

МИННО–ГЕОЛОЖКИ УНИВЕРСИТЕТ

“Св. Иван Рилски” – гр. София

МИННО ЕЛЕКТРО-МЕХАНИЧЕН ФАКУЛТЕТ

КАТЕДРА: “Електроснабдяване и Електрообзавеждане”

маг. инж. Веселин Василев Тодоров

**„ВЛИЯНИЕТО НА НЕСИМЕТРИЧНИТЕ И НЕЛИНЕЙНИ
РЕЖИМИ ВЪРХУ НАДЕЖНОСТТА НА
ЕЛЕКТРОСНАБДЯВАНЕТО“**

АВТОРЕФЕРАТ

**на дисертация за присъждане на
образователна и научна степен “Доктор”**

**Научен ръководител:
доц. д-р. инж. Илиян Христов Илиев**

София, 2022 г.

МИННО–ГЕОЛОЖКИ УНИВЕРСИТЕТ

“Св. Иван Рилски” – гр. София

МИННО ЕЛЕКТРО-МЕХАНИЧЕН ФАКУЛТЕТ

КАТЕДРА: “Електроснабдяване и Електрообзавеждане”

маг. инж. Веселин Василев Тодоров

**„ВЛИЯНИЕТО НА НЕСИМЕТРИЧНИТЕ И НЕЛИНЕЙНИ
РЕЖИМИ ВЪРХУ НАДЕЖНОСТТА НА
ЕЛЕКТРОСНАБДЯВАНЕТО“**

АВТОРЕФЕРАТ

**на дисертация за присъждане на
образователна и научна степен “Доктор”**

За получаване на образователна и научна степен “Доктор”

По професионално направление:

5.2. Електротехника, електроника и автоматика, научна специалност

“Електроснабдяване и електрообзавеждане”

Научен ръководител:

доц. д-р. инж. Илиян Христов Илиев

София, 2022 г.

Дисертационният труд е обсъден и насрочен за защита от разширен катедрен състав на катедра “Електроснабдяване и електрообзавеждане” на Факултет „Минно електромеханичен“ към Минно-геоложки университет – София на 18.10.2022

Изследванията по дисертационния труд са извършени в катедра „Електроснабдяване и електрообзавеждане“ към Минно-геоложки университет – София

Защитата на дисертационният труд ще се състои в зала 105 на Минно-геоложки университет – София

Материалите по дисертационния труд са на разположение в канцеларията на катедра „Електроснабдяване и електрообзавеждане“ при Минно-геоложки университет – София.

Благодарност: *Изказвам уважение и благодарност към научният ми ръководител за ценните указания и практически препоръки при създаването на настоящата дисертация.*

Автор: Веселин Василев Тодоров

E-mail: v.todorov@vvt.bg

Заглавие: „Влиянието на несиметричните и нелинейни режими върху надеждността на електроснабдяването“

А. ОБЩА ХАРАКТЕРИСТИКА НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

Актуалност на проблема

Надеждността е свойство на обектите или техническото устройство да изпълнява дадени функции, като запазва във времето експлоатационните си показатели в граници, съответстващи на нормативните изисквания за експлоатация, ремонт, съхранение и транспортиране. В зависимост от надеждността, различните обекти се разделят на четири категории, които се характеризират със своите особености и характеристики.

От нивото на надеждност на електроснабдяването зависят промишлеността, комунално – битовият сектор, икономиката и т.н. Тази зависимост е толкова силна, че нарушаването на надеждността води до огромни материални загуби съизмерими със загубите от природни и национални бедствия. Например при аварията в Чернобилската атомна електроцентрала през 1986г. материалните щети са оценени за стотици милиарди долари, човешките жертви са неоценими. Аварията в Ню Йорк през ноември 1965г. е довела до загуби около 100 милиона долара в резултат на 10 часово прекъсване на електрозахранването на града и цялостно спиране на транспортната, производствената, социалната и културната дейности на 30 милионното население. Още по – фрапиращи са последиците от аварията на 13 юли 1977г., когато прекъсване на електрозахранването в Ню Йорк води до изцяло парализиране на живота за около 25 часа. Загубите са оценени на 1 милиард долара. Аварията в Чернобилската атомна електроцентрала през 1986 г. регистрира материални щети, оценени на стотици милиарди долари, а човешките жертви са неоценими. Най-големият ядрен инцидент в съвременната история след аксплозиите в атомната електроцентрала Чернобил е аварията във Фукушима. Тя се определя като „крупна авария“, при която са отчетени загуби от 7,5 млрд. евро. Аварията в Ню Йорк през ноември 1965 г. е довела до загуби от около 100 милиона долара в резултат на 10 часово прекъсване на електрозахранването на града и цялостно спиране на транспортната, производствената, социалната и културна дейност на 30 милионното население.

