

dr. sc. Sonja Ravlić Begić, mag. ing. el.  
Ravel d.o.o.  
sonja.ravlic@ravel.hr

Velimir Ravlić, dipl. ing. el.  
Ravel d.o.o.  
velimir.ravlic@ravel.hr

Ante Ravlić, mag. ing. el.  
Ravel d.o.o.  
ante.ravlic@ravel.hr

## MEHANIČKA NAPREZANJA KOD SEIZMIČKOG DJELOVANJA ENERGETSKIH TRANSFORMATORA

### SAŽETAK

U radu je opisana analiza mehaničkih naprezanja kod seizmičkog djelovanja energetskog transformatora 230/135 kV, 160 MVA koji je bio montiran u transformatorskoj stanici ENEL-a, na sjeveru Italije, i to kod djelovanja potresa magnitude 4 u travnju 1995. godine. Potres je uzrokovao proradu Buchholz releja i isklon transformatora.

U prvom dijelu članka se opisuju dinamička svojstva kotla autotransformatora (frekvencije, oblik spektra i prigušenje).

Isto tako su izvedena ispitivanja na lokaciji. Dodatno je izrađena kompletna dinamika konstrukcije autotransformatora ATR metodom konačnih elemenata.

U proračunu je izračunato povećanje seizmičkih opterećenja, uzimajući u obzir elastičnost kotla i to od razine tla do vrha (poklopca) kotla (uključivo provodne izolatore i Buchholz relej).

U drugom dijelu članka prikazan je način proračuna seizmičkih ulaznih potresnih valova na lokaciji transformatorske stanice (pri tome se mogu koristiti podaci iz najbližih mjernih seizmoloških stanica) i dinamička analiza autotransformatora ATR.

Na kraju su objašnjeni razlozi nedopuštene prorade Buchholz releja kao i pojačanje naprezanja 230 kV provodnih izolatora u usporedbi sa zahtjevima iz norme IEC 61463.

U članku je opisana primjena numeričko-eksperimentalne metode koju je razvio ENEL, a koja pomaže kod seizmičke analize velikih energetskih transformatora.

Kompletnu studiju je financirao talijanski operator prijenosnog sustava.

**Ključne riječi:** energetski transformator, visokonaponski provodni izolator, seizmička analiza, Buchholz relej, ispitivanje dinamičke uzbude, metoda konačnih elemenata

# MECHANICAL SEISMIC BEHAVIOUR OF POWER TRANSFORMERS

## ABSTRACT

The paper describes the study of the dynamic behaviour of a 160 MVA 230/135 kV power transformer, installed in an ENEL station in the North of Italy, which suffered, April 1995, an earthquake of magnitude 4. The earthquake caused the tripping out of a Buchholz relay and the consequent out of service of the autotransformer. The first part of the paper concerns with the dynamic identification of the autotransformer tank (frequencies, mode shapes and damping).

To this aim experimental "in situ" tests have been performed. In addition a complete finite element model of the ATR has been realised.

This phase of the study is necessary for evaluating the amplification of the seismic loads, due to the tank elasticity, from the ground to the tank cover (Buchholz relay and bushings).

The second part of the paper deals with the evaluation of the seismic input at the station site (data were available at the nearby seismic station) and with the dynamic analysis of the ATR.

Finally the reasons of the undue intervention of the Buchholz relay have been investigated and the amplification of the 230 kV bushings compared with IEC 61463 Standards.

This study is part of a more global research project, developed and co-ordinated by ENEL Research on the behalf of ENEL Transmission and Division Departments.

