

# ПРИЛАГАНЕ НА МОДЕЛИ НА НАДЕЖДНОСТ И НЕВРОННИ МРЕЖИ ПРИ АНАЛИЗ НА НОРМАЛНИ И АВАРИЙНИ РЕЖИМИ В ЕЛЕКТРОЕНЕРГИЕН ОБЕКТ

Десислав Тодоров

*Резюме:* В работата е извършено разработване на модел на надеждност на електроенергиен обект с дърво на отказите. Извършено е абстрактно дефиниране на задачата за определяне на повреден участък, чрез теорията на множествата. Предложен е метод за използване на минималните пътища и минималните сечения при обучение на линейна невронна мрежа с обратно разпространение на грешката.

*Ключови думи:* дърво на отказите, невронна мрежа, теория на множествата

## Implementation of reliability analysis models and neural networks in fault section estimation

Desislav Todorov

*Abstract:* In the work reliability modeling with fault trees is implemented in fault section estimation. Finding faulted sections and faulted elements are defined as mathematical abstractions from set theory point of view. Minimal paths and minimal cuts are used as patterns in learning process of neural network with back propagation of error.

*Keywords:* fault section estimation, neural network, reliability, fault trees, minimal paths, minimal cuts, set theory

Един от методите за осигуряването на надеждност на електрозахранването е чрез бързо възстановяване на електрическите връзки към потребителите в следавариен режим на работа на електроенергийните обекти. Като първа стъпка от този процес е необходимо бързо и точно определяне на повреденият участък и съответният повреден елемент. Понякога, при късо или земно съединение в елемент от електроенергийната система и отказ на съответни прекъсвачи и/или релейни защиты, аварията прераства в комплексна. Прилагането на експертни системи значително би улеснило анализа на подобни събития и бързия избор на съответни оперативни инструкции за реакция в следавариен режим.

Първата експертна система, разработена с езика Пролог, е представена от Фукуи [1] през 1986 г. През 1989 г. Чан [2] за първи път предлага използване на невронни мрежи при анализа на данни от системата за сигнализация на електроенергиен обект. Решение на задачата, за откриване на повреден участък с използване на данни от релейни защиты и прекъсвачи, е представено за първи път от Йанг [3] през 1994 г.. Януари 1995 г. Йанг [4] използва дърво на решенията като първа стъпка при изграждане на невронна мрежа, базирана на логически функции. В [5] и [6] Кезунович и Жанг предлагат използване на дърво на събитията при анализа на работата на дистанционни защиты в двустранно захранена електроенергийна система, изградена от двойки паралелни електропроводи.

Във всички представени дотук публикации разработването на еталони, с които се извършва обучение на невронните мрежи, се извършва ръчно, на база експертна оценка. В настоящата публикация ще се представи и аргументира използването на дървета на отказите, за автоматизирано генериране на еталони за обучение на невронна мрежа. Статията е разделена на три основни части. В първата се разглежда и доказва приложението на минималните пътища и минималните сечения за формиране на тестови еталони в експертна система. Във втората част е представен модел на надеждност на електроенергиен обект и са извършени анализи на резултатите, генерирани от програмата "Saphire". В третата част е представен математически модел на невронна мрежа и резултати от извършени изследвания.

Надеждността на много системи може да се изчисли чрез логически схеми за надеждност. Една система може да се опише с логически схеми и нейната надеждност да се моделира с мрежови метод, ако е монотонна и изпълнява следните условия [7], [8]:

- Всеки елемент може да се намира в едно от две възможни състояния – работа или авария;
- Моделираната система може да се намира в едно от две възможни състояния – работа или авария;
- Ако всички елементи работят, то и системата работи;
- Авария на елемент в аварирала система не може да възстанови нейната работоспособност и ремонтиран елемент в работеща система не може да предизвика авария.

