

## ПРОБЛЕМИ НА ПЪРВИЧНАТА КОМУТАЦИЯ ПРИ РЕТРОФИТ НА КРУ

**Стефан Чобанов**

CMC-C EOOD, Пирдоп, e-mail: stefan.chobanov@cmc-c.com

**РЕЗЮМЕ:** Обновяването на КРУ НН и СН чрез ретрофит масово се прилага в промишлените уредби с доказалата се технико-икономична ефективност. В случаите, когато се заменят комутационни апарати, най-често се налага промени в конструкцията на шинната система в КРУ. Статията предлага методика за избор на шини в първичната комутация на КРУ по критерии за нагряване и електродинамична устойчивост в установен режим и в режим на късо съединение.

**Ключови думи:** ретрофит, шини, нагряване, електродинамична устойчивост

## PROBLEMS THAT OCCURS AT THE PRIMARY COMMUTATION IN THE RECONSTRUCTION OF SWITCHGEARS

**Stefan Chobanov**

CMC-C Ltd, Pirdop, e-mail: stefan.chobanov@cmc-c.com

**ABSTRACT:** Renovation of LV and MV switchgears through retrofit is applied widely in the industrial systems with proven technical and economical efficiency. In the cases where the commutation equipment is replaced, most often requires changes in the construction of the busbar system in the switchgear. The article offers a methodology for selecting the busbars in the primary commutation of the switchgear by criteria for heating and electrodynamic resistance in the established regime and in short circuit regime.

**Keywords:** retrofit, busbars, electrodynamic resistance

Обновяването на КРУ чрез ретрофит е ефективен подход за повишаване на техническите им параметри, приближавайки ги до ниво на съвременни разпределителни устройства за СН, при това осъществими с 2-3 пъти по-малки разходи. Последното е резултат от съхранението на значителна част от пасивните елементи и габаритите в конструкциите на КРУ и произтичащото от това елиминиране на строителните дейности, съпътстващи монтажа на нови КРУ.

Ретрофитът в общия случай обхваща първичната и вторичната комутация на КРУ, като в отделни случаи това се осъществява селективно, не едновременно.

Измененията в първичната комутация са резултат преди всичко от замаяната на комутационните апарати. Въвеждането на вакуумни и елегазови прекъсвачи, с различни габаритни и присъединителни размери, налагат промяна на конструкцията на шините и разстоянията между тях. Последните обстоятелства най-често изменят електродинамични сили и съответно механичните напрежения, които задължително трябва да бъдат оценени. Изчислителната проверка на шините обхваща:

- Нагряване от максималния работен ток и тока в режим на късо съединение, лимитирани от въведените комутационни апарати;
- Определяне на електродинамичните сили и генерираните от тях механични напрежения в режим на късо съединение.

### 1. Изчислителна проверка по нагряване на шините

#### 1.1. Нагряване от продължителен работен ток

Допустимият ток на шината нормално се определя от номиналният ток на КРУ, респективно на прекъсвача. Но има изключения, когато се извършва ретрофит на КРУ, избран със значителен резерв по ток. В този случай, проверката се извършва по максималния ток на консуматора, но това трябва да се отрази в табелата на КРУ и в придружителната документация.

Допустимият ток за шината се определя по уравнението:

$$I_{\text{доп}} \leq \frac{I_n}{k_1 k_2} \quad (1)$$

или

$$I_{\text{доп}} \leq \frac{I_{\text{раб.}}}{k_1 k_2} \quad (2)$$

където:  $I_n$  - номинален ток на КРУ (прекъсвача), А;

$I_{\text{раб.}}$  - максимален работен ток на включения

към КРУ потребител(и);

$k_1 \geq 1$  - коефициент, отчитащ температурата на въздуха;