**Key words:** power transformer, HV Bushing, seismic analysis, Buchholz relay, dynamic excitation test, finite element method

## 1. UVOD

Kao što se pokazalo u većem broju potresa koji su se dogodili u posljednje vrijeme, većina potresa može uzrokovati oštećenja važnih dijelova prijenosnih i distribucijskih mreža, te je zbog toga prije nekoliko godina ENEL financirao znanstveni projekt proračuna seizmičkog rizika elektroenergetskih postrojenja i aparata. Aktivnosti se sastoje u detektiranju graničnih vibracija električnih uređaja na energetskim transformatorima (Buchholz releji, sigurnosni ventili, visokonaponski provodni izolatori) i povratnih informacija u vezi preostalog životnog vijeka i mehaničke lomljivosti električnih komponenti (prekidača, rastavljača, mjernih transformatora, odvodnika prenapona, vitkih konstrukcija kao što su sabirnički sustavi, itd.) visokonaponskih postrojenja.

U ovom projektu ENEL je unaprijedio i promijenio mnoga tradicionalna rješenja električne opreme s ciljem izbjegavanja nepoželjnih djelovanja za vrijeme potresa i pogonskih događaja (tijekom energiziranja i kratkih spojeva).

U sklopu ovog članka prikazani su rezultati ponašanja energetskih transformatora (rezultati eksperimentalnih ispitivanja i analize metodom konačnih elemenata).

## 2. ISPITIVANJA NA TERENU

Energetski transformator bio je ispitivan s dva uzbudna potresna vala: ispitivanje više slučajnih točaka uzbuđene (engl. Multi Point Random – MPR) i ispitivanje prisilnom vibracijom (engl. Forced Vibration – FV) s ciljem proračuna prirodnih frekvencija, koeficijenta viskoznog prigušenja i oblika vibracija (oblika vibracija krutog tijela i oblika vibracija deformacije kotla), prema [1].

Kod MPR ispitivanja [2] kotao transformatora se uzbuđuju istovremeno na vibrirajućoj podlozi u horizontalnom smjeru (x i y okomite osi). Ovakve uzbuđene omogućuju odrediti oblike deformacije kotla.

Dinamičko ponašanje energetskog transformatora analizira se u oba frekvencijska područja: seizmičkom području frekvencije od 1 do 20 Hz i u radnom području frekvencije (od 20 do 100 Hz).

FV ispitivanje [3] sastoji se u primjeni koncentriranog dinamičkog opterećenja (sinusoidalni oblici i slučajni oblici u području frekvencija 1 do 25 Hz) na temelje transformatora pomoću elektrohidrauličnog aktuatora.

Dinamički parametri postignuti kao rezultat dva navedena ispitivanja se vrlo dobro slažu. Oblik značajne globalne deformacije je utvrđen kod frekvencije 3,5 Hz (MPR ispitivanje) i 3,54 Hz (FV ispitivanje).

Više rezultata ispitivanja pokazuje da je 11 Hz prva prirodna frekvencija za 230 kV provodni izolator montiran na energetskom transformatoru. Koeficijent prigušenja je oko 2 %. Nisu primijećena povećanja kod frekvencija nižih od 3 Hz zbog toga što je u ovom području frekvencije uzbudni nivo vrlo nizak.

Ova faza identifikacije utjecajnih parametara je bitna za dobivanje realnog matematičkog modela transformatora za izvođenje numeričke analize.

## 3. NUMERICKE ANALIZE

### 3.1. Model konačnih elemenata

Model 3D konačnih elemenata je razvijen za kompletni energetski transformator (kotao, konzervator ulja, cijevi i provodni izolatori) pomoću odgovarajućeg softvera IDEAS [4].

