

XIX Seminarium

ZASTOSOWANIE KOMPUTERÓW W NAUCE I TECHNICIE' 2009

Oddział Gdański PTETiS

Referat nr 23

MODELOWANIE I ANALIZA UKŁADU SIECI ŚREDNIEGO NAPIĘCIA DLA OCENY WARUNKÓW I SKUTKÓW WYSTĘPOWANIA FERROREZONANSU ORAZ SPOSOBÓW JEGO ELIMINACJI

Szczepan MOSKWA¹, Wiesław NOWAK², Rafał TARKO³

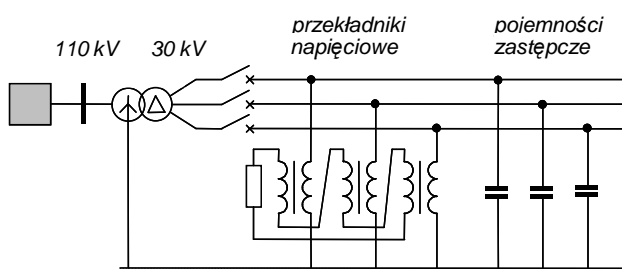
1. Akademia Górniczo- Hutnicza w Krakowie, Katedra Elektrotechniki i Elektroenergetyki
tel: (0-12) 617-37-73 fax: (0-12) 634- 48-25 e-mail: szczepan@agh.edu.pl
2. Akademia Górniczo- Hutnicza w Krakowie, Katedra Elektrotechniki i Elektroenergetyki
tel: (0-12) 617-28-24 fax: (0-12) 634- 48-25 e-mail: wieslaw.nowak@agh.edu.pl
3. Akademia Górniczo- Hutnicza w Krakowie, Katedra Elektrotechniki i Elektroenergetyki
tel: (0-12) 617-36-53 fax: (0-12) 634- 48-25 e-mail: rtarko@agh.edu.pl

Streszczenie: Artykuł dotyczy komputerowych symulacji układu elektroenergetycznego o napięciu 30 kV, które przeprowadzone zostały dla rozpoznania warunków eksploatacji w aspekcie występowania ferorezonansu. Przedstawiono opracowany dla programu EMTP-ATP model układu 30 kV oraz wyniki badań symulacyjnych, mających na celu określenie możliwości i skutków występowania ferorezonansu, jak i sposobów jego eliminacji.

Słowa kluczowe: sieci elektryczne średniego napięcia, ferorezonans, EMTP.

1. WPROWADZENIE

Eksploatacji układów elektroenergetycznych towarzyszą różnorodne stany zakłóceniami, uniemożliwiające lub utrudniające ich normalną pracę. Wykrywanie oraz eliminacja zakłóceń lub innych nienormalnych warunków występujących w systemie elektroenergetycznym jest zadaniem *elektroenergetycznej automatyki zabezpieczeniowej* (EAZ). Jednym z podstawowych wymagań stawianych układom EAZ jest ich niezawodność. Działanie EAZ może być albo *prawidłowe*, albo *nieprawidłowe*, przy czym wśród działań nieprawidłowych wyróżnia się zarówno *działania brakujące*, jak i *działania zbędne*.



Rys. 1. Sieć średniego napięcia, w której możliwe jest wystąpienie ferorezonansu w wyniku równoległego połączenia indukcyjności magnesujących przekładników napięciowych oraz pojemności zastępczej sieci

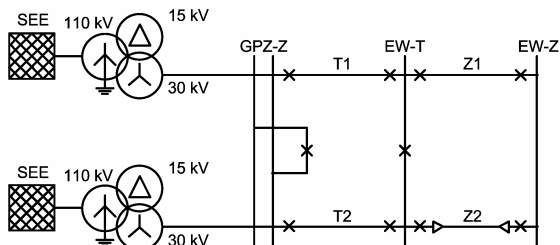
W odróżnieniu od elektroenergetycznych układów przesyłowych wysokich i najwyższych napięć, sieci rozdzielcze średnich napięć eksploatowane są jako układy trójfazowe z punktem neutralnym izolowanym, uziemionym przez dławik (tzw. sieć skompensowana) albo uziemionym przez rezystor. Brak skutecznego uziemienia punktu neutralnego implikuje szereg niekorzystnych trudności w eksploatacji tych układów (np. [1, 2]). Jednym z nich jest możliwość wystąpienia ferorezonansu równoległego (rys. 1).

