

JANUSZ
TADEUSZ

KOZAK *
JANOWSKI**

*ELECTROTECHNICAL INSTITUTE IN WARSAW, POLAND

**LUBLIN UNIVERSITY OF TECHNOLOGY, POLAND

„The analysis of inductive Superconducting Fault Current Limiters' operation.” „Analiza działania nadprzewodnikowych ograniczników prądu typu indukcyjnego.”

Summary

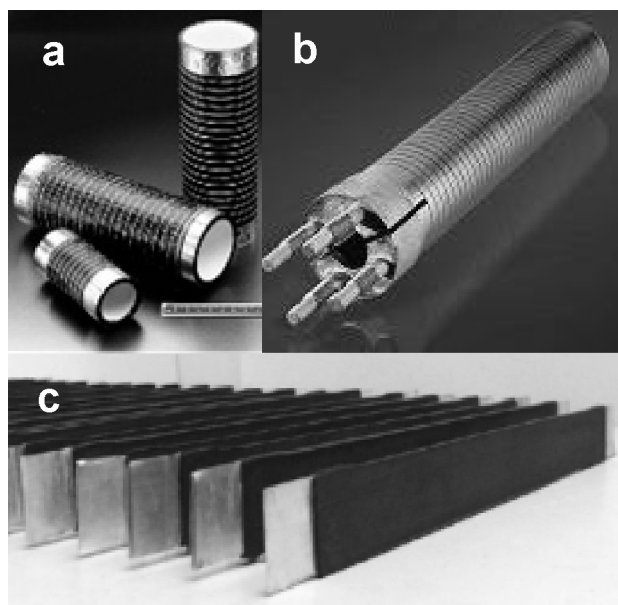
The analysis of inductive type of Superconducting Fault Current Limiters was described in this paper on the base of numerical models investigation and experiments. The Bi2223 superconducting tube was used as shorted secondary winding of the SFCL physical model. The $U-I$ characteristic of the SFCL and current courses with and without limiter in the circuit were described. The distributions of magnetic field of limiters numerical models in resistive and superconducting state are presented. The effectiveness of inductive type of SFCL with closed and open core was also compared.

1. Wprowadzenie

W artykule przedstawiona została analiza działania nadprzewodnikowych ograniczników prądu typu indukcyjnego na podstawie wyników badań modeli numerycznych oraz przeprowadzonych eksperymentów. W modelu fizycznym ogranicznika zastosowany został pierścień nadprzewodnikowy z materiału Bi-2223 stanowiący zwarte uzwojenie wtórne ogranicznika. Wykonane zostały modele numeryczne ograniczników oraz rozkłady indukcji magnetycznej w stanie nadprzewodzącym i rezystywnym. W artykule przedstawione zostały charakterystyki $U-I$ ograniczników, oraz przebiegi czasowe prądu w obwodzie zwarciovym z ogranicznikiem i bez ogranicznika. Porównana została skuteczność ograniczania prądów zwarciovych ograniczników z rdzeniem zamkniętym i otwartym.

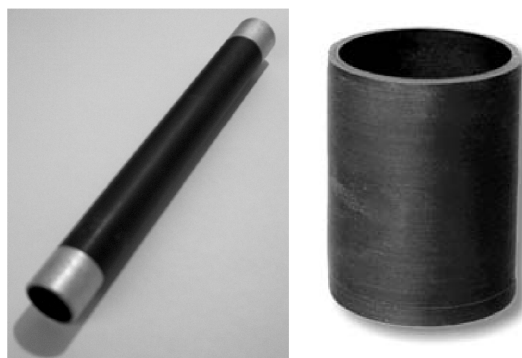
2. Budowa ograniczników

Ograniczniki prądu, (SFCL – Superconducting Fault Current Limiter) są klasyfikowane ze względu na sposób ograniczania prądu. W **ogranicznikach rezystancyjnych** element nadprzewodnikowy poprzez przepusty prądowe łączony jest bezpośrednio do obwodu chronionego. Podczas normalnej pracy przez ogranicznik przepływa prąd znamionowy, po przekroczeniu wartości krytycznej prądu (I_c) nadprzewodnika przy zwarciu w obwodzie, element ten przechodzi do stanu rezystywnego. Gwałtowny wzrost rezystancji ogranicza prąd zwarciovym. Przejściu elementu nadprzewodnikowego do stanu rezystywnego towarzyszy wzrost jego temperatury. Straty ciepłne są powodowane przez przepływający prąd. Wadą takich ograniczników jest konieczność stosowania przepustów prądowych.



