kierunki badań w tematyce opracowanej w rozprawie doktorskiej . . . . .	105
	<b>Bibliografia</b>	<b>107</b>

## Spis skrótów

<b>nN</b>	niskie Napięcie
<b>NN</b>	Najwyższe Napięcie
<b>SN</b>	Średnie Napięcie
<b>WAO</b>	Wektorowy Analizator Obwodów
<b>KEM</b>	Kompatybilność ElektroMagnetyczna
<b>LWP</b>	Laboratorium WielkoPrądowe
<b>AMN</b>	Artificial Mains Network Sztuczna sieć zasilająca
<b>AV</b>	Average (detector) (Detektor) wartości średniej
<b>CCC</b>	Capacitive Coupling Clamp Pojemnościowe cęgi sprzęgające
<b>CDN</b>	Coupling-Decoupling Network Sieć sprzęgająco-odsprzegająca
<b>CM</b>	Common Mode Składowa asymetryczna, wspólna
<b>CLI</b>	Current Limiting Inductors Dławiki ograniczające prąd
<b>CT</b>	Current Transformer Przekładnik prądowy
<b>DM</b>	Differential Mode Składowa symetryczna, różnicowa
<b>DOW</b>	Damped Oscillatory Waves Oscylacje tłumione
<b>DUT</b>	Device Under Test Badane urządzenie
<b>EFT</b>	Electric Fast Transients Szybkie impulsy elektryczne, BURST
<b>EMC</b>	ElectroMagnetic Compatibility Kompatybilność elektromagnetyczna, KEM
<b>ESD</b>	ElectroStatic Discharge Wyładowanie elektryczności statycznej
<b>EUT</b>	Equipment Under Test Badane urządzenie
<b>FAR</b>	Full Anechoic Room

	Komora w pełni bezodbiiciowa
<b>GTEM</b>	<b>G</b> igahertz <b>T</b> ransverse <b>E</b> lectro <b>M</b> agnetic Gigahercowy rodzaj poprzeczny pola elektrycznego i magnetycznego
<b>HCP</b>	<b>H</b> orizontal <b>C</b> opuling <b>P</b> late Pozioma płyta sprzęgająca
<b>MV CB</b>	<b>M</b> iddle <b>V</b> oltage <b>C</b> ircuit <b>B</b> reaker Wyłącznik napięcia średniego
<b>QP</b>	<b>Q</b> uasi <b>P</b> eack (detector) (Detektor) wartości kwazi-szczytowej
<b>PCB</b>	<b>P</b> rinted <b>C</b> ircuit <b>B</b> oard Płytką drukowaną
<b>SAC</b>	<b>S</b> emi <b>A</b> nechoic <b>C</b> hamber Komora w pół-bezodbiiciowa
<b>SPI</b>	<b>S</b> erial <b>P</b> eripheral <b>I</b> nterface Szeregowy interfejs urządzeń peryferyjnych
<b>SWR</b>	<b>S</b> tanding <b>W</b> ave <b>R</b> atio Współczynnik fali stojącej, WFS
<b>SCS</b>	<b>S</b> hort <b>C</b> ircuit <b>S</b> witch
<b>TEM</b>	<b>T</b> ransverse <b>E</b> lectro <b>M</b> agnetic Rodzaj poprzeczny pola elektrycznego i magnetycznego
<b>TE</b>	<b>T</b> ranverse <b>E</b> lectric Rodzaj poprzeczny pola elektrycznego
<b>TM</b>	<b>T</b> ranverse <b>M</b> agnetic Rodzaj poprzeczny pola magnetycznego Załącznik zwarciový
<b>TT</b>	<b>T</b> est <b>T</b> ransformer Transformator zwarciový
<b>VNA</b>	<b>V</b> ector <b>N</b> etwork <b>A</b> nalyzer Wektorowy analizator obwodów
<b>VCP</b>	<b>V</b> ertical <b>C</b> opuling <b>P</b> late Pionowa płyta sprzęgająca

## Spis oznaczeń

$f$	częstotliwość	Hz
$\omega$	częstotliwość kątowna, pulsacja	rad/s
$\rho$	rezystywność	$\Omega\text{m}$
$\epsilon_0$	przenikalność elektryczna próżni	$8.854 \cdot 10^{-12} \text{ F/m}$
$\mu_0$	przenikalność magnetyczna próżni	$4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H/m}$
$R_{Fe}$	rezystancja strat w rdzeniu transformatora	$\text{k}\Omega$
$X_\mu$	reaktancja magnesowania transformatora	$\Omega$
$L_\mu$	indukcyjność magnesowania transformatora	mH
$I_0$	prąd biegu jałowego transformatora	A
$I_\mu$	składowa bierna prądu biegu jałowego transformatora	A
$I_{Fe}$	składowa czynna prądu biegu jałowego transformatora	A
$\Delta_{Fe}$	straty jałowe transformatora	W
$t_k$	czas trwania zwarcia	s
$I_k$	prąd wytrzymywany krótkotrwały	A





# Rozdział 1

## Wprowadzenie

### 1.1 Wyjaśnienie tytułu dysertacji

Praca opisuje badania zmierzające do opracowania procedur zapewniających kompatybilność elektromagnetyczną aparatury kontrolno-sterującej pracującej w Laboratoriach Wielkoproudowych (LWP). Kompatybilność elektromagnetyczna urządzenia oznacza zdolność do zadowalającego działania w środowisku elektromagnetycznym bez powodowania nadmiernych zaburzeń w stosunku do innych urządzeń działających w tym środowisku [18].

Środowisko elektromagnetyczne oznacza wszelkie zjawiska elektromagnetyczne możliwe do zaobserwowania w danym miejscu [18].

W normie dotyczącej kompatybilności elektromagnetycznej laboratoryjnej aparatury pomiarowej i sterującej pomiarami [74], zdefiniowane są tylko dwa środowiska pracy: domowe i przemysłowe.

Istnieje norma [19] w której są zdefiniowane wymagania odporności dla sprzętu używanego w środowisku elektrowni i podstacji. Jednakże, warunki środowiskowe wielkoproudowych laboratoriów badawczych odbiegają od wymagań zdefiniowanych w tej normie. Dlatego zagadnienia przedstawione w dysertacji mają charakter unikatowy.

### 1.2 Motywacja

Koniec XX wieku to czas upowszechniania elektroniki obecnej nie tylko w aparaturze i sprzęcie niskiego napięcia, ale również w sposób pośredni lub bezpośredni w energetyce średnich czy wielkich mocy, gdzie wielkości elektryczne takie jak natężenie prądu czy napięcie występują jako wielkości kilka tysięcy razy większe niż poziomy tych samych wielkości fizycznych znane z techniki sygnałowej.

Pogodzenie wielkich mocy z sygnałami cyfrowymi wykorzystywanymi w aparaturze sterowniczo / kontrolnej czy pomiarowej wymaga uwzględnienia zagadnień Kompatybilności elek-

tromagnetycznej rozpatrywanej dla wysokonapięciowej aparatury rozdzielczej i sterowniczej bliżej zdefiniowanej w normie [75]. Środowisko pracy takich aparatów nie może być rozpatrywane jako idealne, wolne od pola elektrycznego i magnetycznego, a co za tym idzie wolne od zaburzeń generowanych przez te pola [8].

Dyrektywy Unijne, jak i dokumenty normatywne narzucają konieczność spełnienia określonych wymagań dla aparatury EUT, DUT pracującej w warunkach domowych czy też przemysłowych. Znormalizowane obszary nie obejmują jednak przestrzeni złożonych, gdzie środowisko niskich napięć (nN) przenika się ze średnimi napięciami (SN), a prądy występujące nawet w obszarze nN są prądami zwarciovymi, o poziomach od kilku do kilkudziesięciu kiloamperów. Analizowane środowisko laboratorium wieloprądowego LWP, realizującego badania typu na potrzeby energetyki, należy do wąskiej grupy przypadków złożonych, dla których normy i tworzące je komitety techniczne nie uwzględniły istniejących tam warunków oraz dopuszczalnych poziomów występujących zaburzeń. Norma [70] definiuje wymagania w obszarze pomiarów i prób wieloprądowych aparatury wysokonapięciowej i niskonapięciowej takie jak: parametry prób i ich tolerancje, określa wymagania w stosunku do kompletnego układu pomiarowego, określa metody zatwierdzania i kontroli układu pomiarowego oraz jego części składowych, podaje metody szacowania niepewności pomiarów wieloprądowych, ale nie odnosi się do zagadnień EMC. Tego typu laboratoria odgrywają istotną rolę dla sektora energetyki, potwierdzając parametry dedykowane przez producenta aparatury stosowanej w energetyce. Jest to ważny obszar globalnie, zarówno dla kraju, jak i jednostki, jaką jest przykładowy "Kowalski", który fizycznie jest "wpięty" w tę sieć i być może z obszaru swojego podwórka nie dostrzega jej wagi, jednakże oczekuje dobrej jakości dostarczanej energii [25]. Przeanalizowanie zjawisk związanych z kompatybilnością elektromagnetyczną, występujących w laboratoriach realizujących badania typu, stało się koniecznością.

Laboratoryjne badania wysokonapięciowe i wieloprądowe są specyficznym rodzajem prób urządzeń i aparatury elektroenergetycznej. Testy takie jak próby dielektryczne czy też zwarciovowe w swych parametrach wielokrotnie przekraczają wartości napięć znamionowych oraz deklarowanych prądów ciągłych pracy badanego osprzętu, czy aparatów [54]. Próby te związane są z wartościami chwilowymi, którym często towarzyszą zjawiska przejściowe. Podczas takich ekstremalnych badań zachodzą niekorzystne zjawiska, które w istotny sposób wpływają na pracę czułych urządzeń sterujących przebiegiem prób. Występujące zaburzenia zakłócają przebieg badań, co zagraża bezpieczeństwu pracującemu w tym obszarze zespołowi badawczemu, jak również może wpływać destrukcyjnie na badany obiekt, trwale go uszkadzając. Szczególnie istotne jest to w trakcie tzw. prób niszczących, których nie można powtórzyć, dlatego konieczne jest zapewnienie bezawaryjnej pracy aparatury sterującej. Jedną z prób elektrycznych jest „próba zwarciowa” polegająca na wygenerowaniu przez specjalne stanowisko

probiercze ekstremalnych prądów zwarciovych. Głównym elementem układu sterowania przy takich próbach jest nastawnik czasowo-fazowy. Jego użycie pozwala zadawać, jak również kontrolować czas trwania próby, oraz kąt fazowy wyzwalania załączników zwarciovych względem napięcia zasilającego.

Obecnie stosowane w laboratoriach badawczych nastawniki ulegają częstym awariom, a nawet samowzbudzeniom, co stwarza następujące zagrożenia: przeprowadzenia błędnej próby, powodujące uszkodzenie badanego obiektu, bądź konieczności rezygnacji z części wykonywanych badań w przypadku jego trwałej awarii. Niezbędna jest zatem identyfikacja i eliminacja występujących zaburzeń generowanych w czasie przeprowadzanych prób dla zapewnienia dobrej jakości pracy znajdujących się tam urządzeń kontrolno – pomiarowych.

### 1.3 Cel, teza i wartość naukowa pracy

Celem prowadzonych badań było pozyskanie wiedzy z zakresu występujących zaburzeń elektromagnetycznych (EMC) w środowisku laboratoriów probierczych. Zebrane dane pozwoliły stworzyć wytyczne, które zwykle są zdefiniowane w dokumentacji normatywnej, jak w przypadku środowiska domowego czy przemysłowego. Środowisko takie jak np. laboratorium probiercze jest nietypowe, rzadko spotykane i nierozpatrywane przez komitety techniczne pracujące na rzecz zjawisk i przestrzeni spotykanych w tzw. standardzie użytkownika. Dzięki zebranim wytycznym dedykowanym dla indywidualnego rozpatrywanego przypadku - laboratorium wielkoprądowe- możliwe było opracowanie prototypu nastawnika czasowo – fazowego odpornego na zaburzenia EMC, występujące w tym konkretnym obszarze.

Problem wpływu EMC na jakość pracy urządzeń laboratoryjnych nie jest problemem lokalnym, został poruszony na konferencji CAS - CERN Accelerator School: Power Converters 7 - 14 May 2014, w Baden, Switzerland, gdzie w pracy [13], przedstawiono raport dla przekształtników mocy pracujących w uciążliwych warunkach.

Niniejsza praca badawczo – analityczna pozwala na identyfikację i opis zjawiska, co daje możliwość świadomego projektowania urządzeń dla elektroenergetyki, pracujących w szczególnie niekorzystnym środowisku, jakie tworzą pola elektromagnetyczne [71]. Przeprowadzone badania i analizy polegały na pomiarze pola elektrycznego i magnetycznego w trakcie prowadzonych prób w laboratorium. Wyniki wskazywały na obecność znikomego pola magnetycznego, zbliżonego do warunków domowych oraz silnego wielokrotnie przekraczającego poziom przemysłowy pola elektrycznego. Silne pole elektryczne powodowało powstawanie DOW-ów w obwodzie probierczym składającym się między innymi z wyłącznika zwarciovego, elementów indukcyjnych służących regulacji prądu zwarcia oraz transformatorów probierczych SN/nN. Jest to specyficzne zaburzenie nakładające się na zjawiska towarzyszące linii długiej.

CELEM pracy jest:

zaprojektowanie, budowa i walidacja kompatybilnego elektromagnetycznie nastawnika czasowo-fazowego, przeznaczonego do sterowania badaniami w laboratorium wielkoprądowym.

Celem pobocznym jest stworzenie zbioru zaleceń dotyczących:

- projektowania, budowy i montażu aparatury elektronicznej, przeznaczonej do pracy w środowisku laboratorium wielkoprądowego,
- tworzenia w laboratorium wielkoprądowym stref, rozmieszczania w nich aparatury i wytyczania tras ułożenia przewodów wewnątrz stref i między strefami.

TEZA GŁÓWNA:

Środowisko elektromagnetyczne wielkoprądowego laboratorium zwarcioowego ma specyfikę odbiegającą od środowisk zdefiniowanych w normach, w tym w szczególności od środowiska:

- elektrowni i podstacji, zdefiniowanych w normie [19],
- opisanego w normie [74] dla laboratoriów, w których wykorzystywana jest aparatura pomiarowa i sterująca.

Teza ta zostanie udowodniona przez przeprowadzenie kompleksowej identyfikacji zaburzeń elektromagnetycznych w Laboratorium Wielkoprądowym Instytutu Energetyki Państwowego Instytutu Badawczego.

COROLLARY:

Następstwem tezy głównej jest następująca teza pomocnicza: Kompatybilność elektromagnetyczną aparatury sterującej badaniami w laboratorium wielkoprądowym można osiągnąć po rygorystycznym spełnieniu następujących warunków:

- Laboratorium wielkoprądowe trzeba potraktować jako instalację stacjonarną, rozumianą jak podano w dyrektywie [18]. Określić występujące w niej zaburzenia, znaleźć przyczynę ich powstawania i zdefiniować indywidualny program badań kompatybilności. Inaczej mówiąc, trzeba zidentyfikować środowisko elektromagnetyczne laboratorium wielkoprądowego.
- Aparatura sterująca musi być zbudowana z restrykcyjnym zachowaniem wszelkich zasad dotyczących kompatybilności.
- Pomieszczenia laboratorium oraz osprzęt w nim używany (wyłącznik, kanały kablowe, ekranowanie kabli) muszą być rozplanowane i zbudowane zgodnie z wszelkimi wymaganiami kompatybilności.

## OSIĄGNIĘCIA AUTORA

1. Identyfikacja źródeł zaburzeń i ustalenie przyczyny ich powstawania (badania symulacyjne toru prądowego jako kaskady obwodów o elementach skupionych oraz układu drabinkowego modelującego linię długą [14]).
2. Zaprojektowanie i budowa nastawnika czasowo-fazowego z uwzględnieniem wymogów kompatybilności (sprzęt i oprogramowanie).
3. Przeprowadzenie testów funkcjonalnych zbudowanego nastawnika.
4. Określenie programu badań kompatybilności nastawnika: dopuszczalnych poziomów emisji i wymaganych poziomów narażeń.
5. Przeprowadzenie z wynikiem pozytywnym badań kompatybilności elektromagnetycznej zbudowanego nastawnika, zgodnie z indywidualnym programem.
6. Zdefiniowanie zaleceń dotyczących projektowania, budowy i montażu aparatury elektronicznej, przeznaczonej do pracy w środowisku laboratorium wielkoprądowego.
7. Zdefiniowanie zaleceń dotyczących pomieszczeń laboratorium (wydzielenie stref, ewentualnie ekranowanie pomieszczenia pomiarowego, ekranowanie kanałów kablowych lub kabli).
8. Zdefiniowanie zaleceń dotyczących używanej do pomiarów aparatury.

Przedstawione w niniejszej rozprawie badania były częściowo finansowane ze środków dotacji statutowej Instytutu Energetyki – Państwowego Instytutu Badawczego. Były to prace nr: EAZ/44/STAT/19, EAZ/29/STAT/20 i EZC/76/STAT/2021. Część wyników badań, na których oparto niniejszą rozprawę, została zaprezentowana w materiałach konferencyjnych opublikowanych w latach 2020-2023 i opisana w artykułach opublikowanych w recenzowanych czasopismach [58] -[62]:

1. J. Sadura, J. Sroka and M. Owsiański, „Rough identification of EM disturbances interfering the time-phase controller by the short circuit tests,” 2020 12th International Conference and Exhibition on Electrical Power Quality and Utilisation- (EPQU), Cracow, Poland, 2020, pp. 1-4, DOI: 10.1109/EPQU50182.2020.9220298;
2. J. Sadura, J. Sroka, M. Owsiański and A. Jósko, „Identification of EM disturbances interfering the time-phase controller by short circuit tests,” 2020 International Symposium on Electromagnetic Compatibility - EMC EUROPE, Rome, Italy, 2020, pp. 1-6, DOI: 10.1109/EMCEUROPE48519.2020.9245723;

3. J. Sadura, J. Sroka, P. Sul, A. Jósko, i M. Owsiniński, „Susceptibility Issues of Control Instrumentation in Electromagnetic Environment of High Current Laboratory”, *Energies*, t. 15, Art. nr 13, 2022, DOI: 10.3390/en15134682;
4. J. Sadura, A. Jósko, M. Owsiniński, J. Sroka and P. Sul, „Control equipment in the unique EMC environment of High Current Testing Laboratory, case study,” 2023 International Symposium on Electromagnetic Compatibility – EMC Europe, Krakow, Poland, 2023, pp. 1-5, DOI: 10.1109/EMCEurope57790.2023.10274373.

Autorka niniejszej rozprawy zaprezentowała jej częściowe wyniki w ramach międzynarodowych konferencji EMCEUROPE 2020, EMCEUROPE 2023 oraz EMCEUROPE 2024 oraz na konferencji Electrical Power Quality and Utilisation- (EPQU) w Krakowie 2020 i Computational Problems in Electrical Engineering (CPEE) 2023 w Grybowie.

## Rozdział 2

# LWP jako specyficzne środowisko pracy aparatury kontrolno-sterującej

### 2.1 Próby wytrzymałości zwarciowej

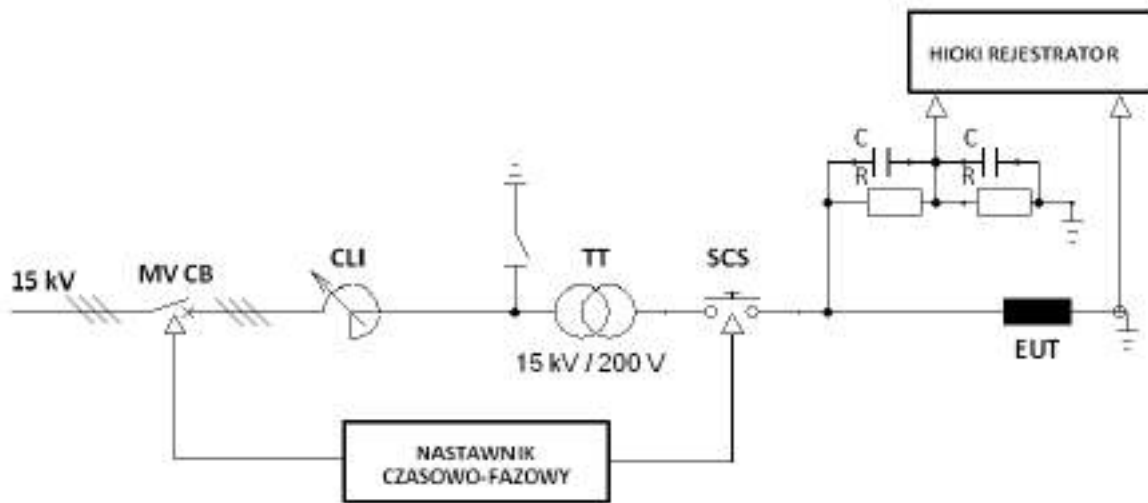
#### 2.1.1 Stanowisko badawcze do prób zwarciowych w odniesieniu do LWP

Wielkopiędowe laboratoria badawcze, jak i laboratoria urzędów rozdzielczych realizują w ramach swej działalności próby typu urzędów i aparatów elektroenergetycznych [3]. Zdefiniowane w normie parametry prób są powiązane z wartościami znamionowymi badanych obiektów bądź z ich wielokrotnością jak w przypadku prób dielektrycznych, zwarciowych czy też łączeniowych. Podczas takich ekstremalnych badań zachodzą niekorzystne zjawiska, które w istotny sposób wpływają na pracę czułych urzędów sterujących przebiegiem prób [12]. Bardzo często występują tam zaburzenia elektromagnetyczne, sprzęgające się na drodze pojemnościowej oraz indukcyjnej [73] i [43], które mogą zakłócić przebieg badań [4]. Rozważany przypadek dotyczy najbardziej niekorzystnych warunków występujących w rozpoznawanym środowisku podczas prób zwarciowych.

Próby zdolności załączania na zwarcie wykonywane w laboratorium IEN-PIB zgodnie z układem prezentowanym na rysunku 2.1 oraz zgodnie z obowiązującą normą, zawierającą wytyczne dla technik probierczych obwodów wielkopiędowych [70]. Układ probierczy składa się z: wyłącznika próżniowego SN oznaczanego na rysunkach również jako MV CB (ang. *MV Circuit Breaker*), uziemników, załączników zwarciowych nN, oznaczanych również jako SCS (ang. *Short Circuit Switc*, dławików regulacyjnych, transformatorów grzejno-zwarciowych oraz urządzenia sterującego).

#### Wyłącznik próżniowy

Jednym z ważniejszych elementów układu zwarciowego jest wyłącznik średniego napięcia.



**Rysunek 2.1.** Schemat obwodu probierczego do badań wytrzymałości zwarciowej.

Jego zadaniem jest przerwanie dużych prądów zwarciowych, ponieważ jest głównym łącznikiem obwodu po stronie SN. W laboratorium pracuje trójfazowy aparat firmy Merlin Gerin typu Evolis 24 kV, z próżniowymi komorami gaszącymi (rys. 2.2). Wszystkie parametry wyłącznika dostępne są w katalogu firmy Schneider Electric [63], najistotniejsze z nich, deklarowane na tabliczce znamionowej zestawiono w Tabeli 2.1

**Tabela 2.1.** Dane znamionowe wyłącznika.

Napięcie znamionowe $U_r$	24 kV
Napięcie znamionowe wytrzymałowe udarowe piorunowe $U_p$	125 kV
Prąd znamionowy ciągły $I_r$	630 A
Prąd znamionowy wyłączalny zwarciowy $I_{sc}$	16 kA 3 s
Prąd znamionowy wyłączalny nieobciążonych linii napowietrznych $I_c$	31,5 kA
Znamionowy szereg przestawieniowy	O-0,3 s–CO-15 s–CO

### Dławiki regulujące

Do regulacji prądów zwarciowych wykorzystywane są w laboratorium dławiki, rys. 2.3, (na schemacie 2.1 oznaczone jako CLI). Zbudowane z dziewięciu pojedynczych cewek łączonych szeregowo, równoległe lub w układ mieszany w zależności od wartości zadanego prądu w danej próbie. Cewki 1-5 o obciążalności prądowej ciągłej 100 A, prądzie udarowym  $I_p = 5,3$  kA i krótkotrwałym wytrzymałym 2,14 kA przez 1 s. Pozostałe cewki posiadają obciążalność





(a) Widok panelu wyłącznika.



(b) Dane znamionowe.

**Rysunek 2.2.** Wyłącznik próżniowy SN (MV CB).

ciągłą równą 30 A, Prąd krótkotrwały wytrzymywany  $I_k$  0,94 kA oraz prąd szczytowy (udarowy) 2,3 kA. Dane techniczne przedstawiono w Tabeli 2.2.

**Tabela 2.2.** Dane techniczne dławików zainstalowanych w LWP IEN-PIB.

Napięcie znamionowe	15	kV
Reaktancja pojedynczej cewki	ok. 7	$\Omega$
Impedancja cewki	0-300	$\Omega$
Masa dławika dla pojedynczej fazy	3	t
Klasa izolacji	A	

### Transformatory zwarciowe

Regulację prądu zwarciowego po wtórnej stronie transformatora probierczego, (rys. 2.1 oznaczonego jako TT), można uzyskać dzięki wspomnianym dławikom wykorzystującym różne konfiguracje łączenia cewek oraz dzięki możliwości zmiany przekładni samego transformatora. Transformator typu TZNS 2000/15 EN firmy MEFTA -dane tabliczki rys. 2.4, zasilany jest po stronie pierwotnej napięciem międzyfazowym 15 kV z podstacji. Parametry transformatora zestawiono w Tabeli 2.3 na podstawie danych zebranych z tabliczki znamionowej.



Rysunek 2.3. Dławiki ograniczające prąd CLI.

Na rysunku 2.4 przedstawiono tabliczkę znamionową, a na rysunku 2.5 widok na transformatory.

### Załączniki zwarciove

Załączniki zwarciove z rysunku 2.1 SCS, to ważne elementy omawianego obwodu zwarciovego. Łączniki te odpowiadają za zamknięcie obwodu zwarciovego, w którym po stronie wtórnej transformatora występuje badany obiekt. Muszą być zdolne do załączania prądów zwarciovech występujących podczas prób typu. Załączniki są sterowane z wykorzystaniem aparatury kontrolnej, jaką w rozpatrywanym przypadku stanowi nastawnik czasowo-fazowy sterujący obwodami pomocniczymi załączników zwarciovech. W zależności od rodzaju załącznika zwarciovego (por. rysunek 2.6b) podajemy odpowiedni prąd lub napięcie potrzebne do wysterowania załącznika.

### Nastawnik czasowo-fazowy

Aparat kontrolny nadzorujący parametry czasowo, fazowe prób wykonywanych w LWP przedstawiono na rysunku 2.7. Panel nastaw daje możliwość wyboru kanałów, których parametry takie jak rodzaj kanału, czas zamknięcia, kąt elektryczny załączenia zsynchronizowany z przebiegiem 50 Hz (sieć zasilająca), czas otwarcia. Obsługiwane kanały to: elektroniczne- diody, tyristory -sterowane prądem bramki, elektromechaniczne przekaźniki- sterowane prądem cewki.



Rysunek 2.4. Tabliczka znamionowa.



Rysunek 2.5. Transformatory probiercze typu TZNS 2000/15 EN.

### 2.1.2 Procedura próby zwarciowej

Procedury związane z wykonaniem testu typu badania wytrzymałości zwarciowej prądem zwarciovym krótkotrwałym (short-time withstand current) oraz szczytowym (peak withstand current) są wielostopniowe. Samo badanie jest poprzedzone etapem przygotowawczym, operator

Tabela 2.3. Dane transformatora

moc	2000	kVA
Napięcie GN	15000 +/-3	V
Napięcie DN	100-200-400-800	V
$I_{znDN}$	20-10-5-2,5	kA
$I_{znGN}$	133,3	A
liczba faz / częstotliwość	3 / 50	Hz
Napięcie zwarcia	6,25	%
Straty jałowe	3412	W
Straty obciążeniowe	16240	W
Masa	5700	kg

wykonujący / nadzorujący badanie, wystawia z pulpitu sterującego znajdującego się w pokoju kontrolnym sygnał na zamknięcie obwodu po stronie SN, co jest realizowane w dwóch krokach, zamknięcie odłącznika znajdującego się pomiędzy Stacją SN 15kV a wyłącznikiem oraz za pośrednictwem wyłącznika. Zamknięcie wyłącznika powoduje podanie, na pierwotną stronę transformatorów probierczych, napięcia 15 kV poprzez dławiki ograniczające prąd. Stan ten, gdy transformatory pracują na jałowo, bez załączonego obciążenia po stronie wtórnej nN- nie jest równoważny początkowi próby. Parametry próby takie jak: START, STOP, Liczba cykli czy też kąt elektryczny załączenia zależą od nastaw na aparaturze kontrolnej, jaką jest nastawnik. Kierownik próby w fazie przygotowawczej nastawia żądane parametry próby, takie jak czas i kąt załączenia załącznika zwarciovego (START) oraz czas i kąt podania sygnału dla wyłącznika próżniowego, przerywającego po stronie pierwotnej obwód probierczy (STOP). Parametry te nastawiane są w odniesieniu do sygnału synchronizującego.

Prawidłowa próba zwarciova winna być inicjowana przez operatora, poprzez wciśnięcie przez niego przycisku START na panelu nastawnika czasowo fazowego. Operacja ta jest jednoznaczna z przejściem kontroli nad próbą przez urządzenie monitorujące czas trwania próby oraz kąty załączenia i wyłączenia. Na podstawie przeprowadzonego wstępnego rozpoznania w postaci wywiadu z pracownikami, jak i analiz przebiegów zarejestrowanych analizatorem HIOKI z nieudanych prób (por. rysunek 2.8), zauważono, że załączenie transformatorów potrafi generować zakłócenia w obserwowanym sygnale. Zjawisko to może powodować wyzwolenie nastawnika, czyli samoczynne wygenerowanie sygnału sterującego dla załącznika zwarciovego (zamknięcie kanału obsługującego załącznik zwarciovy), a tym samym niekontrolowane rozpoczęcie próby zwarciovej.

Stan niekontrolowanego, samoczynnego załączenia załącznika zwarcia bez udziału operatora inicjującego początek próby z panelu nastawnika przyciskiem START, jest niedopusz-



(a) Widok ogólny.



(b) widok z góry

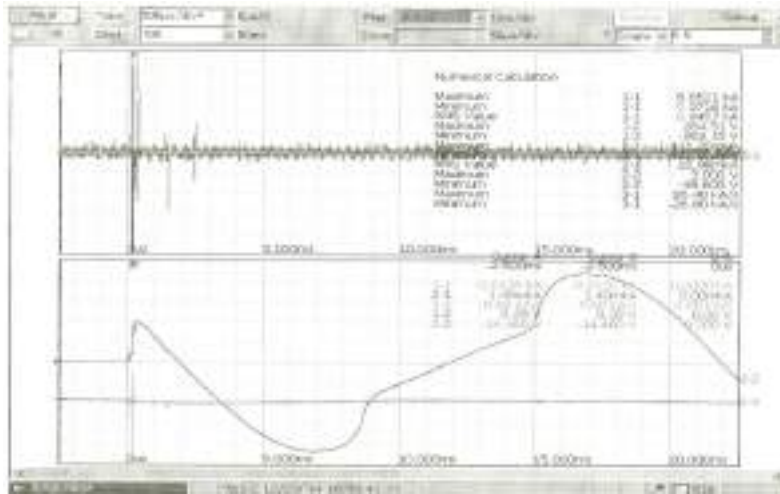
**Rysunek 2.6.** Elektromechaniczny załącznik zwarciowy nN.**Rysunek 2.7.** Nastawnik czasowo- fazowy analizowany w trakcie rozpoznawania zjawisk występujących w LWP podczas prób zwarciowych.

czalny, dyskwalifikujący próbę. Konsekwencje nieprawidłowego działania to niebezpieczeństwo zniszczenia badanego obiektu oraz zagrożenie dla zdrowia, a nawet życia pracowników LWP.

Potrzeba bezpieczeństwa oraz zapewnienie stabilnych warunków pracy zespołu technicznego, oraz aparatury kontrolno-sterującej, przyczyniła się do zdefiniowania niezbędnych do pokonania kamieni milowych eliminujących występujące zagrożenie. Poniżej wymieniono zdefiniowane kamienie milowe:

- identyfikacja EMC środowiska laboratorium wieloprądowego [9], [57],
- opracowanie wytycznych EMC dla urządzeń kontrolno-sterujących pracujących w zdefiniowanym środowisku,
- wykonanie badań EMC na obecnie istniejącej aparaturze kontrolnej,





Rysunek 2.8. Rejestracja napięcia po stronie wtórnej transformatora probierczego.

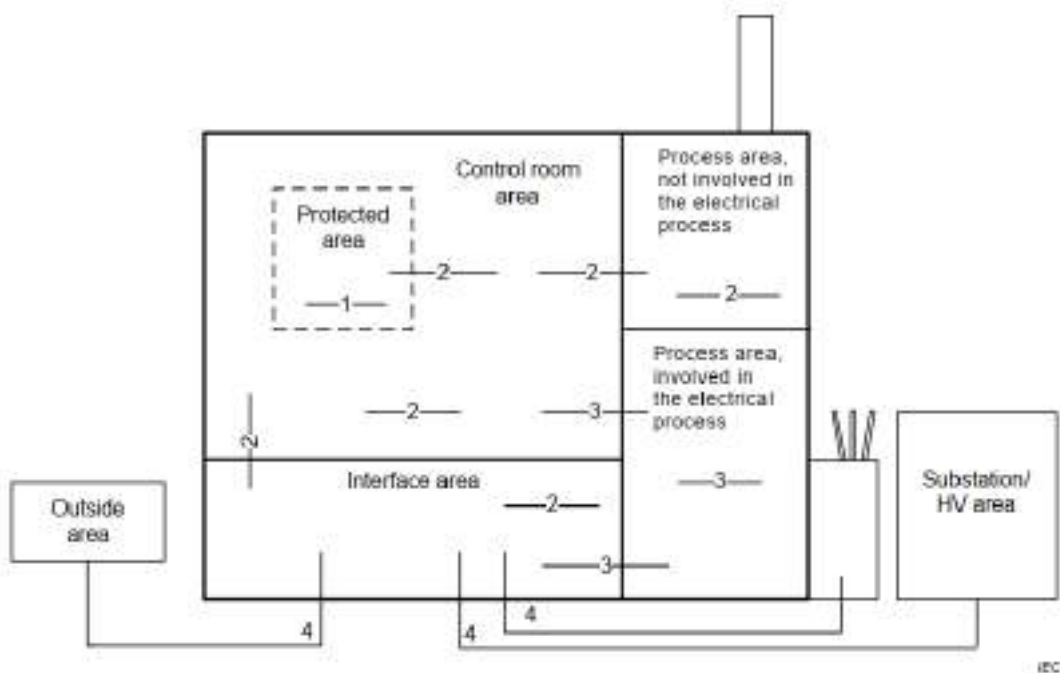
- opracowanie nowego projektu nastawnika czasowo-fazowego,
- wykonanie badań EMC nowego układu sterującego.

## 2.2 Plan sytuacyjny Laboratorium Wielkopiędowego IEN-PIB, a strefy narażenia

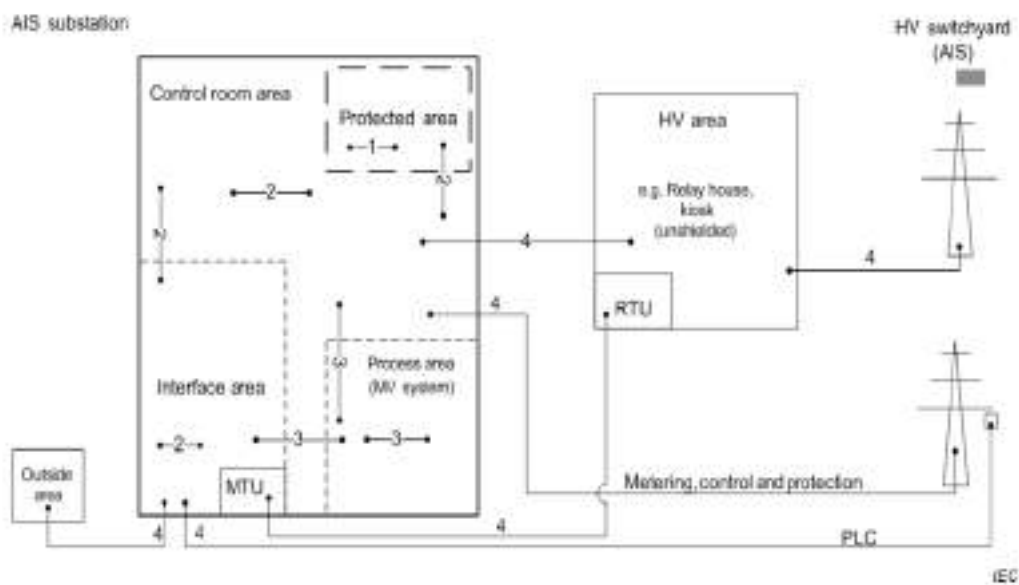
Dokumenty normatywne definiują strefy narażenia zarówno dla elektrowni (rysunek 2.9) jak i stacji w izolacji powietrznej (rysunek 2.10), a także w izolacji gazowej (rysunek 2.11). Strefy pracy zdefiniowano w [19] następująco:

1. wewnątrz obszaru ekranowanego,
2. wewnątrz obszaru sterowni (control room),
3. wewnątrz obszaru wykonawczego SN lub połączenia wychodzące z obszaru SN (process area),
4. wyprowadzenia wchodzące z zewnątrz WN i komunikacyjne.

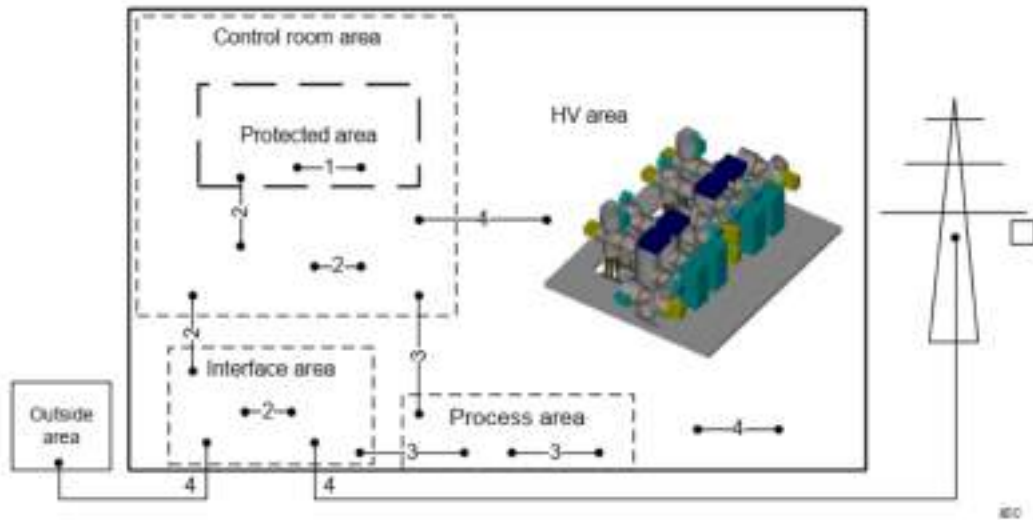
Projekt laboratorium LWP IEN-PIB powstał w latach 70 ubiegłego stulecia, gdy pojęcie kompatybilności elektromagnetycznej, jak i rozróżnianie stref pracy ze względu na występujące korelacje napięciowe nie było znane i rozpatrywane [5]. Plan budynku Laboratorium Wielkopiędowego z uwzględnieniem przestrzeni badawczej, jak i kontrolno pomiarowej przedstawia rysunek 2.12.