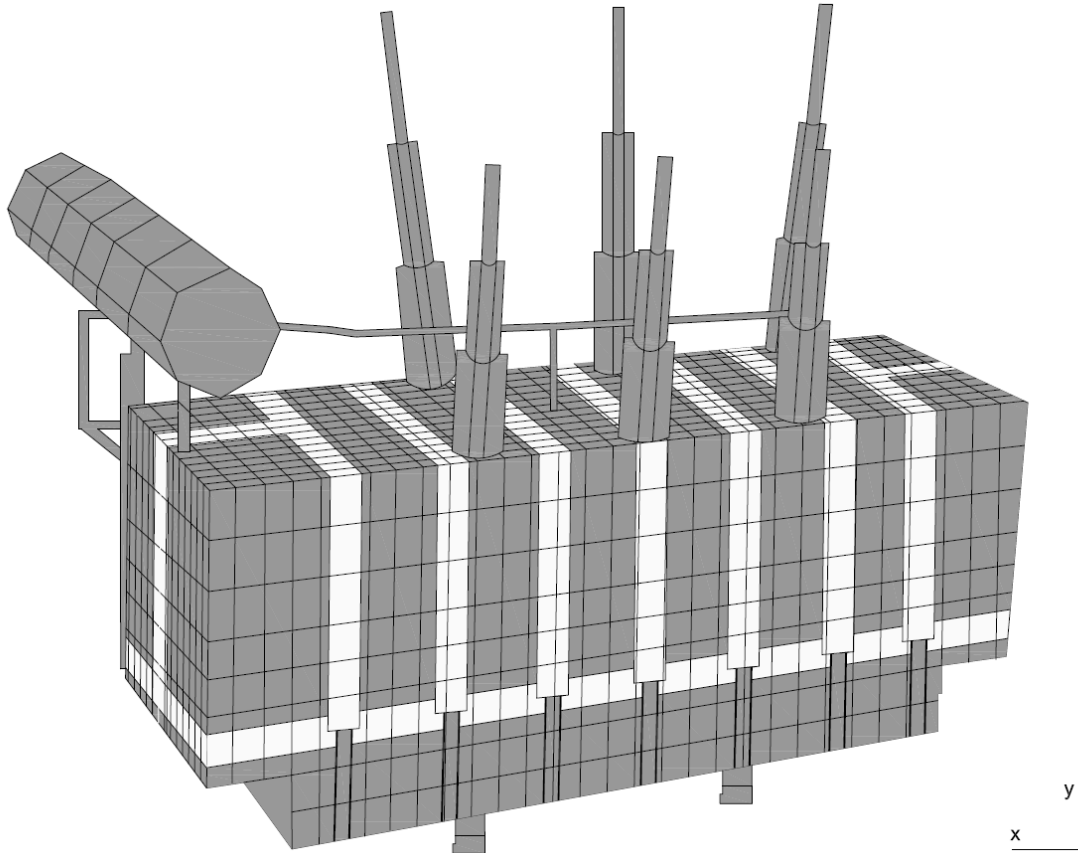
Na slici 1 su prikazane osnovne značajke modela.

Čelični kotao i kupola za montažu provodnog izolatora diskretizirana je linearnim tankim elementima, a ukrute i cijevi za ulje su modelirane linearnim grednim elementima. Dodatno je konzervator ulja modeliran s koncentriranim masama dok je ulje modelirano kao akustični elementi.

Provodni izolatori 230 kV su diskretizirani s grednim linearnim elementima ekvivalenta gustoće i krutosti.

Različiti materijali (keramika i čelik) i mehanički spojevi su modelirani na korektan način. Kotao je pretpostavljen s odgovarajućim vrijednostima linearnosti i elastičnosti.

Usporedbom rezultata ispitivanja s preliminarnim rezultatima numeričkog proračuna napravljen je usavršeni konačni model konačnih elemenata transformatora koji se koristi za konačne seizmičke analize.



Sl. 1.: Mreža konačnih elemenata energetskog transformatora

### 3.2. Proračun vlastite (prirodne) frekvencije

Izrađen je numerički proračun vlastite frekvencije i pripadajućih oblika vibriranja transformatora.

U tablici 1 dan je prikaz vlastitih frekvencija i relativnih oblika (oblici globalnog krutog tijela i oblici lokalne deformacije).

Dobro podudaranje između rezultata numeričkih analiza i rezultata ispitivanja potvrdili su dobru kvalitetu modela konačnih elemenata.

