

АНАЛИЗА УЗЕМЉИВАЧКОГ СИСТЕМА У ГАСОМ ИЗОЛОВАНИМ ПОСТРОЈЕЊИМА ПРИ ПОЈАВИ ПРЕНАПОНСКИХ ТАЛАСА ЕКСТРЕМНО ВИСОКИХ УЧЕСТАНОСТИ НАСТАЛИХ МАНИПУЛАЦИЈАМА ПРЕКИДАЧА И РАСТАВЉАЧА

Драган РИСТИВОЈЕВИЋ, ЈП ЕПС Огранак РБ Колубара, Србија
Слободан ДАМЊАНОВИЋ, ЈП ЕПС Огранак РБ Колубара, Србија

У раду су приказане и анализирани појаве које су регистроване приликом мерења на уземљивачким системима различитих конфигурација и на секундарним прикључцима струјних трансформатора и релејне заштите. Дана је и анализа појаве енормних вредности капацитивних струја услед високих учестаности пренапонокојинастају приликом манипулација растављачем, односно прекидачем.

Реализована су и одређена мерења са променом дужина спојних проводника између металних маса међусобно и према уземљивачу, а извршена је и анализа утицаја металног плашта кабла.

Кључне речи: Пренапонске појаве, манипулација растављачем

ANALYSIS OF GROUNDING SYSTEM IN A GAS ISOLATED SUBSTATIONS AT THE OCCURRENCE OF OVERVOLTAGES OF EXTREMELY HIGH FREQUENCIES CAUSED BY SWITCHGEAR AND DISCONNECTOR MANIPULATIONS

The paper presents and analyzes the phenomena registered during the measurement on grounding systems of different configurations and on secondary connections of current transformers and relay protection. An analysis of the phenomenon of enormous values of capacitive currents due to the high frequencies of overvoltage, which occur during the manipulation of the disconnecter or switch, is also given here.

Certain measurements with the change of the lengths of the coupling conductors between the metal masses, between each other and to the ground conductor have been carried out, as well as the cable metal shield impact analysis.

Key words: overvoltage occurrences, manipulation of the disconnecter

1. УВОД

У раду су приказане и анализирани појаве регистроване при мерењима на уземљивачким системима различитих конфигурација и на секундарним прикључцима струјних трансформатора и релејне заштите. Дана је и анализа појаве енормних вредности капацитивних струја услед високих учестаности пренапона насталих као последица манипулација растављачем, односно прекидачем.

Реализована су и одређена мерења са променом дужина спојних проводника између металних маса међусобно и према уземљивачу, а извршена је и анализа утицаја металног плашта кабла.

Проблема настанка пренапона изузетно високих учестаности при манипулацијама углавном растављачем није толико познат ширем кругу стручне јавности, док се на нивоу института и у процесу производње истражују начини, да се ова појава ублажи и сведе на ниво минорних ефеката. Висок притисак гаса SF₆ у растављачима неопходан је за остваривање диелектричних својстава у постројењу, због малих међуфазних

растојања између сабирница. Растављачи скоро отварају или затварају контакт пошто нису предвиђени за гашење лука. Настаје проблем у ефикасности прекидања односно успостављања струјног кола преко постојећих капацитивности према земљи, пошто је прекидач искључен.

Иначе, брзина реаговања растављача у овој врсти постројења износи неколико центиметара у секунди (2–3) cm/s, што доприноси вишеструком паљењу и гашењу лука. Последица тога је појава пренапона веома стрмог чела и кратког трајања, чак до реда неколико десетина нано секунди (ns). Ради се о појави која је много бржа у односу на атмосферске пренапоне (типично 1,2/50 μs). При вишеструком паљењу и гашењу електричног лука настају радикални осцилаторни процеси изузетно високе учестаности. Услед спорог процеса операција растављачем, трајање вишеструких паљења и гашења електричног лука, може бити релативно дуго (чак до пар секунди) и то може знатно повећати степен угрожености изолације у постројењима.

