

РАЗПРЕДЕЛЕН КАПАЦИТЕТ НА КОНТАКТНИ МРЕЖИ ЗА ПРОМЕНЛИВ ТОК

Петър МАТОВ, Руско КАХЪРКОВ

matov@tu-sofia.bg

Петър Матов, доц. д-р, Технически университет, 1000 София, бул.Кл.Охридски №8
Руско Кахърков, инж., НК"ЖИ" Технологичен център, 1220 София, ул.Пробуда №2

БЪЛГАРИЯ

Резюме: Разпределеният капацитет на променливотоковите контактни мрежи 25 kV се оформя от изолираната система проводници на контактната мрежа, релсовия път и земята. Този капацитет оказва влияние на работата на комутационната апаратура, на големината на капацитивната електроенергия, а също така и на преходните процеси в тяговата мрежа. По-долу разпределените капацитети са определени по изчислителен и експериментален път и накрая, за практически приложения, е приета средна изчислителна стойност.

Ключови думи: Контактна мрежа, разпределен електрически капацитет, капацитивен ток, капацитивна мощност, капацитивна електроенергия.

УВОД

Електрическият капацитет на една променливотокова контактна мрежа определя големината на капацитивния ток, на капацитивната мощност и на капацитивната енергия. Големината на капацитивния ток е един от показателите, ограничаващ изключвателните възможности на секционните разединители, използвани в такива мрежи. Капацитивната енергия се заплаща по сравнително висока "наказателна" цена и затова електрическият капацитет се компенсира по подходящ начин. За предварителна оценка на работата на разединителите и на капацитивната мощност в конкретна контактна мрежа е необходимо да се знае големината на електрическия капацитет. Капацитивният ток и капацитивната енергия зависят от големината на разпределения капацитет, дължината и захранващото напрежение. В този материал се разглежда определянето на разпределения капацитет на контактни мрежи за променлив ток по изчислителен и експериментален път.

ИЗЧИСЛИТЕЛНА РАБОТА

Стойността на разпределения капацитет C_{LE} на верижна контактна мрежа може да се намери чрез формулите (1) и (2) [1]

$$C_{LE} = 2\pi\varepsilon / \ln(2h/r_{re}), \quad (1)$$

където

$$\varepsilon = \varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-9} F/km \quad - \quad \text{относителна}$$

диелектрична проникваемост на въздуха,

$h \approx 6,5 m$ - средна височина на контактната мрежа над земята,

r_{re} - еквивалентен радиус на контактната мрежа. Еквивалентният радиус на верижна контактна мрежа се намира от следната зависимост

$$r_{re} = r^\eta \cdot a_{ik}^{(1-\eta)}, \quad (2)$$

в която

$r = 0.006 m$ е радиус на проводника с по-голям ток (контактен Ri100),

η е относително участие на проводника в общия ток на мрежата и

$a_{ik} = 1 m$ - средно разстояние между носещото въже и контактния проводник.

Еквивалентният радиус зависи силно от разпределението η на тока между двата проводника и по-слабо от разстоянието a_{ik}

между тях даже и когато то е различно от 1m. Тук неизвестността в разпределението на тока налага изчисленията да се направят за няколко случая:

$$r_{re} = 0,006^{0,9} \cdot 1^{(1-0,9)} = 0,0100m$$

$$r_{re} = 0,006^{0,8} \cdot 1^{(1-0,8)} = 0,0167m$$

$$r_{re} = 0,006^{0,7} \cdot 1^{(1-0,7)} = 0,0278m$$

$$r_{re} = 0,006^{0,7} \cdot 0,6^{(1-0,7)} = 0,0238m$$

$$r_{re} = 0,006^{0,7} \cdot 1,5^{(1-0,7)} = 0,0314m$$

$$r_{re} = 0,006^{0,6} \cdot 1^{(1-0,6)} = 0,0464m$$

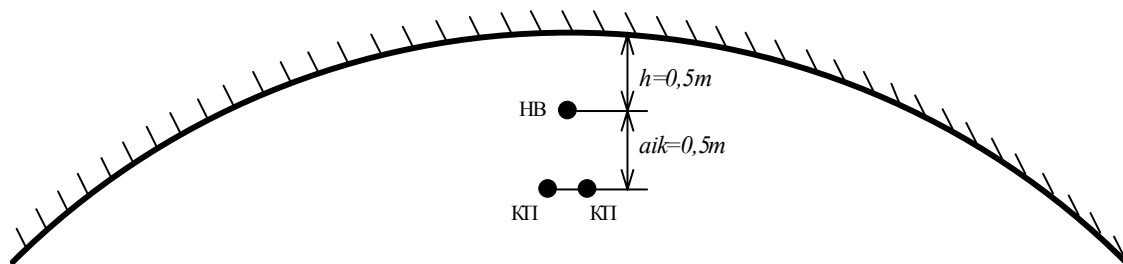
външен диаметър 9 mm протича по-големия ток, показва

$$r_{re} = 0,0045^{0,5} \cdot 0,5^{(1-0,5)} = 0,0474m \text{ и}$$

$$C_{LE} = 2\pi 8,85 \cdot 10^{-9} / \ln(2,0,5 / 0,0474) = 18,241 \text{ nF/km},$$

т.е., в сравнение с открития път, разпределеният капацитет става двойно по-голям.

Намерените по изчислителен път стойности ще се различават от действителните в една конкретна ситуация. Причини за разликите ще бъдат особеностите на контактната мрежа в участъка - строителни



Фиг. 1. Разположение на проводниците на контактната мрежа в тунел

$$r_{re} = 0,006^{0,5} \cdot 1^{(1-0,5)} = 0,0774m.$$

След заместване в (1), за разпределения капацитет се получава:

$$C_{LE} = 2\pi 8,85 \cdot 10^{-9} / \ln(2,6,5 / 0,0100) = 7,75 \text{ nF/km}$$

$$C_{LE} = 2\pi 8,85 \cdot 10^{-9} / \ln(2,6,5 / 0,0167) = 8,353 \text{ nF/km}$$

$$C_{LE} = 2\pi 8,85 \cdot 10^{-9} / \ln(2,6,5 / 0,0278) = 9,04 \text{ nF/km}$$

$$C_{LE} = 2\pi 8,85 \cdot 10^{-9} / \ln(2,6,5 / 0,0464) = 9,867 \text{ nF/km}$$

$$C_{LE} = 2\pi 8,85 \cdot 10^{-9} / \ln(2,6,5 / 0,0774) = 10,852 \text{ nF/km}.$$

Малкото разстояние h между контактната мрежа и земята (тавана - фиг.1) в тунел оказва силно влияние на разпределения капацитет. При дълги тунели това довежда до увеличение и на общия капацитет на мрежата. За показаната на фигурата ситуация, приложимостта на формулите (1) и (2) е под въпрос както заради наличието на два контактни проводника КП, така и заради неизвестността в разпределението на токовете. Проверката с една комбинация (разстояние $h-a_{ik}$ / разпределение η) и допускането, че в носещото въже НВ с

височини, коловозно развитие, изкуствени съоръжения, използвани конструкции и конструктивни елементи износване на КП и др.

ПРАКТИЧЕСКА ПРОВЕРКА

ИЗМЕРВАНЕ НА МАЛКИ ТОКОВЕ В ТПС "СТОЛНИК". Малките токове се дължат както на капацитивната проводимост на контактната мрежа, така и на товарите на маломощните трансформатори за резервно захранване в гарите и за мерене - в секционния пост. Появяват се в интервалите без тягов товар във фидерната зона. В светлите часове на летния ден влиянието на ненатоварените маломощни трансформатори в общия ток може да се пренебрегне.

Липсата на тягов товар се дължи на прозорци в графика за движение или при движението на влаковете по инерция. Появата на такава ситуация в ТПС "Столник" е изчаквана в продължение на около два часа. За измерването на малки токове на изводи 25 kV е използван 5 ½ разряден цифров мултиметр Fluke. Уредът се включва към вторичната токова верига на измервателния ток трансформатор 600/5A на резервния прекъсвач.