В [7] и [8] се дефинира понятието път  $V$  като множество от елементи, които осигуряват връзка между вход и изход на една система, като под минимален път  $T$  се разбира това множество от елементи, в което изваждането на който и да е елемент води до прекъсване на връзката между вход и изход на изследваната система. Сечение  $K$  [7], [8] се нарича всяко множество от елементи, аварията на които води до авария на цялата система и нарушаване на връзката между вход и изход, а минимално сечение  $C$  е това, при което изваждането на който и да е елемент води до авария в цялата система.

При моделиране на сложни обекти броят на пътищата и сеченията е значителен, като само част от тях са минимални. Нека  $A = \{x_1, \dots, x_n\}$  е

множество от  $n$  на брой елемента и секции, изграждащи моделираната система. Нека  $B = \{V_1, \dots, V_m\}$  е множество от  $m$  пътя  $V$ , като всеки път е изграден от елементи на множеството  $A$ :

$$V_m = \{x_i : 1 \leq i \leq n, x \in A\} \quad (1)$$

Нека  $D = \{T_1, \dots, T_l\}$  е множество от минималните пътища  $T$ , където:

$$T_l = \{x_j : 1 \leq j \leq n, x \in A\} \quad (2)$$

Нека  $E = \{K_1, \dots, K_t\}$  е множеството от сечения, а  $F = \{C_1, \dots, C_p\}$  е множеството от минимални сечения, където:

$$K_t = \{x_k : 1 \leq k \leq n, x \in A\} \quad (3)$$

$$C_p = \{x_l : 1 \leq l \leq n, x \in A\} \quad (4)$$

Нека  $G = \{M_1, \dots, M_l\}$  е допълнение на множеството  $D$  до множеството  $B$  изградено от множество от неминимални пътища  $M$ :

$$G = B \setminus D = \{M : (M \in B) \wedge (M \notin D)\} \quad (5)$$

Съгласно [7], [8], [9] и [10] за всеки неминимален път  $M$  съществува минимален път  $T$ , който се явява подмножество на  $M$ , т.е:

$$\forall M \ni \exists T \Leftrightarrow (M \in E) \wedge (T \in D) \quad (6)$$

Аналогично можем да дефинираме множество  $H = \{N_1, \dots, N_s\}$  от неминимални сечения, като допълнение на множеството  $F$  до множеството  $E$ :

$$H = E \setminus F = \{N : (N \in E) \wedge (N \notin F)\} \quad (7)$$

В [7], [8] и [9] математически е доказано, че за всяко неминимално сечение  $N$  съществува минимално сечение  $C$ , което се явява подмножество на  $N$ :

$$\forall N \ni \exists C \Leftrightarrow (N \in H) \wedge (C \in F) \quad (8)$$

Процесът на определяне на повреден участък в електроенергиен обект се разделя на две основни задачи – откриване на повредения участък и откриване на съответен повреден елемент. На база на представените дотук съждения може да се твърди, че метода „Дърво на отказите“ е допустим, а множествата на минималните сечения и минималните пътища са необходимо и достатъчно условие за описание на всички възможни сценарии на отпадане на участък, в съответствие с елементарните събития, въведени в модела на надеждност.

За демонстриране на предложеният подход е извършено моделиране на електрическата разпределителна уредба на електроенергиен обект. Характерно за обекта е, че хранването на потребителите може да се осъществи от три независими източника. Разпределителната уредба е съставена от 6 секции, като първа и втора се хранват от трансформатор  $T_1$ , трета и четвърта от трансформатор  $T_2$ , пета и шеста от трансформатор  $T_3$ . Между всички четни и всички нечетни секции са изградени напречни секционни връзки, както следва – между първа трета и пета секция и между втора, четвърта и шеста секция. За опростяване на модела всяка секция хранва два консуматора.

В програмна среда SAPHIRE е разработен модел на електрическата схема въз основа на публикувани в [7] и [8] дървета на отказите. Съгласно моделите в [7](стр. 255-256) и [8](стр. 138-139) дървото на отказите е разделено на три клона:

- А. Авария в клонове, намиращи се между захранващия източник и съответния товаров възел;
- В. Авария в клон, който се намира в по – отдалечена зона, отколкото зоната, в която се намира товаровия възел, а самият възел се намира на пътя между захранващия източник и аварирания клон;
- С. Авария в клон от мрежата, при който пътя на захранване на аварирания клон, с отказал елемент, и разглеждания товаров възел имат общи клонове, по които те се захранват.

