

Željko Bago, dipl. ing.  
Dr. sc. Radovan Milošević, dipl. ing.  
KONČAR – Električni aparati srednjeg napona, d.d.

## VAKUUMSKI PREKIDAČI SREDNJEG NAPONA POGONJENI MAGNETSKIM AKTUATORIMA

### SAŽETAK

Praktična je spoznaja, temeljena na statistici, pokazala da su vakuumske komore izuzetno pouzdani elementi vakuumskih prekidača. Jedini način za razvoj pouzdanijih i trajnijih prekidača je razvoj njihovih pogonskih mehanizama. U svijetu je sve veći broj vakuumskih prekidača koji za pogonske mehanizme koriste magnetske aktuatori. Bitni razlozi za to su izvrsna sukladnost magnetskih aktuatora s prekidanjem u vakuumu, kao i znatno smanjeni broj mehaničkih dijelova, a samim tim i znatno smanjen broj kvarova na prekidačima. Zbog svoje trajnosti, prekidači pogonjeni magnetskim aktuatorima, svoju primjenu naročito nalaze u industrijskim postrojenjima, gdje su sklapanja znatno češća. Isto tako, svoju primjenu nalaze u sinkronom sklapanju. Daljnja prednost ovakvih pogonskih mehanizama su mogućnosti implementiranja elektroničkog upravljanja. Ovime se razvoj pogonskog dijela prekidača usmjerava samo u dva pravca: razvoj magnetskih aktuatora i razvoj elektroničke upravljačke jedinice.

**Ključne riječi:** pogonski mehanizmi, vakuumski prekidač, magnetski aktuator, permanentni magnet, elektronička upravljačka jedinica.

## MEDIUM VOLTAGE VACUUM CIRCUIT-BREAKERS WITH PERMANENT MAGNETIC ACTUATORS

### SUMMARY

Practical perception, based on statistics, shows us that modern vacuum bottles are extremely reliable parts of vacuum circuit-breakers. So, the only way to improve circuit-breakers reliability and durability is the development of their operating mechanisms. In the world, it is more and more circuit-breakers which use permanent magnetic drive. Main reasons for that are excellent conformity of magnetic actuators with interrupting in vacuum, then considerable decreased number of mechanical parts, which means considerable decreased number of failures of circuit-breakers. Because of their durability, circuit-breakers with permanent magnetic actuators find their application in substations for industrial use especially, where the processes of switching are much more often. In like manner, these circuit-breakers find their applications in synchronous switching. A further advantage of these operating mechanisms is the possibility of implementation of electronic power control. In this way, the development of the operation portion of the mechanism goes only in two direction: the development of permanent magnetic actuators and the development of electronic control unit.

**Keywords:** operating mechanisms, vacuum circuit-breaker, permanent magnetic actuators, permanent magnet, electronic control unit.

## 1. UVOD

Već desetljećima, sredjenaponski vakuumski prekidači koriste uskladištenu energiju opruge za pokretanje kontakata vakuumske komore. Dok se tehnologija električnog prekidanja značajno poboljšavala (od malouljnih preko SF6 do vakuumskih), pogonski mehanizmi prekidača ostali su poprilično nepromijenjeni.

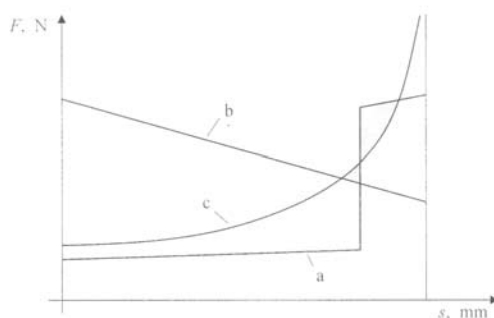
Danas se vakuumska tehnologija razmatra kao tehnologija koja je dovoljno uznapredovala i komercijalno se proizvode sklopni aparati čija uklopna moć iznosi do 100 kA, zbog čega nema razloga za poboljšanjem. U današnje vrijeme, znači, ne ide se s ciljem povećavanja maksimalnih parametara, nego razvoja jeftinijeg, pouzdanijeg i proizvoda kojeg je potrebno manje održavati. Smanjenje troškova vakuuskog prekidača uveliko ovisi o vakuumskim komorama koje su srce prekidača i ujedno i najskuplji dio. Praktične analize su pokazale da su vakuumske komore iznimno pouzdane, zbog čega je jedini način za poboljšanje pouzdanosti prekidača razvoj pogona prekidača. Očito je da zadržavajući stari pristup pogonskog mehanizma smanjenje troškova vodi do smanjenja pouzdanosti. Zato, nema sumnje da je razvoj na ovom polju nemoguć bez uvođenja nove tehnologije.