Rys.1. (a) i (b) Spirale bezindukcyjne wykonane z nadprzewodnika wysokotemperaturowego do rezystancyjnych ograniczników prądu firmy NEXANS [1]. (c) Elementy do SFCL typu rezystancyjnego firmy Advanced Ceramics Limited [2].

W nadprzewodnikowych **ogranicznikach prądu typu indukcyjnego** prąd zwarciovym nie przepływa przez element nadprzewodnikowy, ponieważ nie jest on galwanicznie połączony z obwodem chronionym.

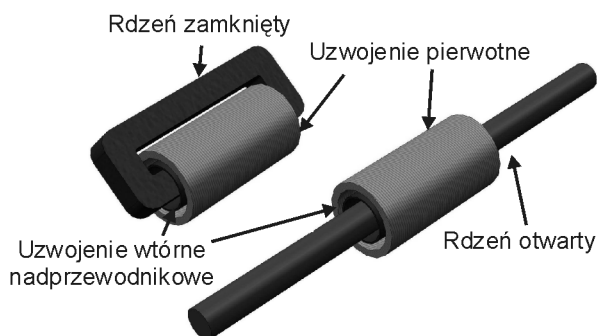


Rys.2. Elementy nadprzewodnikowe z materiału Bi2223 firmy CAN SUPERCONDUCTOR na uzwojenie ogranicznika indukcyjnego. [3]

Ogranicznik indukcyjny zbudowany jest jak transformator ze zwartym uzwojeniem wtórnym, które stanowi pierścień nadprzewodnikowy. Uzwojenie pierwotne wykonane jest z miedzi i włączone bezpośrednio do obwodu. Podczas normalnej pracy uzwojenie wtórne jest w stanie nadprzewodzącym i jego rezystancja $R_{HTS} = 0$, a rdzeń ogranicznika jest ekranowany przez element nadprzewodnikowy, napięcie na ograniczniku spowodowane jest rezystancją uzwojenia pierwotnego oraz reaktancją rozproszenia. W tym stanie ogranicznik pracuje jak przekładnik prądowy. Pod wpływem prądu większego niż prąd krytyczny pierścień nadprzewodnikowy przechodzi do stanu rezystywnego powodując gwałtowny wzrost impedancji ogranicznika. W stanie rezystywnym ogranicznik pracuje jak dławik. Przejście ze stanu nadprzewodzącego do rezystywnego uzwojenia nadprzewodnikowego jest bardzo szybkie i prąd zwarciaowy zostaje ograniczony już w pierwszej ćwiartce okresu.

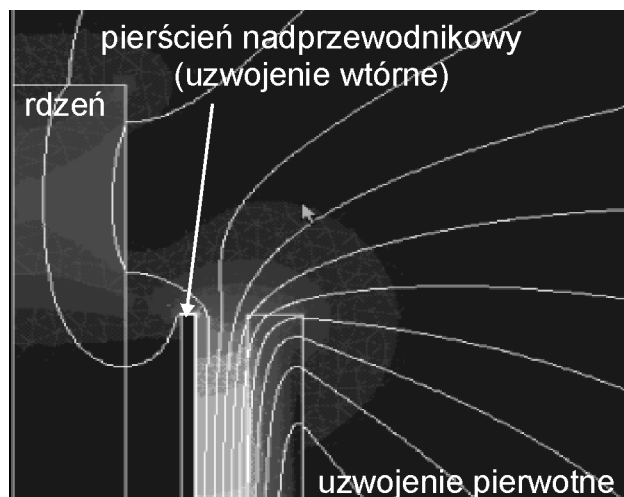
3. Modele numeryczne

W celu analizy rozkładów pól magnetycznych w stanie nadprzewodzącym i rezystywnym zostały wykonane modele numeryczne w programach polowych opartych na metodzie elementów skończonych. Modele numeryczne ograniczników z rdzeniem zamkniętym i otwartym posiadają identyczne uzwojenia, co umożliwiło porównanie ich charakterystyk prądowo-napięciowych. Do programu wprowadzone zostały rzeczywiste dane elementów nadprzewodnikowych posiadanych w laboratorium, HTS Tube CST- 60/100.2.