Zjawisko ferorezonansu ma miejsce, gdy rdzeń ferromagnetyczny urządzenia elektroenergetycznego – przede wszystkim przekładników napięciowych oraz nieobciążonych transformatorów – pracuje w warunkach nasycenia, a indukcyjność staje się w tej sytuacji elementem nieliniowym. W przeciwieństwie do rezonansu liniowego, gdzie częstotliwość rezonansowa jest ściśle określona, ferorezonans może wystąpić dla częstotliwości uzależnionej od warunków pracy układu. W praktyce ferorezonans może zostać zainicjowany nawet przez chwilowe wprowadzenie rdzenia w stan nasycenia. Może to nastąpić w przypadku np. czynności łączeniowej lub przy zmianie wartości napięcia zasilającego np. wskutek doziemienia.

Ferorezonans stwarza istotne zagrożenie przepięciowe dla układów izolacyjnych, stanowi poważne narażenie prądowe uzwojeń pierwotnych włączonych doziemnie przekładników napięciowych, jak i podnosi potencjał punktu neutralnego układu, np. [3, 4, 5]. Podniesienie potencjału punktu neutralnego powoduje również, że w układzie pojawia się składowa zerowa napięcia, mogąca fałszować działania układów zabezpieczeń ziemnozwarciowych.

2. CHARAKTERYSTYKA ANALIZOWANEGO UKŁADU

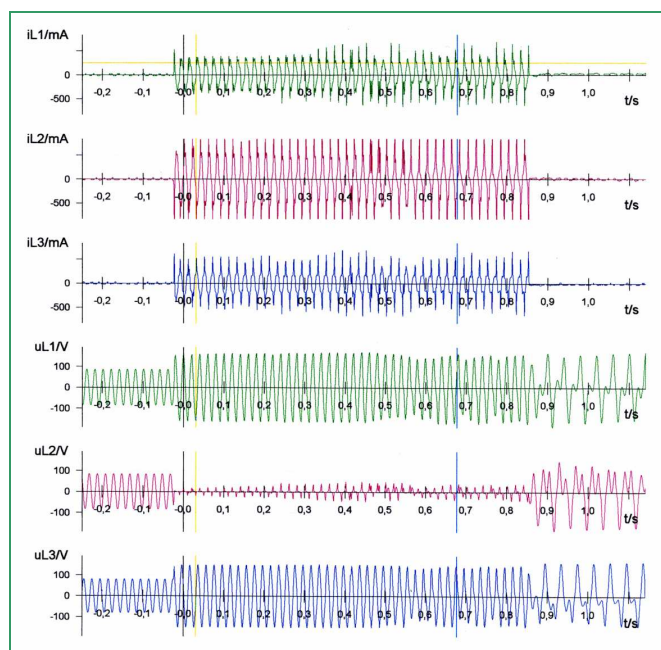
Przedmiotem badań był układ o napięciu 30 kV, który eksploatowany jest z izolowanym punktem neutralnym. Uproszczony schemat tego układu przedstawiono na rys. 2.



Rys. 2. Uproszczony schemat układu 30 kV z izolowanym punktem neutralnym

W wydzielonej części układu, w stacjach *GPZ-Z*, *EW-T* oraz *EW-Z* znajdują się trzy rozdzielnie 30 kV, połączone ze sobą liniami *T1* i *T2* oraz *Z1* i *Z2*. Linie *T1* i *T2* są liniami napowietrznymi o długości około 8,9 km, prowadzonymi jako linia dwutorowa na wspólnych konstrukcjach wsporczych. Linia *Z1* również jest linią napowietrzną o długości około 5,5 km, natomiast linia *Z2* jest linią kablową o długości około 5,1 km.

W układzie zainstalowane są cyfrowe zabezpieczenia odległościowe serii 7SA511 oraz 7SA610 firmy SIEMENS, wyposażone w funkcję czulego zabezpieczenia ziemnozwarciowego dla sieci izolowanych. Dzięki rejestracji przez te zabezpieczenia przebiegów napięć i prądów, w analizowanym układzie stwierdzone zostały stany zakłócenia związane z wyłączeniem doziemień (rys.3).