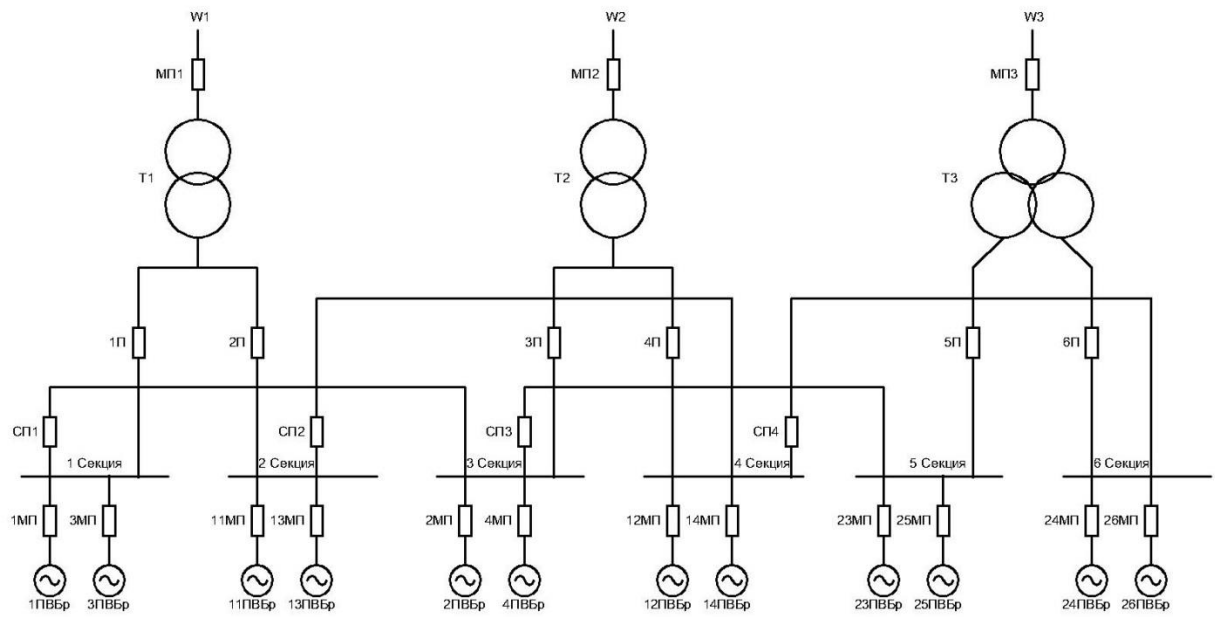
Елементарните събития, изграждащи дървото на отказите, са дефинирани като състояния на прекъсвачи и релейни защиты. В дървото на отказите, като елементарни събития, са въведени и състоянията на потребителите, секциите и трансформаторите.

В настоящата публикация ще се разгледа модел на дървото на отказите свързан с отпадане на захранването на потребител 1ПВБр. В зависимост от трансформатора, захранващ на потребителя групите елементи от тип А, В и С са различни.