Rys.3. Modele ogranicznika indukcyjnego z rdzeniem zamkniętym i otwartym.

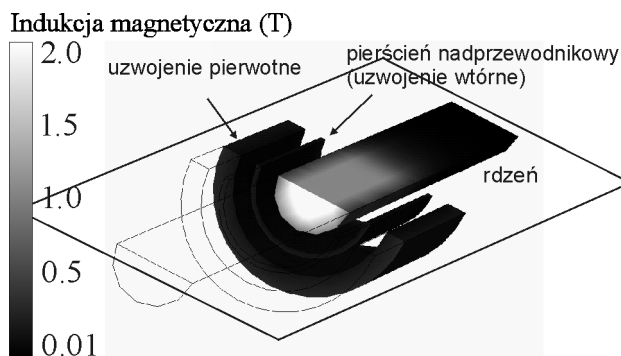
4. Rozkłady pola magnetycznego



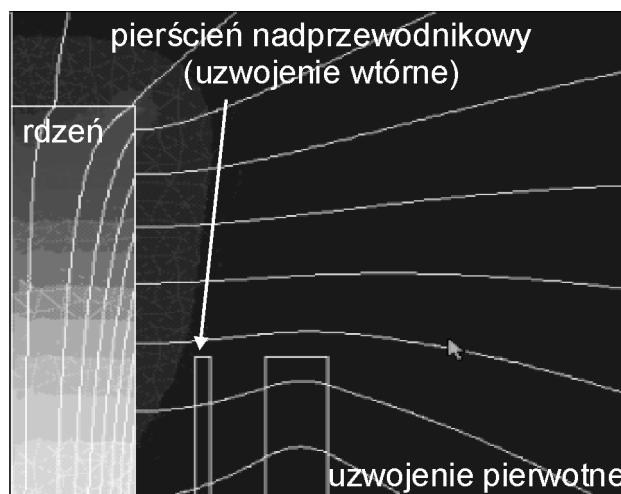
Rys.4. Rozkład strumienia magnetycznego w ograniczniku prądu w stanie nadprzewodzącym.

W stanie nadprzewodzącym strumień magnetyczny nie wnika w nadprzewodnik i rdzeń jest ekranowany. Na rysunku 4 widoczny jest efekt ekranowania rdzenia przez element nadprzewodnikowy, dzięki któremu wartość indukcji magnetycznej w rdzeniu jest bliska zeru.

W stanie rezystywnym zależnie od wartości prądu w obwodzie rdzeń może wejść w stan nasycenia (rys.5). W tym stanie strumień magnetyczny zamyka się poprzez rdzeń i przestrzeń powietrzną, zarówno w ograniczniku z otwartym jak i zamkniętym rdzeniem. Dla indukcji większej od indukcji nasycenia rdzenia przenikalność magnetyczna μ_r jest rzędu nawet kilkudziesięciu.



Rys.5. Rozkład pola magnetycznego w nadprzewodnikowym ograniczniku prądu z otwartym rdzeniem w stanie rezystywnym.[4]



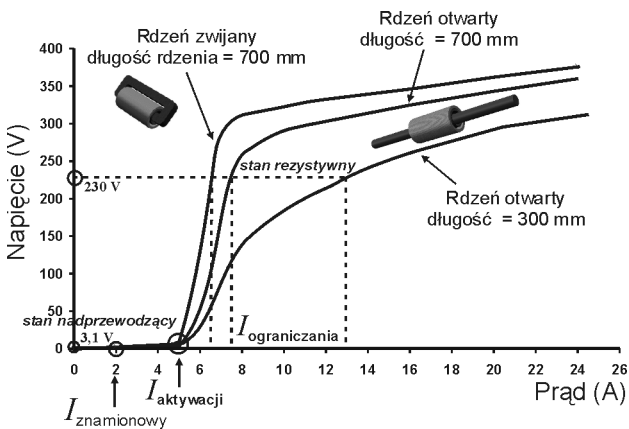
Rys.6. Rozkład strumienia magnetycznego w nadprzewodnikowym ograniczniku prądu w stanie rezystywnym.