Spremljena energija opruge dolazi s mnogo ograničenja. Najprije, upotrebljava se mnogo pomičnih dijelova, koji moraju biti održavani i eventualno zamijenjeni tokom životnog vijeka proizvoda. Također, potreban je velik iznos spremljene sile za pravilno sklapanje, posebno za vrijeme uvjeta kratkog spoja. Otkrićem vakuuskih komora znatno se poboljšao proces prekidanja. Smanjuju se udaljenosti koje kontakti moraju preći (otprilike 8-20 mm) i također se značajno smanjuju energija i brzina potrebne za pokretanje kontakata. Čak i s ovim prednostima, isti opružni mehanizam je i dalje bio korišten.

Magnetski pokretani prekidači nude prvu veću prednost u tehnologiji mehanizama u zadnjih 50 godina. S jednostavnošću izrade i značajnom smanjenju pomičnih dijelova, ova nova tehnologija nudi dugu mehaničku trajnost s gotovo nepotrebnim održavanjem za vrijeme cijelog životnog vijeka aparata. Uvođenjem aktuatora s permanentnim magnetom i elektromagnetskim upravljanjem, nova generacija vakuumskih prekidača obećava povećanu pouzdanost i trajnost.

Inovacije u tehnologiji vakuuskog sklapanja su konstantno povećavale efikasnost vakuumskih prekidača, dok su se u isto vrijeme smanjivale vanjske dimenzije. Veliki broj dijelova potrebnih za upravljačku funkciju čisto mehaničkog pogonskog mehanizma ipak su povlačili određene nedostatke. Poznato je da se vjerojatnost ispada povećava proporcionalno s brojem pojedinačnih dijelova.

Još prije 20 godina, pozornost je dana elektromagnetskom pogonskom uređaju za vakuumske komore. Elektromagnetski pogonski mehanizam idealno odgovara karakteristikama vakuumskih komora: obje su karakterizirane, u jednu ruku, relativno malim gibanjima (8-12 mm), a u drugu ruku, velikoj sili u zatvorenom položaju (2000-4000 N po fazi). Tipična karakteristika sila potrebna za vakuusku komoru je prikazana na slici 1.



Slika 1. Karakteristika sila – put pri uklapanju vakuuskog prekidača

Ovdje vidimo oblik otpornih sila, krivulja (a), koje se pojavljuju u vakuumskim komorama pri uklapanju. Te su sile relativno male do trenutka uspostave galvanske veze između pomičnih i fiksnih kontakata u komorama, a onda naglo rastu, zbog zahtjeva za uspostavom dodatne kontaktne sile među kontaktima u uklopljenom položaju. Vakuumska komora će prirodno pokušati uklopiti kad su joj kontakti razdvojeni. To je zbog sile atmosferskog tlaka koja djeluje na mješur komore. Zbog toga je za vakuusku komoru važno obezbijediti dovoljnu silu od strane mehanizma kako bi se spriječilo uklapanje. Pogonska sila kod opružnih mehanizama općenito ima oblik prikazan krivuljom (b). Ona pada u skladu s karakteristikom uklopne opruge. Magnetski aktuatori imaju pogonsku silu prikazanu krivuljom (c). Očigledna je prednost na strani magnetskih aktuatora, jer će takva pogonska sila (ona eksponencijalno raste) mnogo lakše savladavati otpore u vakuumskoj komori od one u slučaju opružnih mehanizama, gdje

sila opruge linearno pada. Za uklapanje, većina proizvođača vakuumskih komora predlaže da se odmah na kontakte djeluje sa 80 % ukupne sile. Konstruktor mora izraditi mehanizam s dovoljno snage u njegovom uklopnom udaru da premaši tu silu bez stajanja ili dopuštanja da se kontakti odbijaju. Odskakivanje kontakata će često uzrokovati varenje kontakata vakuumske komore.