2. НАЧИНИ ПРОСТИРАЊА ПРЕНАПОНСКИХ ТАЛАСА ДУЖ МЕТАЛНИХ ПОВРШИНА ПОСТРОЈЕЊА И У СЕКУНДАРНИМ КОЛИМА

Пренапонски таласи се углавном преносе кроз постројење на три позната начина:

- Капацитивном спрегом (капацитивност реда неколико nF) међузавојне и доземне изолације намотаја. Генерално, било који електроенергетски елемент се може посматрати као капацитивност. Ефекат је посебно изражен за високе учестаности, када опада вредност капацитивне импедансе.
- Индуктивном спрегом, односно електромагнетним пољем, које фигурише између намотаја вишег и нижег напонског нивоа.
- Галванским путем

Поред напоменутих начина сагледавања простирања пренапонских таласа разматра се и такозвани антенски пренос дуж металних маса постројења и у оквиру секундарних кола мерних трансформатора, дакле – електромагнетним путем. Ради се о екстремно високим учестаностима, чак до реда 150 MHz, што представља ултракратко таласно подручје таласне дужине

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \times 10^8}{150 \times 10^6} = 2m \quad (1)$$

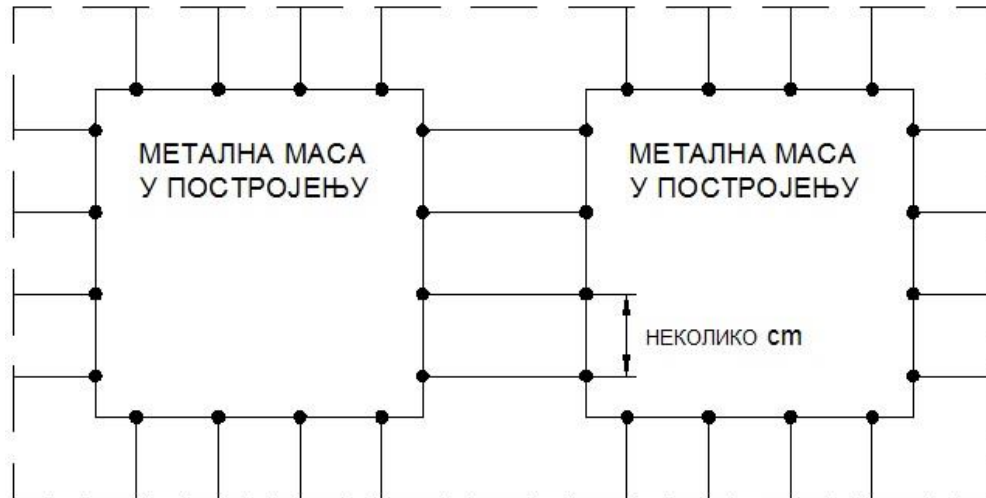
док је периода

$$T = \frac{1}{f} = \frac{1}{150 \times 10^6} = 6,6ns \quad (2)$$

За екстремно високе учестаности елементи еквивалентних електричних заменских шема нису концентрисане капацитивности и индуктивности, већ се проводници, у зависности од дужине, моделују преко више „Т“ или „П“ шема у чијем склопу су LC кола

Појава је веома брза и одступа од класичног начина анализе који је познат за индустријску учестаност $f=50$ Hz, када такозвано изједначавање потенцијала не представља велики проблем и релативно лако се реализује. При високим учестаностима изједначавање потенцијала на металним масама постаје знатно сложеније и реализује се вишеструким спајањем површина, на што већем броју места и што краћим проводницима (што је већи број спојева, мањи је утицај индуктивне компоненте уземљивачког система, а самим тим мањи број тачака дисконтинуитета у постројењу), како је представљено на Слици 1.

Дакле, изједначавање потенцијала за екстремно високе учестаности потребно је реализовати на начин да се смањи индуктивна компонента (ωL), која доминира и ствара тзв тачке дисконтинуитета, при чијем постојању долази до преламања и одбијања (суперпонирања) пренапонских таласа, који се простиру дуж постројења и при секундарним колима мерних трансформатора.



Слика 1. Изједначавање потенцијала између металних маса и према уземљивачком систему, за екстремно високе учестаности

Поред смањивања дужина проводника, познато је да се уземљивачки систем понаша повољније (за смањење индуктивне компоненте), уколико су елементи FeZn траке постављени зракасто. Иначе при постројењима се уземљивачки систем решава формирањем мреже FeZn траком, или употребом бакарне ужади.

