

## ОПРЕДЕЛЯНЕ РАЗПРЕДЕЛЕНИЕТО НА ПОТЕНЦИАЛА ВЪРХУ ИЗОЛАТОРНИ ВЕРИГИ

**Евтим Кърцелин**

*Минно-геоложки университет "Св. Иван Рилски", 1700 София, E-mail: el\_emp@mgu.bg*

**РЕЗЮМЕ.** За определяне разпределението на потенциала върху изолаторните вериги е получен аналитичен израз с използване математическия апарат на уравненията в крайни разлики, с което се показват приложимостта и предимствата на този метод в сравнение с използваните класически методи за решаване на същата задача.

**Ключови думи:** изолаторни вериги, електропроводи, разпределение на потенциал, уравнения в крайни разлики.

### DETERMINING THE DISTRIBUTION OF POTENTIAL OVER INSULATING CIRCUITS

**Evtim Kartcelin**

*University of Mining and Geology "St. Ivan Rilski", 1700 Sofia, e-mail: el\_emp@mgu.bg*

**ABSTRACT.** An analytical expression for determining power factor of tiristor electric drive of mine winder has been obtained considering the specific working regim. That gives the opportunity of making precise estimation of energetical parameters of electric drive and precise calculation of the parameters of compensating devices.

**Key words:** power factor, tiristor electric drive, mine winder, velocity and load diagrams, energetic characteristics, compensating devices.

### Въведение

В последните години възникнаха крупни аварии в енергийните системи на едни от най-технологично развитите държави в света – САЩ, Канада, Русия и др. [1, 5]. Материалните загуби от прекъсване на електроснабдяване само в САЩ се изчисляват на 50 милиарда долара. Възникването на такива крупни аварии в електроенергийните системи (ЕЕС) на тези държави е съпроводено не само с нарушаване жизнения комфорт и безопасност на милиони хора, но и застрашават националната сигурност и безопасност на страната като цяло.

Ето защо развилите се крупни аварии в ЕЕС на тези държави станаха причина за организиране и превеждане на задълбочен анализ на причините, поради които възникнаха аварийните ситуации, причините и проблемите, които не позволиха ограничаване развитието на анарииния процес и адекватно управление на ЕЕС.

За изпълнението на тези мащабни задачи правителствата на тези държави формираха съответни научно-изследователски колективи и осигуриха необходимите финансови средства за изпълнение на тези високоотговорни задачи.

Департаментът по енергетика в САЩ е в процес на съставяне на "пътна карта" и е завършен доклад "Мрежа

2030 – национална визия за електроенергетиката през следващите 100 години".

### Методи за анализ на катастрофални аварии в ЕЕС и основни изводи [1]

За възникване и развитие на крупни аварии в ЕЕС е проведен анализ в съответните държави [1, 5]. В Русия работата включва последователното решаване на две основни задачи [1]:

1. Разработване и верификация на цифров модел на ЕЕС и на свързаните с нея други ЕЕС.
2. Изследване на различни режими на работа на ЕЕС с моделирането на различни сценарии на управление на ЕЕС.

Разработеният цифров модел включва 1535 присъединителни възела, 2335 отклонения, 84 генератора и 10 броя еквивалентни схеми на ЕЕС, свързани и паралелно работещи с изследваната ЕЕС.

Цифровият модел на ЕЕС за изчисляване на динамическата устойчивост и анализ на електромеханичните преходни процеси е разработен в средата на програмно-изчислителния комплекс "EUROSTAG" [2, 3].

Авторите на анализа представят следните основни изводи за причините, породили възникването на крупна авария в ЕЕС на страната:

1. Като цяло, действията на диспечерския състав са били адекватни на създадената аварийна ситуация.

2. От анализа за действията на диспечера в хода на развитието на аварийната ситуация по безпорен начин се доказва, че скоростта за развитие на аварията значително превишава възможностите на диспечерския състав, обслужващ ЕЕС да обработва информацията, която получава (преди всичко по телефон) и въз основа на нея да изпълнява точни оперативни превключвания за управление на ЕЕС.

3. Липсата на достоверни данни както по състава и характеристиката на товара, така и по сумарното ниво на включените към ЕЕС потребители, не позволява да се изпълни адекватно възстановяване на условията, при които възниква аварийната ситуация и нейното развитие в катастрофа.