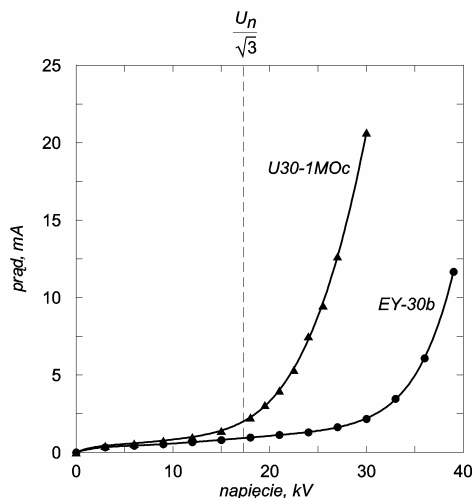


Rys. 3. Zarejestrowane przebiegi napięć i prądów podczas doziemienia, którego wyłączenie zainicjowało ferorezonans

Jednym z takich zdarzeń było doziemienie linii kablowej *Z2*, które zostało poprawnie wyeliminowane przez zabezpieczenie w polu linii *Z2* w rozdzielni *EW-T*. Po wyłączeniu linii *Z2* na szynach rozdzielni 30 kV w stacji *GPZ-Z* zarejestrowany został wzrost napięć fazowych do wartości około 50 kV utrzymujący się przez dłuższy czas, jak również nastąpiło *zbędne wyłączenie* linii *T2*. Zarejestrowane podczas tego zakłócenia przebiegi napięć wskazywały, że jego przyczyną jest zjawisko ferorezonansu.

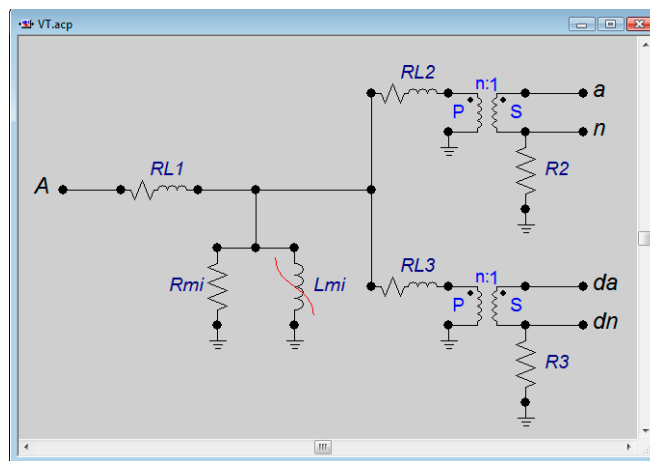
3. MODEL UKŁADU W PROGRAMIE EMTP-ATP

Na podstawie badań przeprowadzonych w układzie rzeczywistym opracowano model w programie EMTP-ATP dla analizy warunków wzbudzenia ferorezonansu i określenia sposobów jego tłumienia. Analiza wymagała dokładnego odwzorowania wszystkich elementów sieci, mogących mieć wpływ na przebiegi napięć i prądów w stanach nieustalonych, a więc mogących wywołać nieprawidłowe działania układu automatyki zabezpieczeniowej. Szczególnie istotnymi elementami decydującymi o wystąpieniu ferorezonansu, są przekładniki napięciowe zainstalowane na szynach rozdzielni 30 kV w stacjach *GPZ-Z*, *EW-T* oraz *EW-Z*. Dla opracowania ich adekwatnych modeli wykorzystano wyniki pomiarów nieliniowych charakterystyk prądowo-napięciowych, o których kształcie decyduje zjawisko nasycania się rdzenia ferromagnetycznego (rys. 4).