Rysunek 2.9. Rozkład stref w elektrowni



Rysunek 2.10. Rozkład stref w stacji w izolacji powietrznej



Rysunek 2.11. Rozkład stref w stacji w izolacji gazowej



Rysunek 2.12. Plan usytuowania pomieszczeń i ułożenia tras przewodów w rozpatrywanym laboratorium zwarciowym.

Różni się on od planów sytuacyjnych prezentowanych w [19] dla elektrowni (rysunek 2.9), stacji z izolacją powietrzą (rysunek 2.10), czy też gazową (rysunek 2.11), przedstawionych odpowiednio na rysunkach: 2, 3 i 4 w normie [19] oraz od analizowanych przypadków prezentowanych w [4], gdzie problem dotyczy obszaru nN.

W rozpatrywanym przypadku brak jest obszaru WN, badane obiekty poddawane są prze-



plywom duzych prądów zwarciovych w obszarze nN. Na prezentowanym planie LWP, (rysunek 2.12) nakreślone linie ciągłe to odwzorowanie ścian działovych wykonanych z cęgly niebędących ekranami. Plan LWP nie uwzględniał ekranów elektromagnetycznych między poszczególnymi obszarami laboratorium. Ścianka działowa pomiędzy pomieszczeniem kontrolnym a obszarem z wyłącznikiem próżniowym i stroną SN (pierwotną) transformatora zawiera szklane okno ułatwiające operatorowi podgląd obszaru prowadzonych badań po stronie SN. Zgodnie z rysunkiem 2.12 napięcie SN 15 kV dostarczane jest ze stacji SN do obszaru SN, w którym występuje część obwodu probierczego. W skład tego obwodu wchodzi wyłącznik próżniowy MV CB, układ dławików ograniczających prąd CLI oraz uzwojenia strony pierwotnej transformatora probierczego SN/nN TT.

Obszar nN obejmuje wtórną stronę transformatora probierczego TT, obciążoną obwodem z badanym obiektem EUT, przez który płynie krótkotrwały prąd zwarciovych po zamknięciu załączników zwarciovych SCS (rysunek 2.12). Aparatura sterująca próbą w postaci nastawnika czasowo-fazowego znajduje się w części operatorskiej nazwanej nastawnią, a w normie [19] Control Room Area, (patrz rysunek 2.9). Jest ona zasilana z dostępnej tam sieci nN 230 V AC. Linia zasilająca na rysunku 2.12 oznaczona jest kolorem zielonym z opisem (2x). Nastawnik posiada kanały dwustanowe w postaci ośmiu przełączników oraz ośmiu triaków. Jeden z portów wykorzystywany jest do sterowania pracą wyłącznika próżniowego MV CB. Tor między nimi zaznaczony jest niebieska pionowa linia z opisem (3x) przechodzącą ze strefy nastawni do strefy SN na rysunku 2.12. Pozostałe kanały sterują w obszarze nN załącznikami zwarciovymi SCS. Tor między nimi zaznaczony jest niebieska linia (3x) na rysunku 2.12 przechodzącą z nastawni, przez strefę SN do strefy nN. Obwody kontrolne zaznaczono również na rysunku 2.1.

Znajomość usytuowania okablowania na planie budynku, jak i pełnionej funkcji przez poszczególne aparaty biorące udział w teście wskazuje na niezidentyfikowane normami obszary wymagające indywidualnego rozpoznania.



# Rozdział 3

## Pomiary i analiza pola elektromagnetycznego w laboratorium wielkoprądowym

### 3.1 Identyfikacja zjawisk przejściowych

Przeprowadzone analizy przypadków niepożądanego samowyzwalania się próby wytrzymałości zwarciowej, opisane w rozdziale 2.1.2, pozwoliły na zawężenie obserwowanych zjawisk do fazy przygotowawczej testu. Zdarzenia krytyczne, niekontrolowanego rozpoczynania próby to wynik zamknięcia obwodu probierczego po stronie obiektu badanego bez udziału operatora. Załącznik zwarciowy SCS zamyka obwód zwarciowy, powodując tym samym stan zagrożenia zarówno dla pracowników niniejszego laboratorium, nieświadomych zaistniałej zmiany warunków, jak i dla badanego obiektu. Zgodnie z wymaganiami dokumentów normatywnych [70] oraz [75] czas trwania zwarcia  $t_k$  wynosi od 1 do 3 s. Jest to czas, w którym obiekt badany obciążany jest prądem wytrzymywanym krótkotrwałym  $I_k$ . W przypadku niekontrolowanego załączenia próby nie ma wyznaczonej granicy początku i końca próby i tym samym prąd zwarciowy staje się prądem ciągłym, co może trwale uszkadzać obiekt. Przedstawione pomiary pól: elektrycznego i magnetycznego oraz jednocześnie obserwowano sygnały napięciowe po stronie wtórnej transformatora probierczego TT wraz z sygnałami w obwodzie sterującym załącznikiem zwarciowym SCS, wykonano dla warunków występujących na etapie przygotowawczym testu.

#### 3.1.1 Wstępne rozpoznanie charakteru analizowanego zaburzenia.

Sondy izotropowe, dzięki możliwości pomiaru sygnałów jednocześnie w trzech ortogonalnych osiach [10], [77], bardzo dobrze sprawdzają się podczas wstępnego rozpoznania środowiska

elektromagnetycznego [40]. Początkową identyfikację występującego pola elektromagnetycznego przeprowadzono z wykorzystaniem miernika pola elektrycznego i magnetycznego 3D ESM 100 firmy Maschek [1] o paśmie pomiarowym częstotliwości od 5 Hz do 400 kHz, zakresie pomiarowym (pole E, pole H) odpowiednio: pole E: 0,1 V/m - 100 kV/m, pole H: 1 nT – 20 mT, umożliwiającą również rejestracje długookresowe powyżej 24 h, co wykorzystano podczas rejestracji tła oraz czterokanałowego oscyloskopu MSO 4054 produkcji Tektronix z analogowym pasmem częstotliwości 500 MHz i częstotliwością próbkowania 2,5 GS/s. Rozkład kierunkowy x, y, z mierzonego pola z użyciem sondy izotropowej zaprezentowano w pracy [66] oraz na rysunkach 3.5.

### **Pomiar tła towarzyszącego zjawisku załączania wyłącznika próżniowego MV CB w stanie jałowym transformatora**

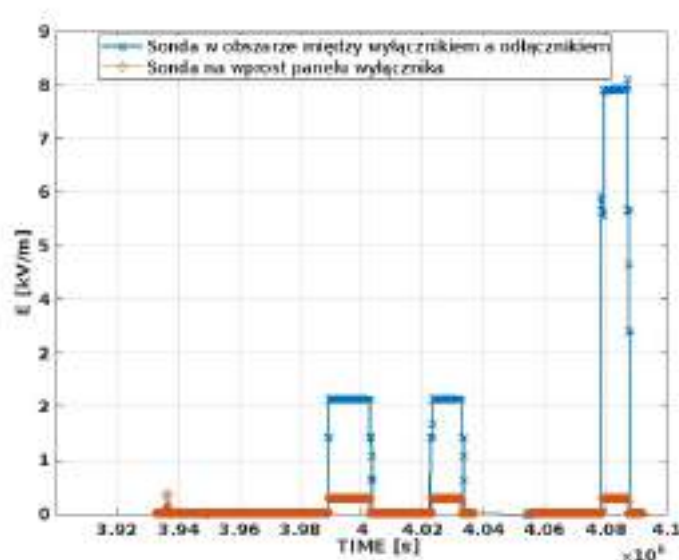
Zamykanie obwodu zwarciovego to złożony wielostopniowy proces mający na celu przyłączenie strony pierwotnej transformatora probierczego do sieci SN 15 kV. Zamknięcie odłącznika oraz podanie sygnału na wyłącznik MV CB nie jest częścią próby zwarciovowej. Proces ten jest realizowany z udziałem operatora technicznego obsługującego pulpit sterowniczy, z którego podawane są sygnały do zamknięcia odłącznika (pierwszy krok) i załączenia wyłącznika SN (kolejny krok). Pomiar tła wykonano z użyciem dwóch sond izotropowych 3.1. Sondę I umieszczono od strony panelu sterującego wyłącznika rys. 3.1a oraz rys. 3.1b, sondę II umieszczono w obszarze styków wyłącznika rys. 3.1c. Pomiar wykonano przy uwzględnieniu obu



(a) Ustawienie sondy I na wprost wyłącznika (b) Ustawienie sondy I na wprost wyłącznika (c) Ustawienie sondy II między wyłącznikiem MV CB, widok twarzą do wyłącznika.      średniego napięcia MV CB, widok z boku.      MV CB a odłącznikiem.

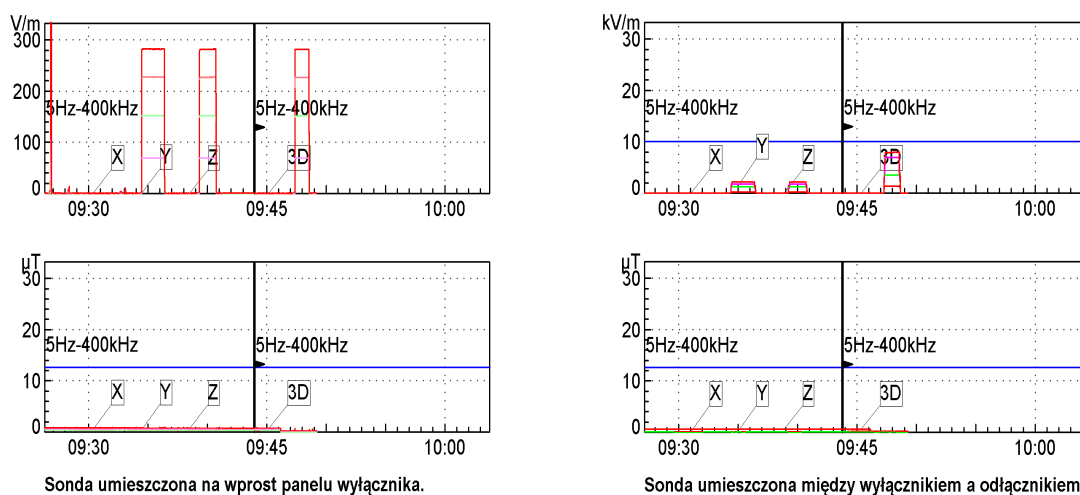
**Rysunek 3.1.** Widok usytuowania sond pola elektrycznego i magnetycznego podczas rejestracji tła.

kroków składających się na podanie średniego napięcia SN na pierwotną stronę transformatora



**Rysunek 3.2.** Wyniki rejestracji pola elektrycznego w stanie ustalonym po zamknięciu odłącznika oraz wyłączeniu. Próbkowanie co 0.5 sekundy.

probierczego TT. Odłącznik, usytuowany jest w obszarze między Stacją SN 15 kV a wyłącznikiem SN MV CB. Zamknięcie obwodu zwarciovego związane jest z wystawieniem sygnału na zamknięcie styków wyłącznika, co zamyka obwód probierczy znajdujący się w Strefie SN (patrz rys. 2.12). Wyniki zaprezentowane na rysunku 3.2 przedstawiają moduł pola  $E$  [kV] w funkcji czasu. Pomiary pola  $E$  sondami umieszczonymi w dwóch strefach narażenia, jedna w



(a) Sonda umieszczona na wprost panelu wyłącznika.

(b) Sonda umieszczona w okolicy styków wyłącznika.

**Rysunek 3.3.** Pomiary natężenia pola elektrycznego i indukcji magnetycznej podczas rejestracji tła.

obszarze łączeniowym pomiędzy Strefą SN a stacją SN 15 kV, druga w obszarze Strefy SN w

pewnej odległości od łączników, na wprost panelu wyłącznika. Rozmieszczenie przedstawiono na rysunkach 3.2 i 3.3. Uzyskane w wyniku schodki związane są z zamknięciem łączników. Pierwszy i drugi schodek to reakcja pola  $E$  na zamknięcie styków tylko odłącznika na czas ok. 1,5 min., gdzie poziom pola elektrycznego na ten czas przyjmował wartości ok. 2 kV/m. Trzeci schodek to wynik wzrostu pola na skutek zamknięcia styków dwóch aparatów: odłącznika i wyłącznika na czas ok. 1,5 min. Uzyskane wyniki potwierdziły znaczny wzrost pola elektrycznego do ok. 8 kV/m w obwodzie z wyłącznikiem; uzyskane poziomy nadal mieściły się w poziomach akceptowalnych (10 kV/m) [29], określone Rozporządzeniem Ministra Zdrowia [56] z dnia 17 grudnia 2019 r. w sprawie dopuszczalnych poziomów pól elektromagnetycznych w środowisku. Na wykresach czasowych przedstawionych na rysunku 3.2 widać podwyższone wartości quasi-stacjonarnego pola elektrycznego. Są to pola częstotliwości sieciowej 50 Hz. Pole elektryczne tej częstotliwości obejmuje małą przestrzeń wokół linii. Nie ma możliwości sprzęgania się tego pola na drodze pojemnościowej z nastawnikiem, umieszczonym w Nastawni i z przewodami podłączonymi do niego [53]. Pomiary tła pola elektrycznego i magnetycznego nie odbiegają od wartości w typowym środowisku przemysłowym [39].

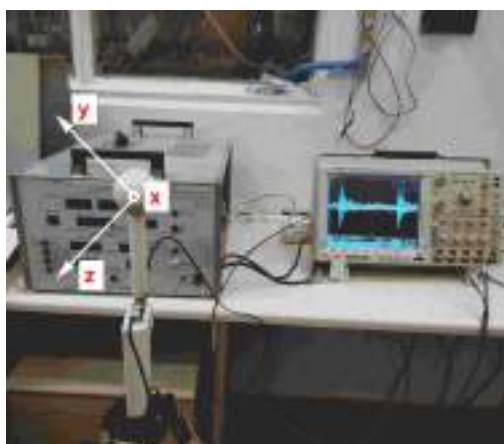
### **Wstępny pomiar nieustalonego pola elektrycznego i magnetycznego środowiska probierczego LWP**

Transformator TT podczas pomiarów był nieobciążony po stronie wtórnej. Nastawnik czasowofazowy znajdował się w pomieszczeniu budynku nazwanym Nastawnią, rys. 2.12. Osoba przeprowadzająca test, zwykle kierownik próby, korzystając z pulpitu sterowniczego (układ rozmieszczenie pulpitu sterującego oraz nastawnika w przestrzeni Nastawni przedstawiono na rysunku 3.4), zamyka wyłącznik średniego napięcia MV CB, rozpoczynając pierwszą fazę przygotowania do testu, poprzez podanie zasilania na stronę pierwotną transformatora zgodnie ze schematem elektrycznym z rysunkiem 2.1. Nastawnik nie wysyłał sygnału na załączenie do załącznika zwarciovego SCS.

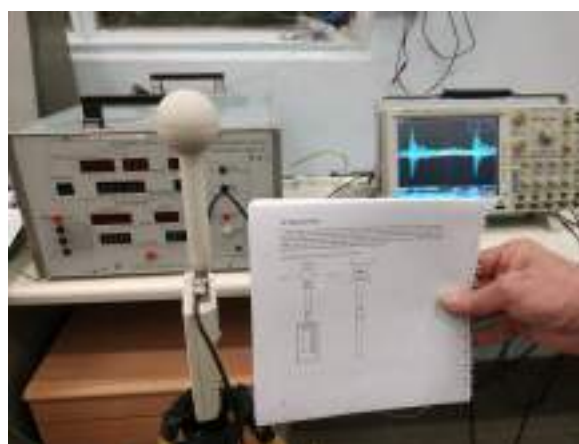
Orientacja lokalnego układu współrzędnych wykorzystanej w pomiarze sondy pola, względem globalnego układu przyjętego dla Nastawni przedstawiona jest na rysunku 3.5a. Oś  $x$  sondy jest ustawiona prostopadle do ściany między Nastawnią a strefą SN (patrz rys. 2.12). Osie  $y$  i  $z$  sondy leżą w płaszczyźnie ściany działowej między Nastawnią a strefą SN, przy czym oś  $y$  jest nachylona pod kątem  $45^\circ$  w górę od poziomu, a oś  $z$  pod kątem  $45^\circ$  w dół od poziomu. Zarejestrowano pole magnetyczne (rys. 3.6) oraz pole elektryczne (rys. 3.7) występujące w trakcie fazy wstępnej, zdefiniowanej powyżej. Obwód posiadał obciążenie indukcyjne w postaci dławików ograniczających prąd CLI, wpiętych pomiędzy wyłącznik a stronę pierwotną TT. W próbach wykorzystywano jeden transformator (TR3), którego uzwojenie pierwotne było



**Rysunek 3.4.** Widok nastawni uwzględniający rozmieszczenie pulpitu operatora oraz nastawnika czasowo-fazowego.

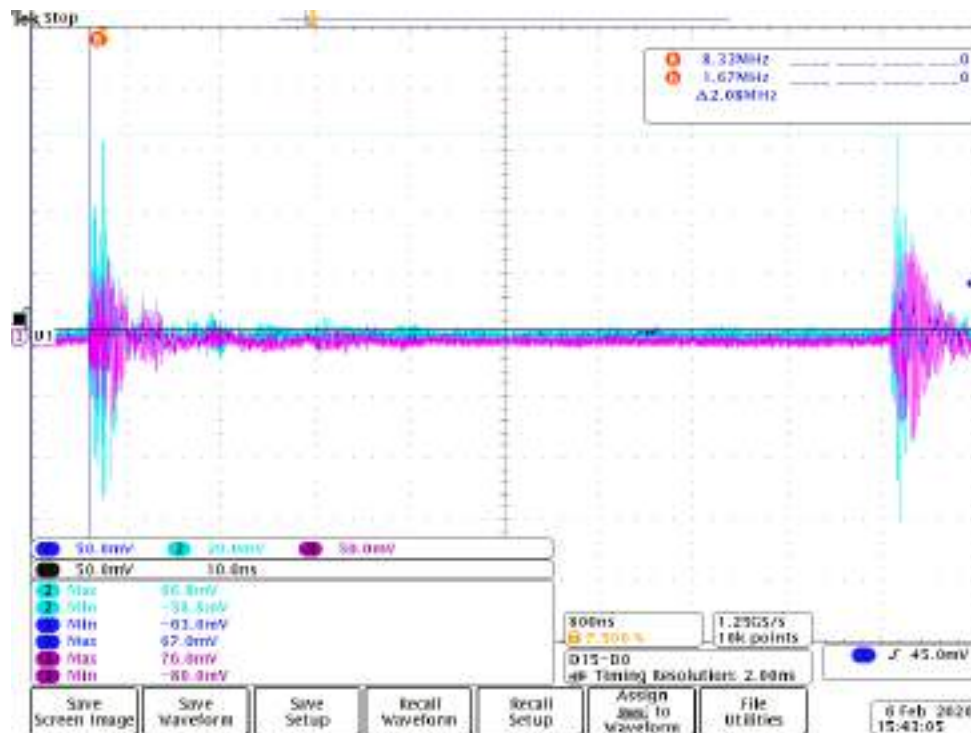


(a) Układ osi.



(b) Rozkład osi z odniesieniem do instrukcji sondy Maschek.

**Rysunek 3.5.** Ustawienie sondy izotropowej w pomieszczeniu Nastawni podczas pomiaru pola  $E$  i  $H$ .

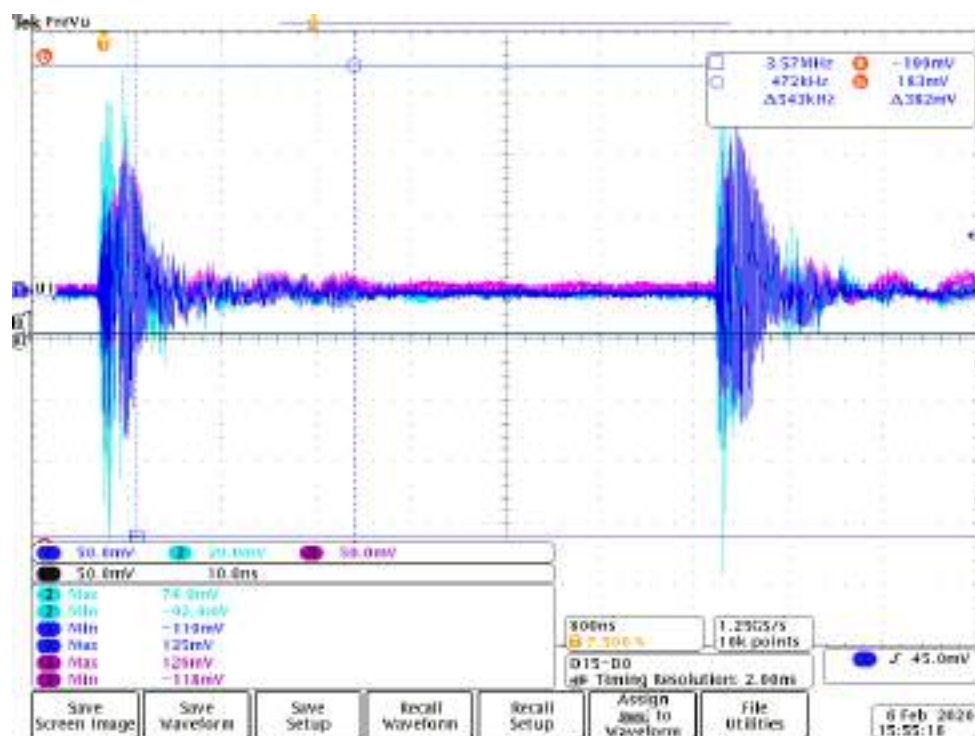


**Rysunek 3.6.** Pomiar pola magnetycznego  $H$  w obwodzie uwzględniającym dławiki CLI regulujące poziom prądu obwodu zwarciego, gdzie  $H_x, H_z: 1,33(A/m)/div$ ,  $H_y: 0,53 (A/m)/div$ , podstawa czasu  $800ns/div$

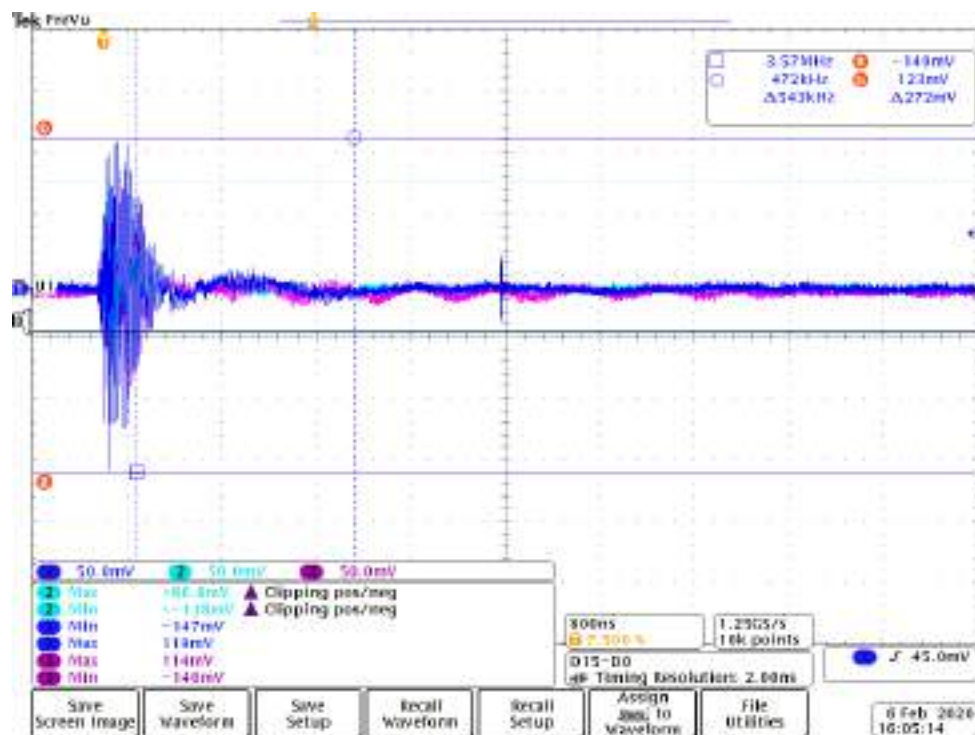
wpięte międzyfazowo między fazy L1 i L3. Oscylogramy: rys. 3.8, rys. 3.9 oraz rys. 3.10 zostały zebrane dla układu z wypiętymi dławikami CLI, eliminując je z obwodu probierczego.

Mierzone pole  $E$  przedstawione na rys.: 3.7, rys. 3.8, oraz rys. 3.9 osiąga wartości kilkuset V/m, (od 906 V/m do 1,3 kV/m dla jednej składowej pola). Pole  $H$  z rysunków 3.6 i 3.10 osiąga wartości pojedynczych A/m, co ostatecznie jest nieszkodliwe dla układu zwarciego i jego elementów. Oznacza to, że główne zagrożenie dla układu nastawnika i obwodu zwarciego to zakłócenia pochodzące od pola elektrycznego wraz ze sprzężeniem pojemnościowym, a w drugiej kolejności od pola magnetycznego wraz ze sprzężeniem indukcyjnym [61], [58]. Zebrane oscylogramy pozwoliły na wstępne rozpoznanie charakteru zjawiska, czyli oscylacji tłumionych występujących w trakcie przełączania, tworząc stan nieustalony z czasem narastania rzędu kilkudziesięciu nanosekund. Wyniki te sugerowały, iż pomiary pól elektromagnetycznych występujących w zadanym obszarze należy przeprowadzić z wykorzystaniem sond szerokopasmowych pozwalających na pomiary w zakresie MHz, a nawet kilku GHz.

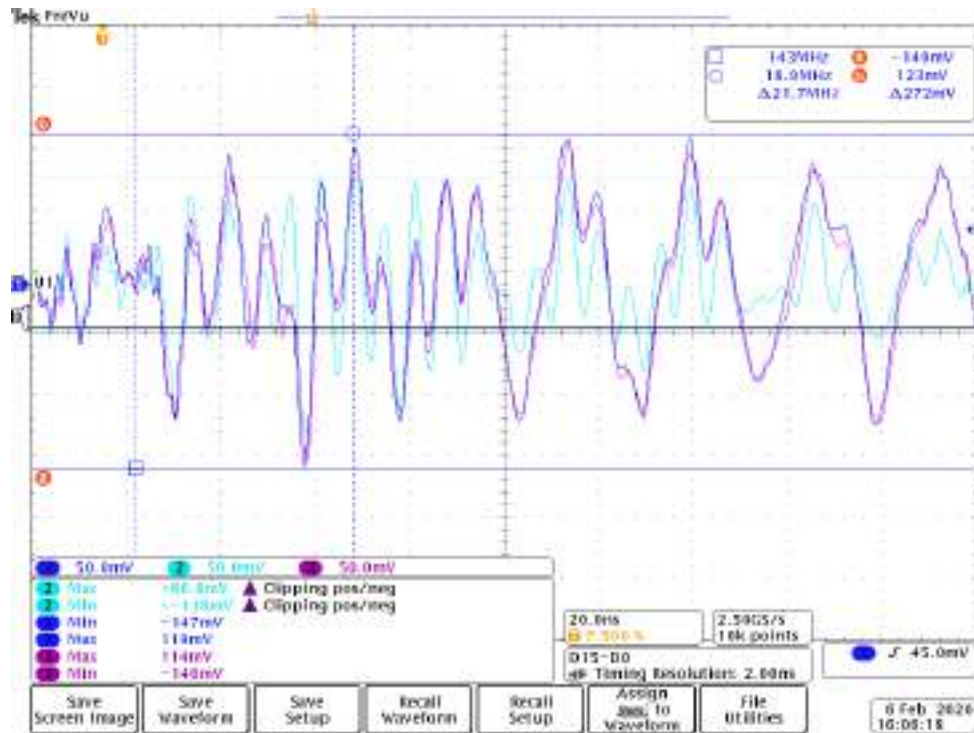




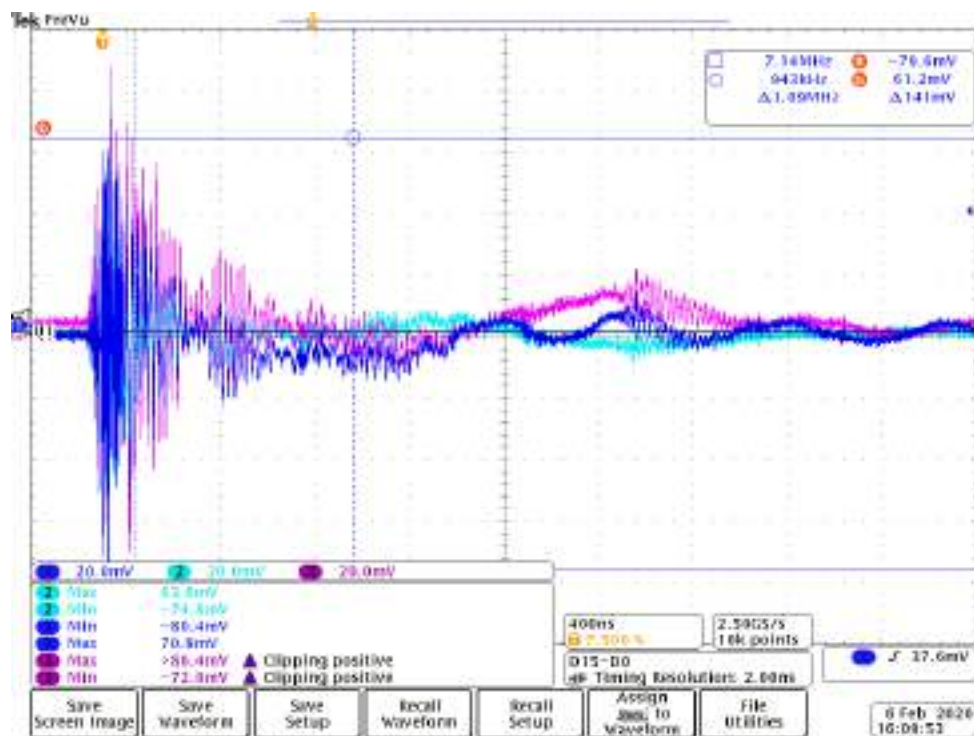
Rysunek 3.7. Pomiar pola elektrycznego  $E$  w obwodzie z dławikami ograniczającymi prąd, rozdzielczość dla składowych  $E_x(1)$  i  $E_z(3)$ : 166,7 (V/m)/div,  $E_y(2)$  66,7 (V/m)/div, podstawa czasu 800ns/div



Rysunek 3.8. Pole elektryczne  $E$  mierzone w układzie bez dławików nastawnych, (wariant II), rozdzielczość dla składowych  $E$ : 166,7 (V/m)/div, podstawa czasu 800ns/div



Rysunek 3.9. Pole elektryczne  $E$  mierzone w układzie bez dławików nastawnych, (wariant II), rozdzielczość dla składowych  $E$ : 166,7 (V/m)/div, podstawa czasu 20ns/div



Rysunek 3.10. Pomiar pola magnetycznego  $H$  gdzie  $H_x, H_y, H_z$ : 0,53 (A/m)/div, podstawa czasu 400ns/div

### 3.1.2 Pomiary pola elektrycznego i pola magnetycznego

W kolejnym kroku wykonano trzy próby, dla losowych wartości kątów załączania wyłącznika, podczas których obserwowano pola z wykorzystaniem kierunkowych sond szerokopasmowych [2]. Układ pomiarowy składał się z: sondy  $\dot{D}(t)$  do pomiaru pola elektrycznego SFE3-5G o szerokości pasma od 100 kHz do 3,5 GHz, oraz  $\dot{B}(t)$  jako czujnika pola magnetycznego o paśmie od 100 kHz do 2 GHz, produkcji MONTENA Technology SA, oscyloskopu cyfrowego WAVESURFER 3074 z pasmem przenoszenia 750 MHz i częstotliwości próbkowania 4 GS/s, produkcji TELEDYNE LeCroy. Do rejestracji sygnałów napięciowych wykorzystano dwa kanały rejestratora HIOKI 8861-50 [26], o częstotliwości próbkowania 20 MS/s. napięcie wyjściowego transformatora strona nN (strona wtórna transformatora, kanał 1.2) i sygnału wyjściowego nastawnika (kanał 1.1).

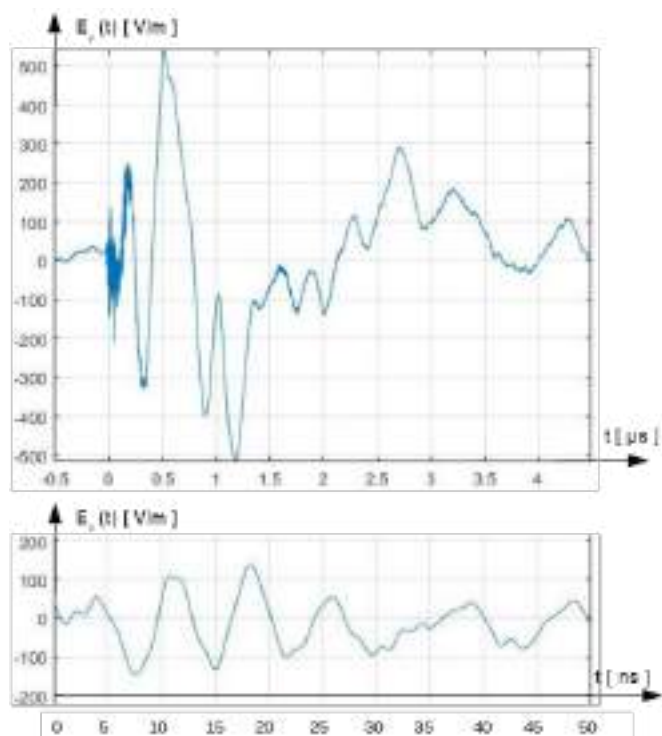
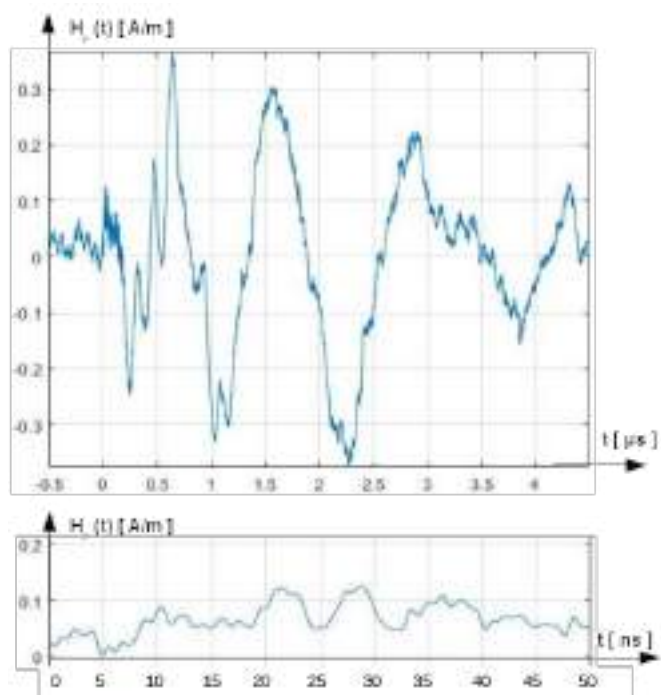
Wykonano pomiary pola dla trzech ortogonalnych ustawień sond B-dot, D-dot: w orientacji pionowej rys. 3.11, prostopadle do ściany oddzielającej nastawnię i część laboratoryjną z transformatorami i wyłącznikiem, rys. 3.14 oraz wzdłuż ściany oddzielającej nastawnię od strefy gdzie znajdują się transformatory wraz z wyłącznikiem, rys. 3.15. Układ sond połowych dla poszczególnych pomiarów wraz z zebranymi wynikami mierzonego środowiska przedstawiono odpowiednio na: rys. 3.11 oraz rys. 3.12, pomiar pola o rozkładzie równoległym do ściany działowej, rys. 3.14 oraz rys. 3.13 dla sond realizujących pomiar pola o rozkładzie prostopadłym względem ściany działowej i rys. 3.15 oraz rys. 3.16 dla sond realizujących pomiar pola o rozkładzie wzdłużnym względem ściany działowej. Zarejestrowanych przebiegów składowych pól nie można ze sobą korelować, gdyż zamknięcie styków następuje za każdym razem w innej chwili w stosunku do przejścia napięcia przez zero.

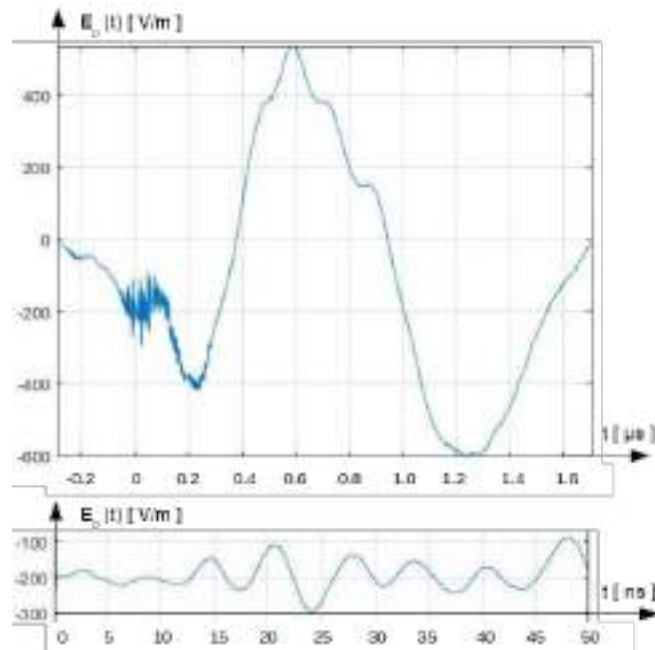
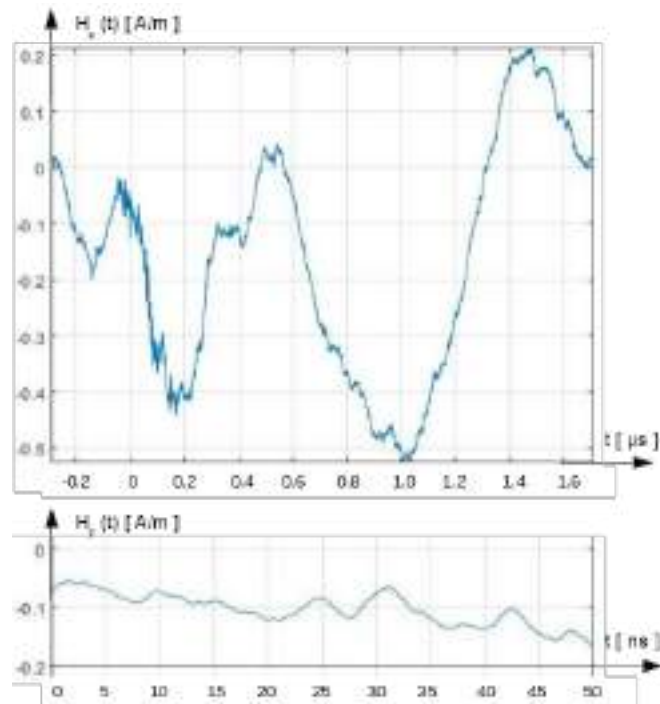


**Rysunek 3.11.** Pomiar pola dla pionowej orientacji sond probierczych względem ściany działowej między laboratorium a pokojem kontrolnym

Przykładowy oscylogram stanu nieustalonego powstałego na skutek zamknięcia styków MV CB przedstawiono na rysunku 3.17. Rejestracje wykonano rejestratorem HIOKI 8861-50. Zebrane dane nie są związane z orientacją mierzonego pola, obrazują nam jakość sygnału napięciowego na wyjściu portu Nastawnika-kanal 1-1 (kolor czerwony) oraz napięcie po stronie wtórnej transformatora probierczego nN- kanal 1-2 (kolor niebieski). Przedstawione na rysunkach: 3.18, 3.19, 3.20, 3.21, 3.22 oraz 3.23 i 3.24 oscylogramy, są wyselekcjonowanymi oknami przebiegu z rysunku 3.17 pozwalającymi wyznaczyć następujące istotne parametry przebiegów, zawarte między kursorami- niebieskie linie przerywane:

- rys. 3.17- wartość RMS napięcia 202.73 V, wyznaczona dla 5 pełnych okresów (100 ms) - strona wtórna transformatora TT,
- rys. 3.18- wyodrębnienie okna 10 ms do pierwszego przejścia przebiegu napięcia przez zero,
- rys. 3.19- okno kursorów wyznacza czas opóźnienie zamknięcia styków (2.498 ms),
- rys. 3.20- rejestracja czasu trwania stanu nieustalonego,
- rys. 3.21- wyodrębnienie okna obejmującego pierwszą fazę zakłócenia,

(a) Wyniku pomiaru pola  $E$  z użyciem sondy D-dot.(b) Wyniku pomiaru pola  $H$  z użyciem sondy B-dot.**Rysunek 3.12.**  $E$  i  $H$  dla układu pionowej orientacji sond względem ściany działowej.