Pomoću specijalne kombinacije elektromagneta i permanentnog magneta, moguće je izbjeći nedostatke mehaničkog zadržanja u krajnjim položajima (prvenstveno višak potrebne spremljene energije u oprugama). Vakuumska komora je držana u krajnjim položajima uz pomoć sile permanentnog magneta bez ikakve električne energije. Kao rezultat ovoga, pogonski mehanizam je puno jednostavniji nego konvencionalni mehanički sustav. Sa značajnim smanjenjem u broju dijelova, učestalost ispada je puno manja, i zbog toga praktički nije potrebno održavanje pogonskog mehanizma.

Daljnja prednost ovog mehanizma je unošenje elektroničkog upravljanja. Blokade, signalizacija, uzbuđivanje svitka i samodijagnoza je ostvareno uz pomoć posebno izrađene upravljačke jedinice. Ovakve pogodnosti mogu biti unesene u konvencionalni mehanizam samo pomoću složenih ožičenja pomoćnih krugova, ako je moguće uopće. Stanje prekidača je određeno pomoću induktivnih senzora koji pokazuju krajnje položaje bez ikakvog fizičkog kontakta i bez ikakvih pokretnih dijelova.

## 2. MAGNETSKI MATERIJALI

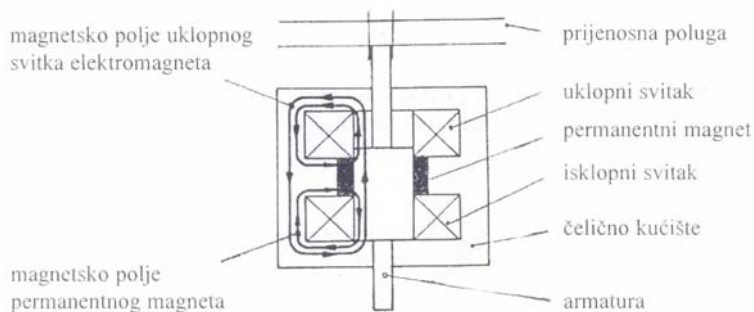
Dobro poznati magnetski materijali kao što su Alnico i različiti feritni materijali imaju određena ograničenja za upotrebu. Alnico magneti imaju visoku razinu remanencije do 1.3 Tesla, ali malu koercitivnost i zbog toga se može lako magnetski oštetiti. Feritni materijali, u drugu ruku, imaju visoku koercitivnost, ali nisku remanenciju oko 0.3 Tesla, što traži velike volumene materijala da se poistigne sila držanja potrebna za vakuumsku komoru.

Otkrićem rijetkih zemnih magneta priča se promijenila. Ovi novi materijali kombiniraju karakteristike visoke koercitivnosti i remanencije. Prvi komercijalno dostupni materijal je samarij – kobalt, koji je dosta skup, jer je samarij rijedak materijal. Također je ovo nestabilan materijal pa je montaža magneta i zaštita od udaraca vrlo teška.

Neodimij – željezo – bor je dosta jeftiniji materijal. Slitine koje su razvijene imaju znatno poboljšanu mehaničku strukturu i ovaj materijal ima dosta veliku gustoću energije po jediničnom volumenu. Ovaj materijal ipak ima i svoja ograničenja. Na temperaturama iznad 120 °C odlike magneta se smanjuju. Međutim, za primjenu u sklopnim aparatima ovo i nije otežavajuća okolnost, jer se temperature okoline kreću do 50 °C.

## 3. IZGLED I OPIS RADA BISTABILNOG MAGNETSKOG AKTUATORA

Konvencionalni opružni mehanizam ima velik broj mehaničkih dijelova, više od 150, bez standardnih dijelova kao što su vijci. Magnetski pogonski mehanizam, naprotiv, puno je jednostavniji. Sastoji se samo od vezne motke koja dolazi na pomični kontakt komore, vratila koje povezuje komoru s permanentnim magnetom i magnetskog aktuatora. Sam magnetski aktuator se u principu prema slici 2. svodi na čelično kućište, armaturu (kotvu), permanentni magnet i svitke elektromagneta.