Коректното моделиране на процесите в ЕЕС, които се определят преди всичко от поведението на товара в електрическите мрежи с напрежение 110 kV и по-ниско, е възможно само при наличието на посочените изходни данни.

4. Отсъствие на необходимата по обем и актуализирана по време информация за състоянието на енергийната система в момента на възникване на аварийната ситуация, което се явява необходимо условие за ефективно и адекватно управление на ЕЕС.

5. Отсъствието на възможност за изключване от Главния диспечер на ЕЕС на електропотребители в района на възникване на аварията, не осигурява условия за ефективно противоаварийно управление на ЕЕС. Тези обстоятелства "принуждава" Главният диспечер да предприеме палиативни решения, насочени към ликвидиране (прекратяване) развитието на аварийния процес.

6. Една от основните причини, която прави невъзможно да се идентифицира аварийната ситуация и да се използват управляващи въздействия за нейното ограничаване и изключване, се явява лошата **наблюдаемост** и лошата управляемост на енергийната система.

Необходимите и достатъчни условия за устойчивост, наблюдаемост и управляемост на една система за пръв път са представени в [6, 7, 9].

Едно от направленията за развитие на ЕЕС с цел осигуряването на зададено ниво на надеждност и качество на управление е свързано с разработване и развитие на математически модели и методи за решаване на задачите за управление режимите на работа и развитие на енергосистемите [2].

Показателят **бързодействие** се явява един от основните показатели на системи за управление на ЕЕС в реално време, който оказва основно влияние за запазване на устойчивостта и работното състояние на ЕЕС, включително и при възникването на аварийни ситуации от всякакъв характер.

Изискването за бързодействие към системите за управление на ЕЕС в реално време поставя задача за разработването на математически модели и на методи за изчисляване на необходими параметри на ЕЕС, които се

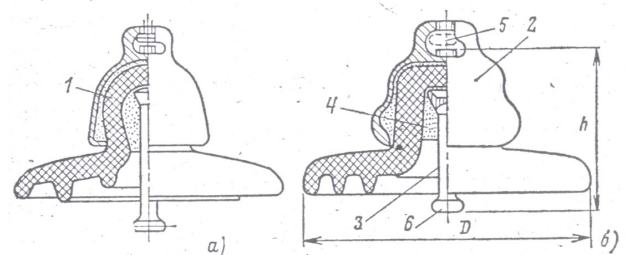
реализират с минимален обем изчислителни процедури при зададено ниво на точност на получавания резултат.

Електрическите системи с много елементи, към които се отнася и една ЕЕС, притежават голям брой степени на свобода. Използването на общите методи за тяхното аналитично описание и изследване води до сравнително дълги и сложни изчисления. Използването на някои специални математически методи води до значително съкращаване на изчислителния процес и опростяване на решенията, което е съществено предимство при управлението на сложни системи, в реално време, към които се отнасят и ЕЕС.

В доклада е показана възможността за определяне разпределението на потенциала върху една изолаторна верига чрез използване математическия апарат на уравненията в крайни разлики, с което се показват приложимостта и предимствата на този метод в сравнение с използваните класически методи за решаване на същата задача.

### Математически модел за определяне разпределението на потенциала върху изолаторна верига за електропровод

На фиг. 1 е представена конструкцията на изолатор, който се явява основен елемент за изграждане на изолаторни вериги при строителството на въздушни електропроводи. На фиг. 1 са приети следните означения: **1** – изолатор с чиниеобразна форма; **2** – метална шапка от ковък чугун; **3** – стомавено стебло; **4** – висококачествен цимент; **5** – ухо в металната шапка; **6** – шапка на стебло.