Резервният прекъсвач замества собствените прекъсвачи на изводите по време

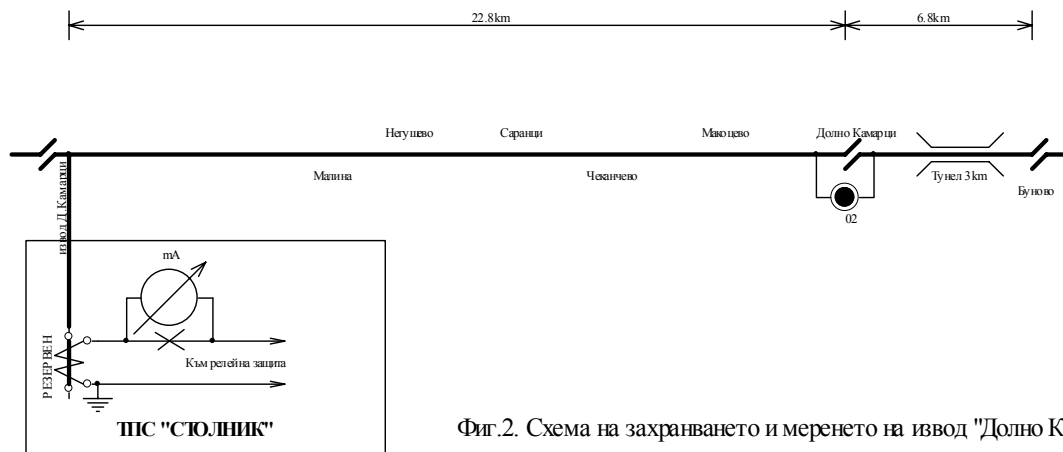
на измерванията. Отчитани са текущо разединител 02 в гара Долно Камарци. променящите се токове с по-особено Изменението на тока между двете ситуации

Таблица 1. Токове на извод "Д.Камарци" в ТПС "Столник" - 09.06.2007г.				
№	Час hh:mm	I2 mA	I1=(600/5)*I2 A	Забележка
1	14:06	34.23	4.11	През резервния прекъсвач. Няма влак от ТПС "Столник" до СП "Буново" - това е токът на празен ход.
2		34.09	4.09	
3		34.25	4.11	
4	14:09	34.47	4.14	
5	14:11	26.84	3.22	Диспечерът изключи секц. разединител 02 в Д.Камарци (изток).
6	14:12	34.37	4.12	Диспечерът включи секц. разединител 02 в Д.Камарци (изток).

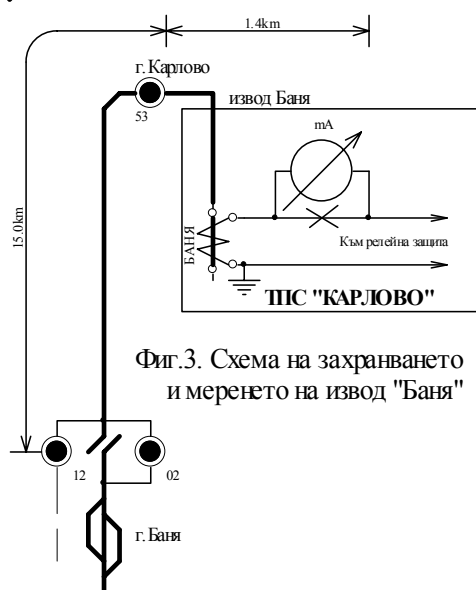
внимание към най-малките им стойности. Те са записани в таблица 1. Схемата на фидерната зона на извод "Долно Камарци", за чиято контактна мрежа е проведено първото измерване, е дадена в съкратен вид на фиг.2.

Интерес представлява поведението на тока при изключване и включване на секционен

(случаите с номера 5 и 6) е $4.12A - 3.22A = 0.9A$, а изключваната дължина на контактната мрежа - $6,8km$ (разстоянието от гара Долно Камарци до гара Буново, където се намира секционният пост е $6.8 km$). Ако се пренебрегне товара на трансформатор СН в гара Буново то този ток е предимно с



Фиг.2. Схема на захранването и меренето на извод "Долно Камарци"



Фиг.3. Схема на захранването и меренето на извод "Баня"