През последните години проблеми с надеждността на електроснабдяването рязко се изостри. Основните причини за това са:

- ✓ *Драстично усложняване на електроснабдителните системи (ЕСС), включващи милиони потребители, хиляди съоръжения, елементи и възли;*

- ✓ *Наличие на екстремални условия на експлоатация за много от елементите на ЕСС (претоварване, прегряване, повишени вибрации, шум, радиация, замърсеност и др.);*
- ✓ *Повишени изисквания към качеството на работа на ЕСС (енергийна ефективност, качество на електрическата енергия, компенсация на реактивните товари и др.);*
- ✓ *Голямата стойност на загубите от прекъсване на електроснабдяването;*
- ✓ *Въвеждането на висока степен на автоматизация на процесите с използване на интелигентни системи за управление с което се игнорира човешкия фактор за контрол на работата на ЕСС и нейните елементи.*

Цел и задачи на дисертационния труд

Целта на настоящия дисертационен труд е следната:

Да се изследва категорията ”надеждност на електроснабдяването” в теоретичен и практично-приложен аспект в електроснабдителните системи на различни обекти, с отчитане влиянието на несиметричните и несинусоидални режими на напрежението и тока.

За реализиране на формулираната по-горе цел на разработката е необходимо да се решат следните задачи:

1. Да се извърши обследване на литературни източници, свързани със състоянието, приложенията, перспективите и проблемите на надеждността на електроснабдяването в национален и международен аспект. Да се изучат основни понятия, свойства, състояния, събития, влияещи фактори и изисквания към надеждността, а също така основни показатели и зависимости в теорията на надеждността (поток на отказите, продължителност на прекъсванията, планови ремонти, допълнителни показатели на надеждността и др.). Загубите на промишлените обекти вследствие прекъсване на захранването са функция на надеждността на електроснабдяването и в тази връзка важна задача е да се даде количествена оценка на това негативно явление с помощта на адекватни теоретични постановки в това направление.

2. В теоретичен план да се синтезират математически модели за различни съединения от елементи в ЕСС, а за трансформаторните подстанции, като основно звено от електроснабдяването, се приложи технико-икономически подход за оценка на надеждността. да се дефинират математически модели на внезапните и постепенните откази чрез различни закони на разпределение на случайната величина надеждност на електроснабдяването, а също така да се предложат за разглеждане допълнителни показатели на надеждността, ориентирани към потребителите на електрическа енергия.

3. Да се проведат експериментални изследвания на надеждността в отрасловата структура на страната, като дейността се фокусира върху силови трансформатори, комутационно-защитни елементи и електрически мрежи работещи в условията на несиметрично и

несинусоидално натоварване. Надеждността на захранващите подстанции да се анализира за големи промишлени обекти и звена от ЕЕС и се дадат препоръки за рационализиране и подобряване на електрозахранването и повишаване на надеждността.

4. Да се изследва влиянието на качеството на ЕЕ върху надеждността на електрическите мрежи и се определят законите на разпределение на случайните величини, свързани с надеждността на електроснабдяването. Да се предложат схемотехнически подобрения с цел рационализиране на ЕСС и повишаване на надеждността за подстанции от ЕЕС на страната, а също и за повишаване безаварийността в електроснабдяването на големи промишлени обекти

Методи на изследване

Дисертационния труд се базира на голям обем експериментални изследвания, като всички данни и измервани величини са обработени и анализирани с методите на математическата статистика, теорията на планиране на експериментите и др. Инструментите.