Фиг. 1. Конструктивна схема на изолаторен елемент за въздушни електропроводи

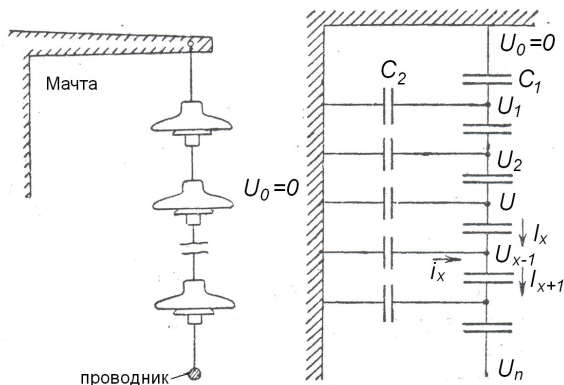
За извеждане на аналитичен израз (модел), който позволява да се определи разпределението на потенциала между елементите на една изолаторна верига, ще се разгледа заместващата електрическа схема на изолаторна верига, показана на фиг. 2.

Първият изолатор (елемент) на изолаторната верига е свързан към металната конзола на носещия стълб и следователно се явява заземен. Към последния изолаторен елемент е окачен проводника на електропровода, по който протича електрически ток с промишлена честота  $\omega$ .

Разглежда се една от металните връзки, която свързва два елемента на изолаторната верига, разположени един до друг.

Скоростта на изменение заряда на тези метални връзки зависи от нейния капацитет спрямо всички други метални

връзки и земя. За опростяване извеждането на практически приложим аналитичен израз, ще се отчитат само два от всички възможни капацитети на една метална връзка: капацитета на металната връзка спрямо съседни метални връзки  $C_1$  и капацитет на металната връзка спрямо земя  $C_2$ .



Фиг. 2. Заместваща електрическа схема на изолаторна верига

Приема се, че металните връзки на всички изолаторни елементи са еднакви, от което следва, че капацитетът между всички метални връзки е еднакъв и има стойност  $C_1$ .

Ако се обозначи потенциала на  $x$ -та метална връзка с  $U_x$ , то токът, който ще протече между  $(x-1)$ -та и  $x$ -та метална връзка ще се определя със следния израз

$$I_x = i\omega C_1(U_{x-1} - U_x) \quad (1)$$

Токът между  $x$ -та и  $(x-1)$ -та метална връзка ще се определи с израза

$$I_{x+1} = i\omega C_1(U_x - U_{x+1}) \quad (2)$$

Токът между  $x$ -тата метална връзка и земя ще се определя с израза

$$i_x = -i\omega C_2 U_x \quad (3)$$

Системата от капацитети, която съответства на разглежданата изолаторна верига е показана на фиг. 2, от която се записва следния израз:

$$I_{x+1} = I_x + i_x \quad (4)$$

След заместване на (1), (2) и (3) в (4) и след преобразуване се получава следния израз

$$C_1(U_{x+1} - U_x) - C_1(U_x - U_{x-1}) - C_2 U_x = 0 \quad (5)$$

или

$$U_{x-1} - \left(2 + \frac{C_2}{C_1}\right) U_x + U_{x+1} = 0 \quad (6)$$

Уравнение (6) представлява по същество уравнение в крайни разлики от втори ред. Замествайки в (6) израза

$U_x = e^{\lambda x}$  се получава следния израз:

$$e^{\lambda(x-1)} - \left(2 + \frac{C_2}{C_1}\right) e^{\lambda x} + e^{\lambda(x+1)} = 0 \quad (7)$$

разделяйки (7) на  $e^{\lambda x}$  се получава

$$e^{-\lambda} - \left(2 + \frac{C_2}{C_1}\right) + e^{\lambda} = 0 \quad (8)$$

Като се използва израза за хиперболичния косинус, а именно

$$ch\lambda = \frac{e^{\lambda} + e^{-\lambda}}{2},$$

формула (8) се записва в следния вид:

$$ch\lambda = 1 + \frac{C_2}{2C_1} \quad (9)$$

Уравнение (9) има два корена:  $\pm \lambda$ , а общото решение на (9) се представя в следния вид:

$$U_x = A_1 e^{\lambda x} + A_2 e^{-\lambda x}$$

или

$$U_x = B_1 ch\lambda x + B_2 sh\lambda x \quad (10)$$

Гранични условия за разглежданата задача:  $U_0 = 0$  и  $U_n = U$ , където  $U$  - потенциал на металната връзка.