(a) Wyniku pomiaru pola  $E$  z użyciem sondy D-dot.(b) Wyniku pomiaru pola  $H$  z użyciem sondy B-dot.Rysunek 3.13.  $E$  i  $H$  w układzie sond prostopadle do ściany działowej.

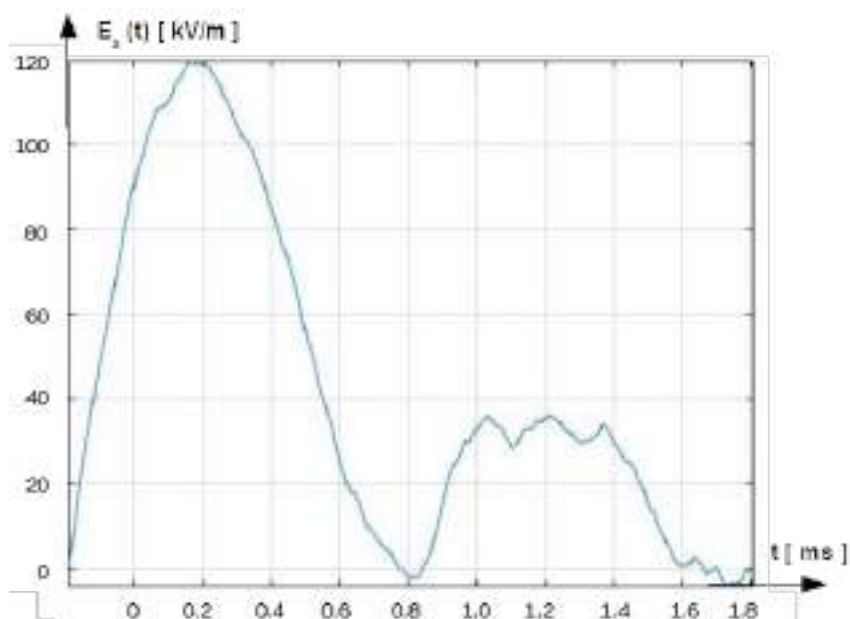
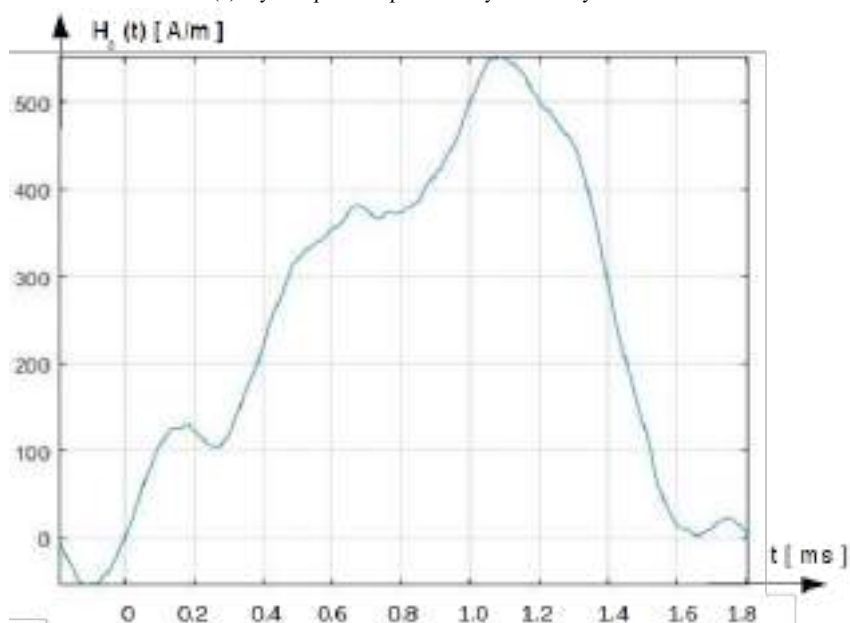




**Rysunek 3.14.** Układ prostopadły sond probierczych względem ściany działowej między laboratorium a pokojem kontrolnym.

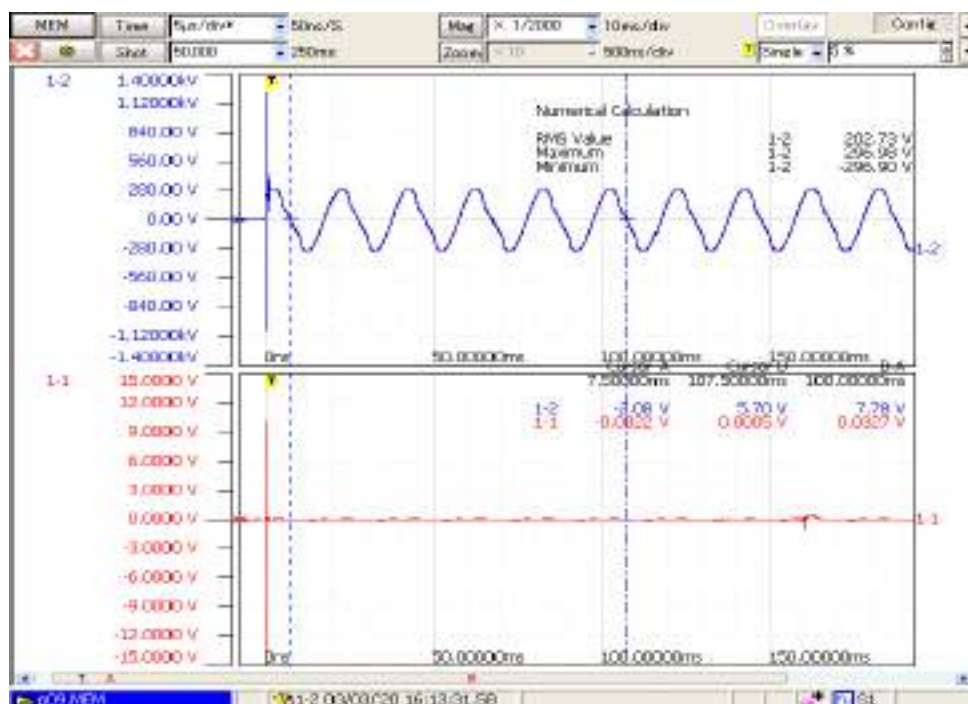


**Rysunek 3.15.** Pomiar pola w ustawieniu sond probierczych wzdłuż ściany działowej między laboratorium a pokojem kontrolnym.

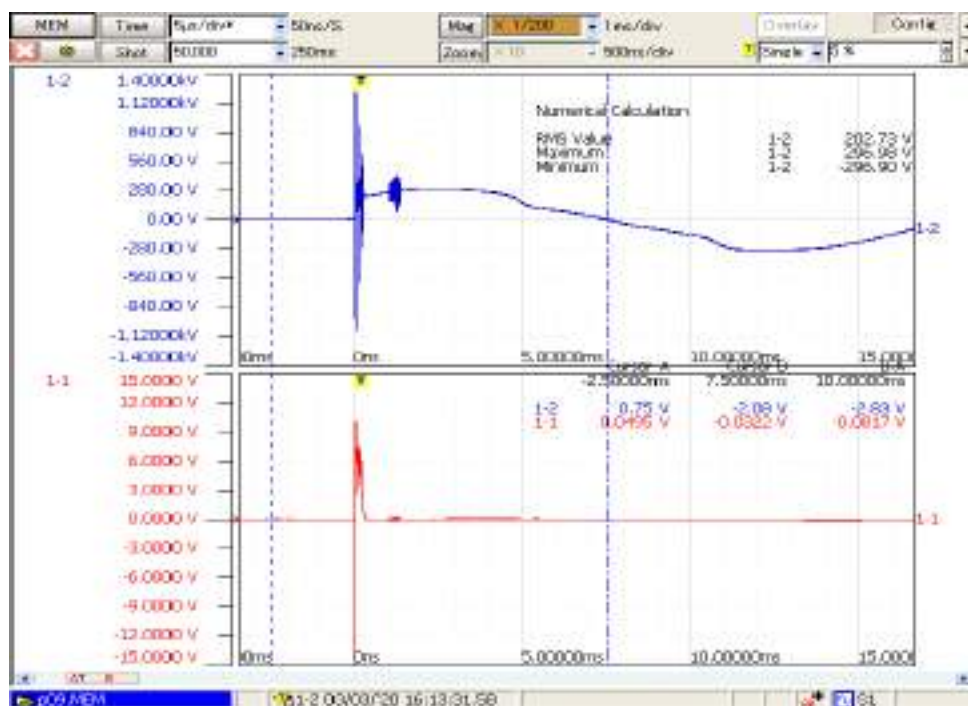
(a) Wyniku pomiaru pola  $E$  z użyciem sondy  $D$ -dot.(b) Wyniku pomiaru pola  $H$  z użyciem sondy  $B$ -dot.**Rysunek 3.16.**  $E$  i  $H$  w układzie sond ułożonych wzdłuż do ściany działowej.

- rys. 3.22- okno kursorów obejmuje czas między kolejnymi zakłóceniami,
- rys. 3.23- wyodrębnienie okna obejmującego drugą fazę zakłócenia,
- rys. 3.24- ekstrema zakłócenia.

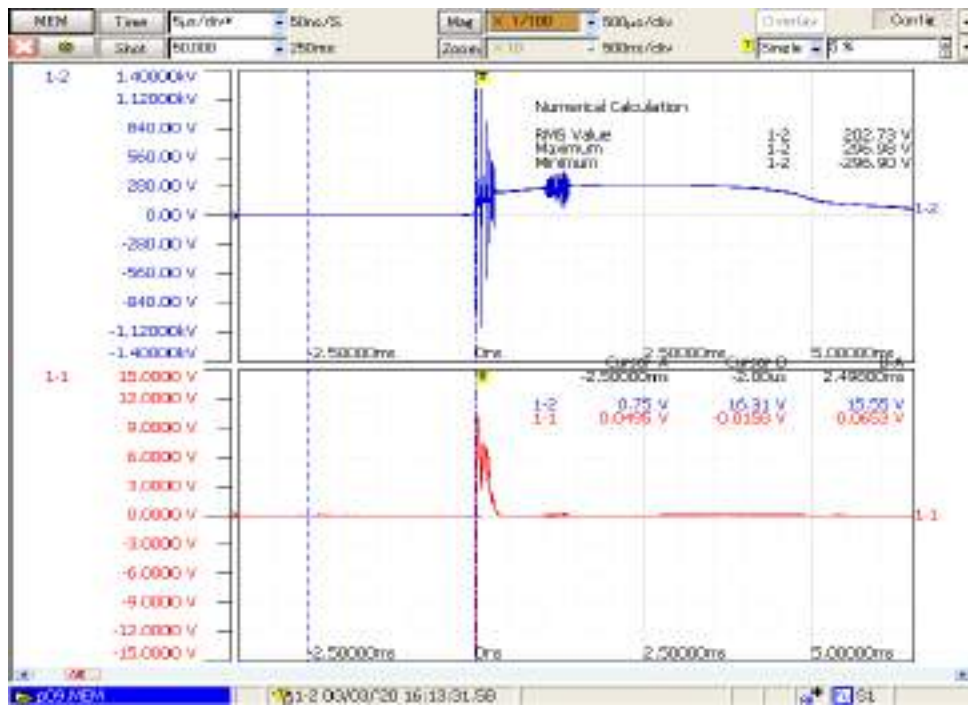




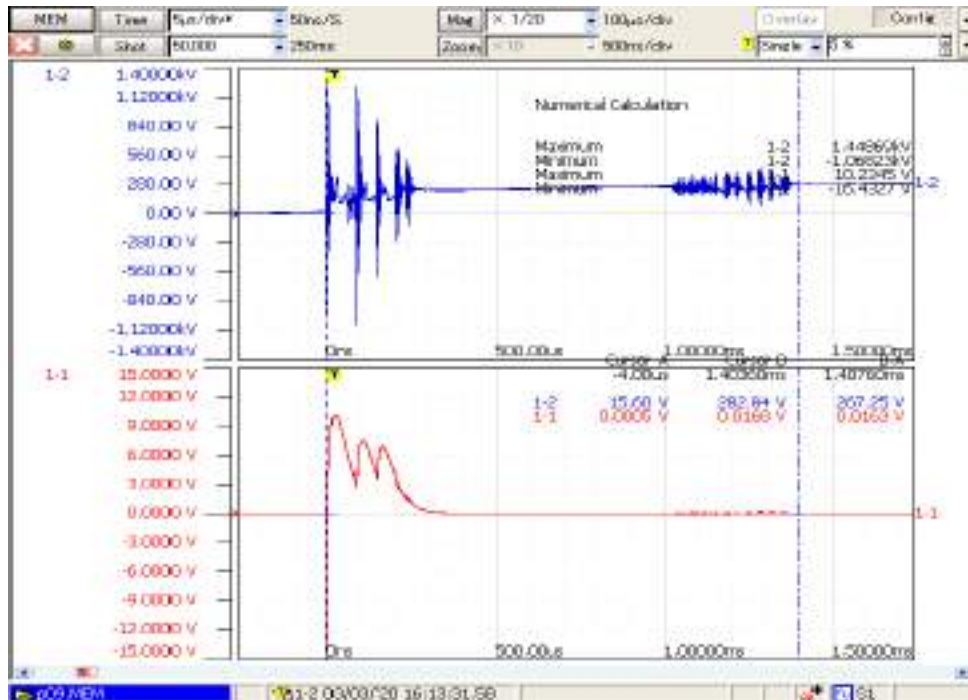
Rysunek 3.17. Rejestracje napięć: po stronie wtórnej transformatora CH 1-2, na porcie Nastawnika CH 1-1.



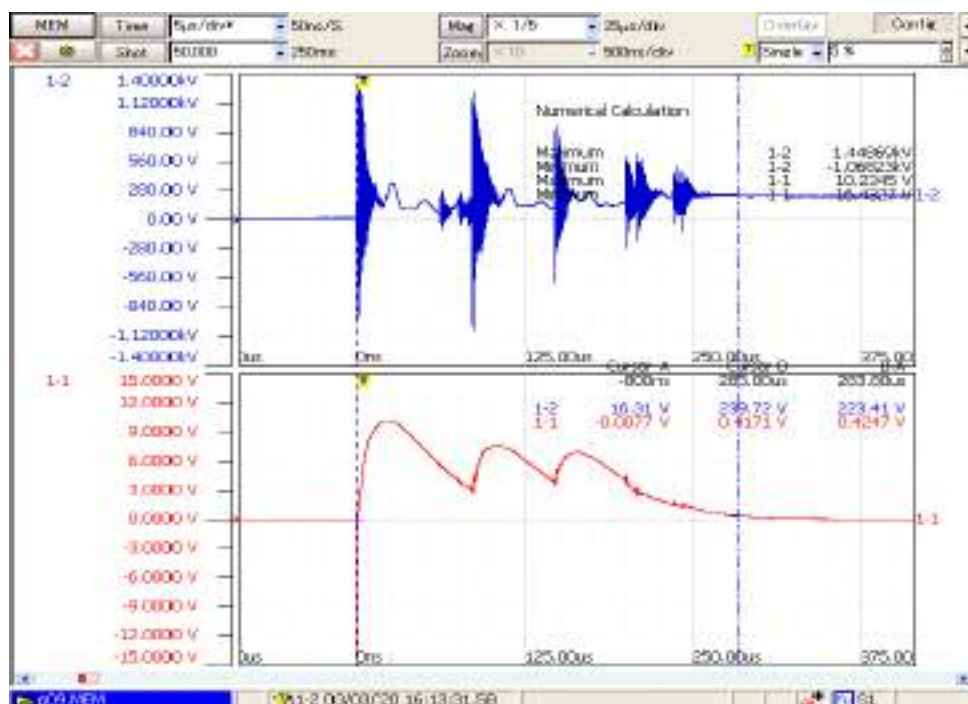
Rysunek 3.18. Półokresowe okno pomiarowe między kursorami (10ms).



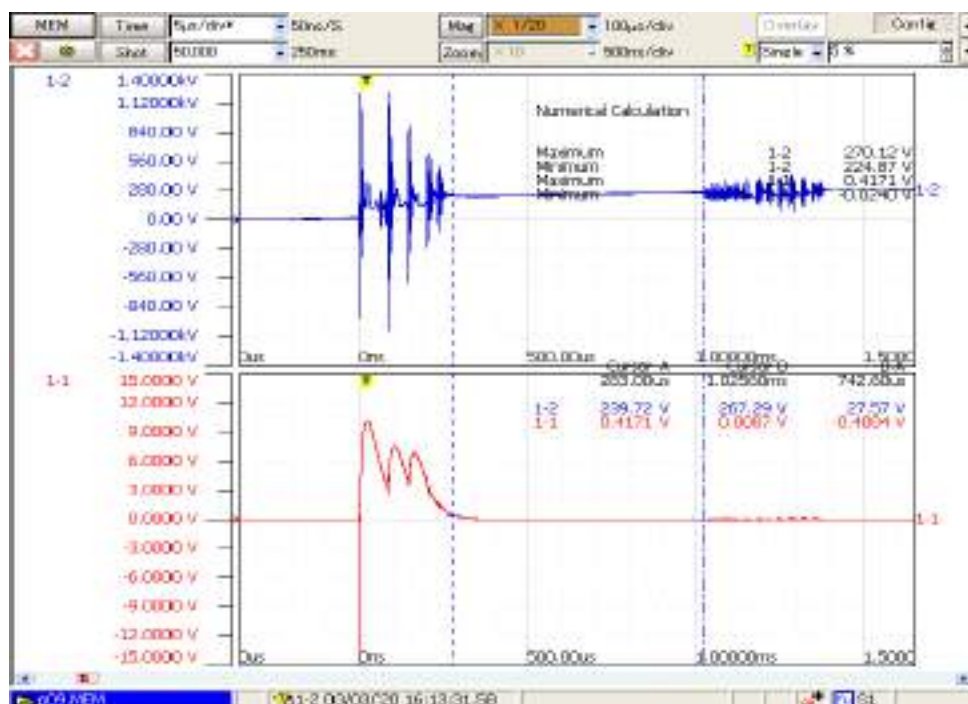
Rysunek 3.19. Opóźnienie załączania napięcia w stosunku do przejścia napięcia przez zero.



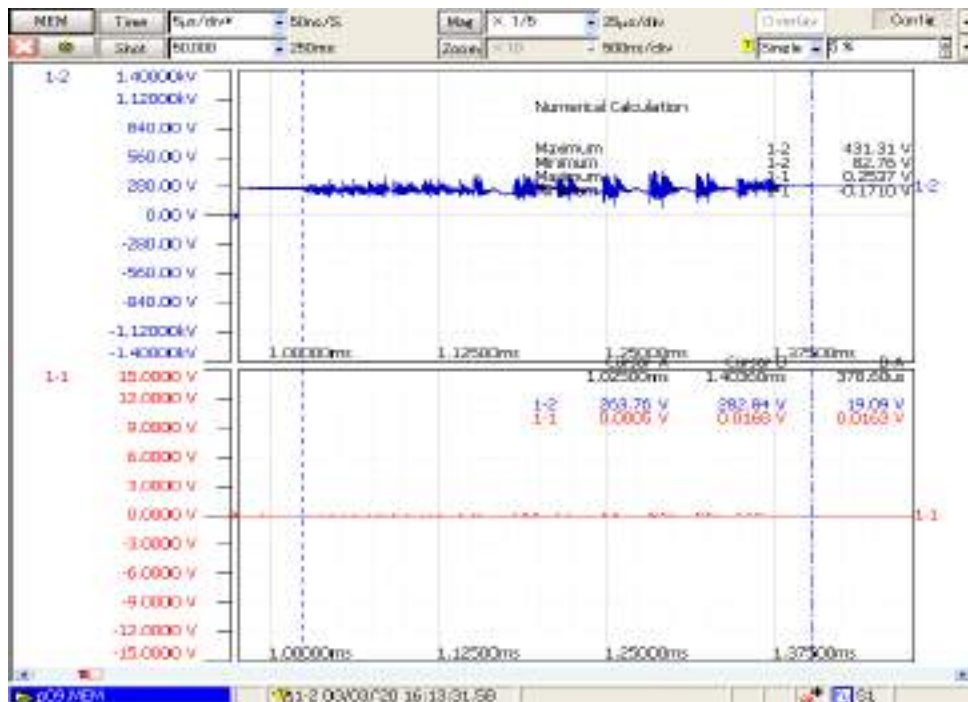
Rysunek 3.20. Rejestracja czasu trwania zakłócenia.



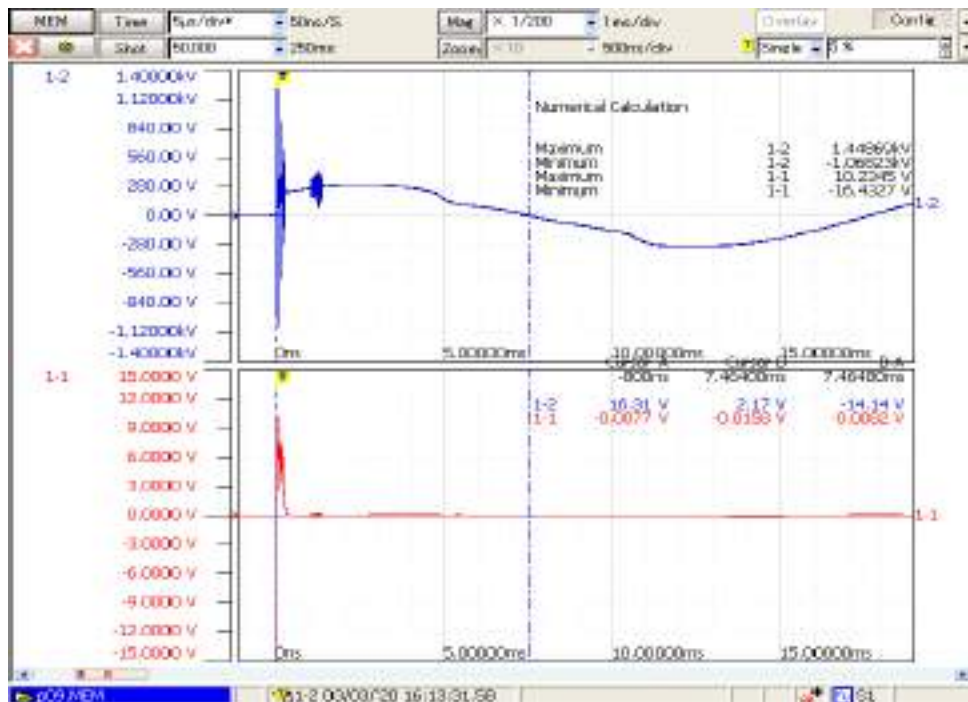
Rysunek 3.21. Pierwsza faza zakłócenia.



Rysunek 3.22. Czas pomiędzy zakłóceniami.



Rysunek 3.23. Druga faza zakłócenia.



Rysunek 3.24. Wartości minimalne i maksymalne zakłóconych napięć.

Analiza wyników wykonanych podczas prób dla trzech losowych kątów załączania napięcia względem zera przedstawiono w tabelach 3.1 oraz 3.2.

nr próby	Parametry napięciowe mierzonych sygnałów				
	$U_{nn}$	faza zakłócenia I		II faza zakłócenia	
	RMS (100ms)	$U_{nn}$ Pk-Pk	$U_{interf.}$ Pk-Pk	$U_{nn}$ Pk-Pk	$U_{interf.}$ Pk-Pk
	[V]	[V]	[V]	[V]	[V]
próba I	208,31	>400	>8	294,1	0,249
próba II	202,73	603,8	10,23	348,5	0,425
próba III	194,92	597,4	9,92	313,2	0,212

**Tabela 3.1.** Parametry napięciowe przebiegów zarejestrowanych podczas prób pomiaru pól elektromagnetycznych dla różnych układów sond.

nr próby	opóźnienie włączenia względem przez 0	czas trwania	czas trwania I fazy	czas trwania II fazy	czas pomiędzy I a II fazą	czas od rozpoczęcia testu do
	[ms]	[ms]	[ms]	[ms]	$\mu s$	[ms]
próba I	3,562	1,462	0,333	0,308	0,820	6,440
próba II	2,498	1,407	0,284	0,379	0,743	7,469
próba III	6,579	1,414	0,326	0,300	0,869	3,530

**Tabela 3.2.** Zestawienia parametrów czasowych dla przebiegów napięciowe zarejestrowanych podczas prób pomiaru pól elektromagnetycznych dla różnych układów sond.

Rozpatrywany stan wywołany zamykaniem styków wyłącznika MV CB rejestrowany sondami, jak i rejestratorem HIOKI jest szybkim stanem nieustalonym, którego parametry nie należy porównywać z rejestracjami wolnozmiennymi tła, dla których poziomy pole elektrycznego i magnetycznego nie przekraczały wartości dopuszczalnej w środowisku pracy określonej w obowiązującym rozporządzeniu ministra zdrowia. Wykonane pomiary przejściowego pola elektrycznego w obszarze Nastawni w okolicy aparatury sterującej, jaką jest nastawnik czasowo-fazowy stanowią cenną informację o poziomie pola występującego w okolicy aparatu, a tym samym dały wytyczne dla badań EMC związaną bezpośrednio z poziomem narażeń szybkimi stanami przejściowymi [62], [60]. W przypadku szybkozmiennego pola magnetycznego zmierzone poziomy nie przekraczają wartości zdefiniowanych dla typowego środowiska przemysłowego [19] i środowiska podstacji [19].





## Rozdział 4

# Badania jednoczesności załączania styków wyłącznika próżniowego SN

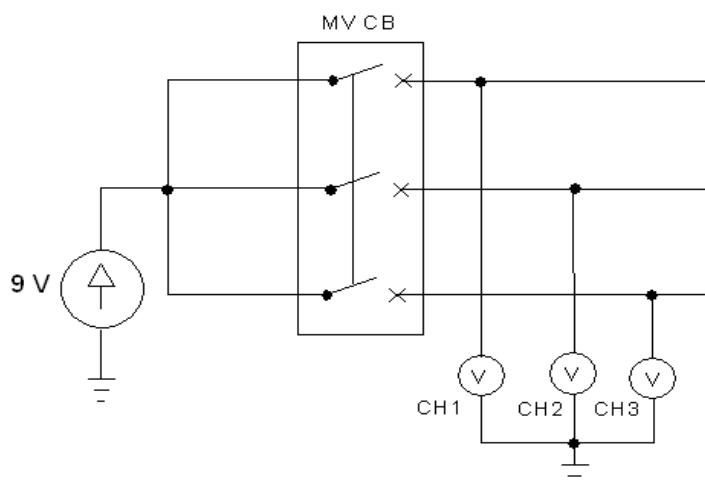
Problem wyłączników próżniowych pracujących w sieci SN znany jest w literaturze i rozpatrywany pod kątem spotykanych tam łuków występujących w trakcie przerywania prądów zwarciovych [64], [15]. W analizowanym przypadku istotnym jest proces zamykania styków wyłącznika i analiza zjawisk przejściowych.

Badanie wykonano dwuetapowo w układzie niskiego napięcia z zasilaniem bateryjnym rys. 4.1 oraz w układzie SN przy zasilaniu wyłącznika z transformatora probierczego TP60 rys. 4.5. Rejestrowano czasy załączania poszczególnych styków z wykorzystaniem oscyloskopu szerokopasmowego MSO 4045 Tektronix. Do pomiaru niskonapięciowego wykorzystano sondy probiercze typu P6139A firmy Tektronix o paśmie 500 MHz i zakresie pomiaru napięcia do 400 V RMS. Pomiary wysokonapięciowe wykonano używając sond probierczych typu P6015A firmy Tektronix o paśmie 75 MHz i zakresie pomiaru napięcia do 20 kV RMS. Zastosowanie transformatora probierczego TP60 pozwoliło na odseparowanie się od SN-czyli od stacji SN, przy zapewnieniu na stykach napięcia pracy wyłącznika 15 kV, plan budynku z uwzględnieniem przestrzeni badawczej, jak i kontrolno pomiarowej przedstawia rys.2.12.

Pomiary sygnałów wykonano zgodnie z rys. 4.1 oraz rys. 4.5, gdzie faza R- kanał CH1, faza S-kanał CH2, faza T- kanał CH3 kanał CH4 -zasilanie. Pomiary wykonano względem sygnału sterującego zamknięcie styków wyłącznika (sygnał sterujący zaciski 4-23).

W układzie nN rys. 4.2b wykonano połączenia uziemień wszystkich elementów układu probierczego, zastosowano transformator separujący w celu oddzielenia układu probierczego od sieci. Wyniki odnoszące się do nierównoczesności zamykania styków przedstawiono odpowiednio dla rys. 4.3 oraz dla rys. 4.4 w Tabeli 4.1.

W kolejnym kroku przeprowadzono próby sprawdzenia jednoczesności zamykania styków wyłącznika w obwodzie SN 15 kV jako rzeczywistych warunków pracy nastawnika. Do budowy układu probierczego wykorzystano transformator TP60 oraz sondy wysokonapięciowe Tektronix P6015A rys. 4.5.



Rysunek 4.1. Schemat elektryczny obwodu DC do pomiaru czasów załączania.



(a) widok od frontu panelu wyłącznika MV CB.

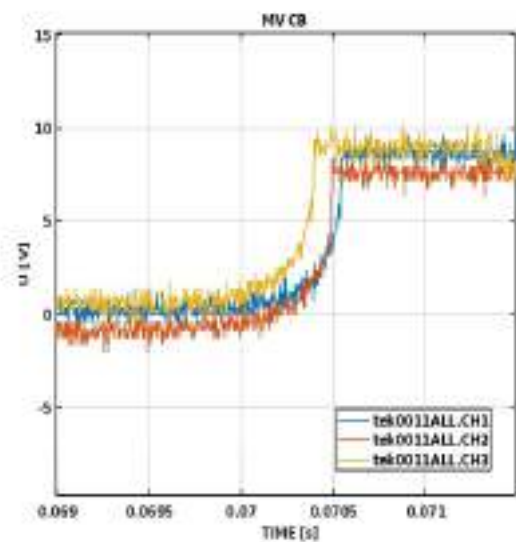
(b) widok od strony komór próżniowych wyłącznika MV CB.

Rysunek 4.2. Widok na układ pomiarowy do badania jednoczesności załączania styków w obwodzie DC nN.

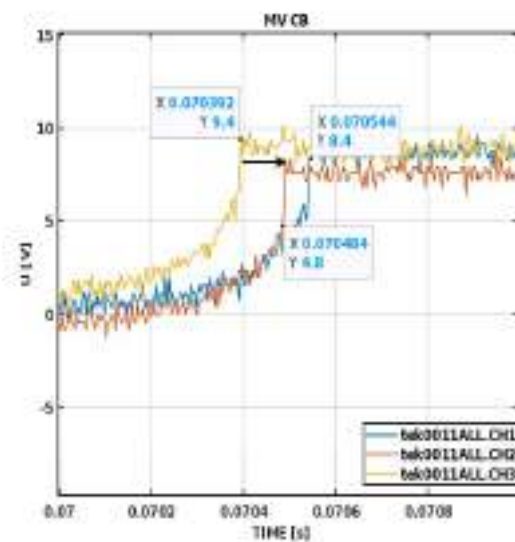
rys. 4.3			rys. 4.4		
kanał nr.	$t_{zamk}$ <i>ms</i>	$\Delta t$ $\mu s$	kanał nr.	$t_{zamk}$ <i>ms</i>	$\Delta t$ $\mu s$
CH1	70,544	152	CH1	69,785	125
CH2	70,485	93	CH2	69,764	104
CH3	70,392	0	CH3	69,660	0

Tabela 4.1. Zestawienie czasów zamykania styków wyłącznika.



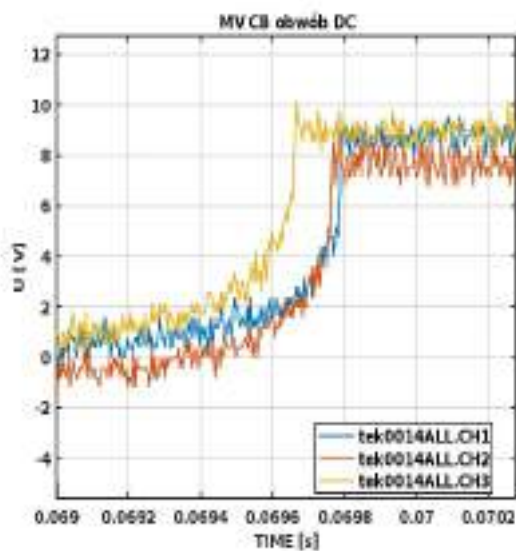


(a) Obwód DC.

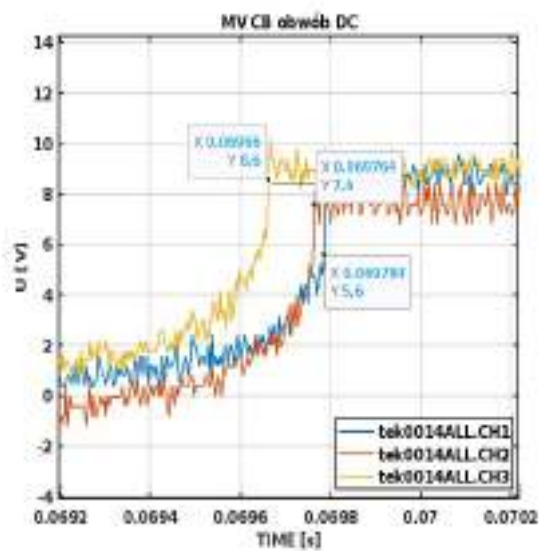


(b) Obwód DC zoom zakresu

Rysunek 4.3. Napięcie na stykach wyłącznika przy zamykaniu obwodu DC o napięciu źródła 9 V.



(a) Obwód DC.

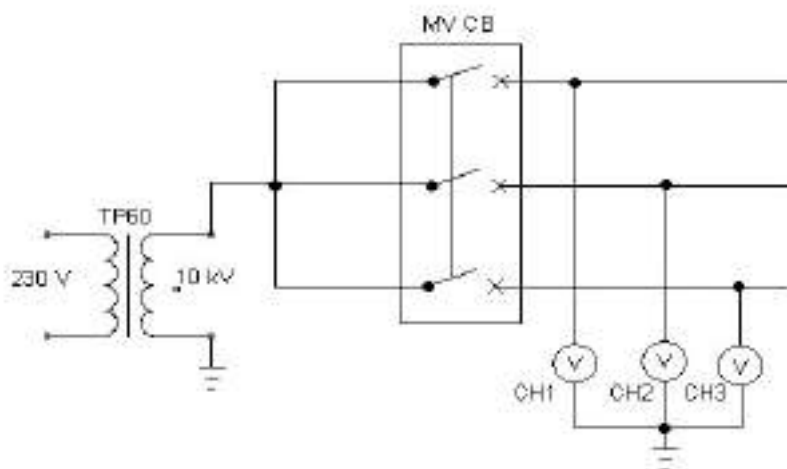


(b) Obwód DC zoom funkcji czasu.

Rysunek 4.4. Napięcie na stykach wyłącznika przy zamykaniu obwodu DC o napięciu źródła 9 V.

rys. 4.8			rys. 4.9		
kanał	$t_{zamk}$	$\Delta t$	kanał	$t_{zamk}$	$\Delta t$
nr.	ms	$\mu s$	nr.	ms	$\mu s$
CH1	71,830	160	CH1	73,160	136
CH2	71,790	120	CH2	73,100	76
CH3	71,670	0	CH3	73,024	0

**Tabela 4.2.** Zestawienie czasów zamykania styków wyłącznika.

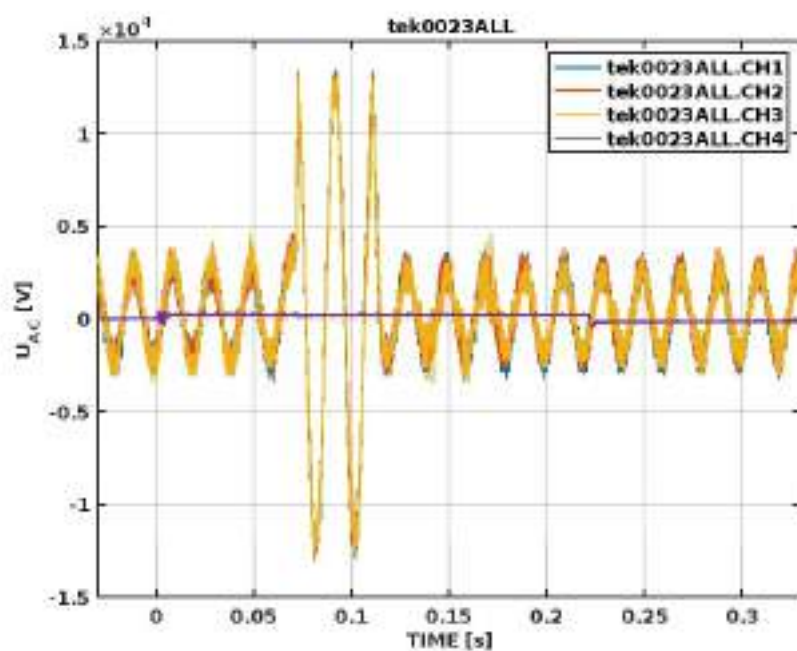


**Rysunek 4.5.** Schemat elektryczny obwodu AC do pomiaru czasów załączania.

Zestawienie czasów wynikających z nierównoczesności zamykania styków przedstawiono odpowiednio dla rys. 4.8 oraz dla rysunku 4.9 w Tabeli 4.2

Próby wykonano dla różnych, losowych kątów załączania napięcia na stykach wyłącznika, w stosunku do przejścia przez "zero" przebiegu sinusoidalnego napięcia AC. Rejestrowano czasy i charakter przebiegów dla różnych długości impulsu sterującego wyłącznikiem, dla krótkich impulsów (rysunek 4.6) jak i długich, gdzie obserwowano tylko same czasy opóźnienia względem załączania kolejnych styków wyłącznika próżniowego.