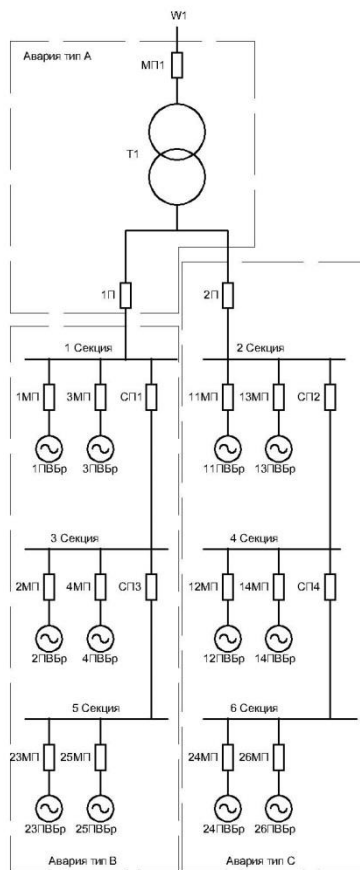
Програмният продукт SAPHIRE генерира автоматично множеството F от минимални сечения С. Множеството D от минимални пътища Т също се получава автоматично, като в дървото на отказите всеки елемент „И“ се замени с „ИЛИ“ и всеки елемент „ИЛИ“ се замени с „И“ [9]. В таблица 1 е представен произволно избран минимален път (№ 2834) при захранване на системата от трансформатор Т2.

Минимален път	Заработили елементи		Участъци
	Прекъсвачи	Релейни защиты	
12ПВБр, 23ПВБр, 4ПВБр, 25ПВБр, 26ПВБр, 2Т, 3ПВБр, 4ПВБр, П-14ПВБр, П-1ПВБр, П-2ПВБр, СП-2, РЗ-14ПВБр, РЗ-1ПВБр, РЗ-2ПВБр, РЗ-СП-2, СЕКЦИЯ-1, СЕКЦИЯ-3, СЕКЦИЯ-4, СЕКЦИЯ-5, СЕКЦИЯ-6, W2	П-1ПВБр	РЗ-1ПВБр	W2
	П-2ПВБр	РЗ-2ПВБр	Т2
	П-14ПВБр	РЗ-14ПВБр	3ПВБр
	СП-2	РЗ-СП-2	4ПВБр
			12ПВБр
			23ПВБр
			24ПВБр
			25ПВБр
			26ПВБр
			СЕКЦИЯ-1
			СЕКЦИЯ-3
			СЕКЦИЯ-4
			СЕКЦИЯ-5
		СЕКЦИЯ-6	

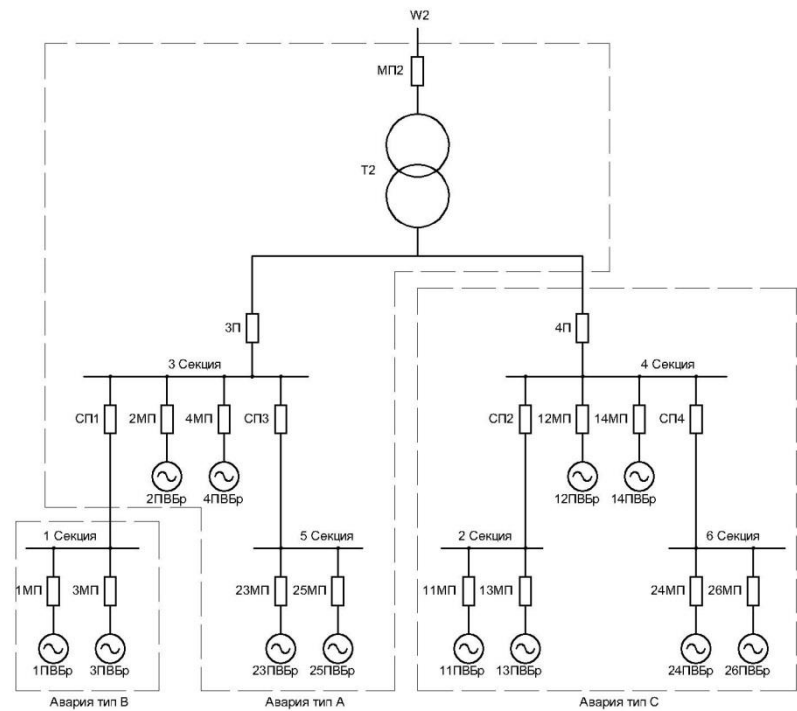
Таблица 1: Минимален път № 2834, захранване от Т2