Металне масе у постројењу морају се везати међусобно и на уземљивач на што више места, уз што краћа растојања, јер у супротном се јављају проблеми са расподелом потенцијала. Сама реализација уземљивачког система у SF6 постројењима није ни мало једноставна и представља веома сложен и комплексан проблем, мада је с друге стране изузетан изазов за електроенергетичаре.

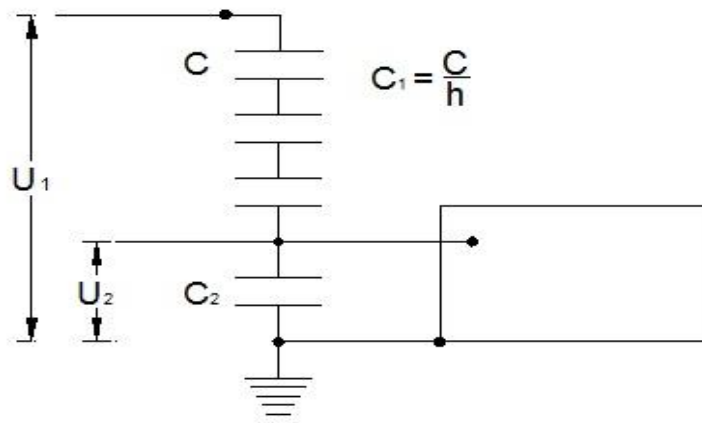
3. МЕРЕЊА У ПОСТРОЈЕЊИМА

Интензитети потенцијала између металних маса у постројењу и према уземљивачком систему при манипулацијама растављачем мерени су употребом двоканалног осцилоскопа FLUKE TIP 199C. Запажено је да су амплитуде пренапона при манипулацијама растављачем (укључење - искључење) на приближно истом нивоу, с тим што су незнатно веће при искључењу (прекидање капацитивних струја). Појаве су израженије при експерименту са дужим проводницима и при раздвојеном плашту једног од каблова на изводу од уземљивачког система постројења.

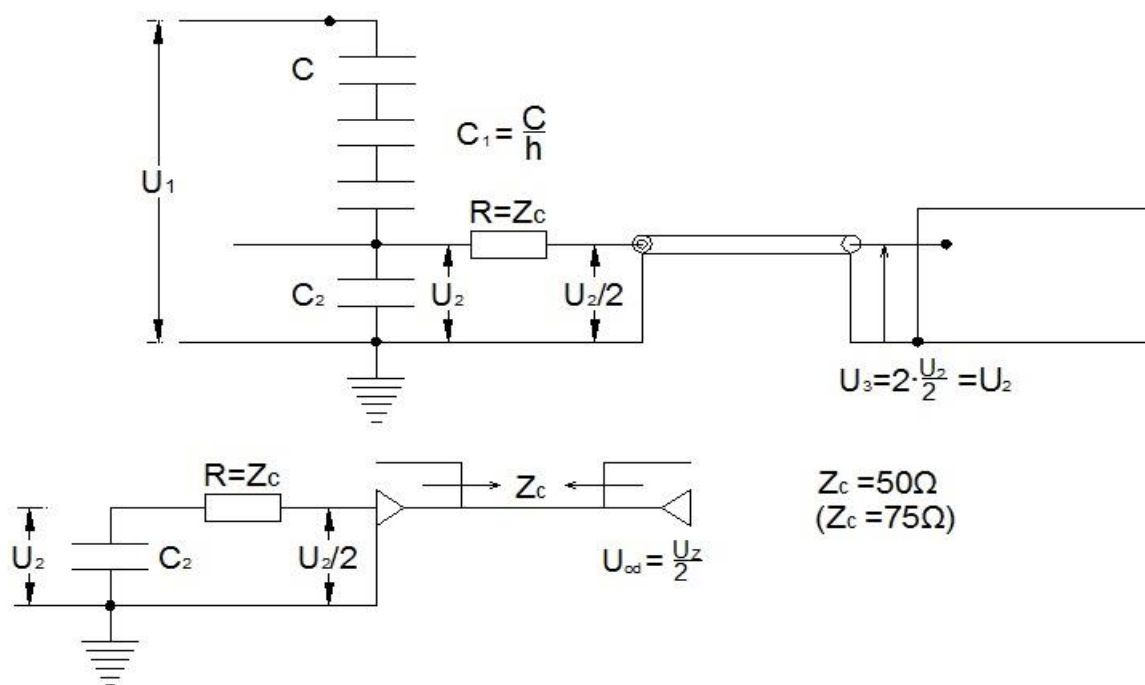
Сва мерења су реализована у постројењу ТС 35/20 kV Каленић, у којем реално није у потпуности реализовано галванско спајање металних маса на довољно тачака. При мерењима је, у недостатку неког фабричког калибрисаног делила напона, коришћено капацитивно делило формирано од одговарајућих капацитета, тако да се тачност измерених вредности објективно може ставити под знак питања, али оно што је од пресудног значаја то је да су задржани односи појединих електричних величина при различитим операцијама, односно конфигурацијама.