Tablica 1. Vlastite frekvencije

Oblik	Vlastita frekvencija (Hz)		
	Numerički proračun	Rezultati ispitivanja	
Oblici krutog tijela		MPR ispitivanje	FV ispitivanje
Y smjer	0,63		
Z smjer	1,76		
Z smjer	1,91		
Y smjer	2,37		
Oblici deformacije			
globalno	3,32	3,5	3,5
globalno	4,78	4,6	4,6
konzervator	5,37	5,5	5,5
globalno	8,37	8,3	8,4
VN provodni izolator	12,7	11	

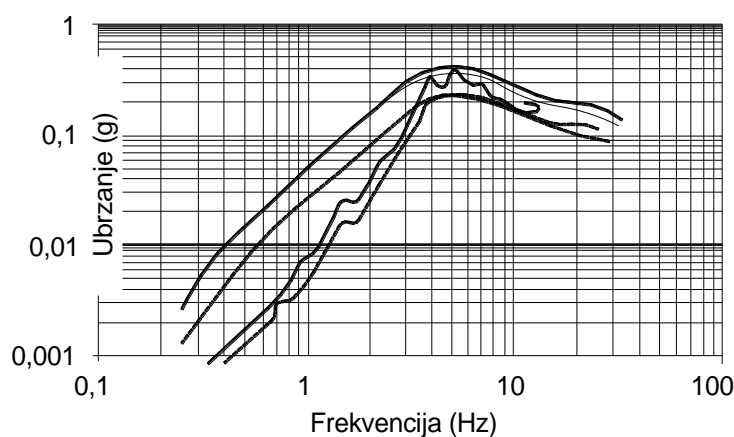
S kalibriranim modelom konačnih elemenata izvršena je seizmička analiza transformatora (uzimajući pri tome ulazne podatke s lokacije) s ciljem dobijanja što točnije vrijednosti ubrzanja koje će podnijeti Buchholz relej i provodni izolatori.

### 3.3. Definiranje seizmičkih ulaznih podataka

Seizmički ulazni podaci odnosno ubrzanje za vrijeme stvarnog potresa (engl. acceleration time histories) na lokaciji postrojenja izračunati su na temelju zapisa seizmičke stanice koja je 50 km udaljena od lokacije postrojenja i bila je u funkciji za vrijeme potresa u travnju 1995. godine. Navedeni podaci su prvo korigirani pomoću Nakamura tehnike [5] kako bi se uzeo u obzir utjecaj lokacije (engl. site effect).

Iduća korekcija je skaliranje signala (engl. scaling of signal) čime se dobiva magnituda potresa na lokaciji i udaljenost od epicentra [6]. Prema ovoj proceduri odzivni spektar na lokaciji (engl. site response spectra) s tri ortogonalna smjera može se dobiti prema slici 2, što dobro odgovara važećoj vremenskoj pojavi potresa.

Vršna vrijednost ubrzanja tla (engl. peak ground acceleration – PGA) procijenjena je na podnožju transformatora na  $0,1 \cdot g$ .



Sl. 2.: Ubrzanje odzivnog spektra – ulazni seizmički podaci u podnožju transformatora (x i y smjer)