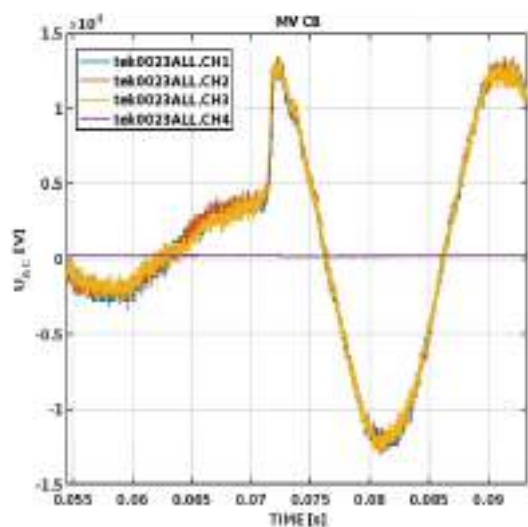
Energia, która wyzwalała się przy zamknięciu styków, generowała pewne trudności w postaci mechanicznych drgań występujących w okolicy styków, co powodowało niedoskonałość kontaktu w miejscu styku sond z punktem pomiarowym, na celi komory próżniowej wyłącznika. Zebrane dane potwierdziły zjawisko niejednoczesności zamykania styków wyłącznika próżniowego, które prawdopodobnie generuje przejściowe stany nieustalone powodujące powtarzające



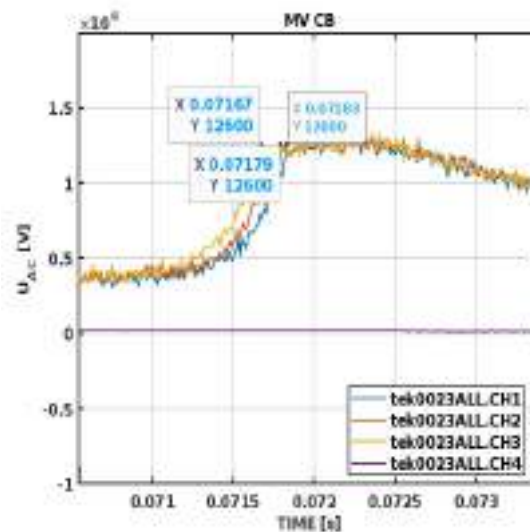
Rysunek 4.6. Rejestracja napięcia dla stanu załączania styków, dla krótkiego impulsu załączająco / wyłączająco.



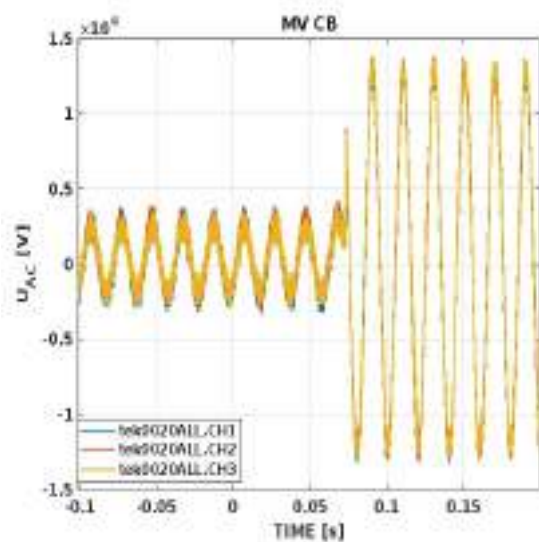
Rysunek 4.7. Widok na stanowisko badawcze podczas badań równoczesności zamykania styków wyłącznika w obwodzie AC SN 15 kV.



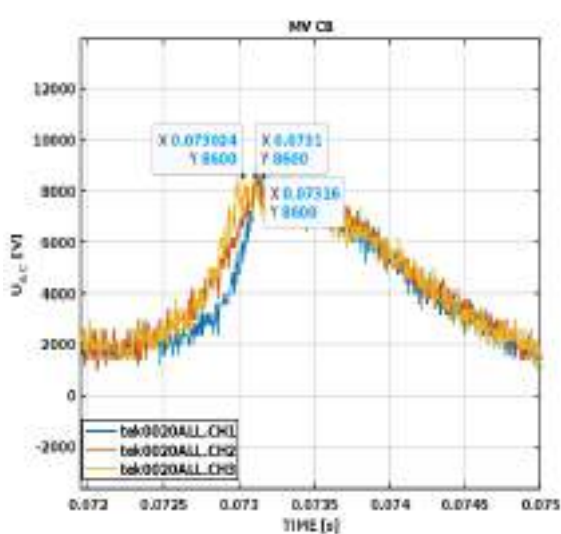
(a) widok od frontu panelu wyłącznika MV CB.



(b) widok od strony komór próżniowych wyłącznika MV CB.

**Rysunek 4.8.** Napięcie na stykach wyłącznika przy zamykaniu obwodu AC o napięciu źródła 15 kV.

(a) Obwód AC SN.



(b) Obwód AC SN w zawężonym oknie czasowym.

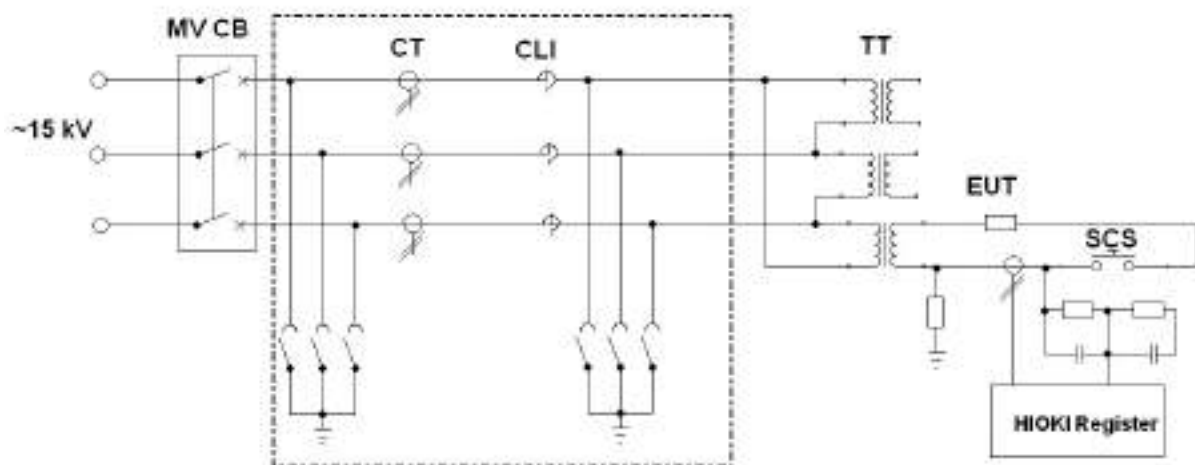
**Rysunek 4.9.** Napięcie na stykach wyłącznika przy zamykaniu obwodu AC SN.

się zaburzenia przedstawione w pomiarach w rozdziale 3.

## Rozdział 5

# Symulacje numeryczne obwodów probierczych

Przedstawione w rozdziale 3, pomiary napięcia po stronie wtórnej transformatora probierczego oraz wyniki pomiaru stanów przejściowych pola elektrycznego (ok. 530 V/m) i magnetycznego (0.4 A/m) w pobliżu nastawnika, pozwoliły na identyfikację występującego zaburzenia pochodzącego głównie od przejściowego pola elektrycznego. Obserwowane zaburzenie to tłumione fale oscylacyjne, wędrujące w obwodzie probierczym zbliżonym do modelu linii długiej, przedstawionego na rys. 5.1, omawiane w publikacji [59].

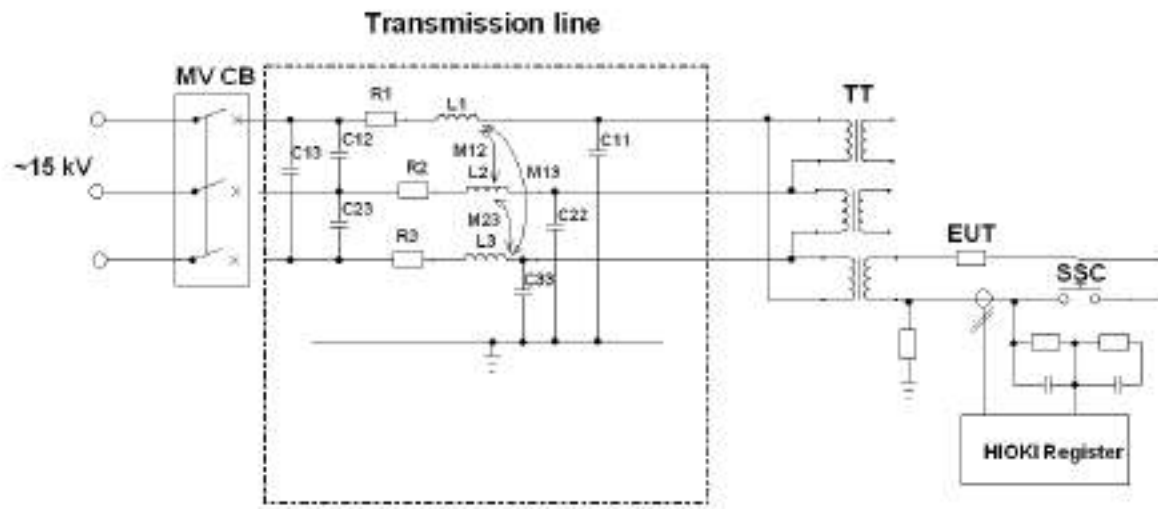


Rysunek 5.1. Schemat obwodu probierczego.

Analiza procedur pomiarowych związanych z realizowanym badaniem typu sugerowała, iż źródłem występujących stanów nieustalonych jest nierównoczesne zamykanie styków wyłącznika próżniowego lub wędrująca fala w układzie wyłącznik-transformator probierczy, bądź zjawisko złożone, na które składają się oba powyższe procesy [44].

Dla rozpoznania źródła generowanych zaburzeń przeprowadzono dwustopniowe komputerowe badania symulacyjne. W pierwszym etapie podjęto próbę odtworzenia toru probierczego,

sytuowanego w laboratorium na dwóch sąsiadujących ścianach (rys. 5.4). Drugi etap symulacji to analiza modelu linii długiej z wykorzystaniem wcześniej wyznaczonych parametrów obwodu przedstawionych na rys. 5.2 oraz porównanie uzyskanych wyników z zarejestrowanymi zakłóceniami napięcia po stronie wtórnej transformatora, (rys. 3.18). Tory prądowe prowadzone na



Rysunek 5.2. Schemat modelu symulacyjnego obwodu probierczego.

ścianie z dławikami oraz wyłącznikiem wielokrotnie zmieniają swój rozstaw względem siebie, jak i względem poprowadzonego na ścianie uziemienia, co wyraźnie widać na rys. 5.3 i 5.4.



Rysunek 5.3. Fragment toru obwodu probierczego.

Wynika to z obecnych w obwodzie elementów, które w przeciwieństwie do podzespołów elektronicznych posiadających niewielkie rozmiary, w energetyce osiągają bardzo duże gabaryty oraz masę od kilkudziesięciu kg (przekładniki) do kilku ton (np. transformatory czy też dławiki). Utrudnia to, a nawet czyni niemożliwym symetryczne ich rozmieszczenie.

Ponieważ dławiki CLI, dedykowane dla poszczególnych faz rozstawione są obok siebie na  $\frac{3}{4}$  szerokości ściany, obwód w miejscach, gdzie faza schodzi na dławik, (rys. 5.4a) bądź na przekładnik prądowy CT, tworzy umowny podział naszego





(a) Rozkład na ścianie z wyłącznikiem i dławikami



(b) Rozkład na suficie z transformatorami probierczymi.

**Rysunek 5.4.** Rozkład torów prądowych w laboratorium.

toru, dzieląc go na  $n$  mniejszych bloków, dla których można mówić o zachowanej stałej geometrii obwodu na odcinku  $\Delta l$ . Rozpatrywany przez nas model będzie składał się z sumy  $n$  bloków, dla których geometria rozstawu szyn nie ulega zmianie. Tory prądowe w LWP wykonane są z cylindrycznych prętów miedzianych o średnicy  $d = 8 \text{ mm}$ . Schemat uproszczonego modelu, przedstawiony na rysunku 5.2, nie uwzględnia wszystkich zmian w geometrii układu. Dla rozpoznania problemu uwzględniono wstępnie trzy bloki o najdłuższym torze.

Rozpatrywany układ zastępczy obwodu probierczego jest zbliżony do modelu trójfazowej linii długiej. Parametry pojemnościowe i indukcyjne na jednostkę długości równą  $1 \text{ m}$  zostały wyznaczone drogą symulacji z wykorzystaniem zebranych wymiarów geometrycznych torów prądowych (przekroje, odległości ułożenia względem siebie poszczególnych faz oraz odległości od masy odniesienia, którą jest sufit i ściana). Obliczenia wykonano w środowisku Ansys i Matlab [68].

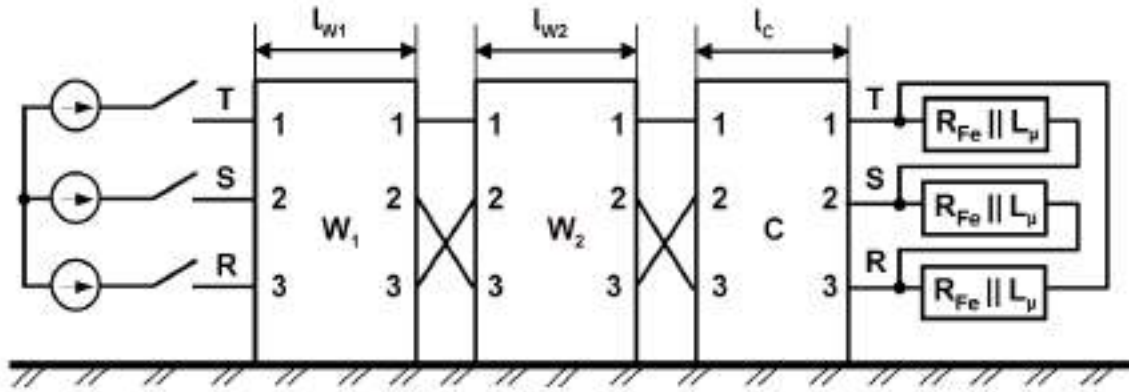
Ponieważ ułożenie toru nie jest równomierne, do wyznaczenia parametrów obwodu skorzystano ze schematu zastępczego linii, wprowadzając pewne uproszczenie. Założono, że geometria jest stała dla trzech odcinków toru (rysunek 5.5). Bloki W1, W2 ułożone na ścianie z wyłącznikiem i dławikami (układ zgodny z rysunkiem 5.6) oraz C ułożony na suficie nad transformatorami probierczymi (układ zgodny z rysunkiem 5.7).

Parametry bloków, takie jak: długość, odległość od ściany i sufitu, odległość między torami zebrane są w Tabeli 5.1. Ułożenie torów prądowych w LWP zilustrowane jest zdjęciami na rysunku 5.4.

Pozwoliło to na wyznaczenie parametrów zastępczych obwodu takich jak: pojemności własne i wzajemne oraz indukcyjności własne i wzajemne.

Wykorzystując model rozkładu pola elektrostatycznego w układzie trzech przewodów o

przekroju kołowym, wykonano obliczenie energii, na jednostkę długości, zgromadzonej w polu elektrycznym. Z uzyskanych wyników wyznaczono pojemności cząstkowe (własne i wzajemne) korzystając z zależności  $W = CU^2/2$ .



**Rysunek 5.5.** Kaskada trzech linii długich przyjętych w symulacjach numerycznych toru zasilającego transformator probierczy.

Celem obliczenia pojemności cząstkowych, czyli trzech pojemności własnych  $c_{10}, c_{20}, c_{30}$  i trzech pojemności wzajemnych  $c_{12}, c_{31}, c_{23}$ , wykonano sześć symulacji, dla których związek między energią, przyłożonym napięciem i pojemnościami przedstawiono w formie równania macierzowego poniżej [67], [55], [24], [23], [48].

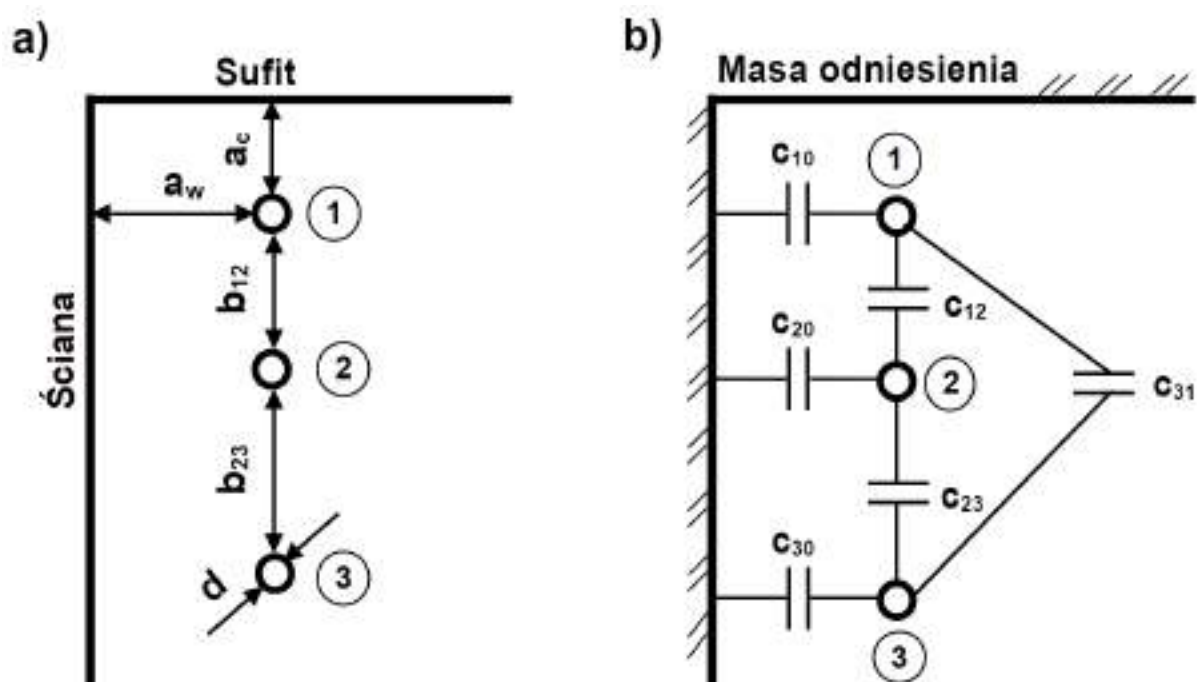
$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_{10} \\ c_{20} \\ c_{30} \\ c_{12} \\ c_{31} \\ c_{23} \end{bmatrix} = \frac{2}{U^2} \begin{bmatrix} W_{123} \\ W_3 \\ W_2 \\ W_1 \\ W_{31} \\ W_{23} \end{bmatrix} \quad (5.1)$$

Wskaźniki występujące w indeksach energii w równaniu (5.1) oznaczają linie, do których przyłożono napięcie  $U$ . Brak numeru linii w indeksie jest informacją o zwarcie tej linii z masą odniesienia (np.  $W_{23}$  oznacza przyłożenie napięcia do linii 2 i 3 przy równoczesnym zwarcu linii 1 z masą odniesienia).

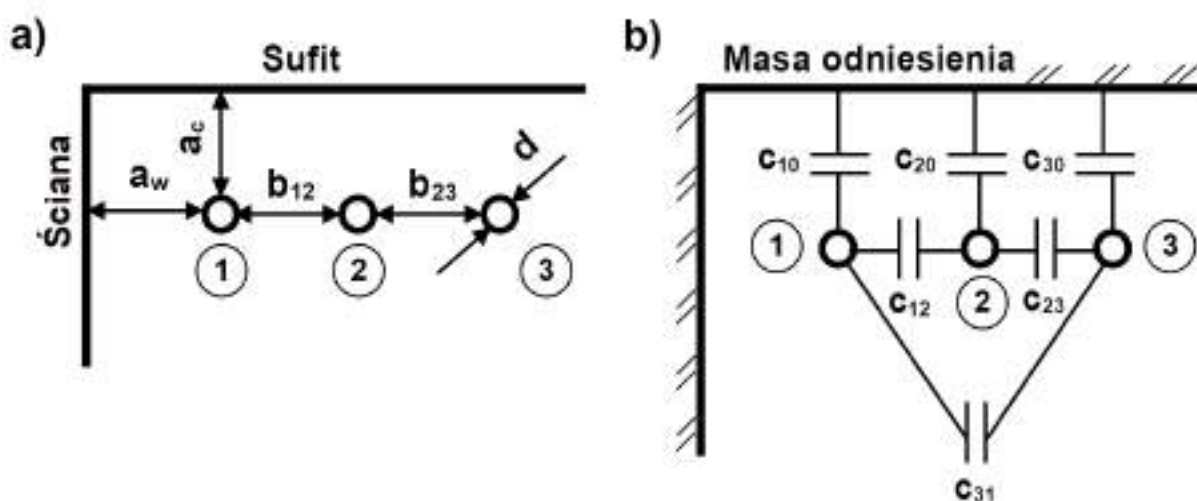
Z wektora pojemności cząstkowych, występującego w równaniu (5.1) można zbudować macierz kwadratową 3x3 pojemności cząstkowych linii trójprzewodowej

$$\mathbf{c} = \begin{bmatrix} c_{10} & c_{12} & c_{13} \\ c_{21} & c_{20} & c_{23} \\ c_{31} & c_{32} & c_{30} \end{bmatrix} \quad (5.2)$$





Rysunek 5.6. Przekrój poprzeczny ilustrujący geometrię odcinka linii równoległego do ściany a), pojemności cząstkowe (własne i wzajemne) odcinka linii b).



Rysunek 5.7. Przekrój poprzeczny ilustrujący geometrię odcinka linii równoległego do sufitu a), pojemności cząstkowe (własne i wzajemne) odcinka linii b).

W budowie macierzy (5.2) korzysta się z właściwości symetrii tzn.  $c_{12} = c_{21}$ ,  $c_{13} = c_{31}$  oraz  $c_{23} = c_{32}$ .

Z elementów macierzy cząstkowej pojemności można zbudować macierz globalną pojemności przedstawioną w [51]

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} c_{10} + c_{12} + c_{13} & -c_{12} & -c_{13} \\ -c_{21} & c_{20} + c_{21} + c_{23} & -c_{23} \\ -c_{31} & -c_{32} & c_{30} + c_{31} + c_{32} \end{bmatrix} \quad (5.3)$$

Zgodnie z [51] iloczyn macierzy globalnych indukcyjności i pojemności  $\mathbf{L}$  i  $\mathbf{C}$  jest równy iloczynowi przenikalności elektrycznej  $\epsilon_0$  i magnetycznej  $\mu_0$

$$\mathbf{LC} = \mu_0 \epsilon_0 \mathbf{1}_3 \quad (5.4)$$

przy czym macierz  $\mathbf{1}_3$  jest jednostkową macierzą diagonalną, kwadratową, o wymiarze 3x3

$$\mathbf{1}_3 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.5)$$

Zależność opisana równaniem (5.4) umożliwia wyznaczenie macierzy globalnej indukcyjności  $\mathbf{L}$  [52] z macierzy globalnej pojemności  $\mathbf{C}$  uzyskanych ze wzoru (5.3)

$$\mathbf{L} = \mu_0 \epsilon_0 \mathbf{C}^{-1} \quad (5.6)$$

**Tabela 5.1.** Parametry odcinków toru prądowego zasilającego transformator probierczy.

Nazwa bloku	$l$ [ m ]	$a_w$ [ mm ]	$a_c$ [ mm ]	$b_{12}$ [ mm ]	$b_{23}$ [ mm ]
$W_1$	2.96	400	720	300	980
$W_2$	2.03	400	720	600	620
$C$	7.97	400	400	300	300

Macierz cząstkowa  $\mathbf{c}_{W1}$  pierwszego odcinka toru zasilającego  $W_1$  na ścianie jest następująca:

$$\mathbf{c}_{W1} = \begin{bmatrix} 8.9323 & 2.0178 & 0.1725 \\ 2.0178 & 8.5500 & 0.4302 \\ 0.1725 & 0.4302 & 9.8997 \end{bmatrix} pF/m$$

Stąd parametry macierzy globalnych  $\mathbf{C}_{W1}$  i  $\mathbf{L}_{W1}$  tego odcinka są następujące:

$$\mathbf{C}_{W1} = \begin{bmatrix} 11.1226 & -2.0178 & -0.1725 \\ -2.0178 & 10.998 & -0.4302 \\ -0.1725 & -0.4302 & 10.5024 \end{bmatrix} pF/m; \quad \mathbf{L}_{W1} = \begin{bmatrix} 1.038 & 0.191 & 0.025 \\ 0.191 & 1.051 & 0.046 \\ 0.025 & 0.046 & 1.065 \end{bmatrix} \mu H/m$$

Macierz cząstkowa  $\mathbf{c}_{W2}$  drugiego odcinka toru zasilającego  $W_2$  na ścianie jest następująca

$$\mathbf{c}_{W2} = \begin{bmatrix} 9.7342 & 0.8892 & 0.2062 \\ 0.8892 & 8.8944 & 0.9272 \\ 0.2062 & 0.9272 & 9.4414 \end{bmatrix} pF/m$$

Dlatego parametry macierzy globalnych  $\mathbf{C}_{W2}$  i  $\mathbf{L}_{W2}$  tego odcinka przyjmują następujące wartości

$$\mathbf{C}_{W2} = \begin{bmatrix} 10.8296 & -0.8892 & -0.2062 \\ -0.8892 & 10.7108 & -0.9272 \\ -0.2062 & -0.9272 & 10.5748 \end{bmatrix} pF/m; \quad \mathbf{L}_{W2} = \begin{bmatrix} 1.038 & 0.089 & 0.028 \\ 0.089 & 1.057 & 0.094 \\ 0.028 & 0.094 & 1.064 \end{bmatrix} \mu H/m$$

Macierz cząstkowa  $\mathbf{c}_C$  odcinka toru zasilającego  $C$  na suficie jest następująca

$$\mathbf{c}_C = \begin{bmatrix} 9.236 & 1.785 & 0.515 \\ 1.785 & 7.571 & 2.016 \\ 0.515 & 2.016 & 8.359 \end{bmatrix} pF/m$$

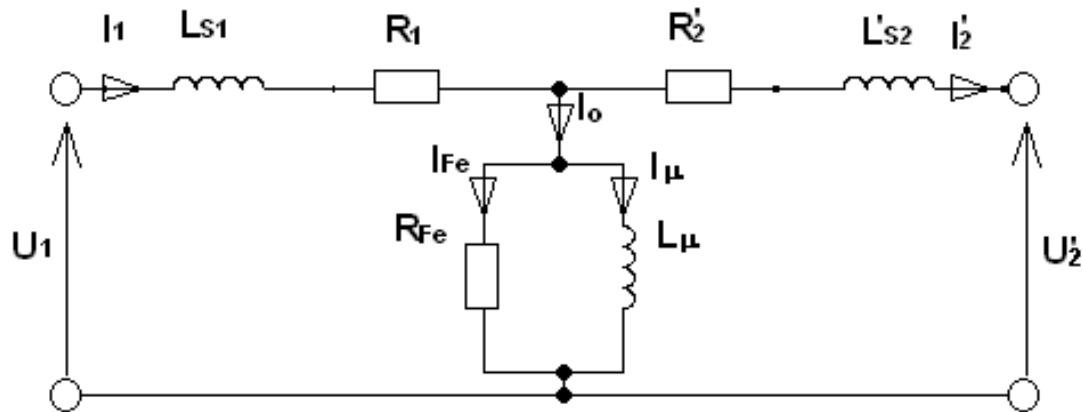
W konsekwencji parametry macierzy globalnych  $\mathbf{C}_C$  i  $\mathbf{L}_C$  odcinka toru zasilającego  $C$  na suficie są następujące

$$\mathbf{C}_C = \begin{bmatrix} 11.536 & -1.785 & -0.515 \\ -1.785 & 11.372 & -2.016 \\ -0.515 & -2.016 & 10.890 \end{bmatrix} pF/m; \quad \mathbf{L}_C = \begin{bmatrix} 0.997 & 0.171 & 0.079 \\ 0.171 & 1.044 & 0.201 \\ 0.079 & 0.201 & 1.066 \end{bmatrix} \mu H/m$$

Przyjmując rezystywność miedzi, z której zbudowany jest tor zasilający  $\rho = 1.68 \cdot 10^{-8} \Omega m$  oraz pomijając rezystancję masy odniesienia, rezystancje wzdłużne wszystkich odcinków toru na jednostkę długości są takie same i wynoszą

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} 0.334 & 0 & 0 \\ 0 & 0.334 & 0 \\ 0 & 0 & 0.334 \end{bmatrix} m\Omega/m$$

Obciążeniem obwodu są trzy transformatory jednofazowe, których strony pierwotne połączone są w trójkąt. Schemat zastępczy jednofazowego transformatora z parametrami strony wtórnej, przeliczonymi na stronę pierwotną pokazany jest na rysunku 5.8. Składowe elementy obwodu to: reaktancja magnesowania  $X_\mu$ , rezystancja strat w rdzeniu  $R_{Fe}$  oraz rezystancja uzwojenia strony pierwotnej  $R_1$ , strony wtórnej przeliczonej na pierwotną  $R'_2$  oraz indukcyjność rozproszenia strony pierwotnej  $L_1$  oraz strony wtórnej, przeliczonej na pierwotną  $L'_2$ . Re-



Rysunek 5.8. Schemat zastępczy transformatora [11].

zystancję odzwierciedlającą straty w rdzeniu wyznaczono korzystając ze strat jałowych  $\Delta P_{Fe}$  transformatora [27], których wartość jest podana na tabliczce znamionowej, patrz rysunku 2.4.

$$R_{Fe} = U_{1N}^2 / \Delta P_{Fe} \quad (5.7)$$

Przyjmując napięcie znamionowe strony pierwotnej  $U_{1N} = 15 \text{ kV}$  oraz straty jałowe  $\Delta P_{Fe} = 3412 \text{ W}$ ,  $R_{Fe}$  wynosi  $65,94 \text{ k}\Omega$ .

Korzystając z dokumentacji badań kontrolnych transformatora i zamieszczonych tam danych, wyznaczono reaktancję  $X_\mu$ . Pomiary strat w ramach badań kontrolnych wykonano zasilając stronę wtórną transformatora napięciem  $U_o = 800 \text{ V}$ . Przy rozwartej stronie pierwotnej, pomierzono prąd  $I_o = 12 \text{ A}$  w układzie Ii0 (transformator w układzie jednofazowym, brak przesunięcia fazowego między stroną pierwotną a wtórną).

Zgodnie ze schematem zastępczym transformatora dla tego stanu (rys. 5.8) prąd biegu jałowego  $I_o$  to suma składowej czynnej  $I_{Fe}$  oraz składowej bierniej prądu jałowego  $I_\mu$ , zwanej prądem magnesującym. Znając rezystancję  $R_{Fe}$ , wyznaczoną ze wzoru (5.7) można obliczyć reaktancja  $X_\mu$  z następującej zależności

$$X_{\mu}^2 = \frac{R_{Fe}^2 U^2}{R_{Fe}^2 I_o^2 - U^2} \quad (5.8)$$

Dla rozpatrywanego transformatora wynosi ona 66,66  $\Omega$ . Zatem indukcyjność magnesowania  $L_{\mu}$  zgodnie z równaniem (5.9)

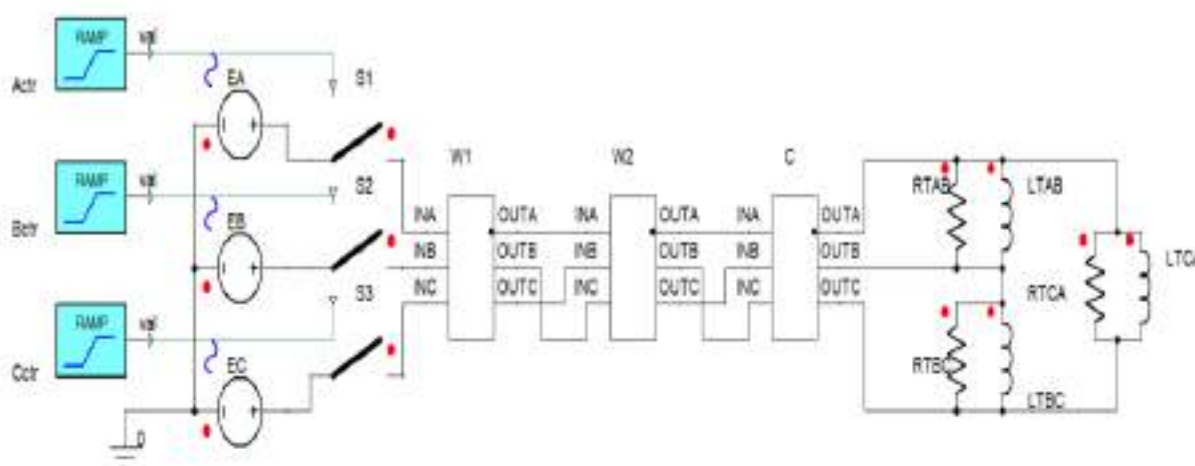
$$L_{\mu} = \frac{X_{\mu}}{2\pi f} \quad (5.9)$$

wynosi 212,2 mH.

Przy czym  $f = 50$  Hz jest częstotliwością sieciową pracy transformatora.

Badania sprawdzenia równoczesności zamykania styków zaprezentowano w rozdziale 4. W obwodzie AC 15 kV zaobserwowano opóźnienia od 80  $\mu$ s do 480  $\mu$ s. Czasy te nie są krytyczne dla poprawnego działania wyłącznika. Gdy uwzględnimy jednak częstotliwości występujących zaburzeń w środowisku LWP, czyli oscylacyjnych fal tłumionych o częstotliwościach przekraczających 25 MHz, to czasy te mogą mieć duże znaczenie przy powstawaniu w torach prądowych wędrujących fal związanych z przepięciami.

Komputerowe badania symulacyjne wykonano w Ansysie [68], dla uproszczonego układu zrealizowanego z kaskady trzech bloków W1, W2 oraz C odpowiadających poszczególnym ścianom, jak pokazano na schemacie przedstawionym na rysunku 5.9.

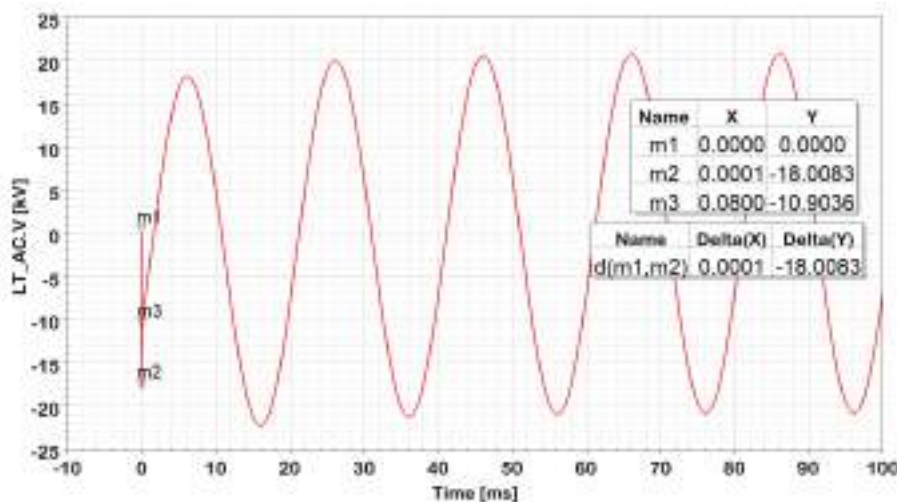


**Rysunek 5.9.** Model symulacyjny obwodu SN prób zwarciovych.

Schemat zastępczy zastosowany do symulacji zjawisk występujących podczas nierównoczesnego zamykania styków uproszczonego obwodu po stronie średniego napięcia wykonano w Ansysie. Tor zasilający odtworzono jako kaskadę trzech segmentów linii o parametrach skupionych, (patrz rysunek 5.9).

Wyniki symulacji oscylacji występujących podczas równoczesnego zamknięcia styków w fazach A i C w chwili  $t = 0$  s oraz opóźnienia zamknięcia styku fazy B przedstawione są na rysunkach:

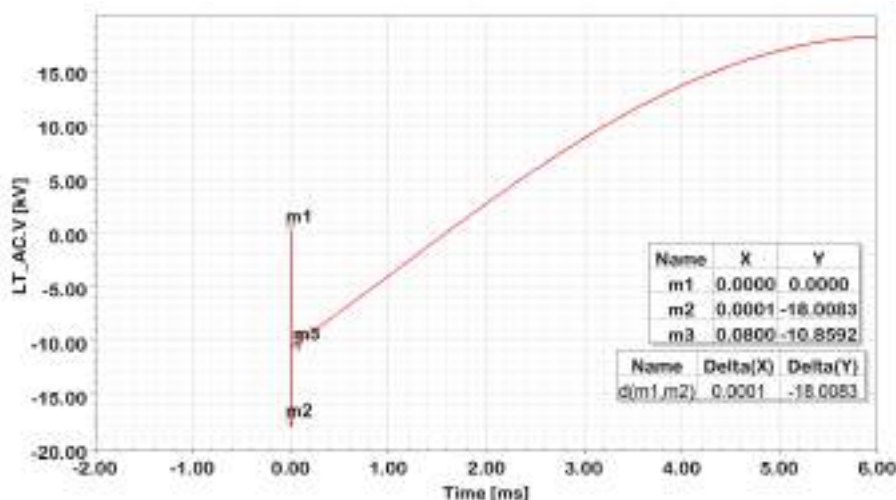
- od rys. 5.10 do rys. 5.12 dla opóźnienia  $80 \mu s$ ,
- od rys. 5.13 do rys. 5.15 dla opóźnienia  $800 ns$ ,
- rys. 5.16 i rys. 5.17 dla opóźnienia  $200 ns$ ,
- od rys. 5.18 do rys. 5.20 dla opóźnienia  $5 ms$ .



**Rysunek 5.10.** Wynik symulacji napięcia  $U_{AC}$  na uzwojeniu transformatora, przebieg wolnozmienny dla czasu opóźnienia zamknięcia styku w fazie B równego  $80 \mu s$ .

Wyniki symulacji analizowane w układzie WWC dla różnych czasów załączania styku wyłącznika fazy B pozwoliły na obserwację stałej tłumienia oscylacji występujących w chwili pierwszego stanu nieustalonego. W rozpatrywanym obwodzie szybkość tłumienia oscylacji jest taka sama i nie zależy od opóźnienia zamknięcia styku. Przy krótkich czasach opóźnienia załączania styku fazy B ( $800 ns$  na rysunku 5.15 oraz  $200 ns$  na rysunku 5.16), obserwator może mieć złudne wrażenie występowania wolniejszego czasu tłumienia, który w rzeczywistości wynika ze zjawiska nakładania się stanów nieustalonych (pierwszego wynikającego z zamknięcia styków w fazach A oraz C w chwili  $t = 0$  s, oraz drugiego, opóźnionego o czas odpowiednio  $800 ns$  (5.15) oraz  $200 ns$  (5.16)).