Преносни однос капацитивног делила напона дат је изразом

$$m = \frac{U_1}{U_2} = \frac{I \times (Z_{C1} + Z_{C2})}{I \times Z_{C2}} = \frac{\frac{1}{\omega C_1} + \frac{1}{\omega C_2}}{\frac{1}{\omega C_2}} = \frac{\frac{C_2 + C_1}{\omega C_1 C_2}}{\frac{1}{\omega C_2}} = \frac{C_1 + C_2}{C_1} \quad (3)$$



Слика 2. Капацитивно делило без коаксијалног кабла



Слика 3. Капацитивно делило напона са приказаном рефлесијом таласа

За капацитет C_1 коришћено је неколико делова кабла 20 kV, дужине по 1 m, са доминантном капацитивношћу према земљи (спој све три фазе према заштитно проводнику $3 \times 16 \text{ mm}^2$), капацитета $C \approx 0,3 \text{ nF}$. За капацитет C_2 искоришћена је кондензаторска батерија знатне капацитивности. Вредности потенцијала на металним масама у хелијама и у секундарним колима мерних трансформатора при искључењу растављача у трансформаторским пољима и на изводима 35 kV приказани су у Табели 1.

Може се уочити да се приликом галванског спајања металних маса на више места (као и скраћивања дужине проводника) у спојној ћелији смањује интензитет измереног потенцијала као и интензитет потенцијала на секундарним колима струјних трансформатора. Види се да постоји утицај пренапонских таласа на кола релејне заштите и о томе је потребно нарочито водити рачуна и предупредити беспотребно реаговање или оштећење релеја.

Табела 1. Вредности потенцијала на металним масама истакнутих ћелија и у секундарним колима мерних трансформатора при искључењу растављача у трансформаторским пољима и на изводима 35 kV

Искључење растављача у ћелији		Трансформаторска поља		Изводи 35 kV	
		Број 1	Број 2	Јаловина 1	Јаловина 2
Потенцијал између металних маса у спојној ћелији (kV)	Постојеће стање струјних тачака	14,7	14,6	11,8	11,85
	Галв. спојено на више места уз скраћење дужине проводника	14,1	14,0	11,35	11,35
Потенцијал између металне масе и уземљивачког система у спојној ћелији (kV)	Постојеће стање струјних тачака	14,5	13,92	11,70	11,35
	Галв. спојено на више места уз скраћење дужине проводника	13,85	13,70	10,90	10,92
Потенцијал у колима секундарних струјних трансф. на изводу Јаловина 2	Постојеће стање струјних тачака	2,78	2,70	2,74	2,86
	Галв. спојено на више места уз скраћење дужине проводника	2,61	2,55	2,58	2,75
Потенцијал у колима секундарних струјних трансф. на изводу Јаловина 1	Постојеће стање струјних тачака	2,78	2,65	2,74	2,80
	Галв. спојено на више места уз скраћење дужине проводника	2,70	2,59	2,67	2,70

Услед минималних растојања, капацитивности између сабирничког система су знатно веће у односу на капацитивности у ваздухом изолованим постројењима

$$C_{SF6} \gg C_{VIP} \quad (4)$$

односно

$$Z_{SF6} \ll Z_{VIP} \quad (5)$$

Пошто су капацитивности веће и струја земљоспоја је такође већа, а при осцилаторним процесима енормно већа, јер се ради о учестаностима реда 150MHz.