Rys. 4. Charakterystyki magnesowania przekładników stosowanych w układzie 30 kV

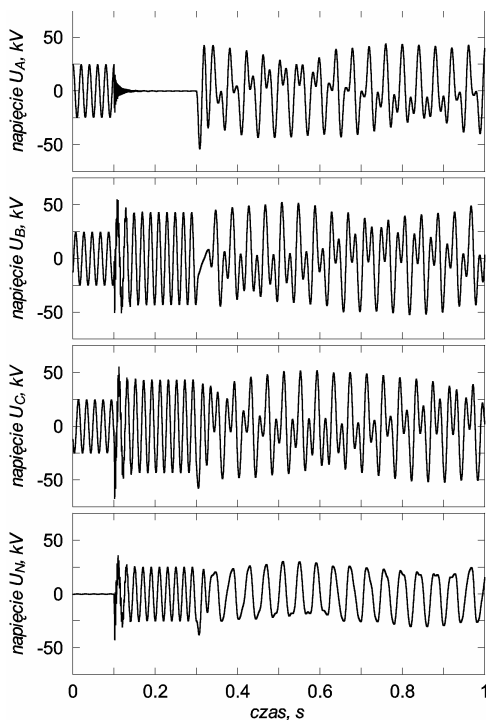
Na podstawie tych charakterystyk oraz badań przekładników w stanie zwarcia, wyznaczono ich modele w programie EMTP-ATP. Przykładowy model przekładnika przedstawiono na rys. 5. W jego skład wchodzić dwójniki *RL1*, *RL2*, *RL3*, opornik *Rmi* reprezentujący straty mocy czynnej w rdzeniu, nieliniowa indukcyjność magnesowania *Lmi* oraz dwa transformatory idealne.



Rys. 5. Model przekładnika napięciowego w programie EMTP-ATP: *A* – zacisk strony pierwotnej, *a-n* – zaciski uzwojenia wtórnego, *ad-nd* – zaciski uzwojenia napięcia resztkowego

4. WYNIKI BADAŃ SYMULACYJNYCH

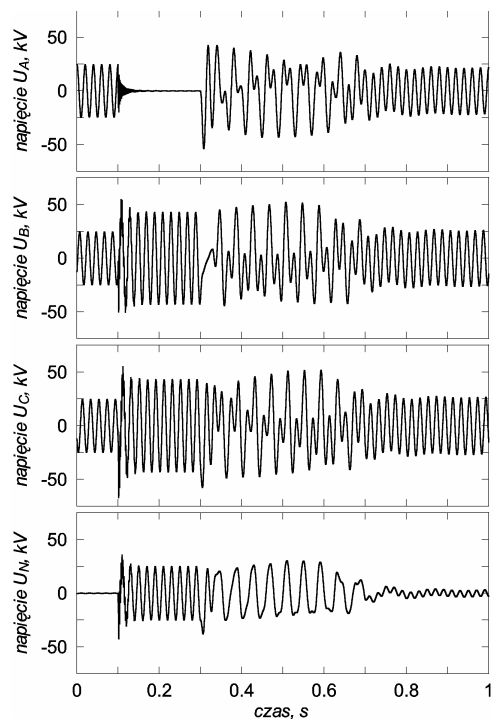
Przeprowadzone badania symulacyjne potwierdziły możliwość wzbudzenia ferorezonansu związanego z wyłączeniem doziemień. Jednym z takich zdarzeń było doziemienie linii kablowej Z2. Na rysunku 6 przedstawiono przykładowe przebiegi napięć fazowych U_A , U_B , U_C oraz napięcia punktu neutralnego U_N w rozdzielni 30 kV stacji GPZ-Z, otrzymane dla doziemienia fazy A linii Z2 w chwili $t = 0,1$ s, a następnie wyłączenia doziemionej linii w chwili $t = 0,3$ s. Wyłączeniu temu towarzyszy wzbudzenie ferorezonansu, który jest powodem drgań zarówno napięć fazowych, jak i napięcia punktu neutralnego, stanowiącego jednocześnie składową zerową U_0 napięć fazowych.



Rys. 6. Przebiegi napięć fazowych U_A , U_B , U_C oraz napięcia punktu neutralnego U_N w rozdzielni 30 kV stacji GPZ-Z

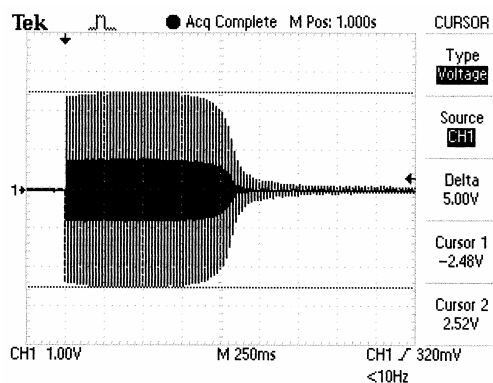
Ponieważ funkcja czułego zabezpieczenia ziemnozwarciowego zainstalowanych zabezpieczeń realizowana jest w wyniku ich pobudzenia przez napięcie składowej zerowej, to powstające w układzie drgania ferorezonansowe są przyczyną zbędnych działań EAZ, w efekcie których następuje odłączenie nieuszkodzonej linii T2.