Апробация на работата

Значителна част от резултатите на работата са представени в дисертацията и публикацииите на автора.

Структура и обем на дисертационния труд

Дисертационния труд е в обем от 163 стр., структуриран е в 4 глави, множество формули и 66 фигури, 32 таблици, 112 заглавия на литературни източници, от които 65 на кирилица и 47 на латиница. В автореферата номерацията на фигурите, таблиците и формулите съответства на тази от дисертационния труд.

Навсякъде в дисертационния труд основните термини и определения са представени с техните съкращения и обозначения.

Б. КРАТКО ИЗЛОЖЕНИЕ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

ПЪРВА ГЛАВА

ЛИТЕРАТУРЕН ОБЗОР ВЪРХУ ПОКАЗАТЕЛИ И ХАРАКТЕРИСТИКИ НА НАДЕЖНОСТТА В ЕЛЕКТРОСНАБДИТЕЛНИ СИСТЕМИ

Електроснабдителните системи представляват съвкупност от много и разни елементи (технически изделия). Някои от тях са с еднократно използване (невъзстановяеми), т.е. след отказ (повреда) се заменят с нови. Тук следва да се отбележи, че част от елементи обаче са с многократно използване (възстановяеми), т.е. след повреда те се ремонтират и тяхната работоспособност се възстановява: силови трансформатори, кабели, прекъсвачи, въздушни електропроводи и др. [11]

За количествена оценка на отказите и надеждността на работа на изделията (елементите на ЕСС) се използват показателите честота ω и интензивност λ .

Честотата на отказите се нарича съотношението на броя на отказалите образци от изделието за единица време към броя на първоначално включените за изпитване образци при условие, че отказалите образци не се възстановяват и не се заменят с изправни:

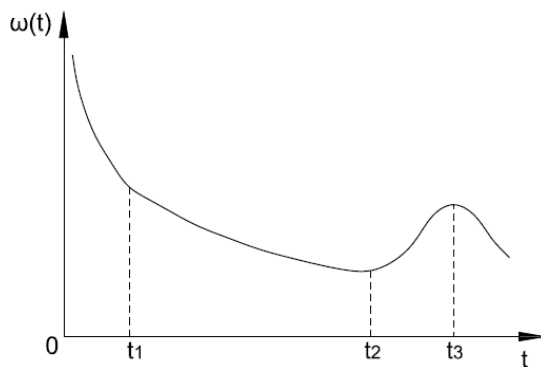
$$\omega(t) = \frac{1}{N_0} \frac{dN_{\text{отк}}}{dt}; \quad (1.1) \quad N_0 = N_{\text{и}} + N_{\text{отк}}, \quad (1.2)$$

където: N_0 е първоначалният брой на изследваните образци, а $dN_{\text{отк}}$ е броят на отказалите образци за време dt .

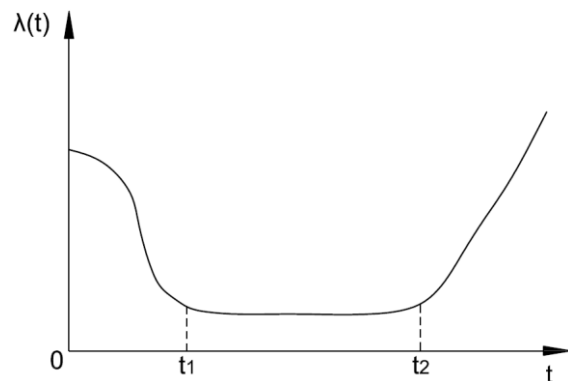
Експериментално честотата на отказите ω за определен интервал от време t може да се определи с помощта на израза:

$$\omega = \frac{N_{\text{отк}}}{N_0 t}; \quad (1.3)$$

На фиг. 1.1 е показана типична крива на изменението на честотата на отказите на даден вид апаратура във времето. Характерни са три периода в работата на образците [11, 60]. В периода от 0 до t_1 честотата на отказите рязко намалява. Високата честота в началото се дължи на наличието на образци с фабрични дефекти, неправилен монтаж, неопитност на обслужващия персонал и др. Обикновено този интервал от време се нарича период на разработване или пусков период.