капацитивен характер. Големината му за единица дължина е

$$I_C = \frac{I}{l} = \frac{0,9A}{6,8km} = 0,132A/km.$$

При 27,2 kV (отчетено в този момент напрежение на празен ход на шините на ТПС "Столник") за капацитивната мощност се получава

$$Q_C = U \cdot I_C = 27200V \cdot 0,132A/km = 3,59kVAr/km$$

Съответният специфичен импеданс е

$$X_C = \frac{U}{I_C} = \frac{27,200kV}{0,132A/km} = 206,1k\Omega \cdot km,$$

а разпределеният капацитет -

$$C_{LE} = \frac{1}{\omega \cdot X_C} = \frac{1}{314 \cdot 206,1k\Omega \cdot km} = 15nF/km$$

ИЗМЕРВАНЕ НА МАЛКИ ТОКОВЕ В ЕДНОПЪТЕН УЧАСТЪК В РАЙОНА НА ТПС "КАРЛОВО". Схемата на фидерната зона на извод "Баня" на подстанцията със секционните разединители по нея е показана на фиг.3.

Данните от измерването са показани в

Таблица 2. Минимален ток на извод "Баня" в ТПС "Карлово" - 26.06.2007г.				
№	Час	I2 mA	I1=(800/5)*I2 A	Забележка
1	12:50	000,00	0,00	Ток на прекъсвача преди включването му.
2	12:55	34,69	5,55	Включен прекъсвач и рамо Карлово-Баня-Д. махала-Хисар=48,4km.
3	12:58	9,55	1,53	Секционният разединител в гара Баня е изключен и рамото е (15+1,4)km.

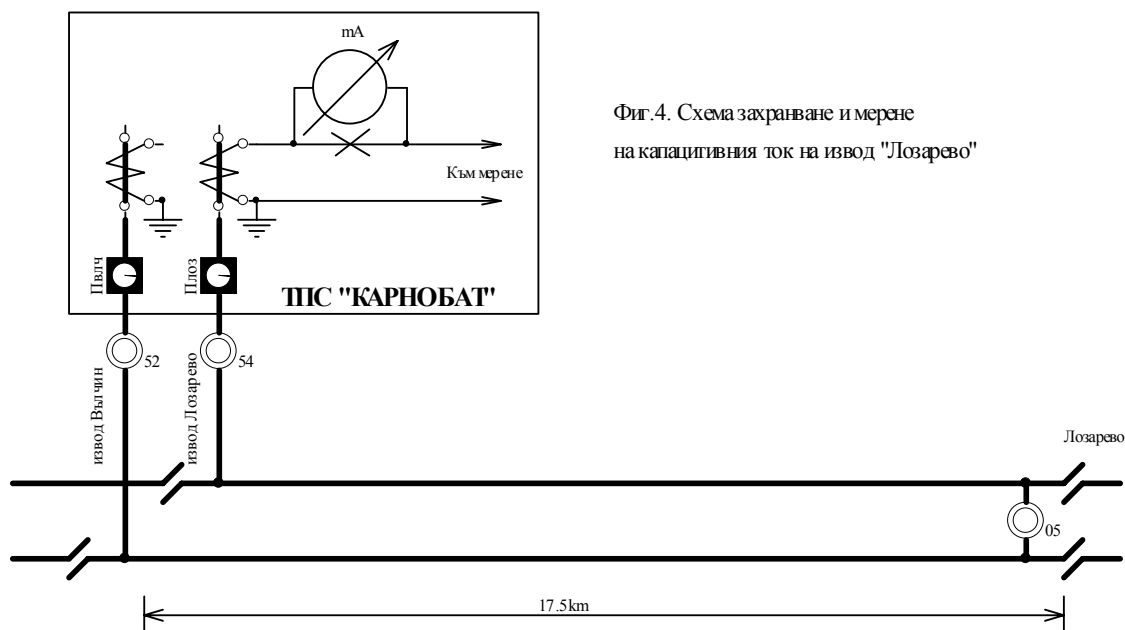
Таблица 2. Волтметърът за напрежението на шините на подстанцията, през същото време, показва $26 \div 26,3 \text{ kV}$. По изчислителен път се намират реактивната мощност Q_C , капацитивната проводимост B_C и разпределеният капацитет C_{LE} на контактната мрежа в еднопътния участък Карлово-Баня с обща дължина $(15,0+1,4)=16,4 \text{ km}$:

$$Q_C = U \cdot I_C = 26300 \text{ V} \cdot 1,53 \text{ A} = 40,239 \text{ kVAr}$$

$$B_C = \frac{I_C}{U} = \frac{1,53 \text{ A}}{26300 \text{ V}} = 58,2 \mu\text{S}$$

$$C_{LE} = \frac{B_C}{\omega l} = \frac{58,2 \cdot 10^{-6} \text{ S}}{314 \cdot (15+1,4) \text{ km}} = 11,30 \text{ nF / km}$$