W stanie rezystywnym przenikalność magnetyczna nadprzewodnika jest $\mu_r \approx 1$. Rezystywność jest rzędu $\rho = 1e^{-05} \Omega m$. Linie strumienia magnetycznego zamykają się poprzez rdzeń, powodując wzrost indukcyjności ogranicznika. Po przejściu do stanu rezystywnego wzrost impedancji ogranicznika włączonego w zabezpieczony obwód ogranicza w nim prąd w tym obwodzie.

Rozkłady pola magnetycznego w ograniczniku są szczególnie istotne przy projektowaniu nadprzewodnikowych ograniczników prądu typu indukcyjnego. Ze względu na nieliniową charakterystykę materiału rdzenia wyznaczenie wartości prądu w obwodzie metodą analityczną jest niedokładne. W przypadku ogranicznika z rdzeniem otwartym metoda elementów skończonych jest nieodzowna, ponieważ strumień zamyka się poprzez nieograniczoną przestrzeń powietrzną, co znacząco komplikuje obliczenia.

5. Charakterystyka $U-I$ ogranicznika

W celu porównania właściwości ograniczników z rdzeniem otwartym i zamkniętym na podstawie modeli numerycznych wyznaczona została charakterystyka prądowo-napięciowa.

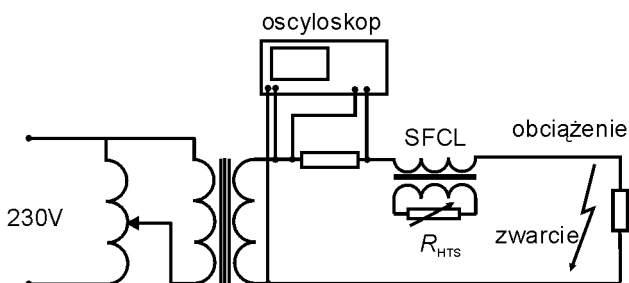


Rys.7. Charakterystyki prądowo-napięciowe modeli numerycznych nadprzewodnikowych ograniczników prądu.

W stanie nadprzewodzącym, a więc, gdy prąd aktywacji nie jest przekroczony charakterystyki pokrywają się, ponieważ rdzeń jest ekranowany. Po przekroczeniu tego prądu, gdy prąd w uzwojeniu wtórnym jest większy od prądu krytycznego pierścienia nadprzewodnikowego napięcie na ograniczniku gwałtownie rośnie. Najlepszymi parametrami charakteryzuje się ogranicznik z rdzeniem zamkniętym, szczególnie przy małych wartościach indukcji w rdzeniu (stroma charakterystyka $U-I$). Przy prądach powodujących nasycenie rdzenia napięcia na ograniczniku dla różnych modeli są zbliżone, z powodu znacznego spadku przenikalności magnetycznej ferromagnetyka. Wartość napięcia w stanie rezystywnym można dobrać zmieniając przekrój rdzenia lub długość rdzenia otwartego.

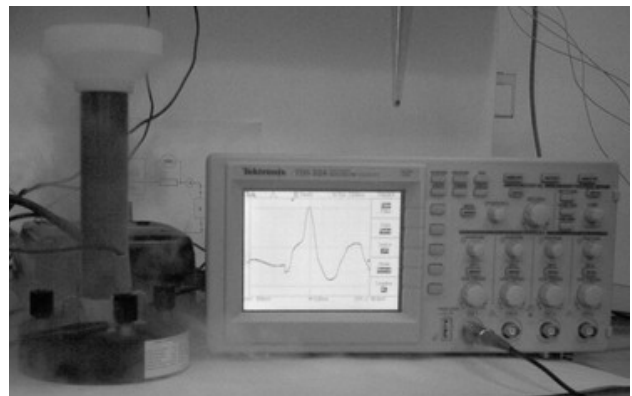
6. Układ pomiarowy

W układzie pomiarowym jak na rysunku 8 przebadany został ogranicznik indukcyjny z otwartym rdzeniem. Układ pomiarowy odseparowany jest galwanicznie od sieci elektrycznej za pomocą transformatora zasilanego z autotransformatora. Przebiegi prądu i napięcia w obwodzie w chwili zwarcia były obserwowane na oscyloskopie i rejestrowane w komputerze.



Rys.8. Schemat układu rejestracji do wyznaczenia przebiegów indukcyjnego nadprzewodnikowego ogranicznika prądu.