Било би интересантно реализовати мерење интензитета струје земљоспоја при актуелним прелазним процесима, насталим манипулацијама растављачима. Капацитивна импеданса Z_{SF6} тада има вредност

$$Z_{SF6} = \frac{1}{2\pi \times 150 \times 10^6 \times C_{SF6}}; Z_{SF6}(150MHz) \ll Z_{VIP}(50Hz) \quad (6)$$

У условима копаактивна компонента струје земљоспоја на напонском нивоу 35kV износи $I_A=50A$ (раније је било $I_A=300A$, али је уследио радикални помак, због безбедности и заштите од превисоког напона додира).

Напон додира се дефинише изразом

$$U_d = \frac{75}{t} \quad (7)$$

где је време реаговања релејне заштите увећано за време деловања актуелног прекидача.

Иначе, једначина (7) важи за стационарна стања електричних појава, док је за прелазне режиме дискутабилна и непоуздана.

Струја земљоспоја садржи и реактивну (капацитивну) компоненту која зависи од дужине кабловске мреже 35 kV и приближно износи 5A/km кабла (на основу релације $I_C = \frac{1}{7} U_l(km) \times l(km)$). За $l=14km \Rightarrow I_C=70A$

$$I_{zuk} = \sqrt{I_A^2 + I_C^2} = \sqrt{50^2 + 70^2} = 80A \quad (8)$$

Пошто је у звездишту трансформатора 110 kV/35kV на страни 35kV постављен отпорник $R = 400\Omega$, уместо раније коришћеног $R=73\Omega$, констатује се да је извршено приближавање режиму рада мреже са изолованим звездиштем. Капацитивна струја износи

$$I_C = 3 \times U_f \times 2\pi f \times c \times l \quad (9)$$

где је U_f - фазни напон 20.21kV, f -учестаност 50 (Hz), c - подужна капацитивност кабла (nF/km) и l - дужина кабловске мреже (km).

Интересантно је разматрање шта бива са интензитетом струје I_C када при манипулацији растављачем долази до појаве осцилаторних процеса учестаности до 150MHz. Тада Z_{sf6} нагло пада, а I_C енормно расте и потребно је у блиској будућности реализовати неколико експеримената, односно изазвати вештачки земљоспој, а онда док земљоспој траје, мерити струју квара, активирати неколико растављача на слободним изводима и такође мерењем, констатовати промене интензитета при осцилаторним процесима са високом учестаношћу.

Поставља се питање како се мења струја земљоспоја и у ком обиму док траје спори процес искључења или укључења? У пракси је чак забележен случај деловања земљоспојне заштите при манипулацији растављачем услед високофреквентних осцилација, иако квар није постојао.

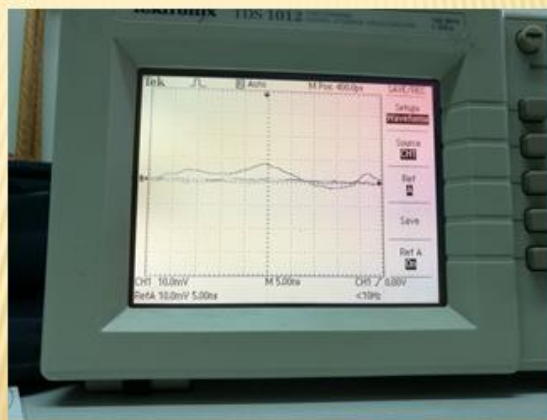
Мерења у постројењу су изведена и за случај раздвојеног плашта кабла резервне ћелије од уземљивачког система ($l = 300m$ до разводног ормана), али нису уочене битније промене, што се можда може објаснити релативно малом дужином кабла, самим тим и плашта.

Мерења потенцијала при укључењу растављача у одређеним ћелијама, показала су нешто ниже вредности у односу на процес искључења, што се види из Табеле 2.

На сликама 4 и 5 је показан изглед пренапонског таласа при укључењу и при искључењу 35 kV прекидача.