ИЗМЕРВАНЕ НА МАЛКИ ТОКОВЕ В ДВУПЪТЕН УЧАСТЪК, ЗАХРАНВАН ОТ ТПС "КАРНОБАТ". Схемата на фидерната зона на извод "ЛОЗАРЕВО" на подстанцията със секционни разединители по нея се вижда на фиг.4.



Числените стойности за измерените минимални токове са поместени в таблица 3. Отчетите са направени за състояние близко до празен ход - тогава когато щатния цифров амперметър на страна 110 kV в подстанцията показва минимален ток - $1 \div 3 \text{ A}$. В този режим, по време на

отчитанията, напрежението на шини 25 kV на подстанцията се променя в диапазона $25,2 \div 25,3 \text{ kV}$.

Реактивната мощност Q_C , капацитивната проводимост B_C и разпределеният капацитет C_{LE} на контактната мрежа към извод "Лозарево" в двупътния участък Карнобат-Лозарево (с дължина $17,5 \text{ km}$) когато контактната мрежа на съседния път е захранена от същите шини (случай №2 в табл.3) са:

$$Q_C = U \cdot I_C = 25200 \text{ V} \cdot 1,43 \text{ A} = 36,04 \text{ kVAr}$$

$$B_C = \frac{I_C}{U} = \frac{1,43 \text{ A}}{25200 \text{ V}} = 56,7 \mu\text{S}$$

$$C_{LE} = \frac{B_C}{\omega l} = \frac{56,7 \cdot 10^{-6} \text{ S}}{314 \cdot 17,5 \text{ km}} = 10,3 \text{ nF / km}$$

За случай 5, при който контактната мрежа на съседния път е изключена (извод "Вълчин"), се получават:

Фиг.4. Схема захранване и мерене на капацитивния ток на извод "Лозарево"

$$Q_C = U \cdot I_C = 25200V \cdot 1,53A = 38,556kVar$$

$$B_C = \frac{I_C}{U} = \frac{1,53A}{25200V} = 60,71\mu S$$

$$C_{LE} = \frac{B_C}{\omega l} = \frac{60,71 \cdot 10^{-6} S}{314,17,5km} = 11,05nF / km$$

формата на напрежението и при изчисленията то се приема за синусоидално, без влияние върху точността на резултатите.

НА ГРЕШКИТЕ НА УРЕДИТЕ. Във веригата за мерене участват лабораторен милиамперметър и щатния ток

Таблица 3. Минимални токове на извод "Лозарево" в ТПС "Карнобат" - 10.07.2007г.						
№	Час	Включени съоръжения	Изключени съоръжения	I2	I1=(600/5)*I2	Забележка
№	hh:mm	-	-	mA	A	-
1	13:40	Пвлч, ЛРлоз, ЛРвлч, 52, 54	Плоз, 05	000,00	0.00	Ток на прекъсвач Плоз на извод "ЛОЗАРЕВО" преди включването му.
2	13:47	Плоз, Пвлч, ЛРлоз, ЛРвлч, 52, 54	, 05	11.88	1.43	Ток на прекъсвач Плоз на извод "ЛОЗАРЕВО" след включването му. Двете контактни мрежи са захранени самостоятелно.
3	14:05	Плоз, Пвлч, ЛРлоз, ЛРвлч, 52, 54, 05	-	10.85	1.30	Ток на прекъсвач Плоз на извод "ЛОЗАРЕВО" след включването на напречен секционен разединител 05 в гара Лозарево. Двете контактни мрежи са захранени през СР 05 в гара Лозарево и са в паралел.
4	14:12	Плоз, Пвлч, ЛРлоз, ЛРвлч, 54, 05	, 52	21.30	2.56	Ток на прекъсвач Плоз на извод "ЛОЗАРЕВО" след изключването на секционен разединител 52 в ТПС Карнобат. Контактната мрежа на извод Вълчин се захранва само през СР 05 в гара Лозарево.
5	14:47	Плоз, ЛРлоз, ЛРвлч, 54	Пвлч, 05, 52	12.75	1.53	Ток на прекъсвач Плоз на извод "ЛОЗАРЕВО" след изключването и на прекъсвач Пвлч в ТПС Карнобат. Контактната мрежа на извод Вълчин е обезточена.