$k = 1$  при температура на околната среда с

$\theta_{01} = 25^\circ C$ . При околна среда с  $\theta_{02} \neq 25^\circ C$ , допустимият ток се коригира с

$$k_1 = \sqrt{\frac{\theta_m - \theta_{01}}{\theta_m - \theta_{02}}} = \sqrt{\frac{70 - 25}{70 - \theta_{02}}} = \sqrt{\frac{45}{70 - \theta_{02}}}$$

$\theta_m$  - максимална температура, допускана за шината,  $\theta_m = 70^\circ C$ , [1];

$k_2 \geq 1$  - коефициент, зависещ от разположението на шината: при разполагане на тясната страна  $k_2 = 1$  при разполагане на широката страна  $k_2 = 1,5$  за шини с ширина до 60mm, а  $k_2 = 1,08$  за шини с ширина до 60mm [1].

В таблица 1 са определени минималните размери и сечения за медни и алуминиеви шини, определени по (1) според номиналните стандартизирани токове на КРУ, при температура на околната среда  $\theta_{01} = 25^\circ C$ , допустима температура на нагряване на шините  $+70^\circ C$ , т.е.  $k_1 = 1$ .

Таблица 1.

№	$I_n$ на КРУ, А	Медни шини			Алуминиеви шини				
		Размер, mm	Сечения, mm <sup>2</sup>	брой	$I_{доп}$	Размер, mm	Сечения, mm <sup>2</sup>	брой	$I_{доп}$
1	630	50x5	250	1	860	60x6	360	1	828
2	1250	100x6	600	1	1676	100x6	600	1	1490
3	2500	100x6	1200	2	3352	100x8	1600	2	3009
4	3150	100x10	1000	2	4277	100x10	2000	2	3962
5	4000	120x10*	1400	2	4907	100x8	2400	3*	4513

\* Не се препоръчват 3 броя шини на фаза, както и използването на шина с ширина  $b > 100mm$ , поради намаляване на разстоянието между фазите и нарастване на електродинамичните сили.

## 1.2. Нагряване в режим на късо съединение

Термичната устойчивост на шините в режим на късо съединение се определя от установения ток на к.с.,  $I_\infty$ , допускайки, че промишлените системи са „отдалечени“ от източниците, генериращи тока на к.с.п. Времето за прекъсване на к.с. се лимитира от максималното време допустимо за прекъсване на т.к.с. от вакуумните и елегазовите прекъсвачи, което се приема  $t_{kc} = 3s$ .

Максималните допустими температури в режим к.с. за шините (при начална температура  $70^\circ C$  [1]) е:

- За медни шини –  $300^\circ C$ ;
- За алуминиеви шини -  $200^\circ C$

Минималното сечение, гарантиращо термична устойчивост [5], се определя от зависимостта:

$$S_{\min} = \sqrt{\frac{B_k}{A_k - A_n}} = \frac{\sqrt{B_k}}{C} \quad (3)$$

където:  $B_k$  е токовият импулс,  $A^2 s$ ;

$A_k$  е функция от допустимата крайна температура в режим на к.с.

$A_n$  е функция от началната температура, при която възниква к.с.

Токният импулс се изчислява от:

$$B_k = I_\infty^2 \cdot 10^6 \cdot t_{kc} = I_\infty^2 \cdot 10^6 \cdot 3, \quad (4)$$

а стойностите на  $A_k$  и  $A_n$ , определени графично по [5], дефинират  $C = \sqrt{A_k - A_n}$ :

- За медни шини:  $C_{cu} = \sqrt{4,1 \cdot 10^4 - 1,4 \cdot 10^4} = 164,32$
- За алуминиеви шини:  $C_{Al} = \sqrt{1,3 \cdot 10^4 - 0,4 \cdot 10^4} = 94,87$

От (3) и (4) може да се определят зависимостите на минималното сечение  $S_{\min}$ , като функция от установения т.к.с.  $I_\infty$ :