Analiza pozwoliła wyznaczyć potencjalnie możliwe stany zakłócenia (doziemienia) oraz stany normalnych łączy, których zaistnienie może prowadzić do zjawiska ferorezonansu, a więc w konsekwencji do nieprawidłowego działania zabezpieczeń. Zaproponowano również wybrane rozwiązania do tłumienia ferorezonansu w analizowanym układzie 30 kV w celu poprawy działania zabezpieczeń. Jednym z nich jest dołączanie do obwodu otwartego trójkąta, który tworzą połączone szeregowo uzwojenia napięcia resztkowego przekładników, rezystora tłumiącego. Przykładowe wyniki symulacji przedstawione na rysunku 7 dla rezystora o oporności 10Ω (załączonego w czasie 0,6 s, a następnie odłączonego w czasie 0,9 s), potwierdzają efektywność takiego rozwiązania.



Rys. 7. Przebiegi napięć fazowych U_A , U_B , U_C oraz napięcia punktu neutralnego U_N w rozdzielni 30 kV stacji GPZ-Z w warunkach tłumienia ferorezonansu

Innym analizowanym rozwiązaniem było zastosowanie urządzenia o nazwie VT Guard firmy ABB, którego rezystancja dostosowuje się aktywnie do warunków pracy [5]. W przypadku występowania składowej zerowej o niewielkiej wartości, wynikającej z dopuszczalnych asymetrii w warunkach normalnej pracy, urządzenie reprezentuje bardzo dużą rezystancję i nie powoduje obciążenia cieplnego zarówno przekładników, jak i samego urządzenia. W przypadku pojawienia się składowej zerowej na poziomie przewyższającym strefę nieczułości urządzenia, VT Guard staje się rezystorem o wartości rezystancji, skutecznie wytłumiającej stan ferorezonansowy, co zostało potwierdzone zarówno metodą symulacji komputerowych, jak i eksperymentalnie. W przypadku, gdy składowa zerowa, obecna w obwodzie otwartego trójkąta utrzymuje się przez czas dłuższy, co może wynikać np. z dużej asymetrii w sieci, spowodowanej np. zwarcieziemnym, urządzenie samoczynnie przechodzi w stan wysokoomowy, nie stanowiąc zbędnego obciążenia dla przekładników. Po ustąpieniu przyczyny asymetrii urządzenie samoczynnie powraca do stanu początkowego.



Rys. 8. Przebieg prądu płynącego przez urządzenie VT Guard przy zasilaniu napięciem przemiennym 100 V

Na rysunku 8 przedstawiono przykładowy przebieg prądu płynącego przez urządzenie VT Guard przy zasilaniu napięciem przemiennym 100 V. W tym przypadku minimalna rezystancja R_{min} wynosi 5,6 Ω i utrzymuje się przez czas około 1 s. Po tym czasie urządzenie samoczynnie przechodzi w stan wysokoomowy, czemu towarzyszy zmniejszenie się prądu przedstawionego na rysunku 8.

Ponieważ efektywny czas tłumienia urządzenia VT Guard przy wymuszeniu 100 V wynosi 1 s, przeprowadzono badania urządzenia mające na celu określenie możliwości wydłużenia czasu działania, w wyniku dołączania szeregowo dodatkowego rezystora o oporności R_d . Przebadano pięć przypadków, rejestrując przebiegi prądów urządzenia dla różnych wartości napięć zasilających U i wartości $R_d = 0 \Omega$ oraz $R_d = 6,9 \Omega$. Na podstawie rejestracji wyznaczono wartości rezystancji minimalnej układu tłumiącego oraz czas jej trwania (tab. 1).