Ciekawe zjawisko zasygnalizowane w publikacji [47] uwidocznione zostało w wynikach symulacji przebiegów wolnozmiennych: rys. 5.17, rys. 5.18, rys. 5.13 oraz rys. 5.10. Autorzy



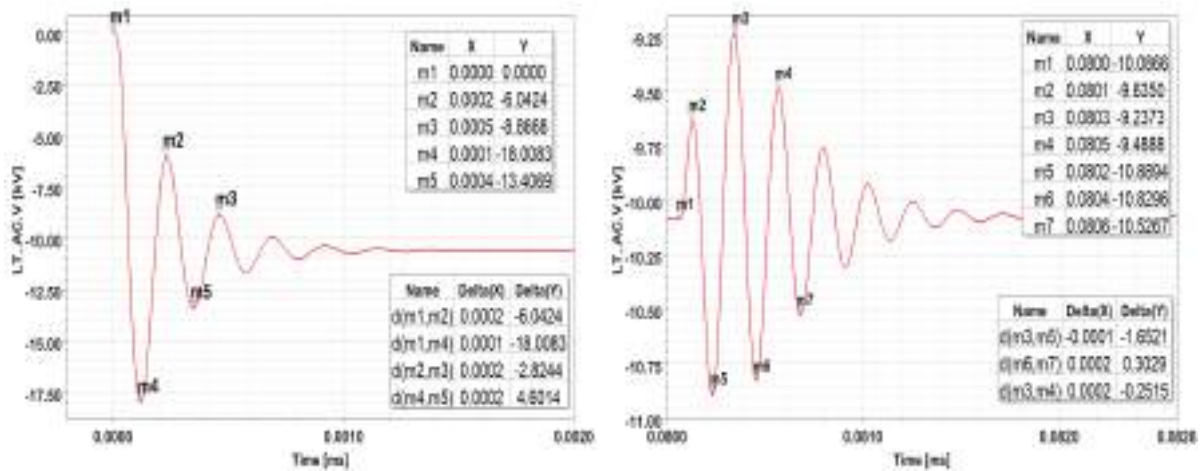
**Rysunek 5.11.** Wynik symulacji napięcia  $U_{AC}$  na uzwojeniu transformatora, podgląd składowych szybkozmiennych, dla czasu opóźnienia zamknięcia styku w fazie B równego  $80 \mu s$ .

J. Maksymiuk oraz J. Nowicki opisali zjawisko stabilizacji amplitudy sygnału, która w początkowej fazie znacznie odbiega od wartości zadanej, spodziewanej na zaciskach uzwojenia transformatora gdzie obserwujemy wyniki symulacji.

W kolejnym etapie badań wykonano komputerowe badania symulacyjne obwodu dla trzech różnych czasów zamknięcia styków w poszczególnych fazach: faza A zamknięcie styku po 5 ms, faza B zamknięcie styku po 80  $\mu s$ , faza C zamknięcie styku w chwili  $t = 0$ s. Wyniki symulacji przedstawiono na rysunkach od 5.21 do 5.24.

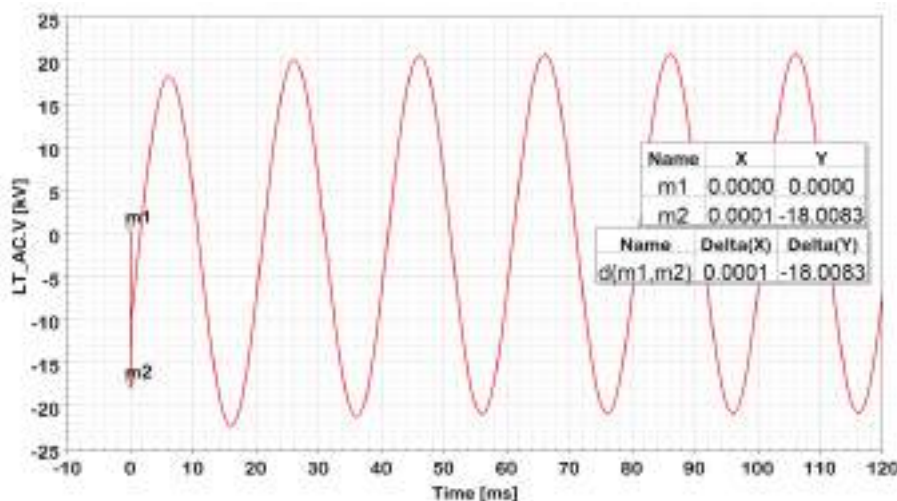
Stany nieustalone występujące przy nierównoczesnym zamykaniu styków można podzielić na trzy etapy [76], pierwszy związany z częstotliwościami rzędu MHz, wg. [47] rys. 4.9 rozdziału 4.1.2 przedział A, obejmuje zakres  $\mu s$ , kolejny przedział B definiowany jest dla  $ms$ , a ostatni C, w której obserwowany przebieg jest zgodny z oczekiwaniami, związany jest z czasem rzędu s. Obszary te widoczne na rysunkach przedstawiających wyniki symulacji w obwodzie trójfazowym gdzie styki w poszczególnych fazach zamykano dla różnych czasów opóźnienia względem  $t = 0$  s. Wybrane w symulacjach czasy zamknięcia styków to 80  $\mu s$  dla fazy A (rys. 5.23a), faza C zamknięcie w chwili  $t = 0$  s, (rys. 5.22a), dla fazy B zadany czas zamknięcia styku względem 0 wynosił 5 ms, co powoduje, że nie widać na przedstawionym przebiegu szybkozmiennym rys. 5.24 zjawiska tłumienia związanego z obszarem B. Na rysunku 5.24 zauważalny jest tylko szybkozmienny stan nieustalony.

W ostatnim etapie badań wykonano komputerowe badania symulacyjne obwodu, w którym bloki W1 i W2 są nadal obwodami o elementach skupionych, natomiast część sufitowa potraktowana jest linia długa, zamodelowana układem drabinkowym składającym się z czterech segmentów, jak pokazano na rysunku 5.25.



(a) Stan nieustalony występujący w obwodzie po zamknięciu styków w fazach A i C, rysunek 5.11 marker 1. (b) Stan nieustalony występujący na skutek zamknięcia styku w fazie B, na rysunku 5.11 marker 3.

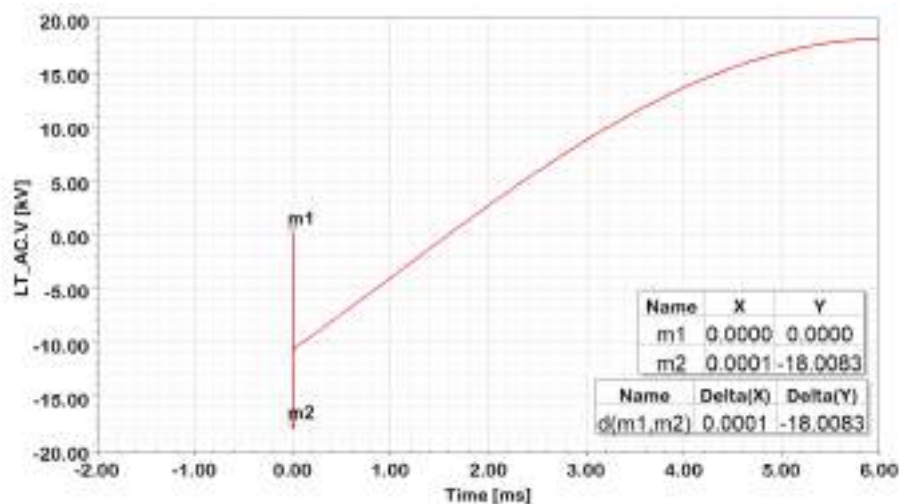
**Rysunek 5.12.** Wynik symulacji dla czasu opóźnienia zamykania styku w fazie B równej 80  $\mu$ s.



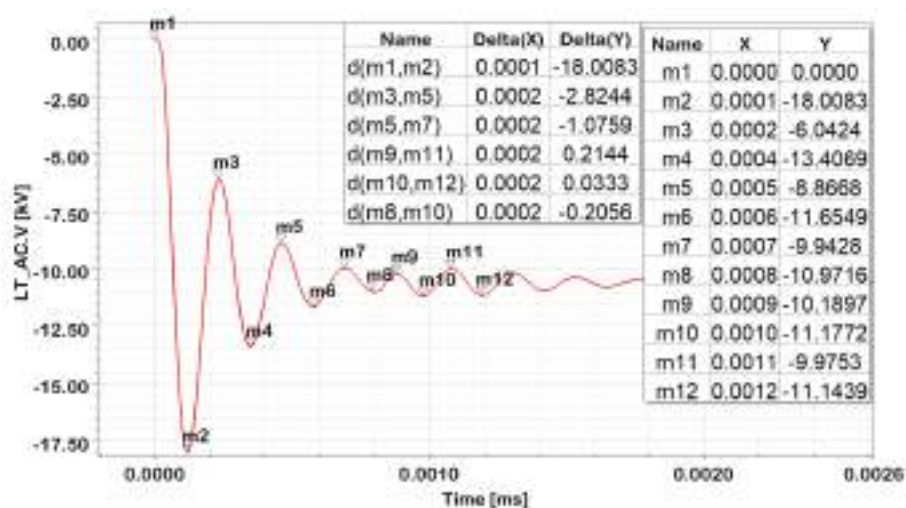
**Rysunek 5.13.** Wynik symulacji napięcia  $U_{AC}$  na uzwojeniu transformatora, przebieg wolnozmienny dla czasu opóźnienia zamknięcia styku w fazie B równego 800 ns.

Przebiegi tych symulacji, przedstawione na rysunkach 5.26-5.28 są bardzo podobne do przebiegów, w których cały tor modelowany był kaskadą trzech obwodów o parametrach skupionych. Świadczy to o tym, że tor zasilający dla zjawisk przejściowych, powstających w wyniku zamykania styków wyłącznika SN nie jest linią długą.

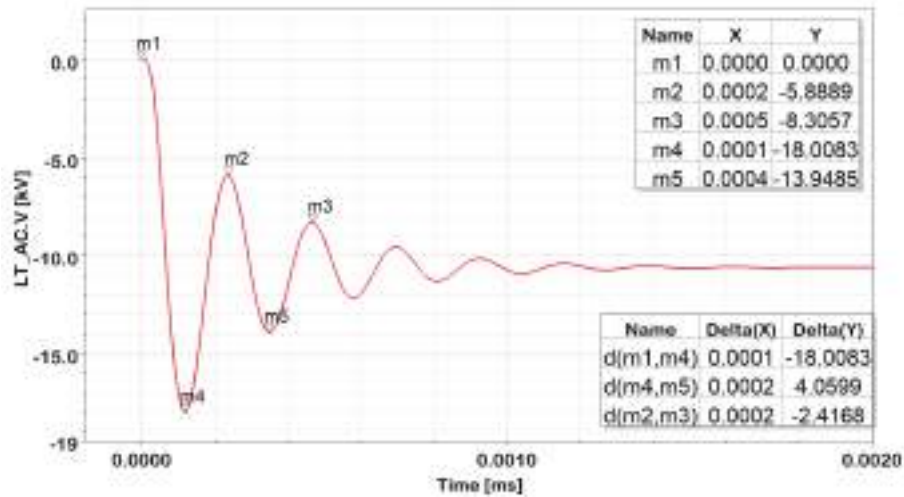




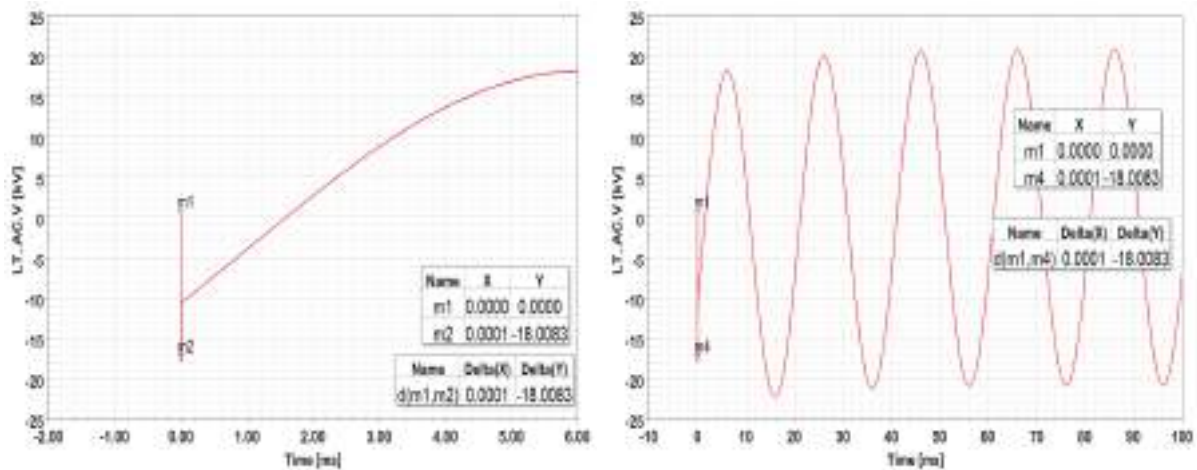
**Rysunek 5.14.** Wynik symulacji napięcia  $U_{AC}$  na uzwojeniu transformatora, podgląd składowych szybkozmiennych, dla czasu opóźnienia zamknięcia styku w fazie B równego 800 ns.



**Rysunek 5.15.** Wynik symulacji dla nakładających się oscylacji występujących przy zamknięciu styków wyłącznika SN fazy B po 800 ns względem pozostałych faz.

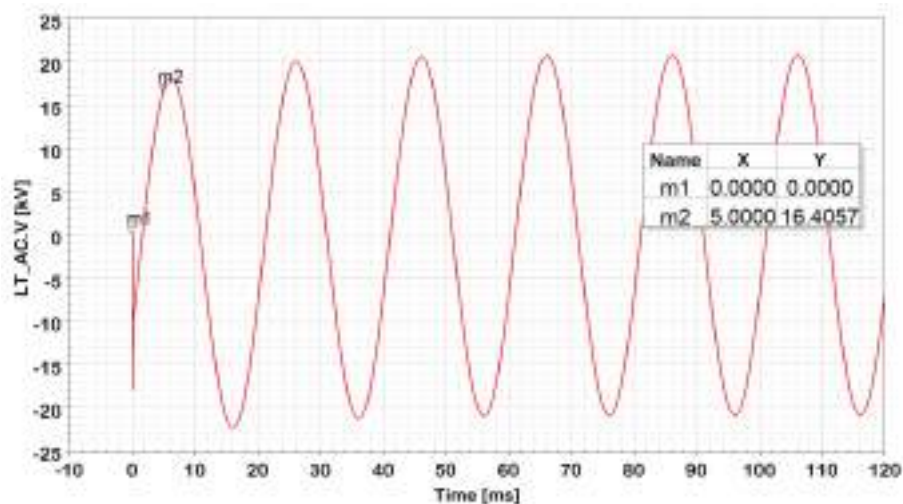


**Rysunek 5.16.** Stan nieustalony wywołany opóźnionym zamknięciem styku fazy B, po 200 ns względem pozostałych faz.

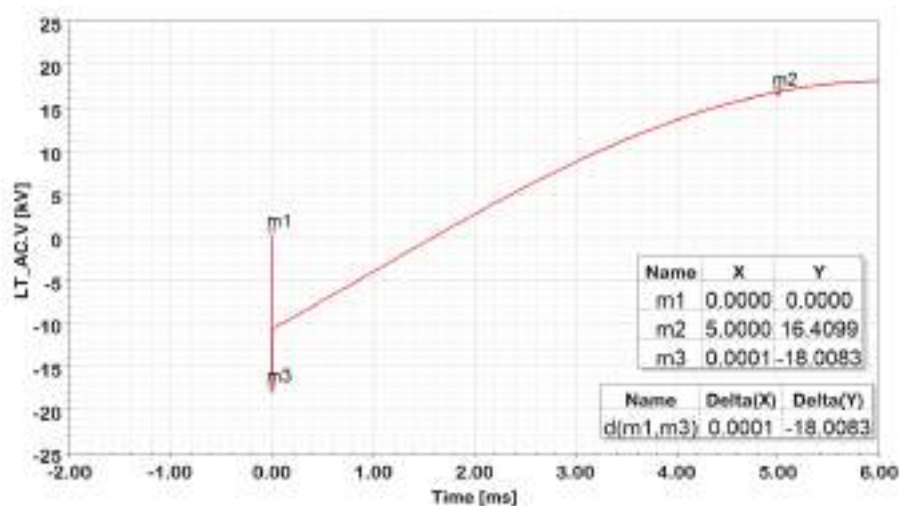


(a) Wynik symulacji napięcia  $U_{AC}$  na uzwojeniu transformatora, pod- (b) Wynik symulacji napięcia  $U_{AC}$  na uzwojeniu transformatora, prze-  
gląd składowych szybkozmiennych, dla czasu opóźnienia zamknięcia bieg wolnozmienny dla czasu opóźnienia zamknięcia styku w fazie B  
styku w fazie B równego 200 ns. równego 200 ns.

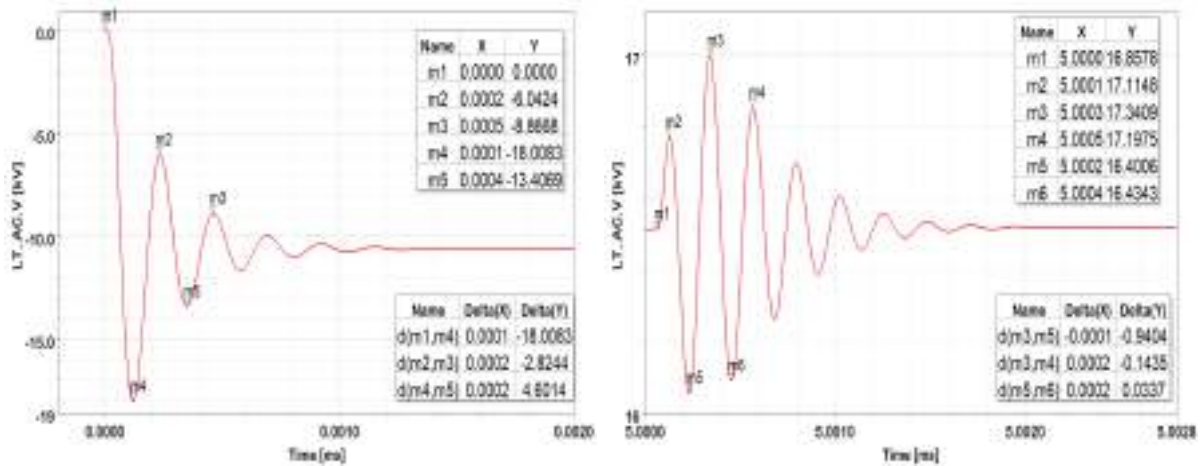
**Rysunek 5.17.** Wynik symulacji dla czasu opóźnienia zamykania styku w fazie B równego 200 ns.



**Rysunek 5.18.** Wynik symulacji napięcia  $U_{AC}$  na uzwojeniu transformatora, przebieg wolnozmienny dla czasu opóźnienia zamknięcia styku w fazie B równego 5 ms.

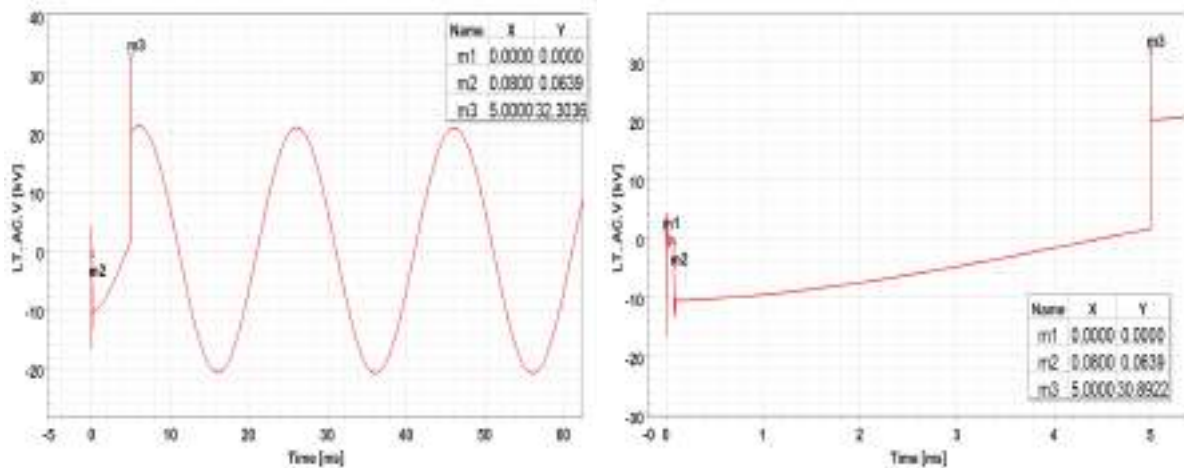


**Rysunek 5.19.** Wynik symulacji napięcia  $U_{AC}$  na uzwojeniu transformatora, podgląd składowych szybkozmiennych, dla czasu opóźnienia zamknięcia styku w fazie B równego 5 ms.



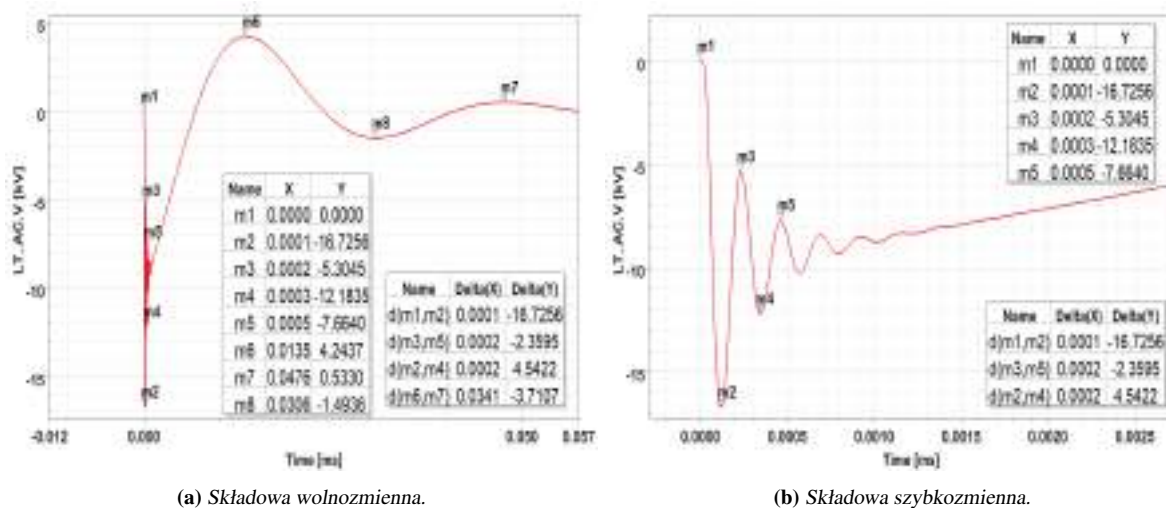
(a) Stan nieustalony występujący w obwodzie po zamknięciu styków w fazach A i C, rysunek 5.19 marker 1. (b) Stan nieustalony występujący na skutek zamknięcia styku w fazie B, na rysunku 5.19 marker 2.

**Rysunek 5.20.** Wynik symulacji dla czasu opóźnienia zamykania styku w fazie B równej 5 ms.

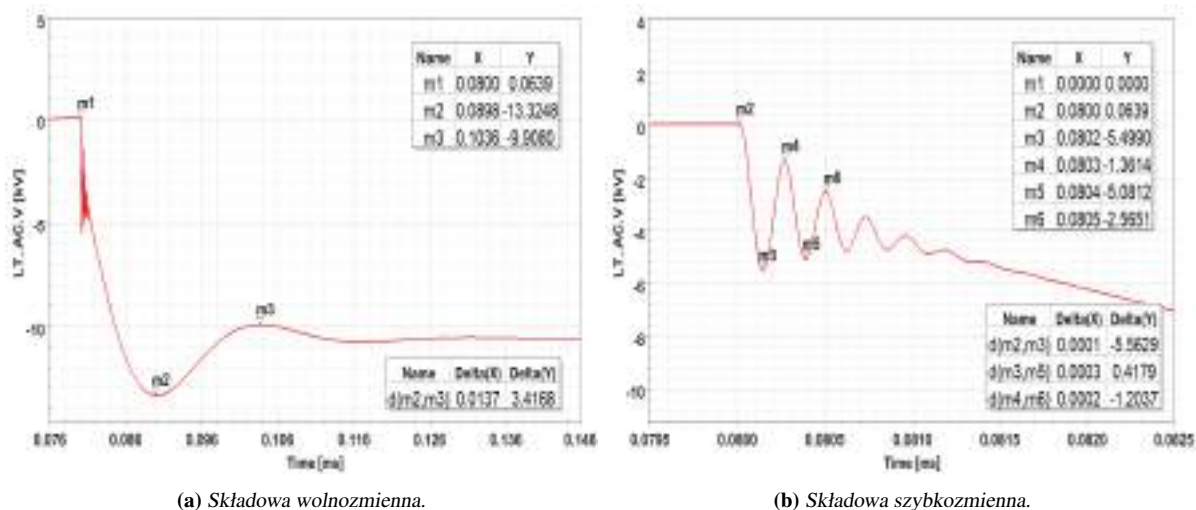


(a) Wynik symulacji napięcia  $U_{AC}$  na uzwojeniu transformatora, przegląd składowych wolnozmienny, dla różnych czasów zamknięcia styków w poszczególnych fazach. (b) Wynik symulacji napięcia  $U_{AC}$  na uzwojeniu transformatora, przebieg szybkozmienny, dla różnych czasów zamknięcia styków w poszczególnych fazach.

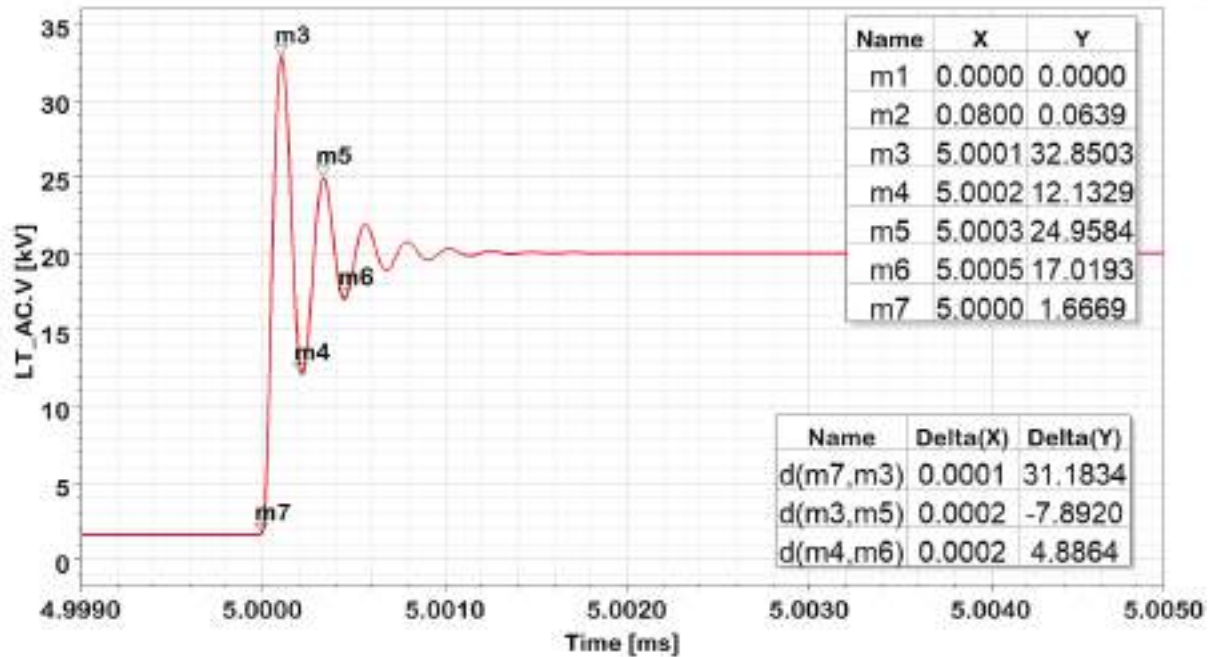
**Rysunek 5.21.** Wynik symulacji dla różnych czasów załączania styków w każdej fazie obwodu probierczego.



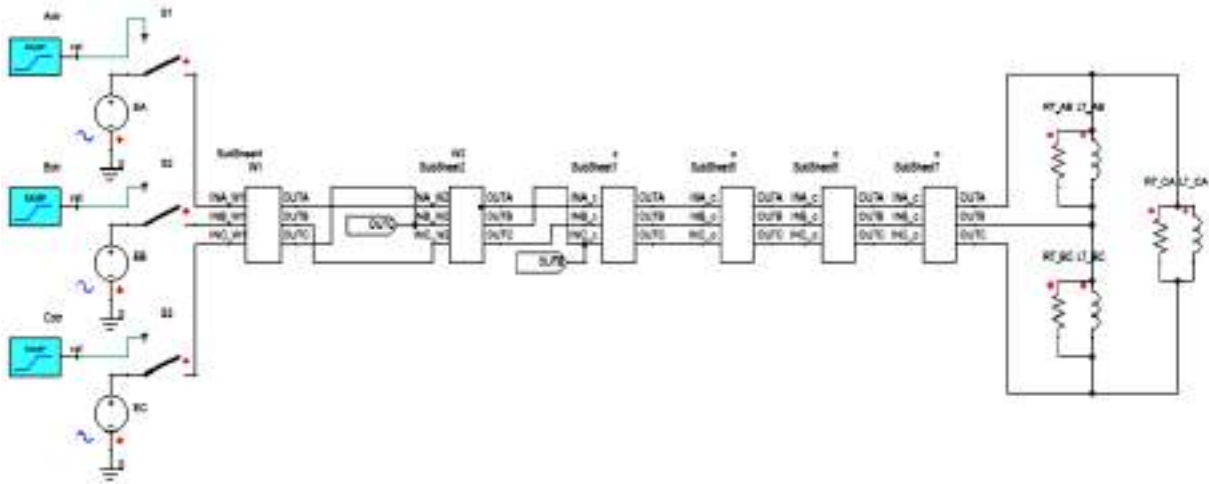
Rysunek 5.22. Stan nieustalony występujący w obwodzie po zamknięciu styku w fazie C, rysunek 5.21b marker 1.



Rysunek 5.23. Stan nieustalony występujący w obwodzie po zamknięciu styku w fazie A, rysunek 5.21b marker 2.

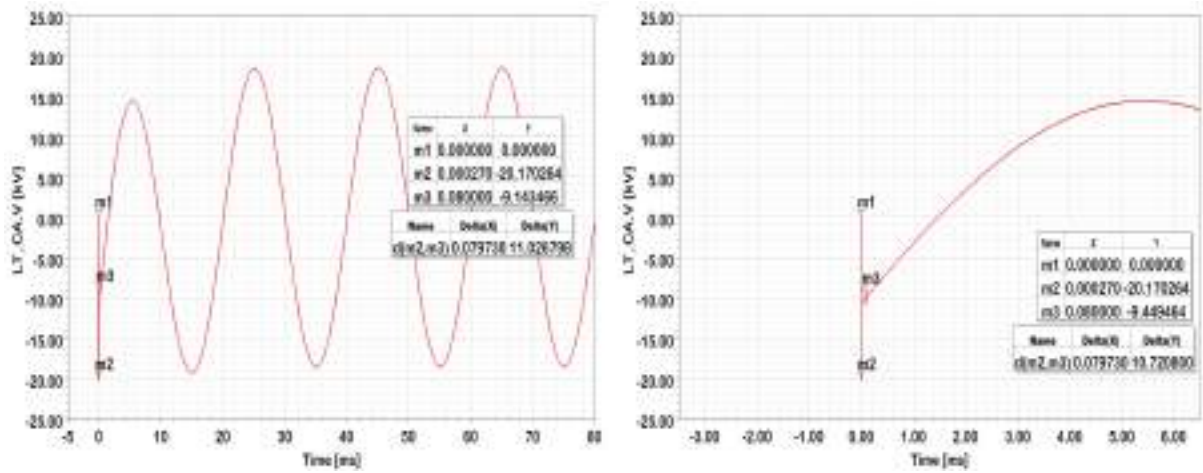


Rysunek 5.24. Stan nieustalony występujący w obwodzie po zamknięciu styku w fazie B, rysunek 5.21b marker 3.

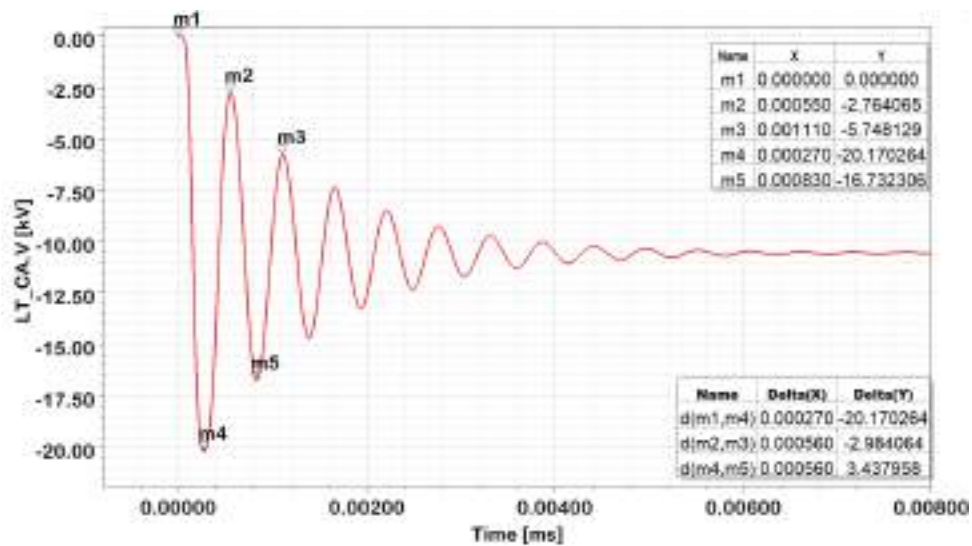


Rysunek 5.25. Schemat zastępczy zastosowany w Ansysie do symulacji zjawisk występujących podczas nierównoczesnego zamykania styków obwodu po stronie średniego napięcia. Odcinek sufitowy obwodu potraktowano jako linię długą zamodelowaną z wykorzystaniem układu drabinkowego składającego się z 4 segmentów drabinki.

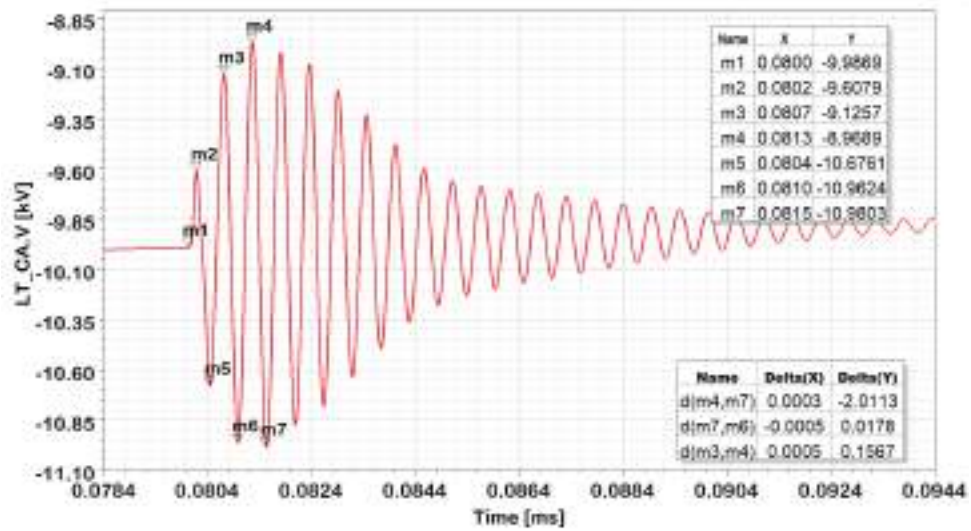




Rysunek 5.26. Wynik symulacji dla czasu opóźnienia zamykania styku w fazie B równej  $80 \mu\text{s}$ .



Rysunek 5.27. Stan nieustalony występujący w obwodzie po zamknięciu styków w fazach A i C, rysunek 5.26b marker 1.



Rysunek 5.28. Wynik symulacji dla czasu opóźnienia zamykania styku w fazie B równej  $80 \mu s$ .



## Rozdział 6

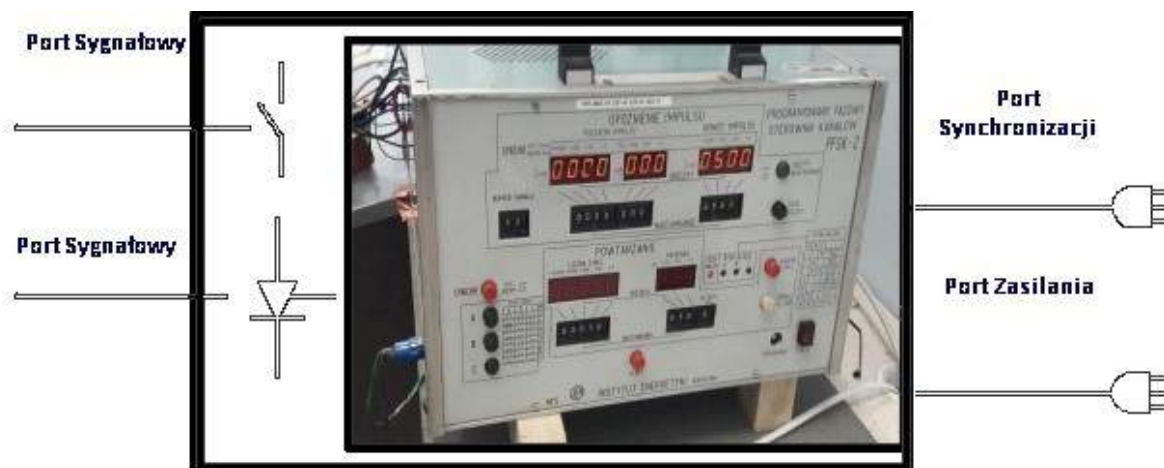
# Badanie kompatybilności aparatury kontrolno-sterującej w LWP

Uzyskane w rozdziale 3 wyniki pomiaru istniejących pól generujących zaburzenie typu DOW oraz wykonane badania i symulacje poszukujące, rozdział 4 i potwierdzające, rozdział 5, źródło ich pochodzenia, zgodnie z dobrą praktyką inżynierską nakazywały sprawdzenie kondycji obecnie wykorzystywanej w laboratorium aparatury, według procedury badań EMC przygotowanej na potrzeby rozpoznanego środowiska i charakteru istniejących tam zaburzeń.