За коефициентите  $B_1$  и  $B_2$  се получават следните стойности:

$$B_1 = 0 \text{ и } B_2 \cdot sh\lambda n = U.$$

За определяне разпределението на потенциала по дължината на изолаторната верига се получава следната формула

$$U_x = U \frac{sh\lambda x}{sh\lambda n} \quad (11)$$

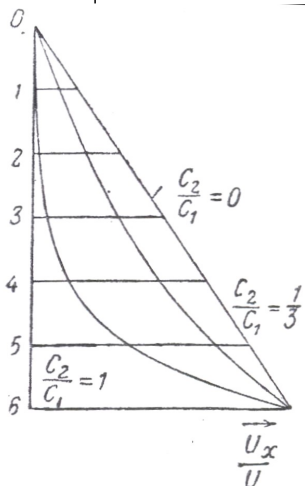
където  $\lambda$  се определя по израза (9).

Ако капацитетът  $C_2$  спрямо земя е възможно да се пренебрегне в сравнение с капацитета  $C_1$  между две

съседни метални връзки, то  $\lambda \rightarrow 0$  и за  $U_x$  се получава израза

$$U_x = U \frac{x}{n} \quad (12)$$

Графическото представяне на (12) е показано на фиг. 3. В този случай пълния спад на потенциала е разпределен равномерно между изолаторите така, че върху всеки изолаторен елемент този спад е равен на  $\frac{U}{n}$ . Ако все пак отношението  $C_1/C_2$  не е малко и  $\lambda n$  е достатъчно голямо, то спада на потенциала върху всеки изолаторен елемент ще намалява толкова по-бързо, колкото повече се отдалечават от проводника. На фиг. 3 е представено отношението  $U_x/U$  за стойностите  $C_2/C_1 = 0; 1/3$  и 1. От фиг. 3 следва, че изолаторите, които се намират по-близо до проводниците на електропровода са натоварени много повече в сравнение с изолаторите, които се намират по-близо до конзолата (мястото на окачване). От получения резултат следва, че след определена граница, увеличаването броя на изолаторните елементи не оказва съществено влияние.



Фиг. 3. Разпределение на потенциала между елементите на изолаторна верига

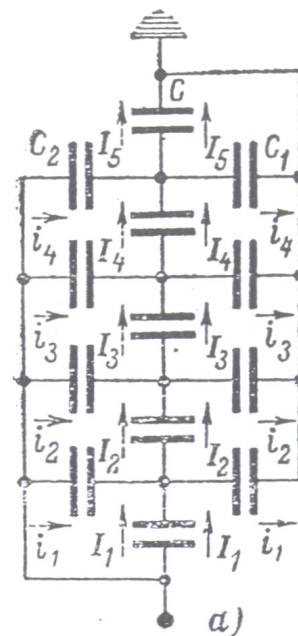
За изясняване на причината за неравномерното разпределение на напрежението по дължината на изолаторната верига се разглежда неговата заместваща електрическа схема, показана на фиг. 4, на която са приети следните означения:  $C$  – собствен капацитет на изолатора;  $C_1$  – капацитет на изолатора спрямо земя (заземнените елементи от конструкцията на стълба);  $C_2$  – капацитет на изолатора спрямо проводника на електропровода.

За изолаторните вериги на електропроводи тези капацитети имат следните стойности:  $C = 50 \div 70 \text{ nF}$ ,  $C_1 = 4 \div 5 \text{ nF}$ ,  $C_2 = 0,5 \div 1 \text{ nF}$  [8,10].

Общият капацитет на изолаторна верига  $C_{u.в}$  с  $n$  елемента се определя с израза

$$C_{u.в} = \frac{C}{n}$$

Ако стойността на  $C_{u.в}$  съществено превишава стойността на капацитетите  $C_1$  и  $C_2$ , то разпределението на напрежението по дължината на изолаторната верига ще бъде практически равномерно.