### 3.4. Seizmičke analize

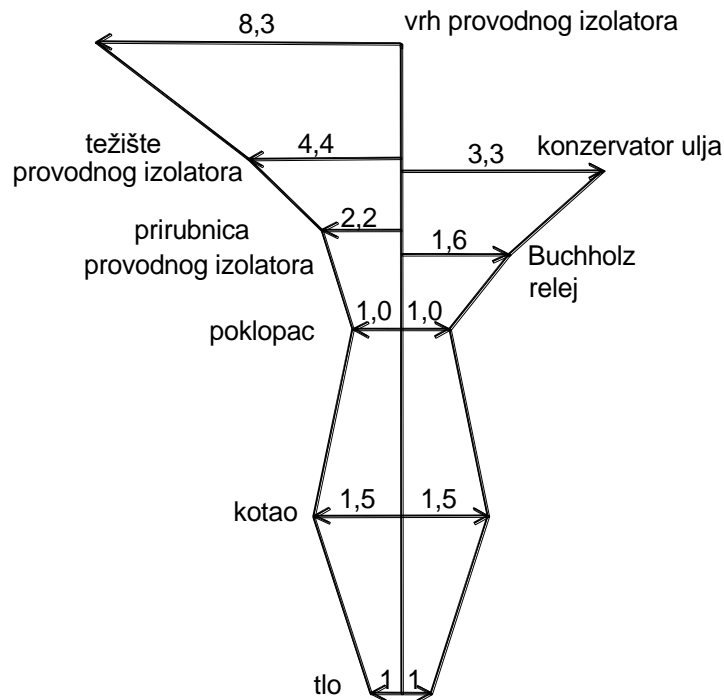
Dinamičke analize (direktna integracija jednadžbi gibanja) se izvode za 20 sekundi pomoću programa ABAQUS [7].

Pri tome je primjenjena opcija Rayleigh-eva prigušenja materijala.

Razmatrano je prigušenje ekvivalentno 2 % kritičnog prigušenja za sve glavne vlastite frekvencije i oblike vibracija.

Analizom odziva autotransformatora ATR u vezi osnovnih naprezanja, otklona i povećanja ubrzanja (od zemlje do vrha transformatora) izvršeni su odgovarajući proračuni.

Faktori povećanja (engl. amplifications factor) u x smjeru (longitudinalnom ili uzdužnom smjeru) su prikazani na slici 3. Zapisane vrijednosti ubrzanja Buchholz releja bile su oko  $0,16 \cdot g$ .



Sl. 3.: Povećanje ubrzanja od zemlje do vrha izolatora (x – longitudinalni smjer)

#### 4. POVEĆANJE NAPREZANJA PROVODNIH IZOLATORA

U normi IEC 61463 [8] dane su preporuke za izvedbu dinamičke analize ili laboratorijska ispitivanja za seizmičku kvalifikaciju visokonaponskih provodnih izolatora.

Ponekad se dopušta korištenje pojednostavljene metode (statička kvalifikacija) s usvajanjem sljedećih koeficijenata za povećanje utjecaja tla:

- K je faktor povećanja između tla i prirubnice provodnog izolatora;
- R je faktor odziva samog provodnog izolatora.

Autotransformator ATR za vrijeme potresa u travnju 1995. godine [9] ima zapisan faktor povećanja 2,2 (od zemlje do prirubnice 230 kV provodnog izolatora) i faktor povećanja 2,0 (od prirubnice provodnog izolatora do težišta provodnog izolatora).

Za slične provodne izolatore (2 % prigušenje; 12 Hz je prva prirodna frekvencija) u normi IEC 61463 dani su koeficijent povećanja K jednak 1,5 i koeficijent R jednak 2,23 te se predlaže korištenje daljnjeg koeficijenta  $S_c=1,35$  kojim se uzimaju u obzir obje visokofrekvencijske uzbuđbe i više oblika odziva. Zbog toga je ukupni (globalni) IEC faktor povećanja 4,2 vrlo blizu stvarnog faktora povećanja koji je snimljen na 230 kV provodnom izolatoru za vrijeme potresa (4,4).

U slučaju pomanjkanja više informacija, faktori povećanja navedeni u normi IEC 61463 mogu se prihvatiti kao prva aproksimacija [10].

## 5. LABORATORIJSKA EKSPERIMENTALNA ISPITIVANJA BUCHHOLZ RELEJA

### 5.1. Vibrirajuće podloge (vibrirajući stolovi)

Buchholz releji živinog tipa koji su bili montirani na autotransformatoru ATR za vrijeme potresa, ispitani su 1996. godine na jednoosnoj vibrirajućoj podlozi u ISMES laboratoriju. Pomoću ovih aktivnosti izvršena je analiza i proračun kritičnog ubrzanja (alarm i isklon) releja.