АНАЛИЗ

НА ГРЕШКИТЕ ПРИ МЕРЕНЕТО. Стойностите за токовете в таблици 1, 2 и 3 са получени при нееднакви начални условия. Нееднакви са дължините на междугарията с разединителите, проводниците на контактните мрежи, височините на контактните мрежи по отношение на земя/релси) както и напреженията на шините на подстанциите. Допълнително влияе и формата на напрежението, тъй като една и съща негова ефективна стойност може да бъде измерена при различно участие на висши хармоници. Те се генерират от несинусоидалните токове на товарите в подстанционната зона и участват в капацитивния ток на извода на който се провежда меренето в зависимост от отдалечеността си от него. Поради неизвестността на местата на конкретните подвижни товари към момента на отчитане на показанията на уредите тук е прието да се взимат под внимание единствено минималните стойности на токовете. Това условие гарантира липса на смущения по

трансформатор на извода в съответната подстанция.

Точността на използвания измервателен уред FLUKE 8840A при измерване на ток с честота 50 Hz е по-добра от 1% (типична 0.5%).

На фиг.5 е показана графична зависимост на коефициента на трансформация на маслен токов трансформатор 600/5A в лабораторни условия. Обикновено за номиналния ток производителите на измервателни трансформатори гарантират точност 0.5% за намотка "мерене" и 1% за намотки "защита". От графиката се вижда, че при много малък първичен ток, грешката във вторичния ток на намотка мерене е с отрицателен знак и нараства значително (до 10÷50%). Тази зависимост не е използвана за корекция в таблиците по-горе тъй като трансформаторите на реалните фидери в трите подстанции са от друго производство и преводно отношение. Очаква се тяхното поведение да е подобно и с близки до показаните количествени стойности на грешката. Измерените тук стойности на токовете би трябвало да се увеличат с около 5%.

НА СРАВНИМОСТТА НА РЕЗУЛТАТИТЕ. Меренето на тока на контактната мрежа на различни места и по различно време е съпроводено с променящи се изходни условия. Това се отнася най-вече за захранващото напрежение на входа на тяговите подстанции, зависещо от енергийната система и тяговия товар, които влияят върху големината и формата на напрежението, а оттам и на ефективната стойност на изключвания капацитивен ток. По тази причина е целесъобразно да се изчаква и отчита минималната ненулева стойност на тока на празен ход, за когото се предполага, че ще бъде предизвикан от напрежение със синусоидална форма.

НА РЕЗУЛТАТИТЕ. Специфичните капацитети, намерени по-горе за различните участъци, са представени в Таблица 4.

За еднопътен участък (1), за двупътен участък (2)	Специфичен капацитет C_{LE} nF/km
-	
Долно Камарци-Буново (1)	15.00
Карлово-Баня (1)	11.30
Карнобат-Лозарево (1)	11.05
Карнобат-Лозарево (2)	10.30
От изчисления (1)	7.750÷10.852

- Най-голямата стойност е намерена в случая с контактната мрежа Долно Камарци-Буново. Малкото разстояние между

контактната мрежа и свода на трикилометровия тунел в този участък е едно от обясненията за значителното повишение. Тук тунелът участва и с голямата си дължина (3170 м) по отношение на изключваната част (6.8 км).