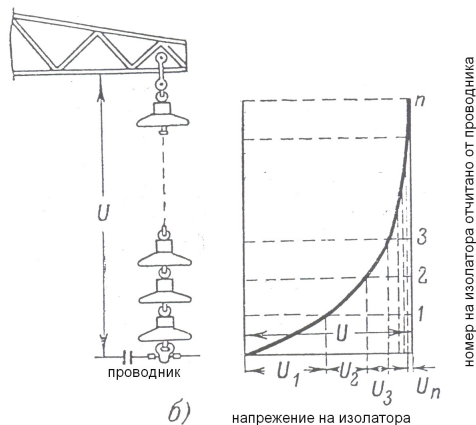


Фиг. 4. Заместваща капацитивна схема на изолаторна верига

Тъй като стойностите на  $C_{u.в}$  и  $C_1$  са от един порядък, а при дълги изолаторни вериги и с  $C_2$ , то разпределението на напрежението по дължината на изолаторната верига е неравномерно. Ако  $C_2 = 0$ , а  $C_1 \neq 0$ , то най-голям пад на напрежение ще бъде върху първия изолаторен елемент до проводника, а с отдалечаване от проводника напрежението върху елементите на изолаторната верига ще намалява. В резултат на отклонение на токовете през капацитета  $C_1$ , то най-голяма стойност на тока през собствения капацитет ще има изолаторен елемент до проводника. По тази причина при  $C_1 = 0$  и  $C_2 \neq 0$  се получава най-голям пад на напрежението.

В реални условия  $C_1 > C_2$ , поради което падът на напрежението е максимален на първия от проводника изолаторен елемент и се намалява с отдалечаването от проводника.

На фиг. 5 е представено разпределение на потенциала между елементите на изолаторна верига.



Фиг. 5. Разпределение на потенциала между елементите на изолаторна верига

### Контрол изолационното състояние на въздушен електропровод

Методът за контрол на изолаторните вериги, основан на измерване разпределението на напрежението по дължината на изолаторната верига се явява достатъчно ефективен и не изисква изключване на електрически уредба. Същността на метода се състои в следното: Сравняване измереното напрежение на всеки елемент от изолаторната верига с нормалния пад на напрежение, измерен при отсъствие на дефекти в изолатора.

Резултатите от измервания при експлоатационни условия показват, че падът на напрежение на дефектен изолаторен елемент е от порядъка на 50% по-малък в сравнение при нормален режим (изправен изолаторен елемент).

Своевременното откриване на дефектни изолаторни елементи значително съкращава броя на аварийните изключвания на един електропровод.

Препоръчана за публикуване от  
Катедра "Електрификация на минното производство", МЕМФ

## Изводи

В съвременните ЕЕС има редица нерешени въпроси и проблеми, които се явяват причина за възникване и развитие на крупни аварии със значителни материални загуби, застрашаващи живота на много хора, включително националната сигурност и безопасност на страната.

Получен е аналитичен израз за определяне разпределението на потенциала върху една изолаторна верига, който може да се използва за "наблюдаване" изолационното състояние на въздушните електропроводи и формиране на управляващ сигнал при недопустимо понижаване на изолационното съпротивление.

## Литература

1. Герасимов В.С. и др., 2008. Исследование режимов Московской энергосистемы в процессе развития аварии в мае 2005 г., *Электричество*, 1.
2. Баринов В.А. и др., 2005. Развитие математических моделей и методов для решения задач управления режимами работы и развития Энергосистем. *Электричество*, 7.
3. Meyer B., Stubbe M., 1992. EUROSTAG – A Single Tool for Power System Simulation. *Transmission & Distribution International*, Marsh.
4. Stubbe M., Bihain A., Deuse J., Baader J, February 1989. STAG – A New Unified Soft-ware Program for the Study of the Dinamic Behaviour of Electrical Power Systems. – *IEEE transaction on Power Systems*, vol 4, №1.
5. Игнатовски Д, 2003. Системна авария на 14 август 2003 г. в САЩ и Канада, *Енергетика*, № 6-7.
6. Воронов А.А., 1979. *Устойчивость, управляемость, наблюдаемость*, М., Наука.
7. Гамм А.З. и др., 1975. Наблюдаемость электроэнергетических систем. *Электричество*, № 1.
8. Базуткин В.В. и др., 1986. *Техника высоких напряжений: изоляция и перенапряжения в электрических системах*. М., Энергоатомиздат.
9. Бородакий Ю.В. и др., 2004. Основы теории систем управления. М., *Радио и связь*.
10. Юриков П.А., 1972. *Как работает электрическая изоляция*. М., Энергия.
11. Георгиев М.Б., 1989. *Техника на високите напрежения*. С., ВМЕИ.