Zaburzenia, związane z przejściowo występującym polem elektrycznym, rozpoznane jako oscylacyjne fale tłumione. Sprzęgając się z kablami [20] i w ten sposób przenikając do nastawnika, mogą powodować jego nieprawidłowe działanie, co należało sprawdzić. Podjęto próbę odwzorowania zaburzeń towarzyszących zamykaniu styków wyłącznika. Wykonano badania symulujące taki stan z użyciem generatora BEST emc firmy Schaffner EMV AG, którego jedną z funkcji jest generacja impulsów typu BURST, generującego serie szybkich elektrycznych stanów przejściowych w postaci „paczek” impulsów („paczka” to 75 impulsów o regulowanej amplitudzie -w tym przypadku testy były wykonane dla trzech poziomów narażenia: 500 V, 1 kV oraz 1,5 kV, z częstotliwością generowania 5 kHz (15 ms -to czas generowanego zaburzenia / czas narażenia, 285 ms -przerwa pomiędzy paczkami). Zebrane parametry zestawiono w Tabeli 6.1. W badaniu poddano sprzężeniu pojemnościowemu sygnał z generatora z sygnałem w badanym kanale nastawnika (Signal port), wykorzystując pojemnościowe cęgi sprzęgające CCC oraz w przypadku kanału synchronizacji (control port) czy też kanału zasilającego nastawnik (AC power port), wewnątrz wbudowane w generator CDN, do sprzężenia pojemnościowego. Testy wykonano zgodnie ze zdefiniowanymi w [19] portami, rys. 6.1. Badaniu poddano zarówno kanały elektroniczne typu TRIAK, jak i elektromechaniczne oparte na przekaźnikach (Signal port). Podczas badania obserwowano reakcję kanałów elektronicznych i jednocześnie elektromechanicznych na generowane zaburzenie w czasie tzw. normalnej pracy.

Tabela 6.1. Nastawy generatora BURST

Poziom narażeń	Częstotliwość generowanych impulsów	Czas trwania paczki impulsów	Liczba impulsów	Przerwa pomiędzy paczkami impulsów
[kV]	[kHz]	[ms]	[-]	[ms]
0.5	5	15	75	285
1	5	15	75	285
1.5	5	15	75	285



Rysunek 6.1. Poglądowy rysunek pierwotnego nastawnika wraz z zaznaczonymi portami

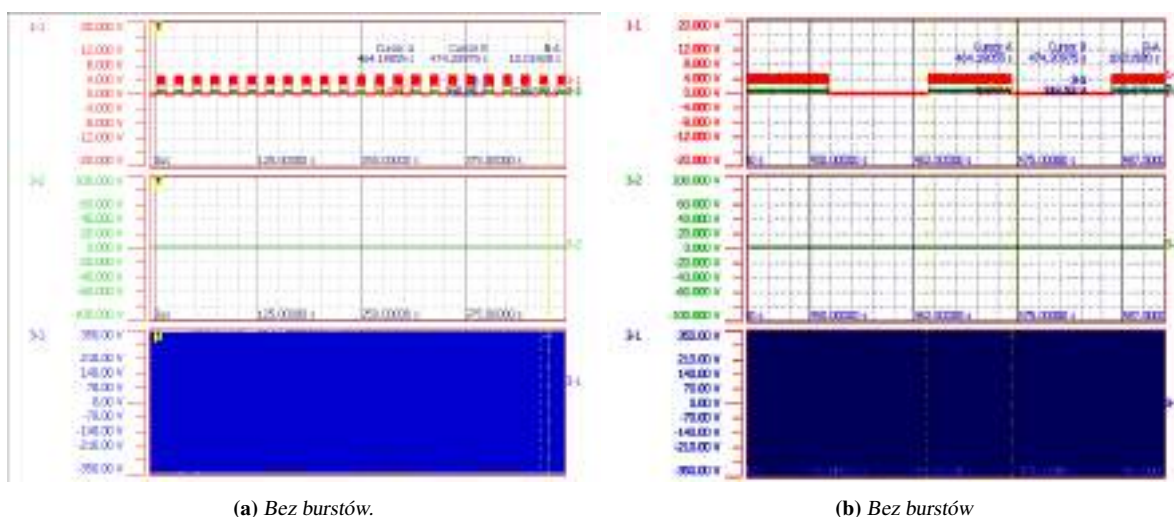
Do testów wyselekcjonowano kanały 10, 11, 12 zazwyczaj używane podczas prób wytrzymałości zwarciowej do sterowania załącznikami zwarcioowymi po stronie niskiego napięcia, a także kanał 7, zwykle wykorzystywany do sterowania wyłącznikiem bezpieczeństwa (sygnał na otwarcie wyłącznika) oraz porty zasilania i synchronizacji. Rejestracja stanów poszczególnych kanałów nastawnika została wykonana rejestratorem HIOKI zgodnie z opisem zawartym w Tabeli 6.2. Układ badany widziany od strony kanału elektronicznego czy przekaźnikowego składał się z szeregowo połączonych źródła napięcia zasilania DC 5 V oraz obciążenia 1 kΩ.

Wykonano próbę cyklicznego załączania kanałów nastawnika bez generacji zaburzenia – patrz rys.6.2a oraz rys.6.2b.

Nastawnik działał prawidłowo, kanały zarówno elektroniczne, jak i przekaźnikowe zamykały się i otwierały z zadaniem czasem, cyklicznie. Układy elektromechaniczne charakteryzują się minimalnym opóźnieniem, ale nie miało to wpływu na negatywną ocenę badanego urządzenia. Zebrane oscylacje posłużyły jako sygnały wzorcowe / odniesienia w dalszej ocenie prowadzonych badań.

Tabela 6.2. Opis badanych portów EUT

<i>Kanał rejestratora HIOKI</i>	<i>Typ portu</i>	<i>Port nastawnika</i>	<i>Typ kanału</i>
CH		Nr	-
1-1	SYGNAŁOWY	10 TY	elektroniczny TRIAK
1-2	SYGNAŁOWY	11 ST	elektromechaniczny PRZEKAŹNIK
2-1	SYGNAŁOWY	12 TY	elektroniczny TRIAK
2-2	SYGNAŁOWY	7 TY	elektroniczny TRIAK
3-1	CONTROL	synchronizacja	230V AC
3-2	DC POWER	-	zasilanie 5 V



(a) Bez burstów.

(b) Bez burstów

Rysunek 6.2. Oscylogramy zarejestrowane podczas prawidłowego cyklicznego załączania kanałów elektronicznych i przekaźnikowych nastawnika. Prawa strona to oscylogramy w zawężonej dziedzinie czasu.

Tabela 6.3. Charakterystyka kanałów występujących na oscylogramach

		NASTAWNIK CZASOWO FAZOWY	
NUMER KANAŁU	KOLOR	TYP KANAŁU	CZAS TRWANIA STANU WYSOKIEGO
10 TY	czerwony	TRIAK	[s]
11 ST	zielony	STYCZNIK	10
12 TY	niebieski	TRIAK	
7 TY	żółty	TRIAK	

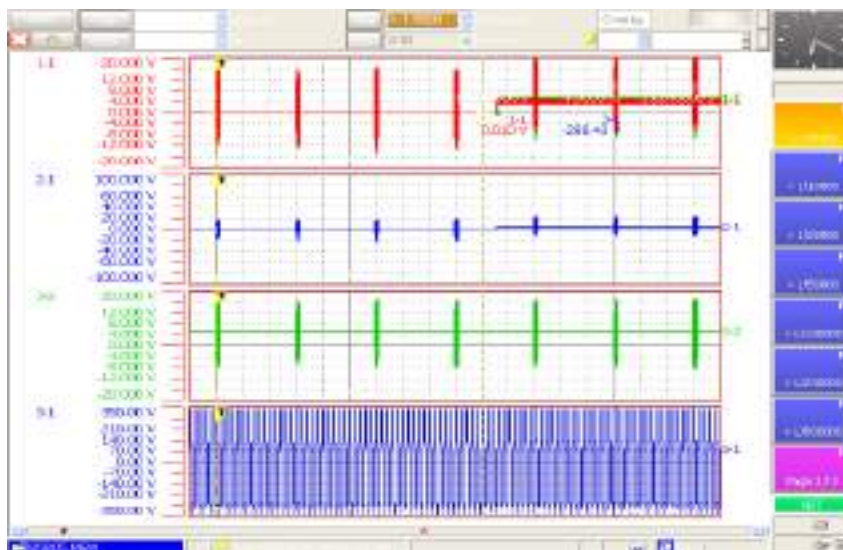


(a) Zbliżenie od strony nastawnika.

(b) Ogólny widok stanowiska badawczego.

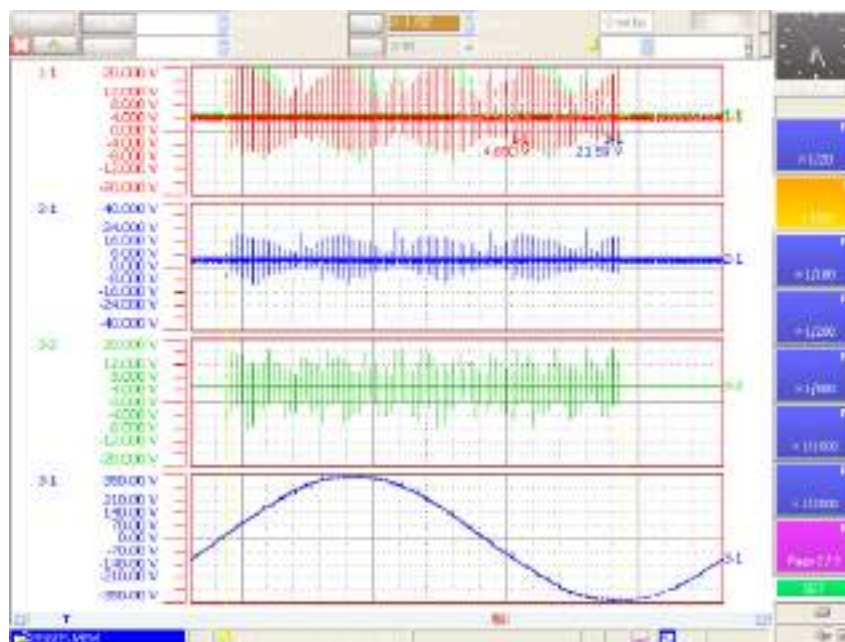
**Rysunek 6.3.** Stanowisko badawcze do symulacji szybkich elektrycznych stanów przejściowych. Zaburzenia sprzężane pojemnościowo z kanałami sygnałowymi.

W kolejnym etapie wykonano próbę sprzężenia pojemnościowego zaburzenia z kanałem elektronicznym typu TRIAK rys.6.3a. Do próby wybrano kanał używany w laboratorium do sterowania obwodem wyłącznika TY\_7. Poziom narażeń wynosił 1 kV, pozostałe parametry próby-jak w Tabeli 6.1. Zarejestrowane podczas próby oscylogramy sprzężania pojemno-



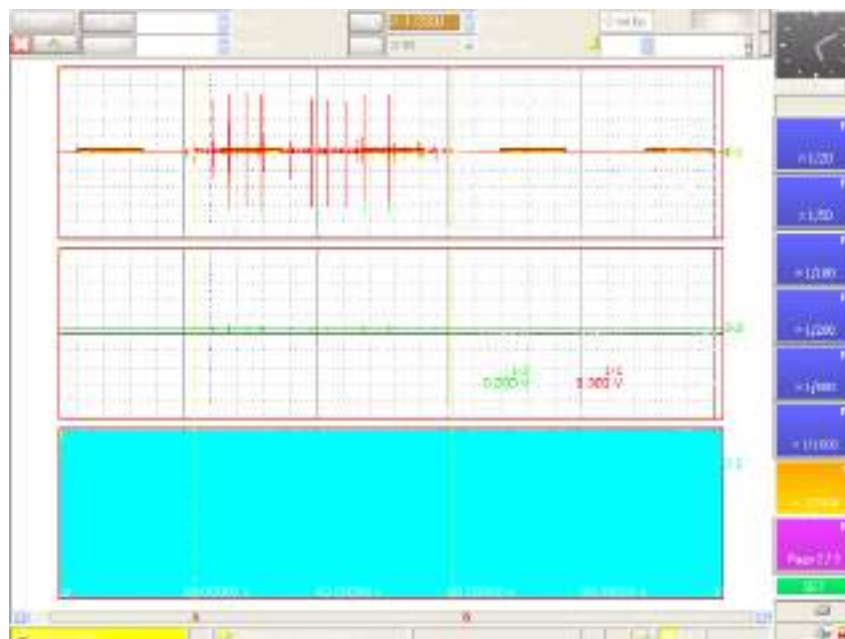
**Rysunek 6.4.** Sprzężanie pojemnościowe zaburzenia z generatora BURST z kanałem TY\_7.

ściowego z kanałem elektronicznym (rys. 6.4), wskazywały na prawidłową pracę badanego urządzenia, które pracowało załączając cyklicznie kanały. Obserwowane porty nie reagowały na "wstrzykiwane" paczki impulsów. Separacja galwaniczna kanałów EUT zapewnia ochronę przed narażanymi sygnałami zaburzenia. Widoczne na rejestracjach z rysunku 6.4 oraz rysunku 6.5 szpilki związane z zaburzeniem obecne w sygnałach obserwowanych kanałów nie zmieniają samoistnie stanu pracy kanału, a tym samym nastawnik pracuje zgodnie z wprowadzonymi przez operatora nastawami. Kolejnym portem, który został poddany badaniom na



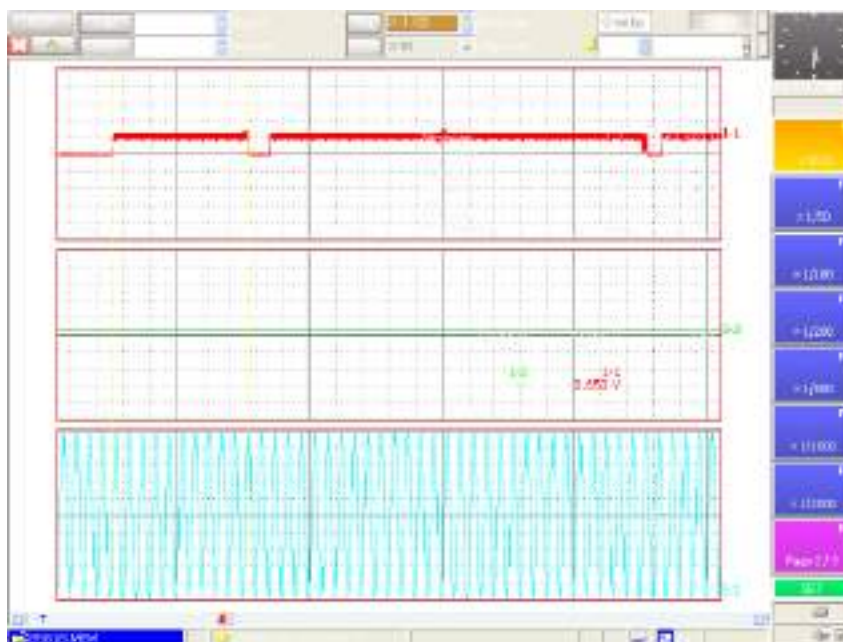
Rysunek 6.5. Próba sprzęgania zaburzeń z kanałem TY\_7.

zaburzenie typu BURST, był kanał synchronizacji sprzęgany drogą pojemnościową przez wewnętrzny CDN. Parametry testu pozostały bez zmian w stosunku do próby sprzęgania pojemnościowego zaburzenia z kanałem TY\_7. Uzyskane wyniki przedstawiono na oscylogramach – rysunek 6.6 oraz rysunek 6.7.



Rysunek 6.6. Próba sprzęgania zaburzeń z portem synchronizacji EUT.





Rysunek 6.7. Próba sprzężenia zaburzeń z kanałem synchronizacji.

Badane urządzenie ukończyło test z wynikiem negatywnym. EUT wykazał się dużą wrażliwością na paczki szybkich elektrycznych stanów przejściowych już przy poziomie zaburzenia 1,5 kV, gdzie wymagany poziom narażeń w środowisku przemysłowym to 2 kV. Konsekwencją poddania się zaburzeniu było nieprawidłowe działanie kanałów elektronicznych, które podlegały zakłóceniu w postaci niekontrolowanego zamykania / otwierania kanału, co bardzo dobrze widać w zawężonym paśmie czasowym oscylogramu z rysunku 6.7. Kanały elektromechaniczne pozostały niewrażliwe na generowane zaburzenie.

Próby sprzężenia zaburzenia z kanałem zasilającym również ukończono z wynikiem negatywnym już przy poziomie 1,5 kV. Zaburzenie powodowało nieprawidłowe funkcjonowanie urządzenia polegające na zawieszaniu się i konieczności odczekania czasu do powrotu badanego nastawnika do stanu użytkowania.

# Rozdział 7

## Wytyczne dla badań kompatybilności aparatury kontrolno-sterującej w LWP

Wiedza, pozyskana z pomiarów pól elektrycznego i magnetycznego, pozwoliła na przygotowanie dedykowanych procedur badań odporności aparatury DUT pracującej w pomieszczeniu operatorskim. Przygotowany program uwzględniał obszary, do których fizycznie jest połączony EUT. Dokumentacja normatywna obejmuje wytyczne dla obszaru stacji i podstacji oraz elektroniki [19]. Wydzielone sąsiadujące obszary i warunki tam występujące są niespójne z zastanymi, rozpatrywanymi w pracy warunkami laboratorium probierczego.

Plan budynku Laboratorium Wielkopiędowego z uwzględnieniem przestrzeni badawczej, jak i kontrolno pomiarowej przedstawiony jest na rysunku 2.12.

### 7.1 Badanie emisji

Zaleca się pomiar emisji radioelektrycznej aparatury kontrolno-pomiarowej, chociaż norma [19] nie obejmuje w ogóle pomiaru emisji. Aparatura ta nie powinna przekraczać dopuszczalnych poziomów emisji radioelektrycznej zdefiniowanych w normie [69] dla urządzeń grupy I w środowisku przemysłowym.

Narzucone wymagania mają służyć temu, aby nie zakłócać niepotrzebnie innych urządzeń elektronicznych używanych w nastawni.

## 7.2 Badanie odporności

### 7.2.1 Tryb pracy, monitoring i kryteria oceny funkcjonowania nastawnika

Za najbardziej krytyczny tryb pracy nastawnika uznano stan gotowości nastawnika do rozpoczęcia badania *ready to operate*. Żadne zaburzenie nie może spowodować zmiany tego trybu pracy w tryb rozpoczęcia badania. Mogłoby to grozić zniszczeniem badanych aparatów, a nawet zagrożeniem życia osób przeprowadzających badania, gdyż w tym czasie mogą one znajdować się w strefie narażania, przygotowując obiekty do badania.

Wybrano następujące sposoby obserwacji funkcjonowania nastawnika:

- wzrokowa obserwacja wyświetlacza,
- wzrokowa obserwacja LED w triakowych kanałach sygnałowych,
- akustyczna obserwacja w przekaźnikowych kanałach sygnałowych,
- wykrywanie oscyloskopem stanu *ON/OFF* w kanałach sygnałowych.

Kryteria oceny jakości funkcjonowania nastawnika zdefiniowano następująco:

- **Kryterium A.** W trakcie badania nie ma żadnych objawów pogorszenia jakości funkcjonowania nastawnika. W szczególności nastawnik nie zmienia trybu pracy gotowości do rozpoczęcia badania w tryb rozpoczęcia badania.
- **Kryterium B.** W trakcie badania możliwe jest przejściowe pogorszenie jakości funkcjonowania nastawnika. Po badaniu pogorszenie jakości funkcjonowania zanika bez ingerencji operatora. Jednakże w trakcie badania i po jego zakończeniu, nastawnik nie ma prawa zmienić trybu pracy gotowości do rozpoczęcia badania w tryb rozpoczęcia badania.
- **Kryterium C.** W trakcie badania możliwe jest pogorszenie jakości funkcjonowania nastawnika wymagające ingerencji operatora po skończeniu badania. Jednakże w trakcie badania i po jego zakończeniu, nastawnik nie ma prawa zmienić trybu pracy gotowości do rozpoczęcia badania w tryb rozpoczęcia badania.



**Tabela 7.1.** Zaburzenia sprzęgane z obudową

<i>Nr badania</i>	<i>Zjawisko</i>	<i>Norma bazowa</i>	<i>Poziom i specyfikacja narażenia według [19] / zastosowane</i>	<i>Kryterium oceny wymagane / uzyskane</i>
1.1	Wyładowanie elektryczności statycznej	EN 61000-4-2	6 [kV/m] / 8 [kV/m] dotykowe	B / A
			8 [kV/m] / 16 [kV/m] powietrzne	B / A
1.2	Promieniowane pole elektromagnetyczne częstotliwości radiowej	EN 61000-4-3	80 MHz - 1 GHz 10 [V/m] / 20 [V/m] AM: 1 kHz 80 %	A / A
1.3	Promieniowane pole elektromagnetyczne częstotliwości radiowej	EN 61000-4-3	1 GHz - 2.7 GHz 10 [V/m] AM: 1 kHz 80 %	A / -
1.4	Promieniowane pole elektromagnetyczne częstotliwości radiowej	EN 61000-4-3	2.7 GHz - 6 GHz 3 [V/m] AM: 1 kHz 80 %	A / -
1.5	Pole magnetyczne częstotliwości sieciowej	EN 61000-4-8	100 [A/m] / 300 [A/m] 1 min	A / A
			1 [kA/m] / 1 [kA/m] 1 s	A / A
1.6	Impulsowe pole magnetyczne	EN 61000-4-9	- / 300 [A/m] wartość szczytowa	- / A

Tabela 7.2. Zaburzenia sprzęgane z przewodem zasilającym w strefie 2

<i>Nr badania</i>	<i>Zjawisko</i>	<i>Norma bazowa</i>	<i>Poziom i specyfikacja narażenia według [19] / zastosowane</i>	<i>Kryterium oceny wymagane / uzyskane</i>
2.1	Serie szybkich elektrycznych stanów przejściowych	EN 61000-4-4	2 [kV] / 4 [kV] 5 kHz	B / A
2.2	Udary	EN 61000-4-5	1 [kV] / 2 [kV] tryb symetryczny	B / A
			2 [kV] / 4 [kV] tryb niesymetryczny	B / A
2.3	Zaburzenia przewodzone indukowane przez pola częstotliwości radiowej	EN 61000-4-6	150 kHz - 80 MHz 10 [V] / 20 [V] AM: 1 kHz 80 %	A / A
2.4	Zapady i krótkie przerwy napięcia zasilającego	EN 61000-4-11	- / 0% $U_T$ 0.5 okresu	- / A
			0% $U_T$ / 0% $U_T$ 1 okres	A / A
			- / 0% $U_T$ 250 okresów	- / C
			- / 40% $U_T$ 10 okresów	- / A
			70% $U_T$ / 70% $U_T$ 1 okres / 25 okresów	A / A
2.5	Tłumione oscylacje	EN 61000-4-18	2.5 [kV] / 5 [kV] 1 MHz tryb asymetryczny	A / A
			1 [kV] / 2 [kV] 1 MHz tryb symetryczny	A / A

**Tabela 7.3.** Zaburzenia sprzęgane z przewodami sterującymi w strefie 3

<i>Nr bad.</i>	<i>Zjawisko</i>	<i>Norma bazowa</i>	<i>Poziom i specyfikacja narażenia według [19] / zastosowane</i>	<i>Kryterium oceny wymagane / uzyskane</i>
3.1	Serie szybkich elektrycznych stanów przejściowych	EN 61000-4-4	4 kV / 4 kV 5 kHz	B / A
3.2	Udary	EN 61000-4-5	2 kV / 4 kV 2 $\Omega$ bezpośrednio do ekranu	B / A
3.3	Zaburzenia przewodzone indukowane przez pola częstotliwości radiowej	EN 61000-4-6	150 kHz - 80 MHz 10 V / 20 V AM: 1 kHz 80 %	A / -
3.4	Tłumione oscylacje	EN 61000-4-18	2.5 kV / 5 kV 1 MHz tryb asymetryczny	B / A
3.5	Tłumione oscylacje	EN 61000-4-18	1 kV / 2 kV 1 MHz tryb symetryczny	B / A



## Rozdział 8

# Opracowanie, budowa i uruchomienie nowego nastawnika czasowo-fazowego

Wykonane pomiary i symulacje komputerowe obwodu probierczego pozwoliły, po przeanalizowaniu wyników, na identyfikację zaburzeń występujących w LWP. Wiedza ta w korelacji z zastaną architekturą laboratorium łączącą obszary nN i SN stała się fundamentem do opracowania wytycznych dla aparatury, która bezpiecznie mogłaby pracować na potrzeby realizowanych badań.

Ważne założenia dla nowej konstrukcji nastawnika odpornego na istniejące w laboratorium pola i pochodzące od nich zaburzenia to [49], [28], [17]:

- zapewnienie ciągłości połączeń obudowy stanowiącej ekran metalowy - co uzyskano poprzez przeszlifowanie powierzchni stykowych celem usunięcia emalii i zabrudzeń dla zapewnienia dobrego kontaktu między powierzchniami sąsiadującymi,
- zapewnienie separacji galwanicznej zarówno od strony zasilania (transformator separujący), jak i na portach sygnałowych (transoptory),
- zastosowanie siatki metalowej w oknie wyświetlacza celem zapewnienia ciągłości ekranu jako zabezpieczenia przed wyładowaniami elektrostatycznymi ESD,
- prowadzenie jak najkrótszych pętli obwodów elektrycznych,
- wprowadzenie ekranowanych przewodów sygnałowych,
- zastosowanie rdzeni ferrytowych zarówno na przewodach sygnałowych, jak i na taśmach, pozwalające na ograniczenie lub eliminację poziomu zakłóceń przewodzonych, jak i promieniowanych,
- zastosowanie elementów zabezpieczających przed przepięciami — zaburzeniami impulsowymi o charakterze udaru typu Surge,

- wprowadzenie filtru 1-fazowego AC [22], na wejściu sygnału zasilającego, będącego również sygnałem synchronizacji, w celu tłumienia zakłóceń przewodzonych w różnych zakresach częstotliwości.

Wstępny model sterownika z możliwością nastawiania czasu trwania próby zwarciowej współpracował z układem stycznika [46]. Do realizacji prototypu wykorzystano platformę Arduino i wbudowany w nią mikrokontroler Atmega328P. Wersja prototypowa została użyta do jednosekundowej próby zwarciowej w laboratorium, podczas badania złązek kablowych. Prąd zwarciowy wynosił 350 A. Niestety pierwsza wersja układu miała ograniczenia związane z precyzyjną kontrolą kąta załączania. Układ oparto o 8-bitowy mikrokontroler o maksymalnej szybkości taktowania 20 MHz oraz posiadający tylko dwa porty z możliwością obsługi przerwań. Więcej informacji zawarto w dokumentacji technicznej [7]. Należy pamiętać, że jeden okres przebiegu sieciowego 50 Hz to 20 ms, zatem do kontroli pojedynczych stopni elektrycznych, mikrokontroler Atmega328P ma zbyt ograniczony zakres częstotliwości, a interesujący nas przedział jest niemożliwy do realizacji na tym kontrolerze.

Docelowa wersja nastawnika powstała na bazie układu STM32F407F [21], [50], który ma znacznie większe możliwości sterowania nastawami częstotliwościowymi. W projekcie wykorzystano możliwość precyzyjnego nastawiania czasu, uzyskując dokładność nastawy rzędu pojedynczych stopni elektrycznych (1 stopień elektryczny to ok.  $56 \mu s$ ). Jednym z najważniejszych zadań w realizacji celu było umożliwienie precyzyjnego doboru parametrów częstotliwości taktowania z wykorzystaniem przerw. W układzie wykorzystano możliwość nastawienia taktowania mikrokontrolera i jego timerów na częstotliwość 84 MHz. Przerwy wywoływane były z częstotliwością 125 kHz, co odpowiadało  $8 \mu s$ . Algorytm działania nastawnika przedstawiono na rysunku 8.1.

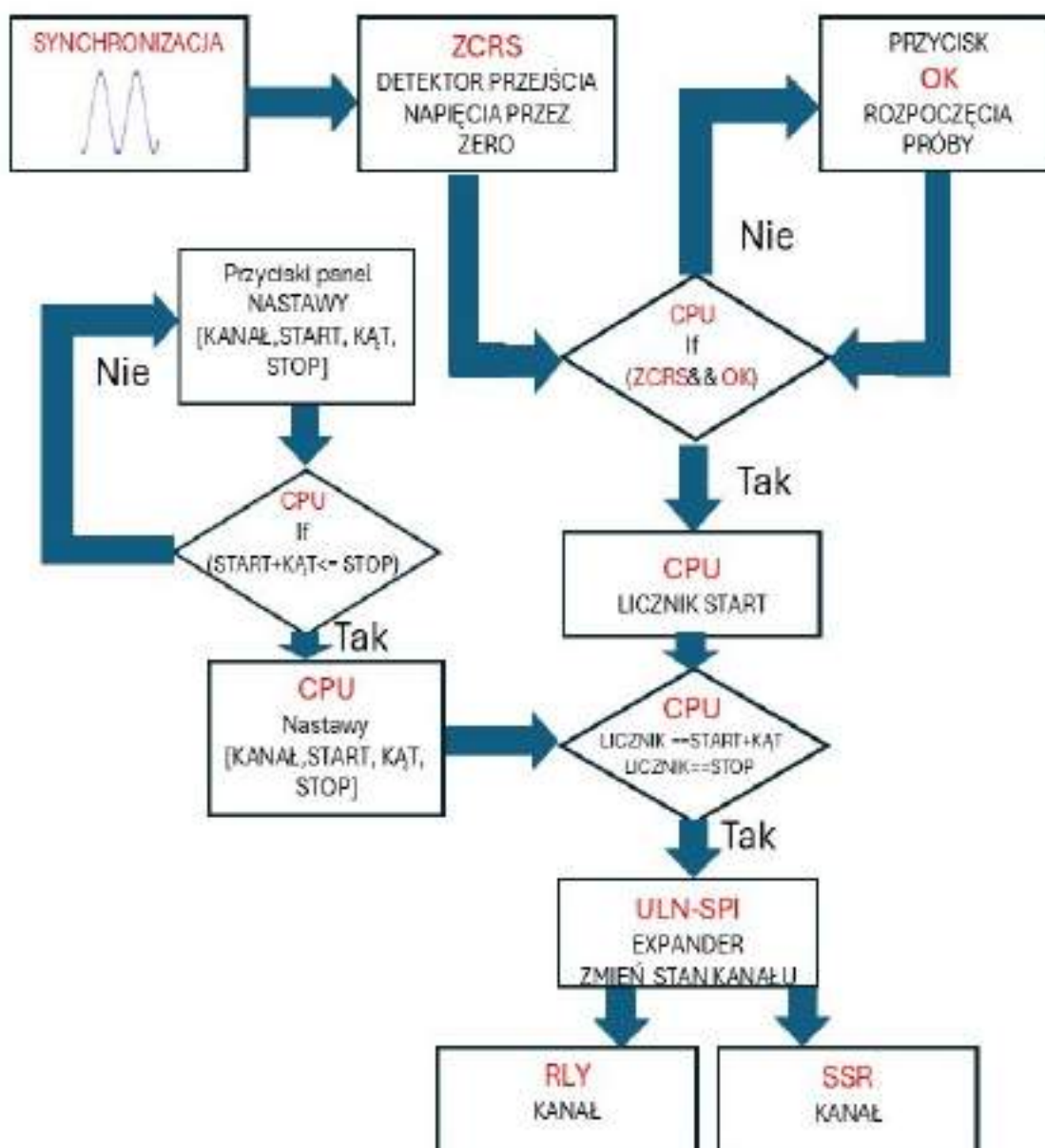
Kolejna wersja nastawnika, opracowana na podstawie algorytmu z rysunku 8.1, została przedstawiona na rysunku 8.2. Układ testowano pod kątem funkcjonalności urządzenia jako precyzyjnego sterownika kontroli czasu załączania i wyłączania obwodu. Wyniki testów, przedstawiono na oscylogramach: rysunki 8.6-8.7. Uznano je za pozytywne.

Nastawa związana z kątem elektrycznym obarczona jest błędem wynikającym z taktowania zegara wystawiającego impuls co 0,9 stopnia elektrycznego. Pełnemu okresowi, czyli 20 ms, odpowiada 400 impulsów. Gdy nastawiany kąt nie jest krotnością 0,9, wówczas kąt przyjmuje część całkowitą iloczynu  $0,9 \times$  liczba impulsów.

Na rysunku 8.2 widoczne są poszczególne płytki składające się ostatecznie na model końcowy. Oznaczenia odpowiadają:

1. płytką główną z mikrokontrolerem STM32F4,
2. układ obsługi kanałów typu triak, expander,

3. kanały typu triak,
4. porty elektromechaniczne, typu przekaźnik,
5. układ detekcji zera,
6. zasilacz AC/DC.



Rysunek 8.1. Uproszczony algorytm działania nastawnika czasowo-fazowego.



**Rysunek 8.2.** Prototyp II nastawnika powstały z wykorzystaniem mikrokontrolera STM32F4.

Nastawnik czasowo-fazowy zbudowany jest z bloków przedstawionych na rysunku 8.3, gdzie:

- RLY blok zawierający 8 przekaźników,
- SSR- płytką zawierającą 8 kanałowy załącznik transoptorowy,
- ZCRS-detektor przejścia napięcia przez zero,
- PSU-układ transformatora separującego z AC/DC AC 230V/DC 24V/ DC 5V,
- CPU-płyta mikrokontrolera STM407,
- ULN-SPI-płyta rozszerzająca porty we/wy umożliwiającą sterowanie z wykorzystaniem szeregowej transmisji danych po magistrali SPI.

Bloki te zostały zdefiniowane również na rysunku 8.2.

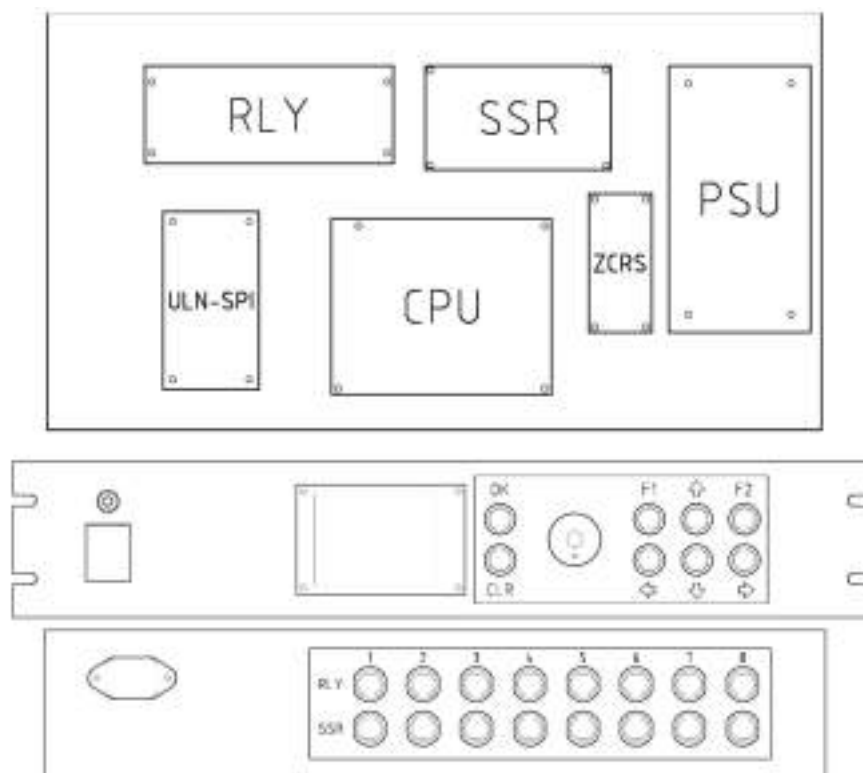
Układ detekcji przejścia napięcia przez zero pozwala na obserwację w przerwaniach punktu zerowego, co umożliwia precyzyjne odliczanie kąta elektrycznego, który jest niezbędny do prawidłowego nastawienia parametrów próby zwarciowej. Parametry nastawnika czasowo-fazowego są synchronizowane względem napięcia sieci. Sterowanie nastawnikiem czasowo-fazowym polega na ustawieniach i wczytaniu parametrów próby takich jak: rodzaj kanału, numer kanału, liczba okresów oraz kąt, po których ma nastąpić zamknięcie wybranego kanału,



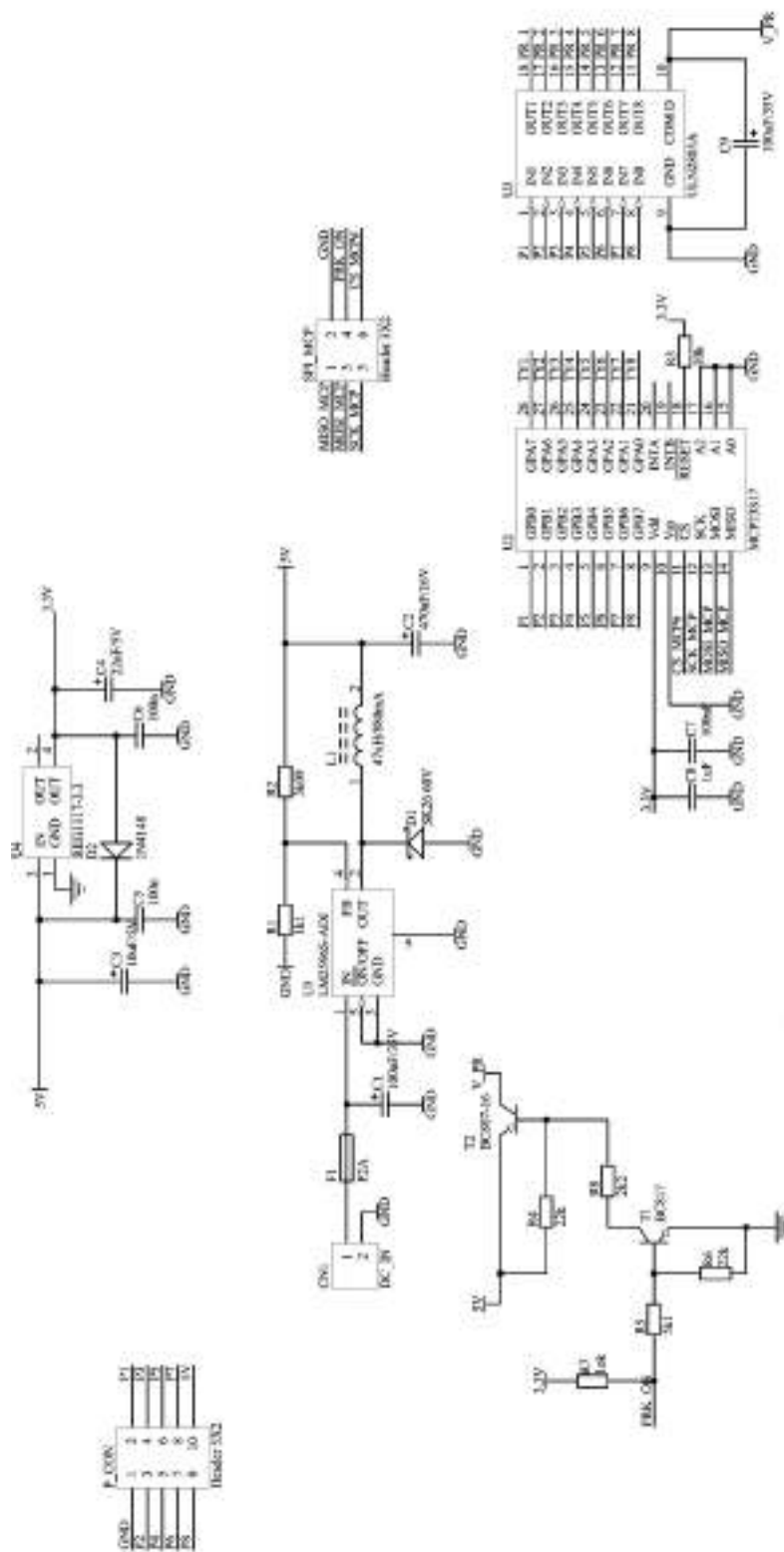
liczba okresów, po której ma nastąpić otwarcie danego kanału, realizowane jest z panelu operatorskiego umieszczonego na przedniej ścianie nastawnika (rys. 8.3). Klawisze oznaczone strzałkami służą do nawigacji po tablicy nastaw, wyświetlanej na displayu. Przyciski funkcyjne odpowiadają za: F1 – sprawdzenie poprawności nastaw, F2 – przełączanie między funkcją nastaw i odczytem aktualnych nastawień. Przycisk OK odpowiada za uruchomienie próby. Przycisk CLR umożliwia wyczyszczenie wszystkich nastaw (wyzerowanie tablic danych). Enkoder pozwala na zgrubne i dokładne wprowadzanie wartości zadanej do tablicy nastaw. W nastawniku wprowadzono zabezpieczenie przed błędną nastawą. Liczba okresów, po której ma nastąpić otwarcie kanału, nie może być niższa, niż liczba okresów plus ką, ustawiony jako czas, po którym nastąpi zamknięcie kanału. Nastawnik został również zabezpieczony programowo przed zjawiskiem drgania styków i błędami wynikającymi z tego procesu.