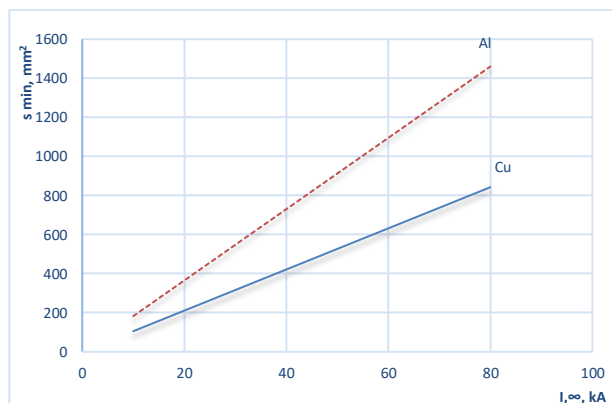
- За медни шини

$$S_{\min} = \frac{\sqrt{B_k}}{C_{cu}} = 10,53 I_\infty \quad (5)$$

- За алуминиеви шини

$$S_{\min} = \frac{\sqrt{B_k}}{C_{Al}} = 18,25 I_\infty \quad (6)$$

Зависимостите (5) и (6) са изобразени графично на фиг.1, откъдето с достатъчна точност може да бъде определено минималното сечение на шини от мед и алуминий.



Фиг. 1.

В зависимост от установения ток  $I_\infty$ , (максималния при трифазно или двуфазно к.с.), определеното сечение се сравнява със сечението, определено при продължителен режим (т.1.1). Приема се по-голямото сечение закръглено до най-близкото стандартно сечение на шината.

С така избраното сечение на шината  $S$ , с ширина  $b$  и височина  $h$  се изчисляват електродинамичните сили и механичните напрежения  $\sigma$ , породени от тях, които не трябва да надхвърлят допустимото  $\sigma_{доп}$ :

$$\sigma \leq \sigma_{доп} \quad (7)$$

## 2. Изчислителна проверка за механична якост на шинната конструкция в режим на късо съединение

Механичната якост се оценява за всички нови шини в КРУ чрез изчисляване на напреженията и сравнение с допустимата стойност  $\sigma_{доп}$ . Проверката обхваща и магистралните шини, разположени в горния отсек на КРУ, ако се налагат конструктивни промени.

Допустимите стойности на напрежението  $\sigma_{доп}$  се препоръчват в границите: за медни шини 0 от 130MPa [ 2 ], до 140MPa [ 5 ].

Напреженията, които възникват в шините, са резултат от електродинамичните сили  $F$ , които се определят по ударния ток  $i_y$ , от разстоянието между фазите, коригирани, от взаимното разположение на правоъгълните шини, техните размери, броя в пакета за една фаза и от съпротивителния момент  $W$ .

Шинните системи в КРУ трябва да се оразмеряват като статични. Собствената честота на колебанията  $f_{ш}$ , зависи от разстоянието между опорите ( $l \leq 1000mm$ ), от коефициента  $k$ , функция от материала на шините (мед или алуминий), съответно при една шина в пакета  $k = 3,62$  и  $5,02$  и при две шини в пакета  $k = 12,3$  и  $18,0$ , и размерите на шините, успоредни на действащата сила ( $b = 50 - 120mm$ ), се изчисляват по формулата:

$$f_{ш} = k \frac{x}{l} 10^5 \quad (8)$$

За посочените размери и вид на шините  $f_{ш}$  има стойности от  $10^3$  до  $10^4 Hz$ , което надвишава считаната като максимална граница  $200Hz$  [ 5 ] най-малко с 1 порядък. От това следва заключението, че при изчисления на шинната система в КРУ, тя трябва да бъде разглеждана като статична.