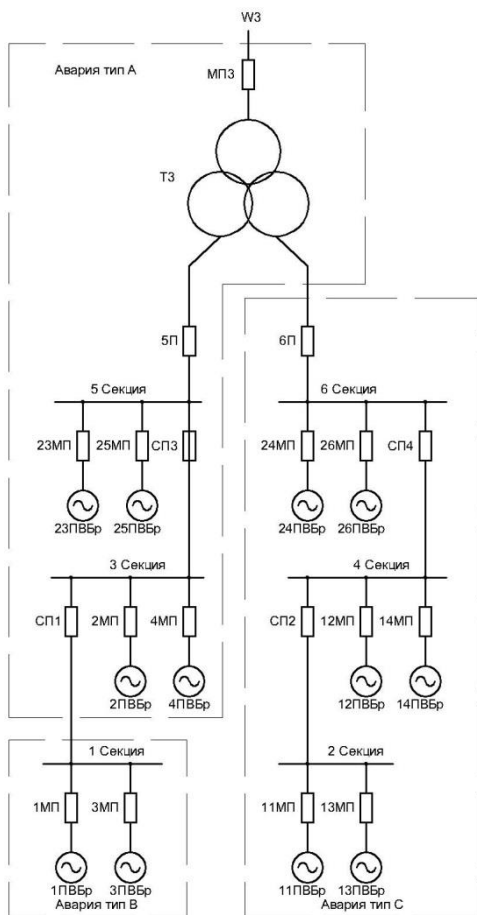
Фигура 1: Структурна схема на електроенергиен обект



Фигура 2: Структурна схема при захранване от T1

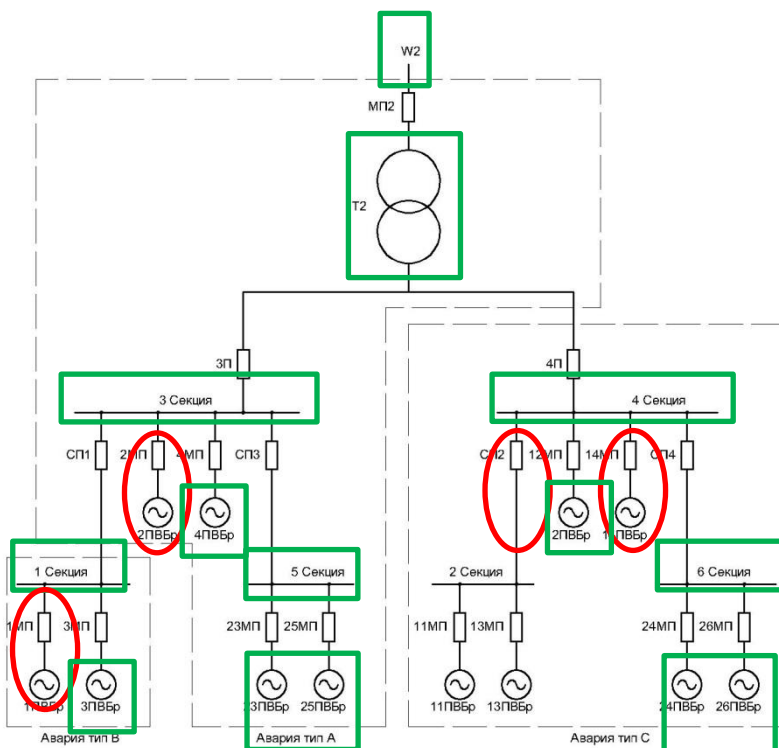


Фигура 3: Структурна схема при захранване от T2



Фигура 4: Структурна схема при захранване от Т3

На Фигура 5 е показана графичната интерпретация на разглеждания минимален път. Ако допуснем, че елементарните събития, описващи състоянието на участъците, представят тяхното изправно състояние, то предвид фигура 5 може да се твърди, че заработилите двойки прекъсвачи и релейни защиты разделят електрическата схема на потенциални повредени участъци и здрави участъци, представени в таблица 2.