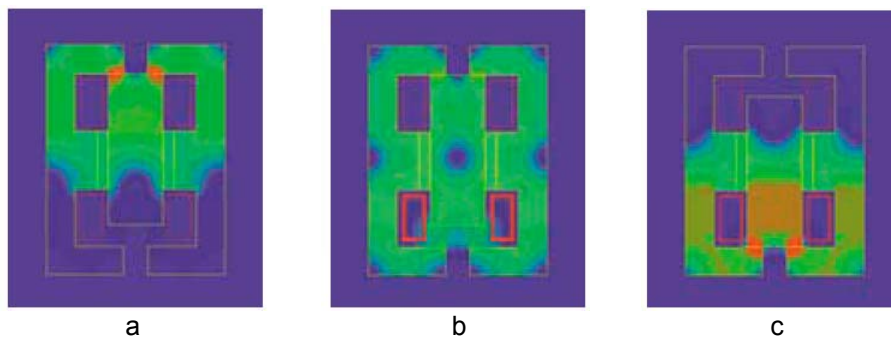


Slika 2. Bistabilni magnetski aktuator u otvorenom položaju s danim impulsom na svitku za uklapanje

Radi se, dakle, o samo nekoliko elemenata, od kojih je samo armatura pomična. Armatura se na prikladan način veže s pomičnim kontaktima vakuumske komore, koje elektromagneti i permanentni magneti pomiču i drže u jednom od krajnjih položaja. Naime, ovisno o tome koji je od dvaju svitaka elektromagneta doveden pod napon, on svojim poljem i poljem permanentnog magneta povlači pomičnu kotvu u jednu, odnosno u drugu stranu, gdje ih permanentni magnet efikasno drži i nakon nestajanja struje u tom svitku. Magnetski aktuator pokreće zajedničko vratilo koje prenosi energiju aktuatora na pomične kontakte vakuumskih komora na sve tri faze preko izolacijskih motki. Vratilo je praktički jedini mehanički opterećeni dio. Uvođenjem magnetski pokretanih prekidača značajno se smanjuje potrebna pomoćna energija i skraćuje vrijeme nabijanja nakon operacija. Električna energija potrebna za pobuđivanje svakog od dva svitka je spremljena u dva elektrolitska kondenzatora, koji zajedno uzimaju manje od 1.5 A na 120 V. Spremljena energija kondenzatorskih baterija je dovoljna za standardni APU ciklus, a kondenzatorske baterije su nabijene i spremne za djelovanje u manje od 2 sekunde nakon prethodnog ciklusa. Spremljena energija dozvoljava operaciju u slučaju nužde i do 200 sekundi nakon gubitka napona.

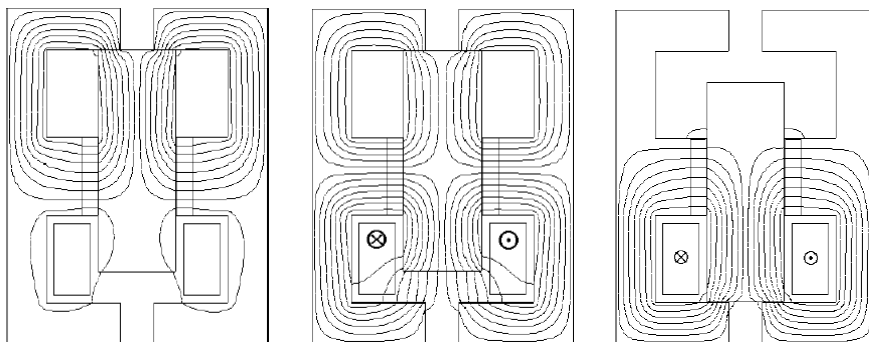
U svakom trenutku, moguće je prekidač isključiti i ručno, koristeći posebnu ručicu.

Princip rada magnetskog aktuatora prikazan je na slici 3. Na slici 3.a prikazan je aktuator pod djelovanjem permanentnog magneta u jednom od krajnjih položaja. Slika 3.b prikazuje aktuator u istom položaju pomične kotve s dovedenim strujnim impulsom na donji svitak elektromagneta. Pomična kotva pod djelovanjem polja permanentnog magneta prelazi u drugi krajnji položaj koji je prikazan na slici 3.c. Slijedeća promjena stanja odvija se dovođenjem gornjeg svitka elektromagneta pod napon.