Wybrane wyniki prób funkcjonalnych dla różnych nastaw przedstawiono na rysunkach 8.6 i 8.7 oraz w Tabelach 8.1 i 8.2

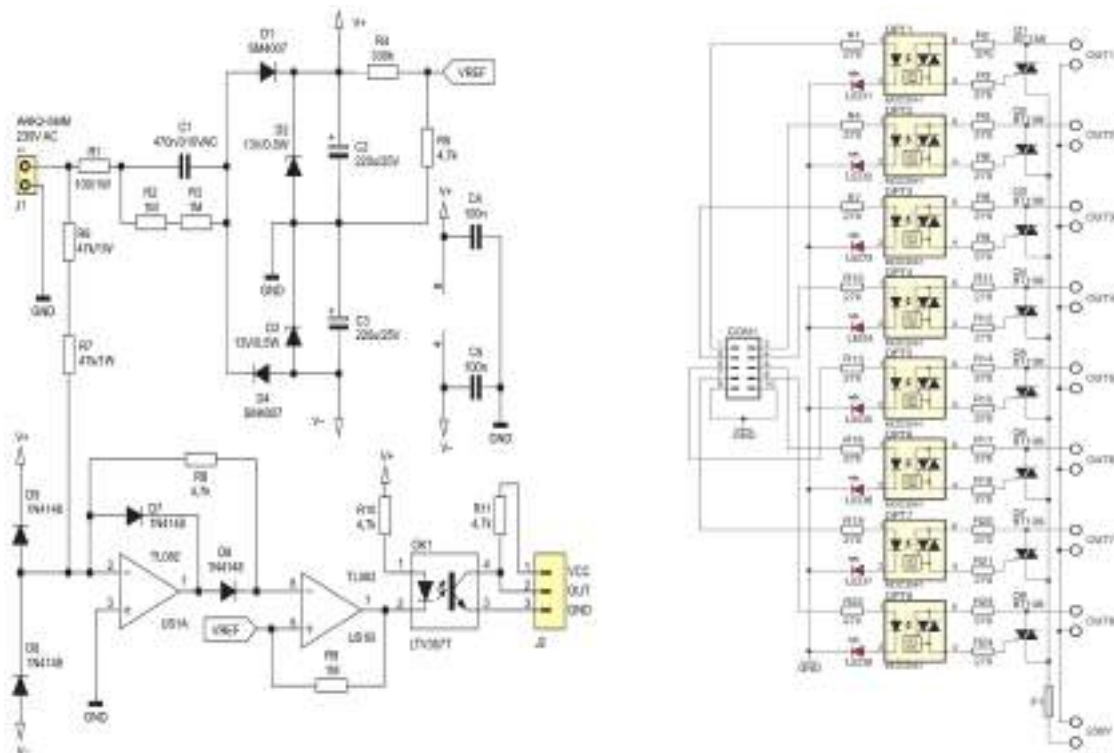
Nowy nastawnik, po pozytywnym przejściu prób funkcjonalnych został poddany testom EMC z poziomem narażenia restrykcyjnie dobranym przez Competent Body dedykowanym dla zadanego mu środowiska pracy.



**Rysunek 8.3.** Projekt nowego nastawnika czasowo fazowego widok z góry, przód oraz tył.



Rysunek 8.4. Moduł rozszerzeń portów sterowanych. Blok ULN-SPI [72].



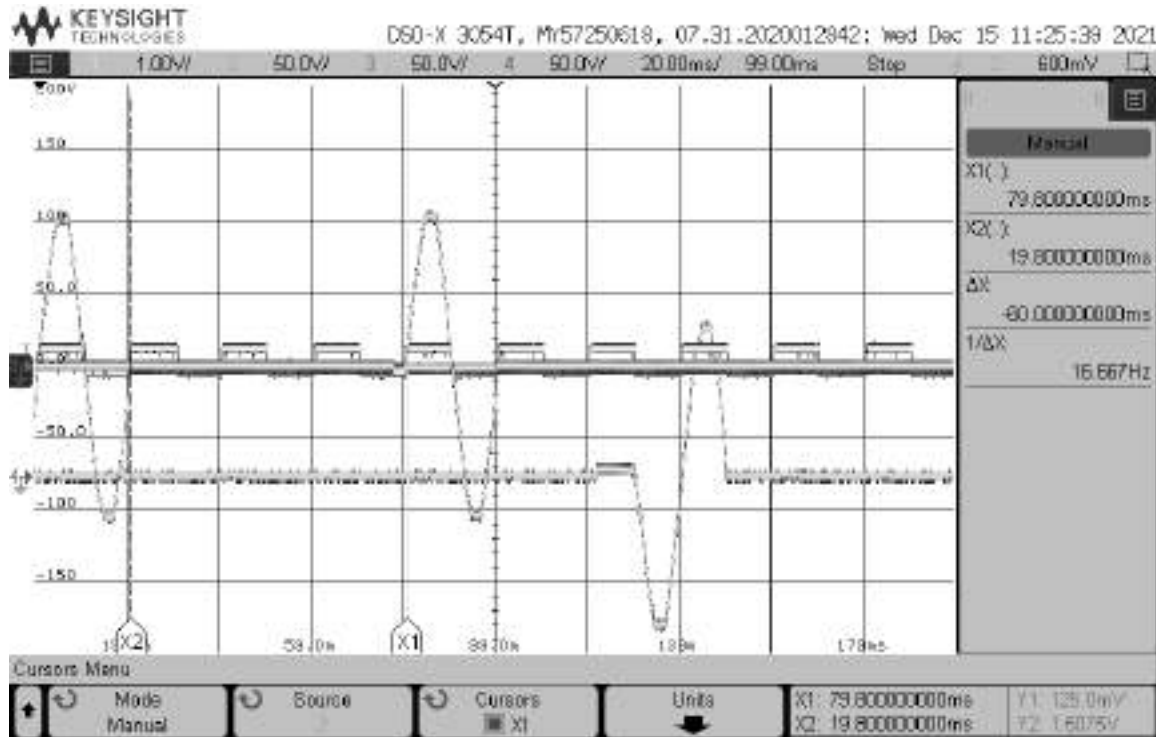
Rysunek 8.5. Schematy ideowe bloków nastawnika.

Tabela 8.1. Przykładowa tablica nastaw dla rys. 8.6.

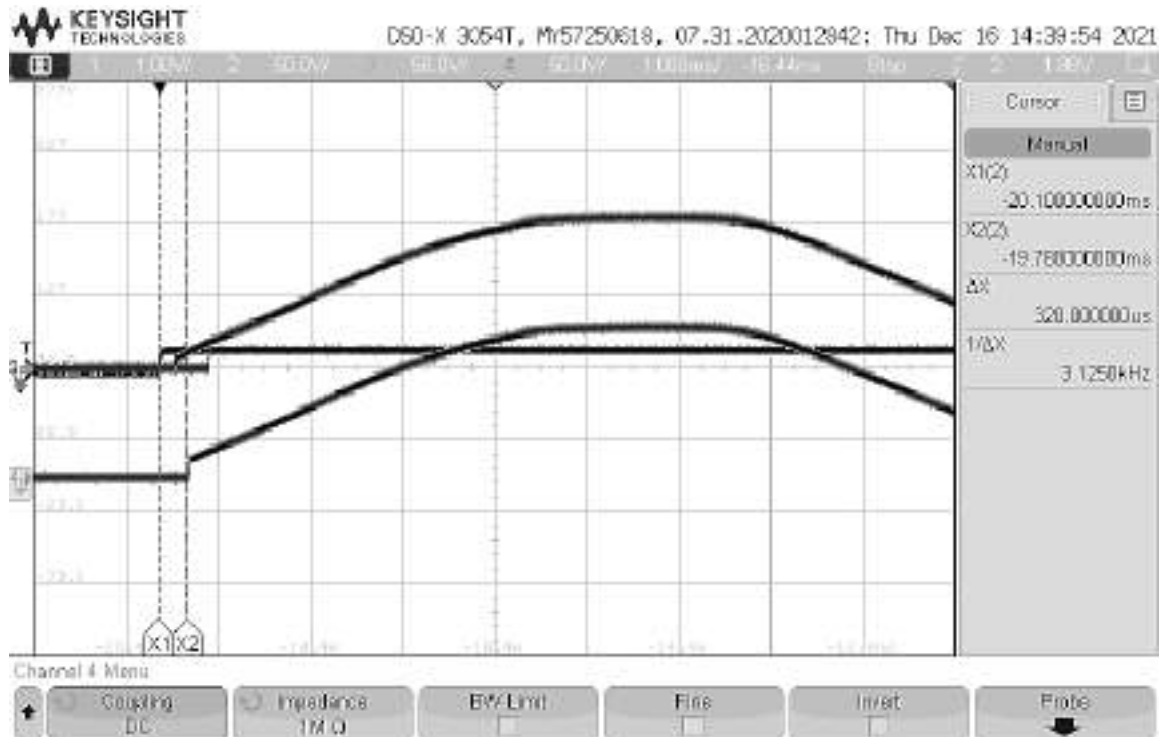
NASTAWY			
kanał	start	kąt	stop
PR[0]	0	0	1
PR[4]	4	0	5
PR[6]	6	180	7

Tabela 8.2. Przykładowa tablica nastaw portów 1,2,5 z rys. 8.7.

NASTAWY			
kanał	start	kąt	stop
PR[1]	0	9	4
PR[2]	0	1	2
PR[5]	0	5	2



Rysunek 8.6. Próba funkcyjna dla nastaw z Tabeli 8.1



Rysunek 8.7. Próba funkcyjna dla nastaw z Tabeli 8.2.

# Rozdział 9

## Badania EMC nowego nastawnika

Nowy nastawnik, pokazany na rysunku 9.1, w odróżnieniu od używanego w LWP nastawnika, przedstawionego na rysunku 6.1 nie ma portu synchronizacji. Sygnał synchronizacji w nowym nastawniku zrealizowany jest odgałęzieniem wewnątrz nastawnika portu zasilającego.



**Rysunek 9.1.** Poglądowy rysunek nowego nastawnika wraz z zaznaczonymi najważniejszymi Wejściami i wyjściami

Nowy nastawnik ma osiem przekaźnikowych oraz tyle samo tyrystorowych portów sygnałowych.

### 9.1 Pomiar emisji radioelektrycznej

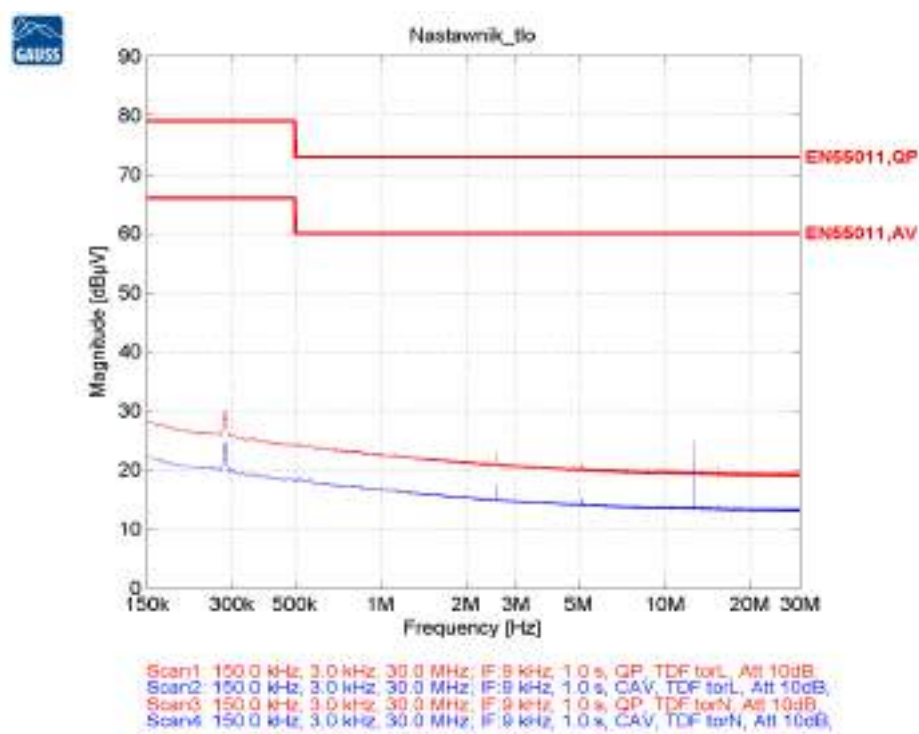
Badania emisji radioelektrycznej przeprowadzono w Laboratorium KEM w Instytucie Elektrotechniki Teoretycznej i Systemów Informacyjno-Pomiarowych na Wydziale Elektrycznym Politechniki Warszawskiej. Laboratorium dysponuje dwoma stanowiskami do pomiaru emisji przewodzonej, dla EUT jedno i trójfazowych oraz dwoma komorami GTEM, umożliwiającymi pomiary inżynierskie emisji promieniowanej w przedziale częstotliwości od 30 MHz do 1 GHz.

### 9.1.1 Emisja przewodzona

Dokument [16] w podrozdziale 6.2.2 narzuca na stanowisko do pomiaru emisji przewodzonej następujące warunki dotyczące odstępów poziomów zaburzeń zewnętrznych (tła) od limitu określonego w użytej normie:

- co najmniej 20 dB w warunkach laboratoryjnych,
- co najmniej 6 dB w pomiarach in situ, jeżeli poziom zaburzeń wytwarzanych przez EUT nie przekracza limitu określonego w użytej normie.

Z tych względów przed przeprowadzeniem pomiarów emisji przewodzonej pomierzono tło zaburzeń. Wynik tych pomiarów przedstawiony jest na rysunku 9.2.

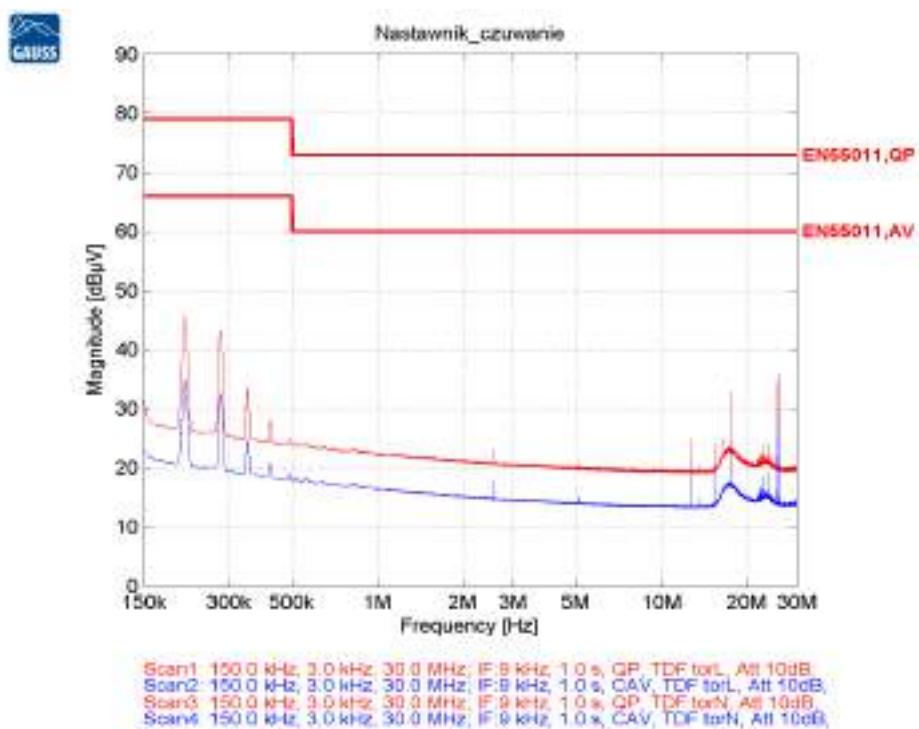


Rysunek 9.2. Poziom zaburzeń tła.

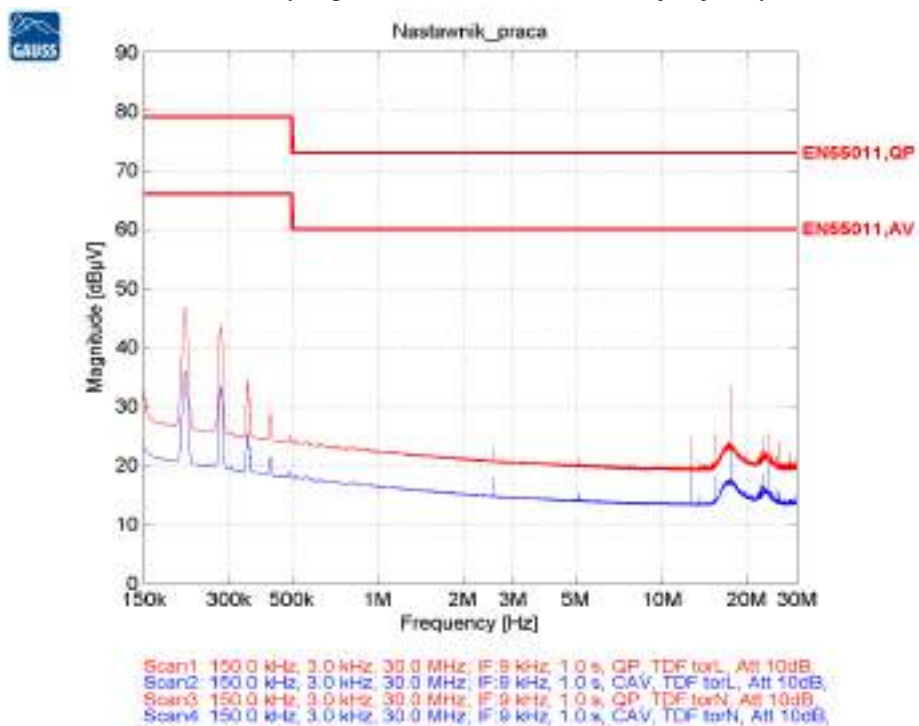
Przyjęto limity dopuszczalnych zaburzeń zgodnie z wymaganiami normy [74] dla aparatury kontrolnej, używanej w środowisku przemysłowym.

Wykresy przedstawione na rysunku 9.2 potwierdzają spełnienie wymagania 20 dB minimalnego odstępu tła od przyjętych limitów. Oznacza to, że stanowisko pomiarowe pozwala dokonać oceny wymagań zdefiniowanych w normie [74].

Pomiary emisji przewodzonej przeprowadzono w stanie czuwania i pracy nastawnika. Odpowiednie wykresy przedstawione są na rysunku 9.3 i rysunku 9.4.



Rysunek 9.3. Poziom zaburzeń emitowanych przez nastawnik do sieci zasilającej w trybie czuwania nastawnika.



Rysunek 9.4. Poziom zaburzeń emitowanych przez nastawnik do sieci zasilającej w trybie pracy nastawnika.

Ponieważ nastawnik jest w obudowie przystosowanej do montażu w szafie rackowej, wybrano stanowisko pomiarowe dla urządzeń podłogowych, co ilustruje rysunek 9.5.



**Rysunek 9.5.** Nowy nastawnik w trakcie badania radioelektrycznej emisji przewodzonej.

Nastawnik spełnia wymagania dotyczące emisji zaburzeń radioelektrycznych w środowisku przemysłowym, zdefiniowanych w normie [74].

### 9.1.2 Emisja promieniowana

Laboratorium KEM w Instytucie Elektrotechniki Teoretycznej i Systemów Informacyjno Pomiarowych na Wydziale Elektrycznym Politechniki Warszawskiej nie dysponuje komorą współ-bezodbiciową (SAC), niezbędną do przeprowadzenia pomiarów emisji promieniowanej zgodnych z wymaganiami normy [74]. Jediną możliwością było wykonanie badań inżynierskich, wstępnych w komorze GTEM. Pomiary w komorze GTEM są dopuszczalne przy ocenie zgodności z wymaganiami norm tylko dla EUT zasilanych z baterii i bez podłączonych jakichkolwiek przewodów. W przypadku nastawnika żaden z tych warunków nie jest spełniony.

Tak samo jak przy pomiarach emisji przewodzonej przyjęto limity dopuszczalnych zaburzeń zgodnie z wymaganiami normy [74] dla aparatury kontrolnej, używanej w środowisku przemysłowym.

Pomiary w komorze GTEM przetransponowano na pomiary na stanowisku 10 m w komorze współ-bezodbiciowej SAC i tak samo jak przy pomiarach emisji przewodzonej, odniesiono do limitu dopuszczalnych zaburzeń zgodnie z wymaganiami normy [74] dla aparatury kontrolnej, używanej w środowisku przemysłowym.

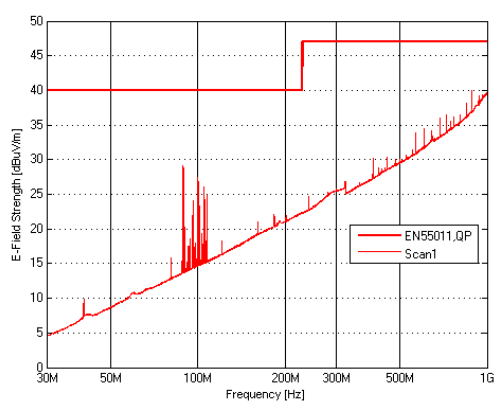
Pomiary przeprowadzono w stanie czuwania i pracy nastawnika. Odpowiednie wykresy przedstawione są na rysunkach 9.7a i 9.7b.

Pomiary emisji promieniowanej w komorze GTEM trzeba wykonać ustawiając EUT w trzech ortogonalnych osiach, co jest zilustrowane na rysunku 9.6.

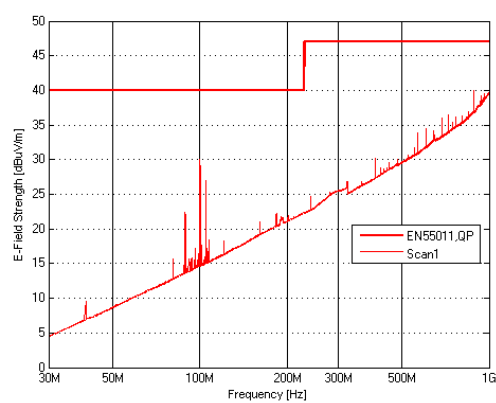




**Rysunek 9.6.** Ustawienie nastawnika w trzech osiach ortogonalnych w komorze GTEM, w trakcie pomiaru emisji promieniowanej.



(a) Tryb czuwania



(b) Tryb pracy

**Rysunek 9.7.** Poziomy zaburzeń emisji promieniowanej przez nastawnik, mierzonych w komorze GTEM.

Nastawnik spełnia wymagania dotyczące emisji zaburzeń radioelektrycznych w środowisku przemysłowym, zdefiniowanych w normie [74], co potwierdzają poziomy zaburzeń przedstawione na rysunku 9.7.

## 9.2 Badania odporności

Wszystkie badania odporności, za wyjątkiem badania odporności na oscylacje tłumione (DOW) przeprowadzono w Laboratorium KEM w Instytucie Elektrotechniki Teoretycznej i Systemów Informacyjno-Pomiarowych na Wydziale Elektrycznym Politechniki Warszawskiej. Odporność na DOW zgodnie z normą [32] przeprowadzono w Laboratorium Kompatybilności Elektromagnetycznej w Katedrze Telekomunikacji i Teleinformatyki na Wydziale Elektroniki Politechniki Wrocławskiej.

Wszystkie badania przeprowadzono w trybie czuwania nastawnika obserwując, czy nastawnik nie przechodzi w stan pracy pod wpływem stosowanego narażenia. Taka podatność nastawnika oznacza bezdyskusyjnie negatywny wynik badań. Obserwację stanu funkcjonowania realizowano nasłuchując, czy przekaźniki w przekaźnikowych obwodach sterujących nie zaczynają cyklicznie włączać i wyłączać się oraz, czy diody LED w tyrystorowych obwodach sterujących nie zaczynają świecić cyklicznie.

Warunki przeprowadzania badań, poziomy narażeń oraz uzyskane kryteria oceny funkcjonowania przedstawione są w:

- Tabeli 9.1 dla sprzęgania z obudową,
- Tabeli 9.2 dla sprzęgania z przewodem zasilającym,
- Tabeli 9.3 dla sprzęgania z przewodami sygnałowymi.

Testów 1.3 i 1.4 z Tabeli 9.1 nie przeprowadzono ze względu na brak odpowiedniego instrumentarium. Doświadczenie pozwala wykluczyć negatywny wynik tych badań dla rozpatrywanego nastawnika. To samo dotyczy testu 3.3 z Tabeli 9.3.

Wszystkie badania są udokumentowane zamieszczonymi zdjęciami.

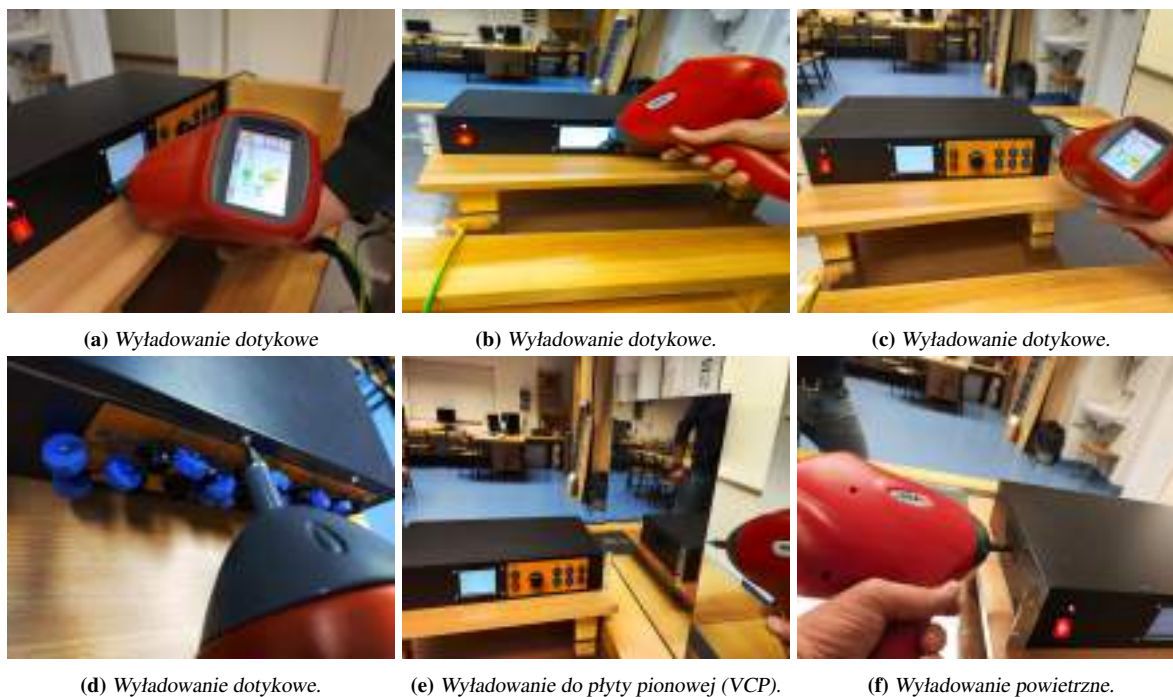
Problemy uzyskania wymaganego kryterium jakości funkcjonowania wystąpiły jedynie w trakcie badania odporności na wyładowania elektryczności statycznej (ESD) oraz na szybkie stany przejściowe (BURST). Dla tych testów umieszczono dodatkowe zdjęcia i komentarze naświetlające występujące problemy oraz sposób osiągnięcia pożądanego kryterium funkcjonowania.

**Tabela 9.1.** Zastosowane poziomy zaburzeń sprzęganych z obudową

<i>Nr badania</i>	<i>Zjawisko</i>	<i>Norma bazowa</i>	<i>Zastosowany poziom i specyfikacja narażenia</i>	<i>Uzyskane kryterium oceny</i>
1.1	Wyładowanie elektryczności statycznej	EN 61000-4-2	8 [kV/m] dotykowe	A
			16 [kV/m] powietrzne	A
1.2	Promieniowane pole elektromagnetyczne częstotliwości radiowej	EN 61000-4-3	80 MHz - 1 GHz 20 [V/m] AM: 1 kHz 80 %	A
1.3	Promieniowane pole elektromagnetyczne częstotliwości radiowej	EN 61000-4-3	1 GHz - 2.7 GHz 10 [V/m] AM: 1 kHz 80 %	-
1.4	Promieniowane pole elektromagnetyczne częstotliwości radiowej	EN 61000-4-3	2.7 GHz - 6 GHz 3 [V/m] AM: 1 kHz 80 %	-
1.5	Pole magnetyczne częstotliwości sieciowej	EN 61000-4-8	300 [A/m] 1 min	A
			1 [kA/m] 1 s	A
1.6	Impulsowe pole magnetyczne	EN 61000-4-9	300 [A/m] wartość szczytowa	A

Tabela 9.2. Zastosowane poziomy zaburzeń sprzęganych z przewodem zasilającym w strefie 2.

<i>Nr badania</i>	<i>Zjawisko</i>	<i>Norma bazowa</i>	<i>Zastosowany poziom i specyfikacja narażenia</i>	<i>Uzyskane kryterium oceny</i>
2.1	Serie szybkich elektrycznych stanów przejściowych	EN 61000-4-4	4 [kV] 5 kHz	A
2.2	Udary	EN 61000-4-5	2 [kV] tryb symetryczny	A
			4 [kV] tryb niesymetryczny	A
2.3	Zaburzenia przewodzone indukowane przez pola częstotliwości radiowej	EN 61000-4-6	150 kHz - 80 MHz 20 [V] AM: 1 kHz 80 %	A
2.4	Zapady i krótkie przerwy napięcia zasilającego	EN 61000-4-11	0% $U_T$ 0.5 okresu	A
			0% $U_T$ 1 okres	A
			0% $U_T$ 250 okresów	C
			40% $U_T$ 10 okresów	A
			70% $U_T$ / 1 okres 70% $U_T$ / 25 okresów	A A
2.5	Tłumione oscylacje	EN 61000-4-18	5 [kV] 1 MHz tryb asymetryczny	A
			2 [kV] 1 MHz tryb symetryczny	A



**Rysunek 9.8.** Badanie odporności na wyładowania elektryczności statycznej zgodnie z normą [33].



**Rysunek 9.9.** Badanie odporności na pole promieniowane częstotliwości radiowej w komorze GTEM zgodnie z normą [34].



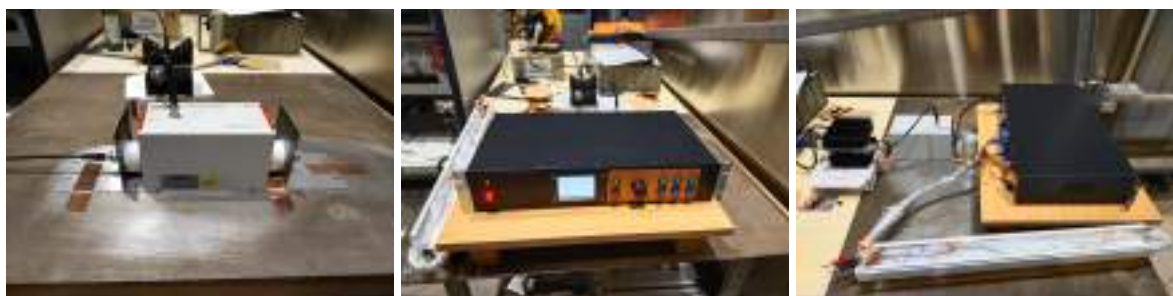
(a) Sprzężenie wewnętrzną siecią sprzęgająco-odsprzęgającą (CDN) z przewodami zasilającymi. (b) Sprzężenie cęgami pojemnościowymi (CCC) z ekranowanym przewodem sygnałowym. (c) Sprzężenie cęgami pojemnościowymi (CCC) z ekranowanym przewodem sygnałowym.

**Rysunek 9.10.** Badanie odporności na szybkie elektryczne stany przejściowe (BURST) zgodnie z normą [35].



(a) Sprzężenie wewnętrznym CDN z przewodami zasilającymi. (b) Sprzężenie bezpośrednio z ekranem przewodu sygnałowego. (c) Połączenie ekranu przewodu sygnałowego do masy odniesienia na przeciwległym końcu.

**Rysunek 9.11.** Badanie odporności na udary (SURGE) zgodnie z normą [36].



(a) Ustawianie poziomu zaburzenia z wykorzystaniem CDN M3. (b) Sprzężenie z przewodami zasilającymi przy pomocy CDN M3. (c) Sprzężenie z przewodami zasilającymi przy pomocy CDN M3.

**Rysunek 9.12.** Badanie odporności na zaburzenia częstotliwości radiowej sprzężane z przewodami zgodnie z normą [37].

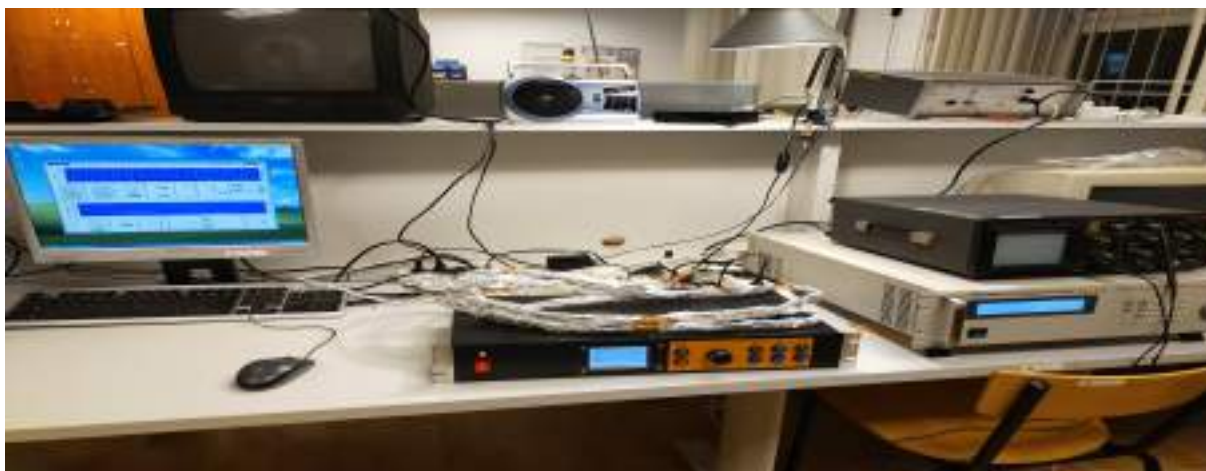




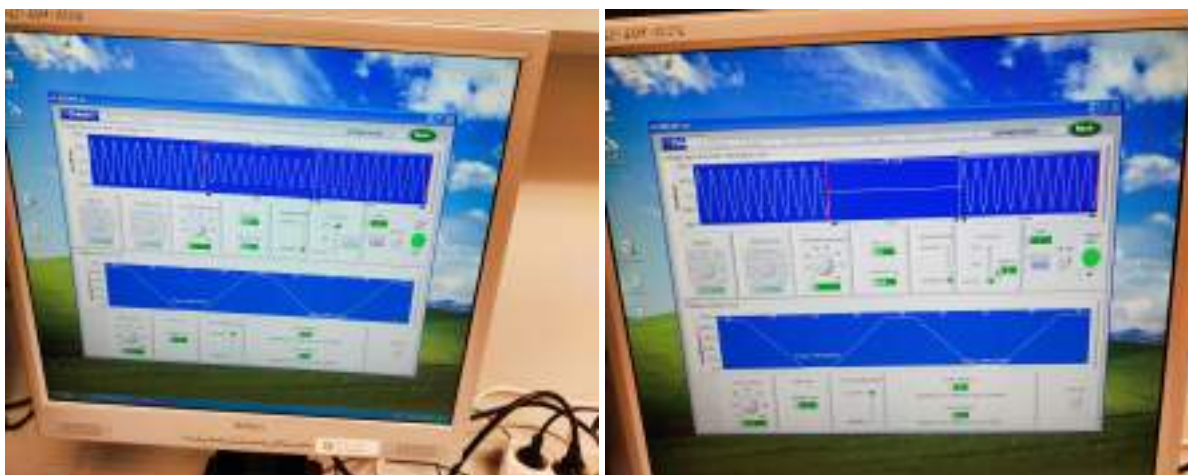
**Rysunek 9.13.** Ustawienie nastawnika w trzech osiach ortogonalnych w układzie cewek Helmholtza, w trakcie badania odporności na pole magnetyczne częstotliwości sieciowej zgodnie z normą [38].



**Rysunek 9.14.** Ustawienie nastawnika w trzech osiach ortogonalnych w antenie pętlowej, w trakcie badania odporności na impuls pola magnetycznego zgodnie z normą [30].



Rysunek 9.15. Ogólny widok stanowiska badawczego ze źródłem napięcia AC w głębi.



Rysunek 9.16. Badanie odporności na zapady i zaniki napięcia zasilającego zgodnie z normą [31], dla 40 % zapadu napięcia na czas 10 okresów oraz dla 0 % zaniku napięcia na czas 250 okresów.



Rysunek 9.17. Nastawnik w trakcie badania odporności na DOW zgodnie z normą [32].



**Tabela 9.3.** Zastosowane poziomy zaburzeń sprzęganych z przewodami sterującymi w strefie 3.

<i>Nr badania</i>	<i>Zjawisko</i>	<i>Norma bazowa</i>	<i>Zastosowany poziom i specyfikacja narażenia</i>	<i>Uzyskane kryterium oceny</i>
3.1	Serie szybkich elektrycznych stanów przejściowych	EN 61000-4-4	4 kV 5 kHz	A
3.2	Udary	EN 61000-4-5	4 kV 2 $\Omega$ bezpośrednio do ekranu	A
3.3	Zaburzenia przewodzone indukowane przez pola częstotliwości radiowej	EN 61000-4-6	150 kHz - 80 MHz 10 V / 20 V AM: 1 kHz 80 %	-
3.4	Tłumione oscylacje	EN 61000-4-18	5 kV 1 MHz tryb asymetryczny	A
3.5	Tłumione oscylacje	EN 61000-4-18	2 kV 1 MHz tryb symetryczny	A

### 9.2.1 Poprawa odporności na wyładowania elektryczności statycznej

Wymagania normy [19] dotyczące odporności na wyładowania elektryczności statycznej w strefie nastawnikowej definiują poziom narażeń 6 kV wyładowania dotykowego i 8 kV wyładowania powietrznego, co przedstawiono w Tabeli 7.1 (pozycja 1.1).