Фиг. 1.1 Зависимост на честотата на отказите от продължителността на работа



Фиг. 1.2 Зависимост на интензивността на отказите от продължителността на работа

В участъка от t_1 и t_2 броят на отказите е значително по – малък и намалява по експоненциална крива. Този период съответства на нормалната работа на изделието и обикновено е много по – продължителен от останалите два. Намалението на честотата в този участък се обяснява с факта, че броят на отказалите образци $dN_{\text{отк}}$ за интервала от време dt става все по – малък поради непрекъснатото намаляване на общия брой на изпитваните изправни образци. Надеждността на апаратурата с течение на времето също намалява.

За третия участък от t_2 до t_3 е характерно рязко увеличаване на честотата на отказите, което се дължи на механично и електрическо износване на изделията.

Намаляването на честотата след време t_3 не означава, че се повишава надеждността на изделията. То се обяснява с малкия брой на изправните образци, вследствие на което броят на повредените образци $dN_{\text{отк}}$ за интервал от време dt е малък.

Елементите на ЕСС обикновено се използват до тяхното износване. След това те се заменят с нови или се ремонтират, в резултат на което изменението на честотата на отказите наново се представя графично с кривата в участъка $t_1 - t_2$.

Интензивността на отказите се нарича отношението на броя на отказалите образци от изследваното изделие $dN_{\text{отк}}$ за единица време към средния брой $N_{\text{и}}$ на образците, изправно работещи в разглеждания период от време dt , при условие че отказалите образци не се заменят с нови и не се ремонтират.

$$\lambda(t) = \frac{1}{N_{\text{и}}} \frac{dN_{\text{отк}}}{dt}. \quad (1.4)$$

Експериментално интензивността на отказите λ за определен интервал от време t , се определя по формулата:

$$\lambda(t) = \frac{N_{\text{отк}}}{N_{\text{иср}}t}, \quad (1.5)$$

където $N_{\text{отк}}$ - брой на отказите в интервал от време t ; $N_{\text{иср}} = \frac{1}{2}(N_{\text{иН}} + N_{\text{иК}})$ - среден брой на изправните (работоспособните) образци в интервал от време t ; $N_{\text{иН}}$ и $N_{\text{иК}}$ - брой на образците, работещи съответно в началото и в края на интервала t .

На фиг. 1.2 е показано примерно изменение на интензивността на отказите, което е характерно за мигновени откази. Трите участъка от абцисната ос $0 - t_1$, $t_1 - t_2$ и след t_2 , както и на фиг. 1.1 съответстват на пусковия период, период на нормална работа и период на стареене (износване).

За почти всички елементи на ЕСС може да се приеме, че в периода на нормална работа интензивността на отказите е постоянна: $\lambda = \text{const}$.

Надеждността на едно изделие се определя с отношението:

$$R(t) = \frac{N_{\text{и}}}{N_0} = \frac{N_0 - N_{\text{отк}}}{N_0} = 1 - \frac{N_{\text{отк}}}{N_0} \quad (1.6)$$

където $N_{\text{отк}}$ и $N_{\text{и}}$ са отказалите и изправните образци в момента t .

Ако уравнение (1.6) се диференцира спрямо t и се раздели на $N_{\text{и}}$, се получава:

$$\frac{1}{N_{\text{и}}} \frac{dR}{dt} = \frac{dN_{\text{отк}}}{N_0 N_{\text{и}} dt}$$

Като се вземат предвид уравнения (1.1) и (1.4), горното уравнение може да се представи в следния вид:

$$\frac{dR}{R} = -\lambda dt.$$

Ако се интегрира, се получава :

$$R(t) = e^{-\int_0^t \lambda(t) dt} \quad (1.7)$$

Когато интензивността на отказите е постоянна ($\lambda = \text{const}$):

$$R(t) = e^{-\lambda t} \quad (1.8)$$

Вероятността, че изделието ще откаже след време t , е:

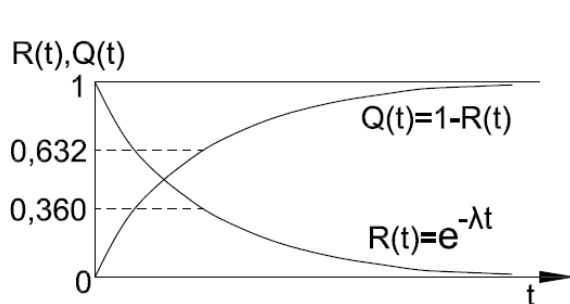
$$Q(t) = 1 - R(t) = 1 - e^{-\lambda t} \quad (1.9)$$

Ако експоненциалните изрази в уравнения (1.8) и (1.9) се представят чрез ред и се вземат само първите два члена, получават се следните приблизителни формули за пресмятане на R и Q :

$$R(t) \approx 1 - \lambda t \quad (1.10) \quad Q(t)$$

$$\approx \lambda t \quad (1.11)$$

От горните уравнения следва, че с увеличаване на продължителността на работа, вероятността за безотказна работа



намалява, докато вероятността за повреда расте (фиг. 1.3). Средното време за безотказна работа $t_{\text{ср}}$ е обратно пропорционално на интензивността на отказите (форм1.4).

Фиг. 1.3 Криви на вероятността за безотказна работа $R(t)$ и вероятността за отказ $Q(t)$

Плътноста на вероятността за отказ $f(t)$

представлява производна на $Q(t)$ по отношение на t :

$$f(t) = \frac{dQ(t)}{dt} = \lambda e^{-\lambda t}. \quad (1.12)$$

Ако е известна една от функциите $R(t)$, $Q(t)$, $f(t)$ или $\lambda(t)$ е възможно да се определят останалите три, изразите за които са изведени в таблица 1.1[60]. .

Таблица 1.1 Зависимости на показателите на надеждността

Известна функция	Формули за определяне на останалите три функции			
	$R(t)$	$Q(t)$	$f(t)$	$\lambda(t)$
$R(t)$	-	$1 - R(t)$	$-\frac{dR(t)}{dt}$	$-\frac{dR(t)}{dtP(t)}$
$Q(t)$	$1 - Q(t)$	-	$-\frac{dQ(t)}{dt}$	$-\frac{dQ(t)}{dt(1 - Q(t))}$
$f(t)$	$\int_t^{\infty} f(t)dt$	$\int_0^t f(t)dt$	-	$\frac{f(t)}{\int_t^{\infty} f(t)dt}$
$\lambda(t)$	$e^{-\int_0^t \lambda(t)dt}$	$1 - e^{-\int_0^t \lambda(t)dt}$	$\lambda(t)e^{-\int_0^t \sigma(t)dt}$	-

Оценката на вероятността за безотказна работа в реални експлоатационни условия трябва да отчита факта, че в момента на включването и изключването на голяма част от електрическите уредби интензивността на отказите се увеличава. Така например при голяма част от осветителните тела един цикъл „включено – изключено” е еквивалентен на значително време непрекъсната работа. Ето защо при оценка на надеждността трябва да се отчита и влиянието на циклите „включено – изключено”.

Вероятността за безотказна работа в зависимост от общата отработка и броя на циклите „включено – изключено” се определя с помощта на следните изрази:

$$P(t, \xi) \approx e^{-(\lambda t + n_{\text{ц}} \xi)} \quad (1.13)$$

ИЛИ

$$P(t, \xi) \approx e^{-\lambda t + (1+k_{\text{ц}})\xi} \quad (1.14)$$

където $n_{\text{ц}}$ е броят на отказите за един цикъл „включено – изключено”; $\xi = \frac{\kappa}{t}$ – честота на включването, т.е. броят на циклите „включено – изключено” за единица календарно време за експлоатация; κ – броят на циклите „включено – изключено”; $k_{\text{ц}} = \frac{n_{\text{ц}}}{\lambda}$ – коефициент на цикличност.