Фигура 5: Структурна схема при захранване от Т2 и представяне на информацията за минимален път № 2834. С правоъгълници са означени здравите участъци. С елипси са означени заработилите прекъсвачи и съответни релейни защиты

Здрави участъци	Потенциални повредени участъци		
	Участъци без отказал елемент или работила система за резервиране	Участъци с отказал елемент и работила система за далечно резервиране	Участъци, чието състояние не може да бъде дефинирано
W2	1ПВБр	11ПВБр	
T2	2ПВБр	13ПВБр	
3ПВБр	14ПВБр		
4ПВБр	СЕКЦИЯ-2		
12ПВБр			
23ПВБр			

24ПВБр			
25ПВБр			
26ПВБр			
СЕКЦИЯ-1			
СЕКЦИЯ-3			
СЕКЦИЯ-4			
СЕКЦИЯ-5			
СЕКЦИЯ-6			

Таблица 2: Категоризация на участъците на разглежданият електроенергиен обект

Нека дефинираме следните множества:

- Множество от участъци  $I\{x_0, \dots, x_l\}$ , където „x“ е съответен участък от електрическа верига.
- Множество от ненаредени двойки елементи - релейни защиты и прекъсвачи -  $J\{\{c_0, r_0\}, \dots, \{c_m, r_m\}\}$

Тогава може да се твърди, че всеки минимален път е изграден от следните подмножества:

- Множество от здрави участъци  $K\{y_0, \dots, y_n\}$ , което се явява подмножество на I:

$$K \subset I \because \{(y \in K) \wedge (y \in I)\} \quad (9)$$

- Множество от изправни релейни защиты и прекъсвачи  $L\{\{c_0, r_0\}, \dots, \{c_p, r_p\}\}$ , което се явява подмножество на J:

$$L \subset J \because \{\{\{c_p, r_p\} \in L\} \wedge \{\{c_p, r_p\} \in J\}\} \quad (10)$$

Ако от множеството участъци I извадим множеството от определени в съответния минимален път здрави участъци K, то получаваме множеството  $S = \{z_0, \dots, z_r\}$  от потенциални повредени участъци:

$$I \setminus K = S\{z: (z \in I) \wedge (z \notin K)\} \quad (11)$$

Тогава, задачата за определяне на повреден участък може да се дефинира като определяне на сюрективното изображение на множеството J, определено с подмножества L, в множеството I, съставено от подмножества S:

$$f(J) = Im J = \{S: S = f(L), L \in J\} \subseteq I \quad (12)$$

В таблица 3 е представено минимално сечение № 207 при захранване на изследваната система от трансформатор T1. На фигура 6 е представена графичната интерпретация на разглежданото минимално съчение. Нека предположим, че всички елементи в минималното сечение са напълно аварирани.

Всяко минимално сечение е изградено от:

- Множество от ненаредени двойки прекъсвачи и релейни защиты  $T\{\{c_r, r_r\}, \dots, \{c_r, r_r\}\}$ , при които единият елемент от ненаредените двойки е отказал, което се явява подмножество на J:

$$T \subset J \because \{\{\{c_r, r_r\} \in T\} \wedge \{\{c_r, r_r\} \in J\}\} \quad (13)$$

- Един повреден участък, инициирал разрастващата се авария;

Нека отново разгледаме множеството  $S$  от потенциални повредени участъци. То може да се разглежда като обединение на следните три множества:

- Множество от повредени участъци  $U$ , за които имаме правилно заработване на прилежащите ненаредени двойки прекъсвачи и релейни защиты или заработване на системите за близко резервиране на основните релейни защиты

$$U \subset J :: \{(k \in U) \wedge (k \in S) \wedge (k \in I)\} \quad (14)$$

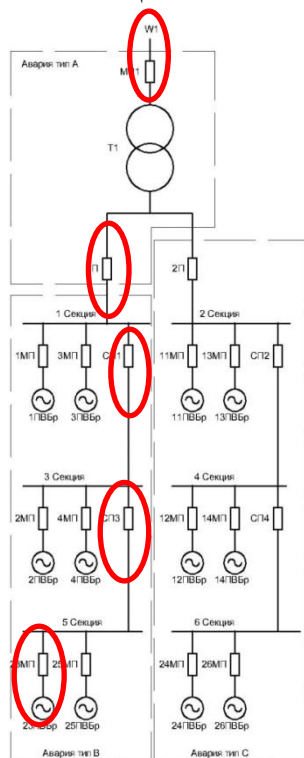
- Множество  $W$  от повредени участъци, при които ненаредени двойки прекъсвачи и релейни защиты представляват системата за далечно резервиране на релейните защиты

- Множество от участъци  $X$ , които не са дефинирани.

$$S \setminus \{U \wedge W\} = X \{l: (l \in S) \wedge (l \notin U) \wedge (l \notin W)\} \quad (15)$$

Минимално сечение	Отказали елементи		Повредени участъци
	Прекъсвачи	Релейни защиты	
23ПВБр-Авария, СП-1, 1П-1Т, РЗ-23ПВБр, РЗ-МП-1-1Т, РЗ-СП-3		РЗ-23ПВБр	23ПВБр-Авария
		РЗ-СП-3	
	СП-1		
	1П-1Т		
		РЗ-МП-1-1Т	

Таблица 3: Минимално сечение №207, захранване от Т1



Фигура 6: Структурна схема при захранване от Т1. С елипси са означени повредените елементи.

Тогава:

- Задачата за определяне на множеството от повредени участъци  $U$  може да се дефинира като определяне на сюрективното изображение на множеството  $J$ , определено с подмножества  $L$ , в множеството  $S$ , съставено от подмножества  $U$ :

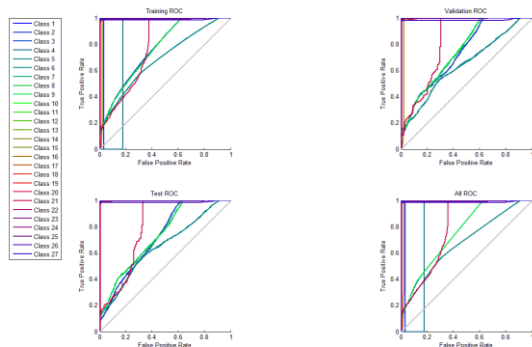
$$f(J) = Im J = \{U: U = f(L), L \in J\} \subseteq S \quad (16)$$

- Задачата за определяне на множеството  $W$  от повредени участъци и отказ на прекъсвачи или релейни защиты се свежда до намиране на сюрективното изображение на множеството  $T$  в множеството  $S$ :

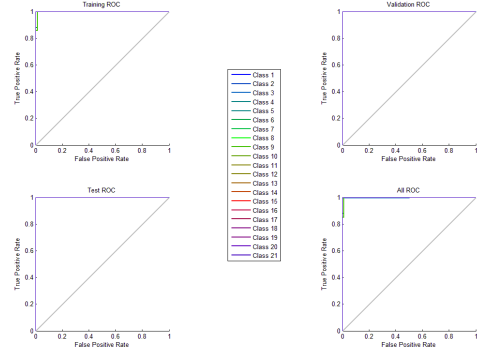
$$f(J) = Im J = \{W: W = f(T), T \in J\} \subseteq S \quad (17)$$

Представеният подход за определяне на еталонни входове и изходи, за обучение на невронна мрежа, използва единствено данни от регистратора на събития. За определяне на състоянието на множеството от участъци  $X$  се изпраща съответна заявка към базата от данни на обекта.