W doktoracie zdefiniowano wyższe poziomy narażeń przewidziane dla nastawnika używanego w środowisku laboratorium wielkopiętowego, a mianowicie odpowiednio 8 kV i 16 kV, co pokazano w wierszu 1.1 Tabeli 9.1.

W pierwotnej wersji nastawnik nie przechodził badania wyładowania dotykowego w różnych miejscach płyty czołowej: do śrub mocujących wyświetlacz, rys. 9.8a, do krawędzi otworu wyświetlacza, rys. 9.8b, czy w kołnierz do mocowania w stojaku rackowym, rys. 9.8c.

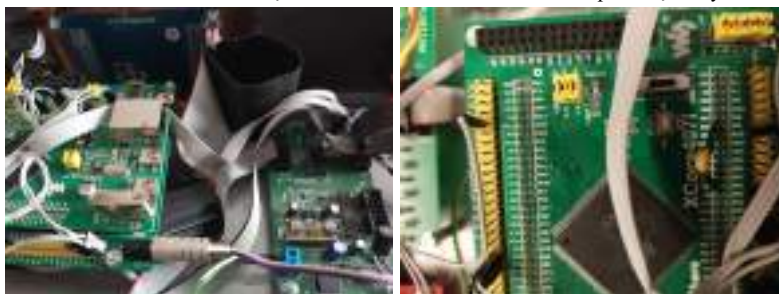
Podatność nastawnika objawiała się dwójako. Wyświetlacz zmieniał wyświetlaną zawartość bądź zamrażał się, a co gorsza, nastawnik przechodził ze stanu czuwania w stan pracy.

Na przewodzie tasiemkowym między płytą główną a wyświetlaczem założono dławik CM typu 0444164181 z jednym zwojem, produkcji Fairrite, jak pokazano na rysunku 9.18d. W ten sposób wyeliminowano podatność samego wyświetlacza.

Wyeliminowanie zmiany stanu pracy pod wpływem ESD wymagało szeregu zmian, opisanych poniżej.



(a) Zasłonięcie otworu wyświetlacza samo- (b) Zamontowanie od wewnątrz obudowy (c) Prowizoryczne zwiększenie liczby miejsc przylepną taśmą miedzianą z przewodzącym siatki metalowej, połączonej galwanicznie z kontaktu pokrywy z podstawą obudowy za klejem.



(d) Dławik CM na przewodzie tasiemkowym (e) Kondensator przeciwzakłóceńowy na wejściu sygnałowym mikroprocesora.

**Rysunek 9.18.** Eksperymenty poprawiające odporność na wyładowania elektryczności statycznej.

Otwór w podstawie obudowy na wyświetlacz, zasłonięty plexi okazał się anteną aperturową [65], przez którą wyładowania dostawały się do modułu wyświetlacza. Pokazał to eksperyment polegający na zaklejeniu otworu samoprzylepną taśmą miedzianą z przewodzącym klejem, co pokazuje zdjęcie na rysunku 9.18a. Próbowano zasłonić otwór wyświetlacza siatką metalową [42], połączoną galwanicznie na całym obwodzie z podstawą obudowy, co pokazuje zdjęcie na rysunku 9.18b. Takie rozwiązanie sprawiało, że zawartość wyświetlacza była w ogóle nierozpoznawalna dla użytkownika. W efekcie końcowym siatkę metalową zastąpiono plexi z wtopioną delikatną siatką, nie pogarszającą przezroczystości wyświetlacza. Plexi została przycięta tak, że druciki siatki wystawały poza nią, co umożliwiło połączenie ich z podstawą obudowy, tak samo jak pokazano to na zdjęciu na rysunku 9.18b.

Dla nastawnika przewidziano zwyczajną, tanią obudowę metalową. Obudowa ta składała się z podstawy i pokrywy. Obudowa ta nie spełniała istotnego wymogu niezbędnego w budowie kompatybilnych urządzeń, którym jest wyrównanie potencjału między wszystkimi metalowymi częściami urządzenia. Powierzchnie styku podstawy z pokrywą były pokryte farbą. Połączenie obu części ograniczało się do czterech śrub na rogach pokrywy. Do uzyskania zadowalającego poziomu odporności zdrapano farbę na wszystkich krawędziach styku podstawy z pokrywą.

Dodatkowo zwiększono liczbę śrub mocujących pokrywę z podstawą. Eksperymentalny dobór rozmieszczenia dodatkowych śrub zilustrowano zdjęciem na rysunku 9.18c. Śruby rozmieszczono w odstępach nie większych niż 12 cm, tak aby antena szczelinowa między sąsiadującymi śrubami była mniejsza niż pierwsze dopasowanie do połowy długości fali o częstotliwości 1.25 GHz [65]. To uzasadnienie wynika z faktu, że szerokość widma częstotliwości odpowiadająca czasowi narastania impulsu prądu wyładowania elektrostatycznego znormalizowanego w normie [33] (800 ps) wynosi  $BW = 1.25$  GHz, co w próżni odpowiada fali o długości 24 cm.

Na wyjściu sygnałowym z płyty głównej 3.3 V zamontowano kondensator 100 nF, jak pokazano na rysunku 9.18e.

### 9.2.2 Poprawa odporności na szybkie, elektryczne stany przejściowe

Norma [19] w punkcie dotyczącym odporności na szybkie, elektryczne stany przejściowe sprzęgane z wejściem AC, zasilanym z gniazda w strefie nastawnikowej ma zdefiniowany poziom 2 kV, co przedstawiono w wierszu 2.1 Tabeli 7.2. W doktoracie zdefiniowano wyższy poziom tego narażenia, a mianowicie 4 kV, co pokazano w wierszu 2.1 Tabeli 9.2.

Norma [19] w punkcie dotyczącym odporności na szybkie, elektryczne stany przejściowe sprzęgane z przewodem sterowania przychodzącym ze strefy napięcia średniego ma zdefiniowany poziom 4 kV, co przedstawiono w wierszu 3.1 Tabeli 7.3. W doktoracie zdefiniowano ten sam poziom co pokazano w wierszu 3.1 Tabeli 9.2. Wytlumaczeniem jest brak na rynku dostępnych generatorów o wyższych poziomach narażeń.



(a) Splotka przewodu zasilającego i ułożenie (b) Ferryty CM na przewodzie zasilającym i (c) Ferryt CM na przewodzie do przycisku na płycie czołowej.

**Rysunek 9.19.** Poprawa odporności na szybkie elektryczne stany przejściowe (BURST).

Zasadniczym problemem było przejście badania przy sprzęganiu 4 kV z przewodem zasilającym.

Filtr sieciowy KFS 4300.5053 firmy SHURTER, który widać na rysunku 9.19b nie był wystarczający.

Z przewodu między filtrem sieciowym, a wyłącznikiem głównym na płycie czołowej zrobiono skrętkę i ułożono ten przewód możliwie blisko obudowy, co pokazano na rysunku 9.19a.

Za filtrem sieciowym na skrętce założono ferryt typu 0431164181 firmy Fairrite z trzema zwojami, jak pokazano na rysunku 9.19b.

Na przewodzie do konwertera DC/DC z 5 V na 3.3 V założono ferryt typu 0475178282 firmy Fairrite z dwoma zwojami, co widać również na rysunku 9.19b.

Na przewód z płyty głównej do włącznika "OK" na płycie czołowej założono ferryt typu 0475161661 firmy Fairrite z trzema zwojami, co widać na rysunku 9.19c.

Wszystkie te środki nie wystarczyły na osiągnięcie odporności przy poziomie 4 kV sprzęganym z wejściem AC. Nieodzownym okazało się umieszczenie przewodów sterujących w ekranie, co najlepiej widać na rysunku 9.10c.

Narazanie poziomem 4 kV przewodów sterujących, umieszczonych w ekranie nie sprawiło żadnych problemów.

# Rozdział 10

## Zakończenie

W pracy zaprojektowano, zbudowano, przeprowadzono testy funkcyjne oraz zbadano kompatybilność elektromagnetyczną nastawnika czasowo-fazowego, przeznaczonego do sterowania badaniami w laboratorium wielkopiędowym. Ponadto stworzono katalog zaleceń dotyczących:

- projektowania, budowy i montażu aparatury elektronicznej, przeznaczonej do pracy w środowisku laboratorium wielkopiędowego,
- tworzenia w laboratorium wielkopiędowym stref, rozmieszczania w nich aparatury i wytyczania tras ułożenia przewodów wewnątrz stref i między strefami.

Tym samym osiągnięto CEL GŁÓWNY i CELE POBOCZNE pracy, zdefiniowane w rozdziale 1.3.

Badanie kompatybilności elektromagnetycznej były poprzedzone kompleksową identyfikacją środowiska elektromagnetycznego w Laboratorium Wielkopiędowym Instytutu Energetyki - Państwowego Instytutu Badawczego.

Na kamienie milowe tej identyfikacji złożyły się:

- pomiary pola elektrycznego i magnetycznego w pomieszczeniach laboratorium oraz pomiary stanów przejściowych napięcia po stronie niskiego napięcia transformatora wywołanych załączeniem wyłącznika w obwodzie średniego napięcia,
- obserwacja i rejestracja procesu zamykania się styków wyłącznika średniego napięcia w stanie wymontowania wyłącznika,
- numeryczne symulacje trójfazowego obwodu średniego napięcia w stanie nieustalonym wywołanym zamykaniem się styków wyłącznika.

Już pierwsze pomiary pola elektrycznego i magnetycznego w pomieszczeniu, w którym znajdował się nastawnik, izotropową sondą pola elektrycznego i magnetycznego o wąskim paśmie częstotliwości (5 Hz - 400 kHz) pozwoliły zidentyfikować zaburzenie jako tłumione oscylacje pól. Przebieg tych oscylacji odbiegał znacząco od oscylacji zdefiniowanych w normie [32]. Ponadto widoczna była w nich dominacja pola elektrycznego nad magnetycznym.

Obserwacje te zostały potwierdzone pomiarami pola sondami kierunkowymi  $\dot{D}(t)$  i  $\dot{B}(t)$  o znacznie szerszym paśmie (100 kHz - 3.5 GHz) dla sondy  $\dot{D}(t)$  oraz (100 kHz - 2.0 GHz) dla sondy  $\dot{B}(t)$ . Ponadto mierzono napięcie po stronie niskiego napięcia transformatora, rejestratorem HIOKI 8861-50, o częstotliwości próbkowania 20 MS/s, [26].

Do kompleksowego zidentyfikowania środowiska elektromagnetycznego niezbędne było ustalenie przyczyny powstawania tych oscylacji. Samo zaobserwowanie występowania oscylacji tłumionych, bez znalezienia przyczyny ich powstawania daje możliwość zapobiegania ich skutkom jedynie poprzez wpływanie na symptomy. W kompatybilności elektromagnetycznej, tak jak i w całym życiu obowiązuje żelazna zasada, że zaburzenia tłumione są skuteczniej tylko wtedy, gdy znamy ich źródło. Stąd niezbędne było znalezienie odpowiedzi na pytanie: gdzie i dlaczego powstają powtarzające się oscylacje tłumione?

W tym względzie rozstrzygającym okazały się pomiary samego wyłącznika w stanie wymontowanym, a w szczególności zaobserwowanie nierównoczesności zamykania się styków wyłącznika, co uznano za przyczynę powstawania oscylacji tłumionych.

Hipoteza ta została zweryfikowana na drodze symulacji numerycznych stanu nieustalonego kaskady trzech trójfazowych linii zasilających o parametrach skupionych oraz wariantu, w którym odcinek linii zasilającej przy transformatorze był potraktowany jako linia długa zamodelowana układem drabinkowym. Obciążeniem linii zasilającej był transformator napięcia średniego na niskie w stanie jałowym. Stan nieustalony był wywoływany nierównoczesnym zwiernianiem się styków wyłącznika w obwodzie napięcia średniego.

Przyjęty model symulacyjny jest dużym uproszczeniem w stosunku do rzeczywistej instalacji badawczej laboratorium, jednakże podobieństwo przebiegu symulowanych napięć w transformatorze z napięciami pomierzonymi, potwierdza przyjętą hipotezę o przyczynach powstawania oscylacji tłumionych.

Tym samym udowodniona została TEZA GŁÓWNA pracy zdefiniowane w rozdziale 1.3, przytoczona raz jeszcze poniżej:

*Środowisko elektromagnetyczne wielkopiętowego laboratorium zwarciowego ma specyfikę odbiegającą znacznie od środowisk zdefiniowanych w normach, w tym w szczególności od środowiska:*

- *elektrowni i podstacji, zdefiniowanych w normie [19],*
- *laboratoriów, w których wykorzystywana jest aparatura pomiarowa i sterująca, opisanego w normie [74],*

Konsekwencją udowodnienia tezy głównej pracy było potraktowanie Laboratorium Wielkopiętowego jako instalacji stacjonarnej, rozumianej tak, jak podano w dyrektywie [18] oraz

określenie występujących w niej rodzajów i poziomów zaburzeń, w celu opracowania indywidualnego programu badań kompatybilności elektromagnetycznej nowo zbudowanego nastawnika. Jest to podejście przewidziane w dyrektywie [18] dla jednostki notyfikującej, a więc jednostki posiadającej najwyższy stopień kompetencji w zakresie kompatybilności elektromagnetycznej, uznawany przez kraje członkowskie Unii Europejskiej.

Nowo zbudowany nastawnik przeszedł z wynikiem pozytywnym zaproponowany w doktoracie program badań kompatybilności elektromagnetycznej, co stanowi udowodnienie dwu podpunktów tezy pomocniczej, zdefiniowanej w rozdziale 1.3, przytoczonych raz jeszcze poniżej:

*Kompatybilność elektromagnetyczną aparatury sterującej badaniami w laboratorium wieloprądowym można osiągnąć po restrykcyjnym spełnieniu następujących warunków:*

- *Laboratorium wieloprądowe trzeba potraktować jako instalację stacjonarną, rozumianą tak, jak podano w dyrektywie [18]. Określić występujące w niej zaburzenia, zdefiniować indywidualny program badań kompatybilności.*
- *Aparatura sterująca musi być zbudowana z rygorystycznym zachowaniem wszelkich zasad dotyczących kompatybilności.*

Zrealizowanie trzeciego podpunktu tezy pomocniczej, dotyczącego pomieszczenia laboratorium oraz osprzętu w nim używanego omówione jest w podrozdziale poniżej.

## **10.1 Wytyczne dotyczące budowy aparatury sterującej i rozplanowania laboratorium**

### **10.1.1 Budowa aparatury sterującej**

- ścieżki na płytkach drukowanych PCB powinny być jak najkrótsze,
- ścieżki sygnałów symetrycznych muszą być prowadzone na PCB możliwie blisko siebie,
- zalecane jest stosowanie wielowarstwowych płytek drukowanych z przeznaczeniem jednej lub kilku warstw na masę odniesienia dla elektroniki,
- przewody i wiązki przewodów muszą być jak najkrótsze i ułożone w sposób zdefiniowany jak najbliżej obudowy metalowej,
- wszystkie części metalowe obudowy, włączając w to otwór na filtr przeciwzakłóceńowy, nie mogą być pokryte farbą, po to aby części metalowe stykały się ze sobą możliwie jak

największymi powierzchniami, co daje wyrównanie potencjałów i zapobiega powstawaniu anten szczelinowych [6],

- rozstaw śrub, nitów lub miejsc spawania części obudowy musi być taki, aby długość anteny szczelinowej między sąsiadującymi miejscami połączenia była mniejsza niż pierwsze dopasowanie do połowy długości fali odpowiadającej największej częstotliwości pracy w urządzeniu i równocześnie odpowiadającej największej częstotliwości zaburzenia sprzęganego w trakcie badań kompatybilności elektromagnetycznej [65],
- pewniejszym, ale droższym rozwiązaniem jest zastosowanie obok punktowego połączenia części metalowych, ułożenie na całej długości styku uszczelki elektromagnetycznych,
- czasami istnieje konieczność wstawienia w otwór wyświetlacza metalizowanego plexi (napylenie powłoką metalową lub zatopienie siatki metalowej). Warstwa metalowa plexi musi być połączona galwanicznie na całym obwodzie z obudową w celu zapewnienia wyrównania potencjałów.

### 10.1.2 Plan sytuacyjny laboratorium

W laboratorium trzeba przewidzieć trzy strefy: średniego napięcia, niskiego napięcia i nastawnię, jak pokazano na rysunku 10.1

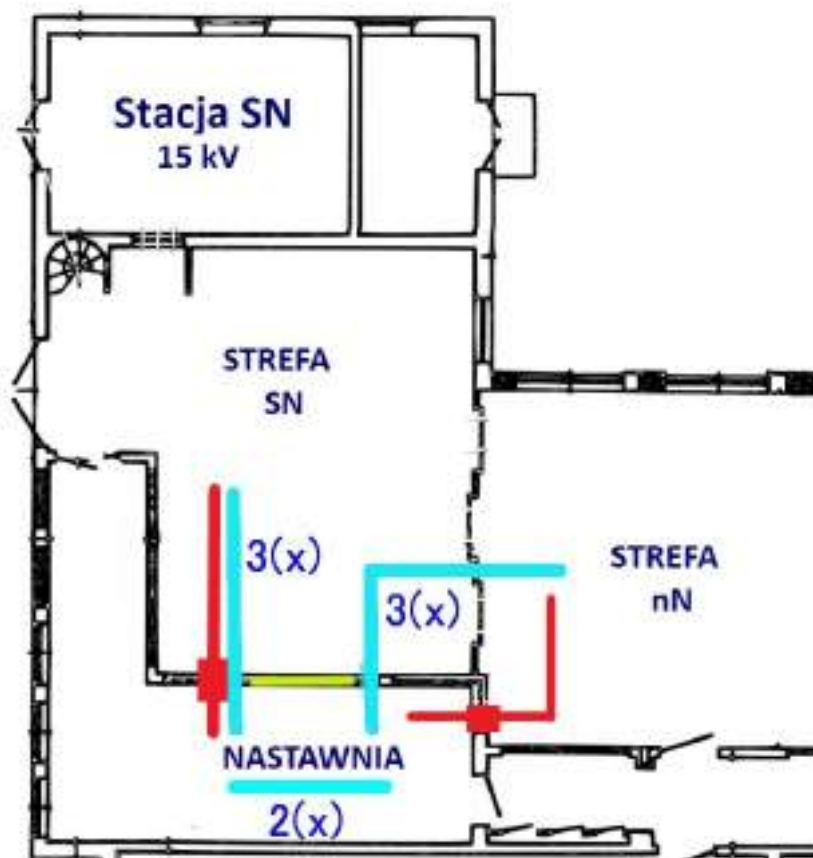
Nastawnia powinna być ekranowana. Ekran można zrealizować wykładając ściany strefy tapetą przewodzącą bądź budując strefę w klatce Faradaya. Okno w ścianie między nastawnią, a strefą średniego napięcia (zaznaczone linią zieloną na rysunku 10.1) musi być również ekranowane, co można zrealizować używając szyby napyłonej warstwą miedzi bądź używając plexiglass z wtopioną siatką metalową. Metalowe obrzeże okna musi być połączony z ekranem dochodzącym do otworu okna.

Przewody przechodzące ze strefy niskonapięciowej do nastawni muszą być ekranowane. Najlepiej ułożyć je w kanałach przewidzianych w tym celu w podłodze i przykryć płytami metalowymi. W przepustach do nastawni ekrany przewodów muszą być połączone z ekranem pomieszczenia. To samo dotyczy przewodu między strefą średniego napięcia a nastawnią. W tym celu można zastosować przepusty EMC, co zaznaczono pogrubieniami kabli na rysunku 10.1.

Na rysunku 10.1 kolorem niebieskim zaznaczone są trasy przewodów w istniejącym laboratorium. Przewody między strefą niskiego napięcia a nastawnią przechodzą przez strefę średniego napięcia. Jest to duże uchybienie zasadom kompatybilności. Konieczne jest wytyczenie tej trasy z pominięciem strefy średniego napięcia, co zaznaczono kolorem czerwonym.

Zasilanie strefy nastawnika musi być wyfiltrowane.





Rysunek 10.1. Sposób poprawy ułożenia tras przewodów w rozpatrywanym laboratorium zwarciowym.

## 10.2 Dalsze kierunki badań w tematyce opracowanej w rozprawie doktorskiej

Poziomy elektrycznych stanów nieustalonych tłumionych oscylacyjne (DOW), powstających w chwili zamykania obwodu napięcia średniego zależą w znacznym stopniu od wartości chwilowej napięcia średniego w momencie zwierania styków wyłącznika. W obecnym rozwiązaniu moment zwierania styków jest zjawiskiem losowym, zależnym od chwili uruchomienia przez operatora zwierania styków. W celu ograniczenia narażenia elektromagnetycznego związanego z zamykaniem obwodu napięcia średniego można zbudować oddzielne urządzenie dobierające w sposób optymalny moment zwarcia styków wyłącznika.

W pracy przeprowadziłam szereg symulacji trójfazowej linii średniego napięcia zasilającej transformator. Przewiduję kontynuację powyższych prac polegającą na udoskonaleniu mo-

delu linii trójprzewodowej i rozbicia tego modelu na składowe symetryczne i składową asymetryczną. Ponadto przewiduję analizy stanów nieustalonych w różnych wariantach obciążenia transformatorem (jednofazowe, dwufazowe), gdyż takie stany pracy też są wykorzystywane w omawianym laboratorium.

# Bibliografia

- [1] *3D H/E fieldmeter ESM-100 Patented Measuring of Electric- and Magnetic Field with FFT*. URL: <https://maschekpolska.pl/uploads/products/ESM-100-FFT-EN.pdf>.
- [2] Yachia Achour i in. „D-dot, B-dot data processing of fields generated with broadband pulsed antenna”. W: *Przegląd Elektrotechniczny* R. 95, nr 11 (2019), 109–112. ISSN: 0033-2097.
- [3] Omar M. Aladdin i in. „A New Technique for High Current Calibrations Using Low Voltage Reference Standards”. W: *IEEE INSTRUMENTATION & MEASUREMENT MAGAZINE* 25.3 (2022), s. 30–36.
- [4] K. Aniserowicz. „Udary przepięciowe w obwodach elektroenergetycznych niskiego napięcia”. W: *Przegląd Elektrotechniczny* R. 92, nr 2 (2016), 8–13. ISSN: 0033-2097.
- [5] K. Aniserowicz. „Zasady kompatybilności elektromagnetycznej w instalacjach elektrycznych budynków”. W: *Przegląd Telekomunikacyjny + Wiadomości Telekomunikacyjne* nr 7 (2009), 265–268. ISSN: 1230-3496.
- [6] K. Aniserowicz i M. Zielenkiewicz. „Zasady ekranowania i wyrównywania potencjałów w systemach informatycznych”. W: *Wiadomości Elektrotechniczne* R. 77, nr 4 (2009), 30–34. ISSN: 0043-5112.
- [7] *ATMEGA328P Datasheet, PDF*. 2015. URL: <https://www.microchip.com/en-us/search?searchQuery=ATmega328P>.
- [8] Wojciech Bandurski. *Metody analizy pól i propagacji fal elektromagnetycznych w elektronice i telekomunikacji*. pol. Wydanie I. Poznań: Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, 2012. ISBN: 9788377751633.
- [9] P. Bieńkowski, J. Karpowicz i J. Kieliszek. „Przegląd miar skutków narażenia na zmienne w czasie pole elektromagnetyczne i właściwości metrologicznych mierników, istotnych podczas oceny narażenia w środowisku pracy”. W: *Podstawy i Metody Oceny Środowiska Pracy* Nr 4 (90) (2016), 41–74. ISSN: 1231-868X.

- [10] P. Bieńkowski, M. Świdorski i B. Zaburzak. „Wybrane aspekty wzorcowania mierników pola elektromagnetycznego”. W: *Pomiary Automatyka Kontrola* R. 58, nr 3 (2012), 240–244. ISSN: 0032-4110.
- [11] Stanisław Bolkowski. *Teoria obwodów elektrycznych*. Warszawa: WNT, 2012. ISBN: 9788320432220.
- [12] D. Burger i in. „Sources of transient electromagnetic disturbance in medium voltage switchgear”. eng. W: *10th International Symposium on Electromagnetic Compatibility*. IEEE, 2011, s. 597–602. ISBN: 1457717093.
- [13] Alain Charoy. „Electromagnetic Compatibility of Power Converters”. W: *CAS - CERN Accelerator School: Power Converters* (2015), s. 83–95. DOI: 10.5170/CERN-2015-003.83.
- [14] Tadeusz Cholewicki. *Elektrotechnika teoretyczna*. 4th edition. Warszawa: WNT, 1973.
- [15] Zbigniew Ciok. *Procesy łączeniowe w układach elektroenergetycznych*. pol. Wyd. 2 uzup. Podręczniki Akademickie. Elektrotechnika. Warszawa: WNT, 1983. ISBN: 8320405572.
- [16] International Electrotechnical Commission. *Corrigendum 1 - Specification for radio disturbance and immunity measuring apparatus and methods - Part 2-1: Methods of measurement of disturbances and immunity - Conducted disturbance measurements*. Spraw. tech. 16-2-1. Wer. 2014/COR1:2020. CISPR.
- [17] G. Durcansky. *EMV-gerechtes Gerätedesign. Grundlagen der Gestaltung störungsarmer Elektronik*. München, Franzis, 1995.
- [18] *Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2014/30/UE z dnia 26 lutego 2014 r. w sprawie harmonizacji ustawodawstw państw członkowskich odnoszących się do kompatybilności elektromagnetycznej (wersja przekształcona)*.  
<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PL/TXT/?uri=CELEX:3A32014L0030>. 2014.
- [19] *Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 6-5: Generic standards - Immunity for equipment used in power station and substation environment*. Norma Europejska IEC 61000-6-5:2016-01. Wer. 2016-01. PKN.
- [20] Kamil Filik i Grzegorz Masłowski. „Analiza zaburzeń piorunowych indukowanych w modelu wiązki kablowej statku powietrznego”. eng. W: *Scientific Journals of Rzeszów University of Technology, Series: Electrotechnics* (2018), s. 5–24. ISSN: 0209-2662.
- [21] Marek Adam Galewski. *STM32 : aplikacje i ćwiczenia w języku C z biblioteką HAL*. pol. Wydanie I. Legionowo: Wydawnictwo BTC, 2019. ISBN: 9788364702174.

- [22] A. Gerfer i in. *Trilogy of Magnetics*. Adolf Würth GmbH & Co. KG., 2018. ISBN: 9783899294002.
- [23] Percy Hammond. *Applied Electromagnetism (Applied Electricity & Electronics S.)* Pergamons, 2001. ISBN: 0080163823.
- [24] Percy Hammond. *Electromagnetism for engineers, an introductory course*. 4th edition. Oxford University Press, 1997.
- [25] Z. Hanzelka i Z. Kowalski. „Kompatybilność elektromagnetyczna (EMC) i jakość energii elektrycznej w dokumentach normalizacyjnych”. W: *Jakość i Użytkowanie Energii Elektrycznej* T. 5, z. 1 (1999), 93–107. ISSN: 1234-6799.
- [26] *HIOKI 8860-508861-50 Instruction Manual*. URL: <https://www.manualslib.com/manual/1251244/Hioki-8860-50.html>.
- [27] Eugeniusz Jeziński. *Transformatory. Cz. 1*. pol. Wyd. 2. popr. i uzup. Warszawa: Nakł. Stowarzyszenia Elektryków Polskich, 1949.
- [28] H. Singer K. H. Gonschorek. *Elektromagnetische Verträglichkeit*. Stuttgart: B. G. Teubner, 1992. ISBN: 978-3-322-82992-4.
- [29] Jolanta Karpowicz. „Ochrona przed zagrożeniami elektromagnetycznymi w środowisku pracy w świetle najnowszych opracowań międzynarodowych”. W: *Podstawy i Metody Oceny Środowiska Pracy* Nr 4 (114) (2022), 153–177. ISSN: 1231-868X.
- [30] *Kompatybilność elektromagnetyczna (EMC) – Część 4-9: Metody badań i pomiarów – Badanie odporności na impulsowe pole magnetyczne*. Norma Europejska PN-EN 61000-4-9:2016-11. 2016-11.
- [31] *Kompatybilność elektromagnetyczna (EMC) – Część 4-11: Metody badań i pomiarów – Badania odporności na zapady napięcia, krótkie przerwy i zmiany napięcia dla urządzeń o znamionowym prądzie fazowym nie przekraczającym 16 A*. Norma Europejska PN-EN IEC 61000-4-11:2020-11. 2020-11.
- [32] *Kompatybilność elektromagnetyczna (EMC) – Część 4-18: Metody badań i pomiarów – Badanie odporności na tłumiony przebieg oscylacyjny*. Norma Europejska PN-EN IEC 61000-4-18:2019-08. Wer. 2019-08. PKN.
- [33] *Kompatybilność elektromagnetyczna (EMC) – Część 4-2: Metody badań i pomiarów – Badanie odporności na wyładowania elektrostatyczne*. Norma Europejska PN-EN 61000-4-2:2011. Wer. 2011-06. PKN.

- [34] *Kompatybilność elektromagnetyczna (EMC) – Część 4-20: Metody badań i pomiarów – Badanie emisji i odporności w falowodach z poprzeczną falą elektromagnetyczną (TEM)*. Norma Europejska PN-EN 61000-4-20. Wer. 2011-02. PKN.
- [35] *Kompatybilność elektromagnetyczna (EMC) – Część 4-4: Metody badań i pomiarów – Badanie odporności na serie szybkich elektrycznych stanów przejściowych*. Norma Europejska PN-EN 61000-4-4:2013-05. Wer. 2013-05. PKN.
- [36] *Kompatybilność elektromagnetyczna (EMC) – Część 4-5: Metody badań i pomiarów – Badanie odporności na udary*. Norma Europejska PN-EN 61000-4-5:2014-10. Wer. 2014-10. PKN.
- [37] *Kompatybilność elektromagnetyczna (EMC) – Część 4-6: Metody badań i pomiarów – Odporność na zaburzenia przewodzone, indukowane przez pola o częstotliwości radiowej*. Norma Europejska PN-EN 61000-4-6:2014-04. Wer. 2015-08. PKN.
- [38] *Kompatybilność elektromagnetyczna (EMC) – Część 4-8: Metody badań i pomiarów – Badanie odporności na pole magnetyczne o częstotliwości sieci elektroenergetycznej*. Norma Europejska PN-EN 61000-4-8:2010. Wer. 2010-07. PKN.
- [39] *Kompatybilność elektromagnetyczna (EMC) – Część 6-2: Normy ogólne – Norma dotycząca odporności w środowiskach przemysłowych*. Norma Europejska PN-EN 61000-6-2. Wer. 2019-04. PKN.
- [40] A. Kozłowska i T. Reczek, red. *Wybrane problemy kompatybilności elektromagnetycznej*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 2005. ISBN: 83-7085-883-x.
- [41] Michał Kurzela. „Precyzyjny detektor przejścia napięcia przez zero”. pl. W: *Elektronika Praktyczna* 7/2019.7 (2019), s. 64–66.
- [42] T. Maksimowicz i K. Aniserowicz. „Badania skuteczności ekranowania pól elektromagnetycznych przez ekrany siatkowe”. W: *Pomiary Automatyka Kontrola* R. 56, nr 2 (2010), 101–102. ISSN: 0032-4110.
- [43] G. Masłowski i R. Ziemba. „Analiza zagrożeń przepięciowych powodowanych we wchodzącej do obiektu linii przez pobliskie wyładowania piorunowe”. W: *Energetyka* nr 7 (2018), 402–405. ISSN: 0013-7294.
- [44] Grzegorz Masłowski. *Analiza i modelowanie wyładowań atmosferycznych na potrzeby ochrony przed przepięciami*. pol. Rozprawy, Monografie - Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica 208. Kraków: Wydawnictwa AGH, 2010. ISBN: 9788374643061.
- [45] *Moduł wykonawczy z triakami*. URL: <http://www.serwis.avt.pl>.

- [46] Mieczysław Nowak. *Poradnik inżyniera energoelektronika*. pol. Warszawa: WNT, 1998. ISBN: 832042223X.
- [47] J. Nowicki i J. Maksymiuk. *Aparaty elektryczne i rozdzielnice wysokich i średnich napięć*. pol. Warszawa: Oficyna Wydawnicza PW, 2014. ISBN: 9788378141754.
- [48] Stanisław Osowski. *MATLAB w zastosowaniu do obliczeń obwodowych i przetwarzania sygnałów*. pol. Warszawa: Oficyna Wydawnicza PW, 2006. ISBN: 8372075573.
- [49] Henry W Ott. *Noise reduction techniques in electronic systems*. eng. Second edition. New York [etc.]: John Wiley & Sons, 1988. ISBN: 0471850683.
- [50] Krzysztof Paprocki. *Mikrokontrolery STM32 w praktyce*. pol. Wyd. 1 popr. Legionowo: Wydawnictwo BTC, 2011. ISBN: 9788360233528.
- [51] Clayton R Paul. *Analysis of multiconductor transmission lines*. eng. 2nd ed. Hoboken, New Jersey: Wiley-Interscience : IEEE Press, 2008. ISBN: 9780470131541.
- [52] Clayton R Paul. *Inductance: Loop and Partial*. Wiley, 2009. ISBN: 0470461888.
- [53] Clayton R Paul. *Introduction to Electromagnetic Compatibility*. eng. 2nd ed. T. 184. Wiley series in microwave and optical engineering. Hoboken: John Wiley & Sons, Incorporated, 2006. ISBN: 9780471755005.
- [54] J. Przybysz, M. Owsiniński i Z. Piątek. „Praktyczne aspekty wytrzymałości zvarciowej urządzeń z półprzewodnikami mocy”. W: *Prace Instytutu Elektrotechniki* 270 (2015), 47–61.
- [55] Henryk Rawa. *Podstawy elektromagnetyzmu*. pol. Wyd. 3. Warszawa: Oficyna Wydawnicza PW, 2011. ISBN: 9788372075253.
- [56] *Rozporządzenie Ministra Zdrowia z dnia 17 grudnia 2019 r. w sprawie dopuszczalnych poziomów pól elektromagnetycznych w środowisku*. Rozporządzenie. 2019-12.
- [57] S. Różycki. „Ochrona ludności przed polami elektromagnetycznymi w Unii Europejskiej ze szczególnym uwzględnieniem pól o częstotliwości przemysłowej”. W: *Ochrona przed promieniowaniem...* (2015).
- [58] Jolanta Sadura, Jan Sroka i Maciej Owsinski. „Rough identification of EM disturbances interfering the time-phase controller by the short circuit tests”. en. W: *Proceedings of the 2020 12th International Conference and Exhibition on Electrical Power Quality and Utilisation- (EPQU)*. Red. Tomasz Sikorski. 2020, s. 1–4. DOI: 10.1109/epqu50182.2020.9220298.

- [59] Jolanta Sadura, Jacek Starzyński i Jan Sroka. „Origin of the damped oscillatory waves in the MV mains of the High Current Testing Laboratory”. W: *2024 International Symposium on Electromagnetic Compatibility – EMC Europe*. 2024, 1–6, w trakcie publikowania.
- [60] Jolanta Sadura i in. „Control equipment in the unique EMC environment of High Current Testing Laboratory, case study”. W: *2023 International Symposium on Electromagnetic Compatibility – EMC Europe*. 2023, s. 1–5. DOI: 10.1109/EMCEurope57790.2023.10274373.
- [61] Jolanta Sadura i in. „Identification of EM disturbances interfering the time-phase controller by short circuit tests”. en. W: *Proceedings of the 2020 International Symposium on Electromagnetic Compatibility - EMC EUROPE, EMC EUROPE 2020*. 2020, s. 1–6. DOI: 10.1109/EMCEUROPE48519.2020.9245723.
- [62] Jolanta Sadura i in. „Susceptibility Issues of Control Instrumentation in Electromagnetic Environment of High Current Laboratory”. en. W: *Energies* 15.13 (2022), s. 1–13. DOI: 10.3390/en15134682.
- [63] *Sieci rozdzielcze SN Wyłącznik Próżniowy Evolis 24 kV*. 2004. URL: <http://www.schneider-electric.pl>.
- [64] Paul G Slade. *The Vacuum interrupter : theory, design, and application*. eng. Boca Raton [etc.]: CRC Press ; Taylor & Francis Group, 2008. ISBN: 0849390915.
- [65] Jan Sroka. *Compendium on ElectroMagnetic Compatibility*. pol. 1 wyd. Oficyna Wydawnicza PW, 2021. ISBN: 9788381562775.
- [66] Jan Sroka i in. „Uncertainty budget by evaluation of the coil factor in accordance with the standard EN 61000-4-8”. pl. W: *Przegląd Elektrotechniczny* 98.8 (2022), s. 123–127. DOI: 10.15199/48.2022.08.23.
- [67] J. Starzyński. *Laboratorium podstaw elektromagnetyzmu : praca zbiorowa*. pol. Warszawa: Oficyna Wydawnicza PW, 2005. ISBN: 8372075700.
- [68] Jacek Starzyński. *Symulacje komputerowe w projektowaniu kompaktowych generatorów szybkich impulsów pola elektromagnetycznego*. pol. 1 wyd. Oficyna Wydawnicza PW, 2022. ISBN: 9788381564441.
- [69] *Urządzenia przemysłowe, naukowe i medyczne – Charakterystyki zaburzeń o częstotliwości radiowej – Poziomy dopuszczalne i metody pomiaru*. Norma Europejska PN-EN 55011:2016-05. Wer. 2016-05. PKN.
- [70] *Wielkopądowa technika probiercza – Definicje i wymagania dotyczące prądów probierczych i układów pomiarowych*. Norma Europejska PN-EN 62475:2010. 2010-12.



- [71] Stanisław Wincenciak i in. *Komputerowe metody analizy pola elektromagnetycznego*. Warszawa: WNT, 1993.
- [72] S. Wolf i R. Regenhold. *Abc of Power Modules. Functionality, Structure and Handling of a Power Module*. Adolf Würth GmbH & Co. KG., 2015. ISBN: 9783899293982.
- [73] Stanisław Wyderka i in. „INVESTIGATION OF SURGE CURRENT DISTRIBUTION IN LIGHTNING PROTECTION SYSTEM AND ELECTRICAL INSTALLATION OF BUILDING”. eng. W: *Scientific Journals of Rzeszów University of Technology, Series: Electrotechnics* (2013), s. 349–363. ISSN: 0209-2662.
- [74] *Wyposażenie elektryczne do pomiarów, sterowania i użytku w laboratoriach - Wymagania dotyczące kompatybilności elektromagnetycznej (EMC) – Część 1: Wymagania ogólne*. Norma Europejska EN 61326-1. Wer. 2020. PKN.
- [75] *Wysokonapięciowa aparatura rozdzielcza i sterownicza – Część 1: Postanowienia wspólne dla aparatury rozdzielczej i sterowniczej prądu przemiennego*. Norma Europejska PN-EN 62271-1:2018-02. 2018-02.
- [76] Jerzy Stanisław Zieliński. *Zastosowanie metody charakterystyk do analizy stanów nieustalonych w układach elektroenergetycznych*. pol. Wydanie 1. Postępy Techniki Wysokich Napięć z. 12. Warszawa: Państwowe Wydawnictwo Naukowe, 1975.
- [77] B. Zubrzak i P. Bieńkowski. „Wynik wzorcowania miernika pola elektromagnetycznego z sondą izotropową”. W: *Przegląd Elektrotechniczny* R. 93, nr 1 (2017), 241–244. ISSN: 0033-2097.