Изразите (1.13) и (1.14) са получени експериментално, но в инженерната практика все още се използват масово поради липсата на указания за областта на използване в зависимост от пределните стойности на честотата на включване.

Възстановяването на отказалия елемент като правило се извършва от обслужващия персонал и характеристиките на възстановителния процес отчитат както надеждността на елемента, така и субективния и обективния характер на дейността на обслужващия персонал.

Приема се, че отказите се отстраняват мигновено и че при възстановяването напълно си възвръщат свойствата на елемента, т. е. ремотируваният елемент не се отличава от новия. При такъв подход продължителността на работа на елемента от момента на възстановяването до поредния отказ не зависи от това, колко пъти е отказал до този момент. Последователността на събитията за появата на отказ в случайни моменти от време $t_1, t_2, t_3, \dots, t_n$ образува случаен поток на събитията или поток на отказите.

Ако за всеки един от N на брой еднотипни възстановяеми елемента в течение на време t се отчетат $n_i(t)$ брой откази, средният брой откази за време t се определя по формулата:

$$n^*(t) = \sum_{i=1}^N \frac{n_i(t)}{N}. \quad (1.15)$$

При $N \rightarrow \infty$ се получава математическото очакване на броя на отказите за време t :

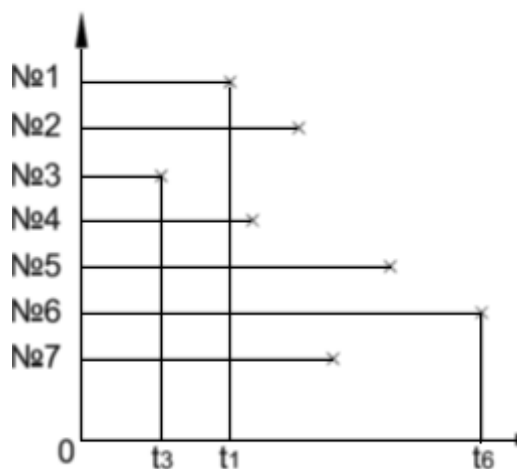
$$M[n(t)] = \lim_{N \rightarrow \infty} \left[\sum_{i=1}^N \frac{n_i(t)}{N} \right] = H(t), \quad (1.16)$$

което обикновено се нарича водеща функция на потока на отказите. Често е удобно да се използва параметърът на потока на отказите:

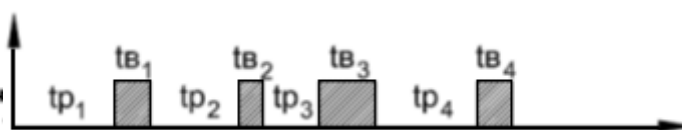
$$\omega(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{M[n(t, t + \Delta t)]}{\Delta t} = \frac{dH(t)}{dt}, \quad (1.17)$$

където Δt е интервалът от време между отказите.

Формулата (1.17) е вярна при ординарен поток без последствие, когато параметърът на потока на отказите съвпада с интензивността на потока.



Фиг. 1.4 Поток на отказите на елементи с еднократно използване



Фиг. 1.5 Поток на отказите на елементи с възстановяване

На фиг. 1.4 е представена диаграма на потока на отказите на m еднакви изделия с еднократно използване, които работят при практически еднакви условия. Всеки елемент работи изправно в течение на някакъв период от време t и след това отказва.

На фиг. 1.5 е представена диаграма на потока на отказите на изделия с възстановяване. Както продължителността на работа на изделието t_p , така и времето за неговото ремонтиране (възстановяване) t_b имат различни стойности.

Главни характеристики на потока на откази са интензивността λ и честотата ω на отказите, които се дефинират съгласно формули (1.1) и (1.4).