ПРИМЕРИ

Слика 4



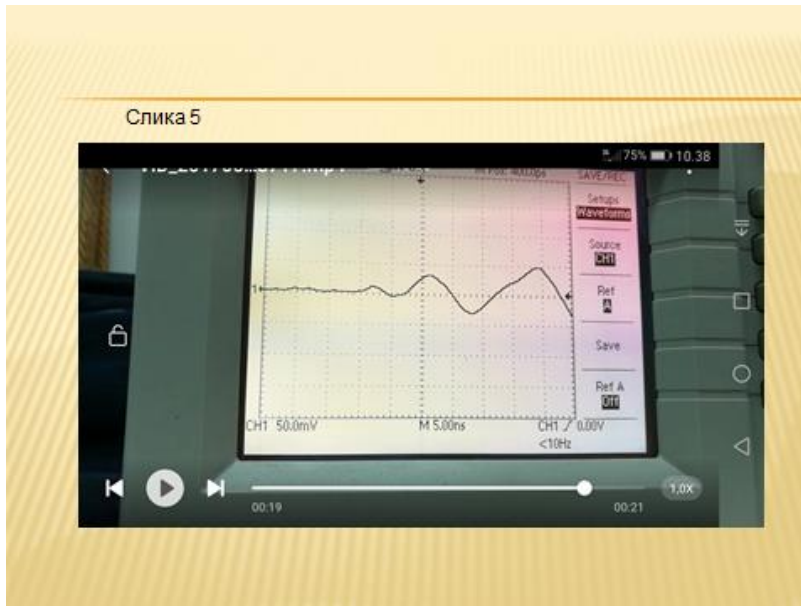
Слика 4. Пренапонски талас при укључењу 35 kV прекидача

Табела 2. Вредности потенцијала на металним масама истакнутих ћелија и у секундарним колима мерних трансформатора при укључењу растављача у трансформаторским пољима и изводима 35kV

Искључење растављача у ћелији		Трансформаторска поља		Изводи 35 kV	
		Поље бр. 1	Поље бр. 2	Јаловина 1	Јаловина 2
Потенцијал између металних маса у спојној ћелији (kV)	Постојеће стање струјних тачака	14,10	14,00	11,45	11,60
	Галв. спојено на више места уз скраћивање дужине проводника	13,41	13,10	10,83	11,00
Потенцијал између металне масе и уземљивачког система у спојној ћелији (kV)	Постојеће стање струјних тачака	13,85	13,74	11,28	11,50
	Галв. спојено на више места уз скраћивање дужине проводника	13,05	12,90	10,70	10,87
Потенцијал у колима секундарних струјних трансф. на изводу 35kV Јаловина 2	Постојеће стање струјних тачака	2,63	2,55	2,80	2,69
	Галв. спојено на више места уз скраћивање дужине проводника	2,45	2,40	2,35	2,52
Потенцијал у колима секундарних струјних трансф. на изводу 35kV Јаловина 1	Постојеће стање струјних тачака	2,61	2,60	2,64	2,63
	Галв. спојено на више места уз скраћивање дужине проводника	2,41	2,40	2,21	2,23

Генерално, тренутно не постоје правилници којима би била дефинисана ова врста појаве са препорученим дозвољеним вредностима интензитета пренапона. У европским сразмерама, мишљење је да је ниво пренапона између металних маса и металних маса и уземљивачког система око 15kV, док је у секундарним колима

мерних трансформатора ближе прикључним тачкама око 3kV,а на самим елементима релејне заштите до 1kV.



Слика 5. Пренапонски талас при искључењу 35 kV прекидача

4. ЗАКЉУЧАК

Описана је појава осцилаторних процеса високих учестаности, насталих при манипулацијама растављачем (услед вишеструких паљења и гашења електричног лука између контаката), као и начини преношења кроз постројење, од којих је електромагнетни најинтересантнији.

Ови експерименти представљају тек зачетак изузетно сложеног испитивања, како тачака дисконтинуитета, тако и утицаја дужине и броја проводника којима се галвански повезују металне масе међусобно и према уземљивачком систему.

Закључује се да је неопходно у знатно ширем обиму посветити се овој појави, јер представља веома велики изазов и захтева перманентну теоретску надоградњу и емпирију.

Уземљивачки систем, одлично димензионисан за стационарна стања и ниску учестаност, представља непознаницу, како за прелазне процесе при уобичајеним операцијама, тако и за настале осцилаторне појаве које се јављају при манипулацијама растављачима због екстремно високих учестаности ових појава.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Гојко Дотлић, Електроенергетика кроз стандарде, законе, правилнике и техничке препоруке, 2009.
2. Јован Нахман, Владица Мијаиловић, Разводна постројења, 2005.
3. Јован Нахман, Драгутин Саламон, Владица Мијаиловић, Разводна постројења-збирка решених задатака са прилозима, 2012.
4. Милан Савић, Златан Стојковић, Техника високог напона, 2001.