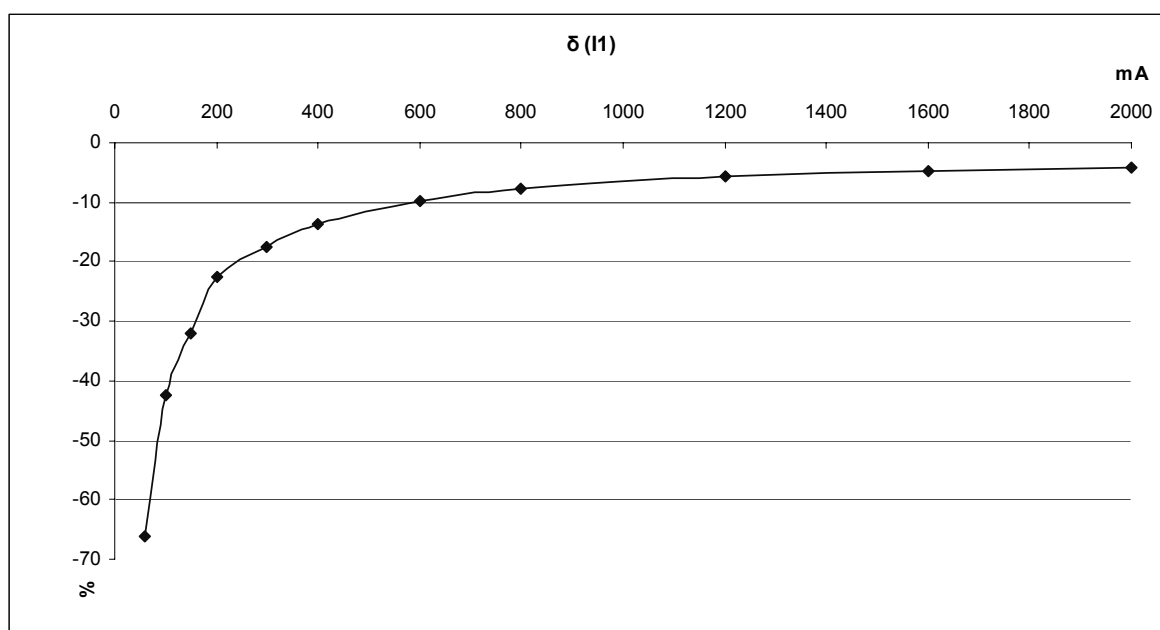
- Разликата между специфичните капацитети на един и същи извод Карнобат-Лозарево при самостоятелно захранване (1) и захранване на контактната мрежа и на съседния път (2) се появява поради екраниращото действие на намиращата се под напрежение, и в близост, втора контактна мрежа Карнобат-Вълчин.

- По-високите стойности на специфичния капацитет на мрежата Карнобат-Лозарево в сравнение с изчислителните се дължат на неточности в разстоянията, а също така и на неотчетения капацитет на изолатори (40-50бр.на километър) и конзоли.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В резултат на опитните измервания в трите подстанционни зони за специфичния капацитет на верижни контактни мрежи в еднопътни и двупътни участъци може да се приеме стойността 11 nF/km . За капацитивната мощност на верижна контактна мрежа се получава

$$Q_C = U^2 \cdot \omega C_{LE} = (25000V)^2 \cdot 314 \cdot 11\text{ nF} / \text{km} = 2,16\text{ kVar/km}.$$



фиг.5

Резултатите от изчисленията по формули (1) и (2) са близки до измерените.

ЛИТЕРАТУРА

[1]. Kiessling, Puschmann, Schmieder, Contact lines for electric railways, Publicis, Munich, 2001.

DISTRIBUTED CAPACITANCE OF AC OVERHEAD SYSTEM

Petar Natov, Rusko Kaharkov

*Assoc. Prof. Petar Natov, PhD, Technical University of Sofia, 8 Kl. Ohridski Boulevard
Rusko Kaharkov, MSc, Technological Centerq National Railway Infrastructure Company, Sofia
BULGARIA*

Abstract: *The distributed capacitance of the AC overhead systems of 25 kV is formed by the isolated system of wires, track and ground. This capacitance influences on commutation equipment, the size of the capacitance electric power as well as on the transient processes in the traction network. The capacitances distributed below are determined by computation and experimental way and the average value is assumed to be applied to practice.*

Key words: *overhead system, distributed capacitance, capacitance current, capacitance power, capacitance electric power.*