- ✓ Потокът от откази е ординарен, когато не е възможно едновременно случване на две събития. Такъв е потокът на откази на един елемент (изделие), докато потокът на група от елементи очевидно не е ординарен.
- ✓ Когато вероятността за отказ не зависи от продължителността на работа на елемента, потокът на откази се нарича стационарен. В този случай интензивността λ и честотата ω не зависят от времето t - $\lambda(t) = \lambda = \text{const}$ и $\omega(t) = \omega = \text{const}$. Ако потокът от събития е едновременно ординарен и стационарен: $\lambda = \omega = \text{const}$.
- ✓ Когато броят на повредите (отказите) в произволен интервал от време не зависи от броя на повредите в друг интервал от време, потокът се нарича „без последствие“.

- ✓ Потокът се нарича *поасонов*, ако едновременно е *ординарен* и *без последствие*. В този случай вероятността F , че няма да се случат повече от n повреди в течение на времето t , се определя както следва:

$$F(n, A) = \sum_0^n \frac{A^n}{n!} e^{-A}; \quad F(n, \lambda t) = \sum_0^n \frac{(\lambda t)^n}{n!} e^{-\lambda t}, \quad (1.18)$$

където $A = \lambda t$.

Разпределението на времето за възстановяване следва експоненциалния закон, когато:

- възстановяването е свързано с редица опити, всеки от които се характеризира с някаква вероятност за отстраняване на повредата;
- плътността на разпределението намалява с нарастване на аргумента t .

ИЗВОДИ И РЕЗУЛТАТИ КЪМ ПЪРВА ГЛАВА НА ДИСЕРТАЦИОННАТА РАБОТА

1. В първа глава на дисертационната работа са разгледани основни понятия, свойства, събития влияещи фактори и изисквания към надеждността на електроснабдяването. Формирани са основни показатели, зависимости и характеристики на потока на отказите за възстановяеми елементи, разглеждан като стационарен ординарен и „без последствие” поток. Този анализ е целенасочен в направление за адекватно отразяване на събитията, свързани с надеждността в практически приложен аспект.

2. Представени са основни постановки за оценка на продължителността на прекъсване на електроснабдяването и плановите ремонти. Разгледани са допълнителни показатели на надеждността, систематизирани тематично и в табличен вид, което дава възможност за тяхното ефективно и пълноценно използване при експериментални изследвания.

3. Загубите на промишлените обекти вследствие на прекъсване на захранването, са подробно анализирани, като е направен сравнителен анализ на разгледаните методи. Констатирано е, че всички методи

разглеждат две компоненти на тези загуби – преки и косвени, които не отчитат режимни параметри, динамиката на процесите и качеството на електрическата енергия. Обърнато е също така внимание на оценката на складовия резерв при оптимизиране надеждността на електроснабдяването.

ВТОРА ГЛАВА

ИЗСЛЕДВАНЕ И АНАЛИЗ НА ТЕОРЕТИЧНИ ПОСТАНОВКИ И ИНСТРУМЕНТАРИУМИ ЗА ОЦЕНКА И ОПТИМИЗИРАНЕ НА НАДЕЖНОСТТА В ЕЛЕКТРОСНАБДИТЕЛНИ СИСТЕМИ

Най – простата техническа система, от гледна точка на теорията на надеждността, е съвкупността от елементи, при които отказа на един случаен елемент от системата води до отказ на цялата система и това не променя надеждността на другите елементи в системата. [21, 19] Такова съчетание на елементи в теорията на надеждността се нарича последователно свързване.

Вероятността на отказите при последователното съединение може лесно да се получи чрез следния израз:

$$Q_k(t) = 1 - \prod_{i=1}^n [1 - Q_i(t)] = 1 - R_k(t). \quad (2.6)$$

Под група от елементи (или групи от машини) имаме предвид система от n постоянно включени в работата на елементи, където m елементи гарантират нормалното функциониране на групата, а $n - m$ елементи се явяват „въртящи се” или "горещи" резерви. Приемаме, че при отказ на един елемент, след отказа на всички резервни, води до отказ на цялата група. По този начин, вероятността на отказите се определя като вероятността за съвпадение на отказите $(n-m+1)$ на елементите в рамките на очакваното време. Ако отказа на един елемент не зависи от отказа на други елементи, то по теорията на вероятностите имаме следната зависимост:

$$Q_{\text{гр}}(t) = \prod_{k=1}^{n-m+1} Q_k(t), \quad (2.7)$$

където $Q_k(t)$ е вероятността за отказ на k -тия елемент.