Slika 3. Bistabilni magnetski aktuator

Linije magnetskog polja nacrtane na slici 4. pomažu da se objasni funkcija aktuatora. Kad je kotva u gornjem položaju (isklopljen položaj prekidača), zajedno sa željeznom jezgrom tvori stazu niskog magnetskog otpora za polje permanentnog magneta. Naprotiv, velik raskor na dnu kotve predstavlja visok magnetski otpor. Silnice polja zbog toga većinom prolaze kroz kraj kotve koji je u kontaktu s jezgrom. Visoka koncentracija silnica polja prikazuje jaku privlačnu silu u toj točki. Ova privlačna sila je preko vratila prenesena izravno na kontakte vakuumske komore. Za sklapanje su potrebni svici. Za operaciju uklopa, dodana magnetska energija donjeg svitka kompenzira se s visokim magnetskim otporom raskora, usmjeravajući silnice polja sve više i više prema donjoj stazi. Kad je dostignuta određena razina struje u svitku, kotva se pomiče. Sada, zatvoreni položaj prekidača je zadržan pomoću sile permanentnog magneta.



Slika 4. Raspodjela silnica magnetskog polja

#### 4. IZGLED I OPIS RADA MONOSTABILNOG MAGNETSKOG AKTUATORA

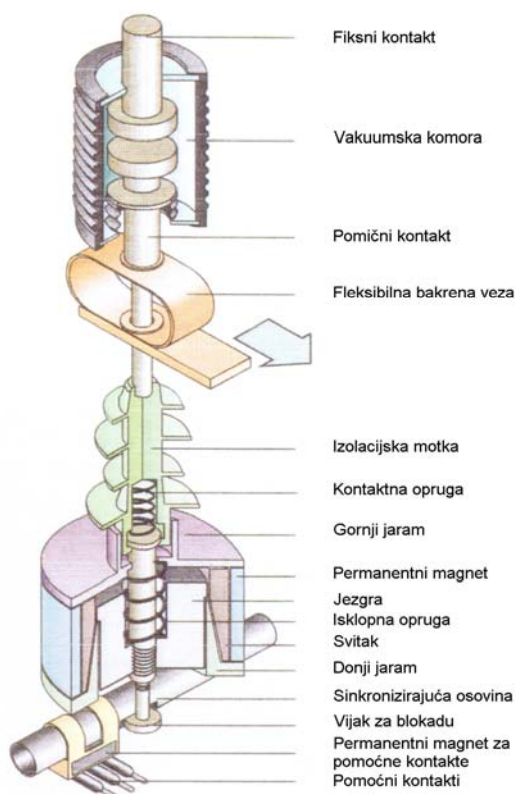
Dizajn vakuumnog prekidača razvijenog i proizvedenog od strane Tavrída Electric bitno se razlikuje od drugih dizajna koji se trenutno proizvode. Osnovni princip razlike ovog prekidača je potpuno poravnanje aktuatora i vakuumske komore. Ovakva konfiguracija dozvoljava konstruktoru da pojednostavi mehaničku strukturu prekidača.

Sva tri pola su povezana zajedno sinkronizirajućom osovinom da bi se izbjeglo nesinkrono djelovanje vakuumskih komora. Ova osovina je također korištena za upravljanje pomoćnim kontaktima. Osovina je namijenjena i za pogon svih mehaničkih blokada postrojenja gdje je vakuumski prekidač instaliran.

Prije početka uklapanja kontakti vakuumske komore su otvoreni zbog isklonpe opruge koja djeluje na pomični kontakt preko izolacijske motke. Da bi zatvorili kontakte vakuumske komore, upravljački napon treba biti narinut na svitak aktuatora. Magnetski tok proizveden od strane svitka javlja se u rasporu između gornjeg jarma i armature aktuatora. Taj magnetski tok postaje sve jači i elektromagnetska sila sve jače privlači armaturu aktuatora u gornji položaj. U trenutku kad elektromagnetska sila nadmaši otpor isklonpe opruge, armatura se počinje gibati zajedno s izolacijskom motkom i pomičnim kontaktom komore. Proces uklapanja je završen prekidom uklopne struje uz pomoć upravljačkog modula. Vršna vrijednost struje aktuatora ne prelazi 10 A. Prekidač ostaje zatvoren zbog privlačne sile permanentnog magneta koji drži armaturu privučenu uz gornji jaram. Prekidač je sposoban ostati u ovom položaju sve dok se ne pojavi struja suprotnog polariteta koja će razmagnetizirati permanentni magnet.