### 2.1. Механични напрежения в правите участъци на съединителните шини при една шина

Механични напрежения в правите участъци на съединителните шини при една шина се определят по формулата:

$$\sigma_{\phi} = \frac{FL}{10W} = \frac{fL^2}{10W}, MPa \quad (9)$$

където:  $F$  - електродинамична сила, възникваща между фазите, N;

$f$  - специфична сила, N/m;

$L$  - разстояние между опорите по надлъжната ос в шините, m;

$W$  - съпротивителен момент на шините относно оста перпендикулярно на действието на силата,  $m^3$

Електродинамичната сила между фазите  $F$  при правоъгълни шини, разположени в една равнина се определя:

$$F = 1,73 \cdot 10^{-7} \frac{L \cdot i_y^2}{a} k_{\phi}, N \quad (10)$$

а специфичната сила:

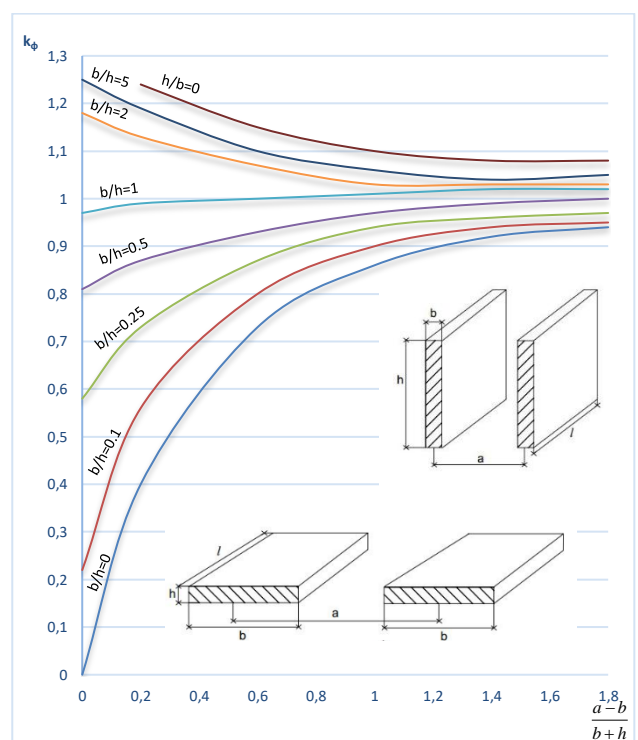
$$f = 1,73 \cdot 10^{-7} \frac{i_y^2}{a} k_{\phi}, Nm \quad (11)$$

където:  $i_y$  - ударен ток на трифазно к.с, A

$a$  - разстояние между осите между две съседни фази, m

$k_{\phi}$  - коефициент, коригиращ формите на контура (фиг.2),

зависещ от разстоянието между проводниците  $a$ , и размерите на шината  $b$  и  $h$  [ 3 ]



Фиг. 2.

Съпротивителният момент се определя по таблица 2, [5] в зависимост от броя на шините в една фаза.

Таблица 2.

Размери и разположение на шината	Монтаж и брой на шините във фазите			Съпротивителен момент, $W, m^3$
	R	S	T	
				$0,167hb^2$
				$1,44hb^2$
				$3,33hb^2$
				$0,167h^2b$
				$0,333h^2b$
				$0,500h^2b$

В случаите, когато се използват пакет от шини за една фаза, механичното напрежение се определя като сума от напреженията в шините между отделните фази  $\sigma_{\phi}$  (9) и в пакета  $\sigma_n$ , което зависи от тока през съставните две или три шини и разстоянието между тях.

$$\sigma = \sigma_{\phi} + \sigma_n < \sigma_{\text{дон}} \quad (12)$$

При две или три шини в пакета за фаза, напрежението  $\sigma_n$  се определя от:

$$\sigma_n = \sigma_{\text{дон}} - \sigma_{\phi} = \frac{M_n}{W_n} = \frac{f_n l_n^2}{12W_n} \quad (13)$$

където:  $M_n$  - огъващ момент на шините в пакета

$$M_n = \frac{f_n l_n}{12} \quad (14)$$

$W_n$  - съпротивителен момент за 1 шина и се определя от:

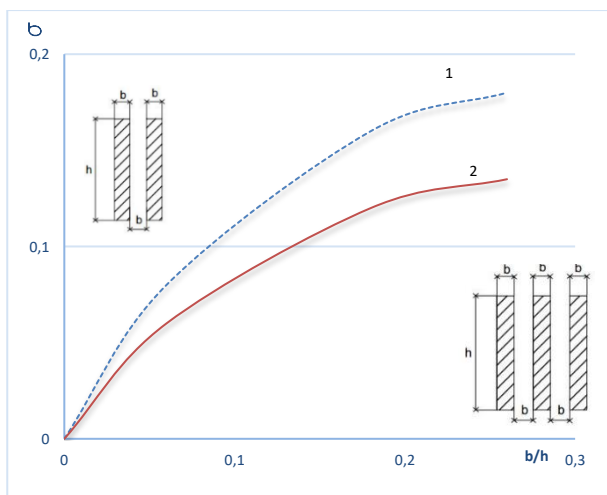
$$W_n = \frac{b^2 h}{6} \quad (15)$$

$l_n$  - разстояние на фиксация на шините (между подложките с дебелина  $b$  ;

$f_n$  - специфична сила при две и три шини в пакета се определя от израза:

$$f_n = \delta \frac{i y^2}{6} 10^{-7} \quad (16)$$

като  $\delta$  е коефициент, който се определя от фиг. 3: при две шини - от крива 1, а при три шини - от крива 2, в зависимост от съотношението на размерите  $b/h$ .



Фиг. 3.

Така може да се определи максималното разстояние на фиксация между шините, когато са две или три, по формулата

$$l_{n \text{ max}} = \sqrt{\frac{12\sigma W_n}{f_n}} \quad (17)$$

## 2.2. Механични напрежения в огънати шини

При ретрофита на КРУ в преобразуваната първична комутация, освен правите участъци, се използват огънати профили от избраната шина. Най-често се използват правоъгълни профили „L“, П-образни „П“ и с разнопосочна, двойно огъната форма „Г“. Силите, възникващи в правите участъци, създават моменти в огъвките, насочени към увеличаване на ъгъла (изправяне) между отделните участъци в шината.

В някои литературни източници по Електрически апарати [3,4] са разгледани и предложени формули за определяне на електродинамичните сили и моменти в различни профили на шините, но с кръгло сечение. В [3] те са адаптирани само към прави шини с правоъгълно сечение, а в други са разгледани профилни (огънати) шини, но с кръгло сечение с радиус  $r$  [4], за които са изведени коригиращи коефициенти: за определяне на електродинамичната сила: ( $k_g$ ) и за огъващите моменти ( $m_g$ ), с допускането, че през отделни участъци на шината протича един и същ ток (табл.3).

Електродинамичните сили при шини с кръгло сечение се определят с израз, зависещ от коефициента  $k_g$  (таблица 3):

$$F = i^2 \cdot 10^{-7} k_g \cdot N \quad (18)$$

Таблица 3.

Форма на огънатия токовод	Стойности на коефициентите, коригиращи:	
	Електродинамичната сила, $k_g$	Огъващият момент, $m_g$
	$k_g = l_n \frac{2b}{1 + \sqrt{1 + C^2}} + 0,25$ $b = \frac{a}{r}; c = \frac{a}{h}$	$m_g^o = 1,02(a-r)$ за $h > a$
	$k_g = 2 \left( \frac{2b}{1 + \sqrt{1 + C^2}} + 0,25 \right)$ $b = \frac{a}{r}; c = \frac{a}{h}$	$m_g^o = \left[ a \left( l_n \frac{a-r}{r} + 0,25 \right) + r \right]$
	$k_g = 0$	$m_g^o = a \left( 1,75 - 3 \frac{r}{a} + l_n \frac{r}{a-r} \right)$