Фигура 7: ROC характеристики при множество от еталони за T1, T2 и T3



Фигура 8: ROC характеристики при множество от еталони за T1

Проверка за правилното определяне на еталонните входове и изходи се извърши с линейна невронна мрежа, с обратно разпространение на грешката, която се явява стандартно приложение в среда Matlab. Първият експеримент се извърши с въвеждане на цялото множество от 24 653 еталона. Стандартното приложение на Matlab допуска използване на двуслойна мрежа, като броят на входовете е 50, а броят на изходите 27. Броят на невроните в скрития слой е 50. Предавателната функция е сигмоидална. Обучението се извърши със стандартен алгоритъм с обратно разпространение на грешката, като завърши след 3 мин. и 46 сек и 166 епоха. На Фигура 7 са представени ROC (received operating characteristics) характеристиките на невронната мрежа. Поради нееднозначното дефиниране на някои от изходите (аварии в секции) подходът се счете за неуспешен. Следващият експеримент въведе в невронната мрежа 7228 еталона, при захранване от T1. Броят на входовете и изходите бе намален съответно до 38 и 21, а броят на невроните в скрития слой бе редуциран до 40. В резултат на направените изменения невронната мрежа бе обучена за 84 епоха, продължили 31 секунди, а средноквадратичната грешка достигна  $0.109 \times 10^{-3}$ . ROC – характеристиките са представени на Фигура 8 и са близки до идеалните. С направеният експеримент се доказва, че използването на минималните пътища и минималните сечения, за генериране на множество от еталонни входове и изходи, дава изключително добри резултати.

В заключение може да се твърди, че теорията на множествата дава възможност за абстрактна дефиниция на задачите за определяне на повредени участъци, релейни защиты или прекъсвачи. Експерименталното прилагането на минималните пътища и минималните сечения, като еталони за обучение на невронна мрежа, се оказа сполучливо. Предложеният метод решава проблема, свързан със зависимостта на качеството на обучение на невронната мрежа от броя на въведените еталони. Използваните входните данни са от регистратора на събития, като е представен подход за автоматизирано определяне на заявки към бази от данни или към IED устройства. Така предложеният алгоритъм би могъл да се прилага върху всяка система, чиято работа може да се моделира чрез дървовидна структура.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Fukui, Ch., K. J., "Expert system for fault section estimation using information from protective relays and circuit breakers", IEEE Transactions on Power Delivery, Vols. PWRD-1, no. 4, pp. 83-90, 1986.
- [2] Chan, E. H. P., "Application of neural-network computing in intelligent alarm processing (power systems)", Power Industry Computer Application Conference, 1989. PICA '89, Conference Papers, 1989.
- [3] Yang Hong-Tzer, C. W.-Y. H. C.-L., "New Neural networks approach to on-line fault section estimation using information of protective relays and circuit breakers", IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 9, no. 1, pp. 220-230, 1994.
- [4] Yang, Hong-Tzer, C. W.-Y. H. C.-L., "Power system distributed on-line fault section estimation using decision tree based neural nets approach", IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 10, no. 1, pp. 540-546, 1995.
- [5] Zhang N., K. M., "Verifying the Protection System Operation Using an Advanced Fault Analysis Tool Combined with the Event Tree Analysis", 2004. [Online]. Available:  
[http://pserc.wisc.edu/documents/publications/papers/2004\\_general\\_publications/md-000538.pdf](http://pserc.wisc.edu/documents/publications/papers/2004_general_publications/md-000538.pdf).
- [6] Kezunovic, M. B., "Use of intelligent techniques for analysis of faults and protective relay operations", Conference of 2007 IEEE Power Engineering Society General Meeting, Tampa, 2007.
- [7] Endrenyi, J., "Reliability modeling in electric power systems", New York: Wiley, 1979.
- [8] Малчев, К., "Надеждност в електроренергетиката", София: ТУ-София, 2008.
- [9] Limnios, N., "Fault trees", France: Hermès Science/Lavoisier, 2005.
- [10] Пеева, К., "Линейна алгебра", София: ТУ - София, 2010.

**Автори:** Десислав Тодоров, асистент – Катедра „Електроенергетика“, Електротехнически факултет, ТУ - София *email:* [desislav\\_todorov@tu-sofia.bg](mailto:desislav_todorov@tu-sofia.bg)