Da bi isklopili prekidač napon suprotnog polariteta potrebno je narinuti na svitak aktuatora u trajanju 15-20 ms. U ovom slučaju dolazi do razmagnetiziranja permanentnog magneta. Mehanička energija spremljena u isklonpoj opruzi i kontaktnoj opruzi iznimno brzo ubrzava armaturu. Pomični kontakt se počinje gibati vrlo brzo što povećava prekidnu moć prekidača. Nakon razdvajanja kontakata, armatura se nastavlja gibati pomoću izolacijske motke do konačnog donjeg položaja. Razmagnetizirajuća struja dostiže jedva 1.5 A u vremenu od 15-20 ms.

Osim toga, moguće je prekidač isklopiti i ručno kad dođe do ispada pomoćnog napona. Potrebno je samo povući armaturu silom koja je veća od magnetske sile držanja armature.



Slika 5. Unutrašnji izgled jednog pola prekidača proizvođača Tavrída Electric

## 5. ELEKTRONIČKA UPRAVLJAČKA JEDINICA

Elektroničko napajanje i upravljačka jedinica za prekidač mora ispuniti sve funkcije konvencionalnih mehaničkih pogonskih mehanizama. Dodatna funkcija je nadzor energije za pogonjenje aktuatora. Napajanje nam daje konstantnih 80 V, neovisno o stabilnosti i kvaliteti narinutog pomoćnog napona. Podnapon i prenapon nema nikakvog utjecaja na vremena sklapanja.

Elektroničke kondenzatorske baterije osiguravaju snagu do 2600 W potrebnu za nabijanje isklonog i uklopnog svitka u aktuatoru. Potrebno je manje od 200 J spremljene energije za cjelokupni O-CO ciklus. Nakon ovog ciklusa kondenzatorske baterije se nabiju za manje od 10 s, s maksimalnom strujom od 2 A. Kombinacija MOSFET tranzistora i tiristora upravlja strujom za uzbuđivanje svitaka. Sklopni prenapon induciran preko induktiviteta svitaka reduciran je pri isklapanju preko paralelnih dioda na takav iznos koji nema utjecaj na poluvodičke komponente.

Sklopne komande se jedino izvršavaju uzimajući u obzir položaj prekidača koji se detektira pomoću induktivnih senzora i stanju nabijenosti kondenzatorskih baterija.

Elektronička upravljačka jedinica također omogućava funkcije podnaponskog, nadnaponskog i okidača za zaštitu od kratkog spoja.

## 6. ZAKLJUČAK

Permanentni aktuator je idealni mehanizam za pogonjenje vakuumske komore prekidača. Razvijen je isključivo promatrajući karakteristike vakuumske komore. U određenim eksploatacijskim uvjetima, npr. u industriji gdje se traže velika mehanička trajnost prekidača, ovakvi pogonski mehanizmi nalaze svoju primjenu. Isto tako, svoju primjenu nalaze u sinkronom sklapanju, kada je zbog malih dimenzija aktuatora moguće izvesti 3 mehanizma, za svaku fazu neovisno.

Dakle, ovaj mehanizam predstavlja pogon s nižim troškovima koji može biti korišten za cijelu gamu vrijednosti prekidne moći prekidača. Magnetski aktuator nudi korisniku poboljšanje tehničkih karakteristika, manje troškove i produženi životni vijek prekidača.

## LITERATURA

- [1] R. Milošević: Mehanizmi električnih sklopnih aparata, osnove teorije i praksa, GRAPHIS, Zagreb, 2004.
- [2] B. Fesmire, "Magnetic technology spurs quantum leaps in circuit breaker performance", Electricity Today Issue 6, 2003.
- [3] E. Dullni, H. Fink and C. Reuber, "A vacuum circuit-breaker with permanent magnetic actuator and electronic control"
- [4] B. Mckean and C. Reuber, "Magnets & vacuum – the perfect match", Conference Publication IEE No. 459, 1998.
- [5] A. J. W. Lammers, P. P. Leufkens and G. C. Schoonenberg, "MV vacuum switchgear based on magnetic actuators", Conference Publication IEE No. 459, 1998.
- [6] A. Chaly and A. Gusev, "New generation of medium voltage circuit breakers", Tavrida Electric
- [7] Grupa autora, "Totally maintenance-free: new vacuum circuit breaker with permanent magnet actuator", Elektrizitätswirtschaft Jg. 96, 1997.