Tab. 1. Wyniki badań urządzenia VT Guard

Lp.	U , V	R_d , Ω	R_{min} , Ω	t_{min} , s
1	100	0	5,6	1,0
2	75	0	5,7	1,8
3	50	0	5,8	4,0
4	100	6,9	12,1	4,2
5	75	6,9	11,8	8,0

U – napięcie przyłożone do urządzenia, R_d – rezystancja dodatkowa połączona szeregowo z urządzeniem, R_{min} – minimalna rezystancja urządzenia, t_{min} – czas trwania stanu niskoomowego (utrzymywania się wartości R_{min})

Przeprowadzone badania wykazały, że zastosowanie rezystora dodatkowego o wartości 6,9 Ω (kilku omów), pozwala wydłużyć efektywny czas działania urządzenia do ok. 4,2 s, przy czym wartość rezystancji minimalnej wynosząca wówczas 12,1 Ω jest wystarczająca do wytlumienia ferorezonansu w analizowanym układzie 30 kV. Przeprowadzone badania wykazały również, że zastosowanie dodatkowego rezystora połączonego z urządzeniem VT Guard nie wpływa praktycznie na wartość napięcia zadziałania.

5. PODSUMOWANIE

W oparciu o przeprowadzone badania przekładników opracowano model układu 30 kV dla programu komputerowego EMTP-ATP. Przy jego wykorzystaniu przeprowadzono analizę układu, która potwierdziła możliwość

występowania ferorezonansu, mającego zasadniczy wpływ na niezawodność działania zabezpieczeń ziemnozwarciowych zainstalowanych w rozdzielni 30 kV stacji GPZ-Z. Wyznaczono potencjalnie możliwe stany zakłóceniowe (doziemienia) oraz stany normalnych łączy, których zaistnienie może prowadzić do zjawiska ferorezonansu, a więc w konsekwencji do nieprawidłowego działania zabezpieczeń.

Na podstawie przeprowadzonych analiz komputerowych, zaproponowano wybrane rozwiązania do tłumienia ferorezonansu w analizowanym układzie 30 kV w celu poprawy działania zabezpieczeń. Przeprowadzono również badania laboratoryjne, wykazujące możliwość zastosowania zmodyfikowanego dla warunków analizowanego układu urządzenia tłumiącego VT Guard. W odróżnieniu od innych środków stosowanych do tłumienia ferorezonansu, VT Guard jest w stanie rozpoznać zakłócenie oraz w przypadku stwierdzenia ferorezonansu, w sposób skuteczny go wytlumić.

6. BIBLIOGRAFIA

1. Lorenc J.: Admitancyjne zabezpieczenia ziemnozwarciowe, Poznań, Komitet Elektrotechniki Polskiej Akademii Nauk, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej 2007, ISBN 978-83-7143-342-9
2. Nowak W., Tarko R., Moskwa Sz., Gawryła A., Cich W.: Analiza warunków działania zabezpieczeń ziemnozwarciowych w sieci średniego napięcia, Archiwum Energetyki, Tom XXXIX, 2009, Nr 1, str. 135-145, ISSN 0066-684X.
3. Piasecki W., Florkowski M., Fulczyk M., Mahonen P., Luto M., Nowak W.: Ferroresonance involving voltage transformers in medium voltage networks. 14th International Symposium on High Voltage Engineering ISH2005, Beijing, China, 2005, paper F-19.
4. Piasecki W., Florkowski M., Fulczyk M., Nowak W.: Preventing the risk of ferroresonance involving Voltage Transformers in MV ungrounded networks. 3rd International Symposium on Modern Electric Power (MEPS'06) under auspices of IEEE, Poland, Wrocław, September 6-8, 2006, pp. 398-401, ISSN-10 83-921315-2-5
5. Piasecki W., Florkowski M., Fulczyk M., Mahonen P., Luto M., Nowak W.: Mitigating Ferroresonance in Voltage Transformers in Ungrounded MV Networks. IEEE Trans. on Power Delivery, vol. 22, 2007, no. 4, pp. 2362-2369, ISSN 0885-8977

MODELING AND ANALYSIS OF MIDDLE VOLTAGE NETWORKS FOR EVALUATION OF CONDITIONS AND CONSEQUENCES OF FERORESONANCE OCCURRENCE AND WAYS OF ITS ELIMINATION

Key-words: medium voltage electrical networks, ferroresonance, EMTP

Abstract: The paper presents computer simulations of 30 kV distribution network for identification of exploitation conditions in aspect of ferroresonance occurrence. Presented model of 30 kV network system in the EMTP-ATP program and the results of simulation to determine the possibility and consequences of ferroresonance occurrence and ways of its elimination.