Relej je bio podvrgnut sinusnoj harmoničkoj uzbuđi s povećanjem amplitude kod različitih frekvencija.

Najkritičniji smjer uzbuđe je u X osi prema slici 1, tj. u horizontalnom smjeru.

U frekvencijskom području od 1 do 6 Hz izmjerena su ubrzanja do 0,2·g. Te vrijednosti su niže od vrijednosti koje su predviđene prema internoj normi ENEL-a (0,45·g), tako da je ispitivani Buchholz relej izgleda bio više osjetljiv na vibracije čiji je uzrok potres od očekivane vrijednosti.

### 5.2. Dinamičko ispitivanje s protjecanjem tekućine

Kompletan set dinamičkog ispitivanja s protjecanjem tekućine, koja reproducira protjecanje ulja kroz cijevi i Buchholz relej, izvedena su u ETI laboratorijima.

Pri tome su analizirane različite temperature ulja, ručne operacije (postupne ili trenutne) te otvaranje i zatvaranje ventila.

Kritične vrijednosti brzine ulja koje uzrokuju električno isklapanje su zapisane kod svih ispitivanja.

Utjecaj navedenih parametara na isklon releja je od vrlo malog značaja. Kritična vrijednost brzine protjecanja ulja je oko 1 m/s i praktično se podudara s vrijednosti koju propisuju interne norme ENEL-a.

## 6. USPOREDBA REZULTATA MJERENJA I NUMERIČKE ANALIZE

U tablici 2 je prikazana usporedba između rezultata mjerenja kod ispitivanja i rezultata numeričke analize.

Tablica 2. Vrijednosti kritičnih parametara Buchholz releja

	Numerička analiza	Rezultati ispitivanje	Vrijednosti kalibracije (ENEL)
<b>Ubrzanje kod isklopa (g)</b>	0,15	0,20	0,45
<b>Brzina ulja (m/s)</b>	0,30	1,00	1,00

Razlike između zapisanih rezultata ispitivanja i rezultata numeričke analize kod određivanja kritičnog ubrzanja i kritične brzine ulja kroz relej nastaju zbog:

- nepotpunost matematičkog modela;
- nepouzdanosti, odnosno nesigurnosti, kod mjerenja tijekom laboratorijskih ispitivanja;
- nepouzdanosti ulaznih podataka na mikrolokaciji transformatorske stanice.

Na ponašanje Buchholz releja utječu inercijska opterećenja čiji su uzrok seizmičke vibracije i djelovanje na interni pokretni član kao i zbog protoka ulja čiji su uzrok vibracije kotla kod djelovanja potresa na izolacijsko ulje transformatora.

Zbog toga što oba opisana utjecaja mogu uzrokovati proradu Buchholz releja, nije strogo potrebno da ubrzanje i brzina protoka ulja prijeđu u istom trenutku vrijednosti kalibracije.

Poboljšanje releja, zbog smanjenja lažnih prorada, izvode se modificiranjem internih pokretnih dijelova (npr. primjena „micro-switch type contact“ umjesto „mercury contact“) i odgovarajućom izvedbom cijevnih spojeva.

Dodatno treba razmotriti krutost kotla i način učvršćenja na tlo, jer su to također utjecajni faktori koji mogu indirektno utjecati na seizmičko djelovanje Buchholz releja.

U svakom slučaju treba naglasiti da se sada kriste različiti načini temeljenja transformatora (samo kotači, kotači + sidrenje vijcima, zavareni spoj bez kotača, samo vijci u temelju bez kotača) i da svaki od navedenih načina na različiti način utječe na proradu Buchholz releja.

## 7. USPOREDBA REZULTATA MJERENJA I NUMERIČKE ANALIZE

Izvršeno je više laboratorijskih dinamičkih ispitivanja za različite izvedbe proradnih izolatora, spojenih vijčano ili cementiranjem.