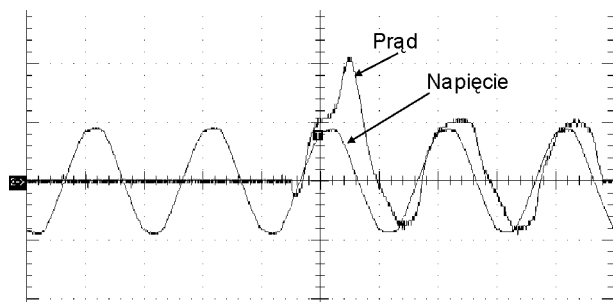
Podczas pomiarów wtórne nadprzewodnikowe uzwojenie schłodzone było ciekłym azotem do temperatury 77 K.



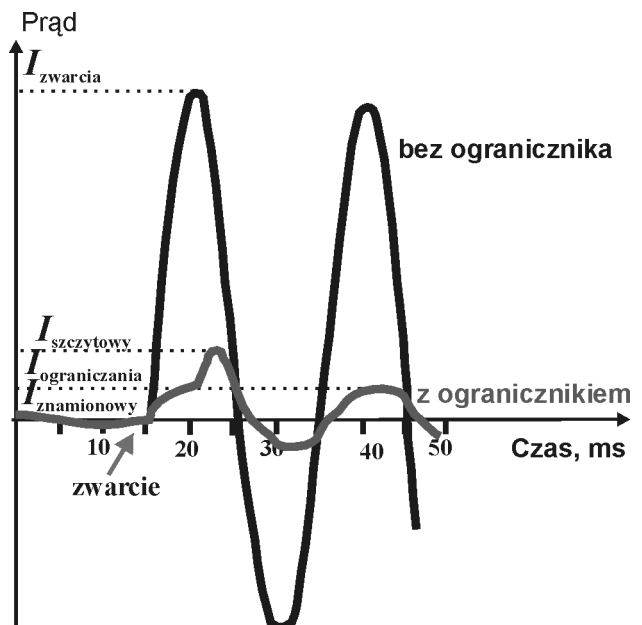
Rys.9. Widok układu pomiarowego nadprzewodnikowego ogranicznika prądu.

7. Przebiegi prądu w obwodzie z ogranicznikiem

Przebieg prądu w układzie rys.8 przy napięciu zasilania, przy którym rdzeń wchodzi w stan nasycenia pokazany jest na rys 10. Widoczny impuls prądu na przebiegu jest skutkiem nasycenia rdzenia i zmniejszenia się impedancji ogranicznika. Występuje on tylko w pierwszej połowie okresu, ponieważ składowa nieokresowa prądu zwarcia ma wówczas największą wartość. Przy zmniejszeniu napięcia zasilającego o 50% impuls ten jest niezauważalny.



Rys.10. Oscylogram, przebieg prądu i napięcia w obwodzie z ogranicznikiem.