Огъващият момент, спрямо точка О, зависещ от  $m_g$  (таблица 3), е:

$$M_o = i^2 \cdot 10^{-7} \cdot m_g^o, Nm \quad (19)$$

Напрежението, което възниква в сгъвките от огъващия момент  $M_o$  е:

$$\sigma = \frac{M}{W} = \frac{M_o}{0,167 \cdot h^2 \cdot b} < \sigma_{доп} \quad (20)$$

При шини с правоъгълно сечение, радиусът се определя приблизително от кръга с еквивалентно сечение на шината със страна  $b$  и височина  $h$  :

$$r = \frac{\sqrt{b \cdot h}}{\pi} \quad (21)$$

като грешката от това преобразуване намалява с относителното увеличаване на дебелината на шината  $b$  и намаляване на  $h$ , т.е. при квадратни шини.

Синтезираната методика успешно се прилага за изчисляване на шинната система при ретрофит на КРУ от електроинженеринговата фирма СМС-С ЕООД и решава съществен проблем на първичната комутация.

Таблица 4 илюстрира това приложение при изпълнение на ретрофит на КРУ 6кV в Аурубис България през 2015-2016г.

Таблица 4.

Тип на КРУ	п/ст	$I_n, A$	$I_{max}, A$	Токове на трифазно к.с., кА			Използвана медна шина			Изчислени параметри				
				$I''_{КС}$	$I_{\infty}$	$i_y$	Размери на напречно сечение	Прав участък, mm	Профил на съединенията*	$I_{доп}, A$	$S_{m, усм. min}$	Напрежение в шините, МРа		
												Права	Ъглова	
КВЭ	РП25	630	362	24,36	17,38	55,91	60/8	744	185		1254	103	63,41	106
КМ-1Ф-10	РП206	630	334	22,65	17,58	53,15	60/8	250	185		1254	123	6,48	83,9
ШВМЭ-6	ГПП2	1250	679	24,19	18,58	62,20	60/8	535	185		1254	131	9,97	98,6
ШВЭ-10	ГПП2	1250	498	41,28	31,32	107,54	60/8	210	185		1254	224	18,69	126
ШВМЭ-6	РП201	2500	598	26,41	18,58	67,4	100/8	552	240		1914	140	9,97	69,8
ШВМ-6	ГПП2 ( )	3150	1870	24,19	18,58	62,21	100/10-2бр.	530	255		3772	224	2,67	14,9
ВНХ	ГПП2 ( )	3150	1941	26,31	18,88	66,99	100/10-2бр.	530	255		3772	147	2,19	14,9

\* Изчислени са профилите с максимални размери

Прави впечатление, че единствено КРУ ШВМЭ-6 с  $I_n 2500A$  е с максимален товар 598А, т.е. 4 пъти по-малък от номиналния ток. Шинната система е с допустим ток  $I_{доп} = 1914A$ . Той е почти три пъти по-голям от максималния товар. Във всички останали КРУ, максималният консумиран ток е приблизително 2 пъти по-малък от номиналния, което гарантира достатъчен резерв около 100%.

## Заклучение

Систематизиран е метод за изчислителна проверка на шинната система, като съществена част от първичната комутация на КРУ, с което се решава важен проблем при ретрофита им.

## Литература

- Наредба № 3 за устройство на електрическите уредби и електропроводните линии. ДВ бр.90, 91/2004, доп и изм. ДВ бр.108/2007; ДВ бр.92 / 2013.
- Анев, Г. Електрически подстанции и релейни защиты. ВМГУ, С., 1986
- Пенчев, П. Електрически апарати. Техника, С., 1976
- Буль, Б.К., Г.В.Буткевич, А.Г.Годжеалло и др. Основы теории электрических аппаратов. Высшая школа, М., 1970
- Справочник по электротехника, под.ред. на проф.д.р Ст. Стоянов, АВС Техника, С., 1992

Статията е рецензирана от проф. д-н Менто Ментешев.