Provodni izolatori su bili kruto učvršćeni na ispitnu opremu te su bila na njima izvedena ispitivanja dinamičkog ponašanja uzbudom prema IEC normi i prema zapisima stvarnog potresa, i to s porastom ubrzanja.

Ispitivanja su bila izvršena sve do sloma provodnog izolatora (kvara keramike ili prirubnice). Treba naglasiti da su se kvarovi 245 kV provodnih izolatora, slično kao i u slučaju razmatranog 230 kV provodnog izolatora koji je bio montiran na autotransformatoru ATR i opisan u ovom radu, događali kod  $(10 \div 11) \cdot g$  vršne vrijednosti ubrzanja fla.

Ova vrijednost je oko pedeset puta veće ubrzanje od vrijednosti koje je pretrpila oprema (provodni izolatori) za vrijeme potresa u travnju 1995. godine. Činjenica je da nisu zabilježeni veći kvarovi na provodnim izolatorima (lom, istjecanje ulja, veće deformacije).

## 8. ZAKLJUČAK

U članku je opisana primjena numeričko-eksperimentalne metode koju je razvio ENEL koja pomaže kod seizmičke analize velikih energetske transformatora.

Analizirano je dinamičko ponašanje autotransformatora 230/135 kV, 160 MVA za vrijeme stvarnog potresa.

Razlozi isklopa autotransformatora zbog prorade montiranog Buchholz releja su analizirani pomoću ispitivanja (u laboratoriju i na terenu) kao i numeričkom analizom metodom konačnih elemenata.

U članku su opisana poboljšanja na autotransformatoru ATR koje pomažu smanjenju vjerojatnosti kvara i nedopuštenih operacija električnih uređaja (npr. Buchholz relej) ugrađenih na autotransformatoru.

Pri tome treba naglasiti da se sada najčešće koristi proračunska metoda prema IEEE Std 693-2018, ASD kriterij, kontrola prema SRSS metodi. Energetski transformatori su jedan od najvažnijih dijelova elektroenergetskog sustava te je vrlo bitno da se i u Republici Hrvatskoj izvrše detaljne analize mehaničkih naprezanja kod seizmičkog djelovanja energetske transformatora.

## LITERATURA

- [1] J. S. Bendat, A. G. Piersol: *Engineering Applications of Correlation and Spectral Analysis*, Wiley-Interscience Publication, John Wiley & Sons.
- [2] C. M. Harris, C. E. Crede: *Shock and Vibration Handbook*, Mc Graw-Hill book Company, Inc.
- [3] M. Corti, C. Galimberti: Strumentazione laser per la diagnostica di vibrazioni a distanza, Automazione e strumentazione, Luglio-Agosto, 1990.
- [4] *SDRC I-DEAS<sup>TM</sup> User's Guides*, SDRC, Milford Ohio, USA, 1990.
- [5] Y. Nakamura: A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface, QR or RTRI, Vol.30, n.1, pagg.25-33.
- [6] A. Pugliese, F. Sabetta: Stima di spettri di risposta da registrazioni di forti terremoti italiani, Ingegneria Sismica. anno VI, n.2, 1989.
- [7] H.K.S.: "*ABAQUS Standard Manuals- 5.5. Version*", HKS inc., Pawtucket, R.I., USA, 1995.
- [8] IEC 61463 Technical Report II, Bushings - Seismic qualification, Luglio 1996.
- [9] S. Bellowini, F. Bettinali: ENEL Autotrasformer 160MVA 230/135kV Seismic Qualification of HV Bushings, IEC SC 36A Working Group 2, CEI (Mi), 22 January 1997.
- [10] S. Bellowini, F. Bettinali, M. Salvetti, G. Zafferani: Seismic qualification of transformer High Voltage bushings, IEEE Transactions on Power Delivery, October 1998.