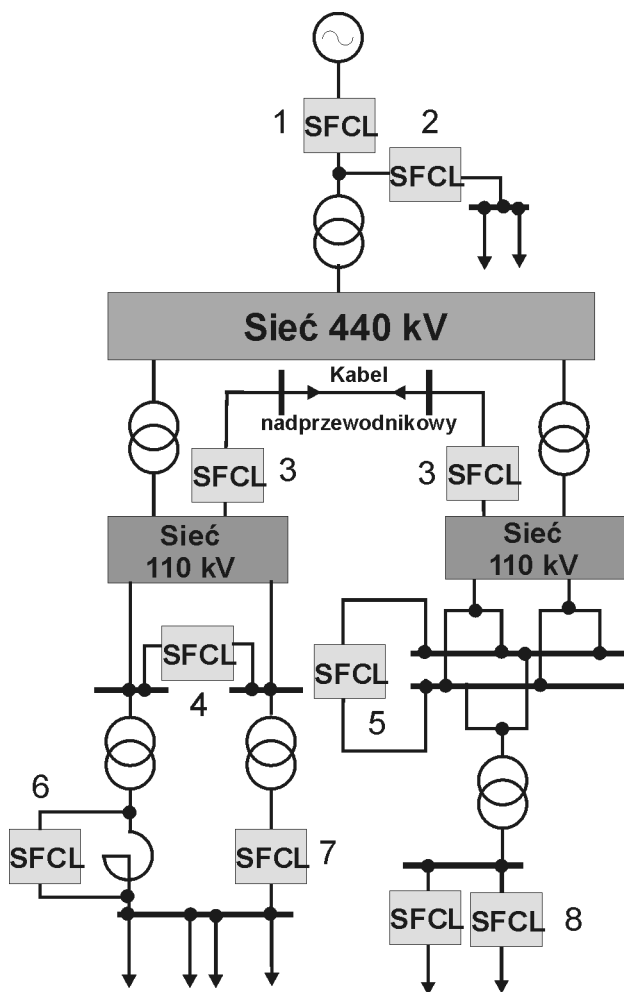


Rys.11. Przebieg prądu zwarciovego w układzie z ogranicznikiem i bez ogranicznika.

Na rysunku 11 przedstawiony został przebieg prądu zwarciovego w obwodzie bez ogranicznika i z ogranicznikiem przy zachowaniu proporcji tych sygnałów. Prąd szczytowy w obwodzie z ogranicznikiem jest około pięciokrotnie mniejszy, a prąd ograniczania około dziesięciokrotnie od prądu zwarciovego.

8. Zastosowanie

Poniższy rysunek przedstawia możliwe lokalizacje nadprzewodnikowych ograniczników prądu w systemie elektroenergetycznym, gdzie ograniczniki oferują swoje korzyści techniczne i ekonomiczne.



Rys.12. Przykładowe zastosowania nadprzewodnikowego ogranicznika prądu w sieci elektroenergetycznej. [5]

1. Przyłącze generatora
2. Urządzenia pomocnicze elektrowni
3. Połączenie dwóch podsieci poprzez kabel nadprzewodnikowy.
4. i 5. Sprzężenie szyn zbiorczych
6. Dławik zbocznikowany ogranicznikiem
7. Przewód zasilający po stronie wtórnej transformatora.
8. Połączenie szyn zbiorczych

W stanie nadprzewodzącym podczas pracy przy prądzie znamionowym ogranicznik charakteryzuje się prawie zerową impedancją, a dzięki szybkiemu przejściu ze stanu nadprzewodzącego do rezystywnego po przekroczeniu wartości prądu aktywacji ogranicza prąd zwarcia. Prąd ograniczania, jaki płynie w obwodzie w kolejnych półokresach po zwarciu nie przekracza 3-5 razy

wartości prądu znamionowego w zależności od konstrukcji ogranicznika.

9. Podsumowanie

W artykule przedstawiona została analiza działania nadprzewodnikowych ograniczników prądu typu indukcyjnego na podstawie badań eksperymentalnych i modeli wykonanych w programach polowych. Analiza modeli numerycznych metodą elementów skończonych umożliwiła wyznaczenie charakterystyk napięciowo-prądowych ograniczników oraz rozkładów pola magnetycznego w różnych stanach pracy. Badania eksperymentalne potwierdziły słuszność założeń przyjętych do modeli numerycznych oraz pozwoliły zweryfikować obliczenia komputerowe. Zarejestrowane przebiegi prądu w obwodzie zwarciovym świadczą o szybkim i skutecznym działaniu ogranicznika. Wykazano, że w zależności od właściwości rdzenia oraz konstrukcji ogranicznika różna jest jego charakterystyka prądowo-napięciowa, która wpływa na zdolność ograniczania prądów zwarciovych.

Literatura:

- [1] www.nexans.de
- [2] www.aclstafford.co.uk/superconductors/
- [3] www.can.cz
- [4] Kozak, J., Janowski T., *Numerical models comparison of Superconducting Fault Current Limiters with Closed and Open Core*, ELMCO 2003.
- [5] Noe M., Oswald B. R., *Technical and Economical Benefits of Superconducting Fault Current Limiters in Power Systems*, Presented at ASC98, Palm Desert, USA.

Mgr inż. Janusz KOZAK
 INSTYTUT ELEKTROTECHNIKI W WARSZAWIE
 PRACOWNIA W LUBLINIE
 UL. NADBYSTRZYCKA 38A, 20-618 LUBLIN, POLAND

Prof. dr hab. inż. Tadeusz JANOWSKI
 POLITECHNIKA LUBELSKA,
 INSTYTUT PODSTAW ELEKTROTECHNIKI
 I ELEKTROTECHNOLOGII
 UL. NADBYSTRZYCKA 38A, 20-618 LUBLIN, POLAND