Електроснабдителните системи на промишлените предприятия представляват съвкупност от много елементи, свързани последователно, паралелно и смесено. Поради това определянето на надеждността на ЕСС е свързано с пресмятане на надеждността на последователно, паралелно и смесено съединените на елементи.

Средни стойности на потока на отказите на разгледаните елементи на подстанциите, получени въз основа на статистически данни, са дадени в табл. 2.3:

Таблица 2.3 Стойности на потока на отказите λ на елементите на подстанциите

Наименование на елемента	обозначение	Напрежение ,kV	
		110	220
Маслен прекъсвач	$\lambda_{\text{п.м}}$	0,015	0,05
Въздушен прекъсвач	$\lambda_{\text{п.в}}$	0,100	0,30
Отделител	λ_0	0,017	0,017

Късосъединител	λ_k	0,013	0,013
Разединител	λ_p	0,0001	0,0001
Трансформатор	λ_T	0,0046	0,017
Шини	$\lambda_{ш}$	0,01	0,04

ИЗВОДИ И РЕЗУЛТАТИ КЪМ ВТОРА ГЛАВА НА ДИСЕРТАЦИОННАТА РАБОТА

1. Във втора глава на дисертационната работа е проведено изследване и е направен анализ на теоретични постановки, свързани с надеждността на ЕСС. Съставени са математически модели за невъзстановяеми и възстановяеми елементи при различни видове съединения и са представени математически формализации за оценка на показателите на надеждността. Анализирани са различни схемотехнически постановки на подстанции и е проведен сравнителен анализ на надеждността им по различни критерии.

2. Представени са математически модели на откази на елементи от ЕСС с техните закони на разпределение. В теоретичен план е анализирана надеждността на изолацията на електрическите съоръжения и е доказано, че времето на безотказна работа се подчинява на закона на Вейбул. Надеждността на СТ се разглежда като последователно съединени звена от внезапни и постепенни откази, които зависят в силна степен от коефициента на вариация на товара. Следователно, формира се предположението, че надеждността има връзка с режимните характеристики на СТ.

3. Дефинирани са допълнителни показатели на надеждността, ориентирани към потребителя и такива, характеризиращи вероятността на недоставяне на ел. енергия. Представена е апробация на тази постановка с помощта на цифров анализ на конкретна система. Това дава възможност за прилагане на методиката в изследователски процес на конкретни обекти и формиране на количествена оценка на допълнителни показатели на надеждността.

ТРЕТА ГЛАВА

**ЕКСПЕРИМЕНТАЛНО ИЗСЛЕДВАНЕ НА
НАДЕЖНОСТТА В ПРОМИШЛЕНИ И ЕНЕРГИЙНИ
ОБЕКТИ**

Броя на изследваните промишлени обекти е 186, групирани в 9 отрасли, представени в табл. 3.1. Основните енергетични характеристики в отраслите са осреднени и служат като информационна основа при анализите на надеждността на електроснабдяването. На базата на априорна информация и експертен анализ за основни енергетични характеристики при определяне на надеждността на електроснабдяването са възприети следните показатели [4,26,55].

Таблица 3.1

Енергетични характеристики за 9 отрасли от промишлеността									
Група	Машиностроене	Хим. и доб. пром.	СМК Строителни материали, Пътно строителство	Електротехническа промишленост	Хартиена, текстилна, шивашка и обувна промишленост	Обработка на дърво, метал и пластмаса	Хранително-вкусова промишленост	Електрически транспорт	Комунално-битов сектор
Отрасъл	(М)	(ХДП)	(С)	(ЕП)	(ХТШО)	(МДП)	(ХВП)	(ЕТ)	(КБС)
Мощност $S[MVA]$	568	635	284	207	187	82	117	78	68
Коефициент на натоварване $\beta = S/S_H$	0.27-0.63	0.25 - 0.78	0.32-0.74	0.12-0.52	0.26-0.83	0.28-0.75	0.32-0.79	0.09-0.84	0.06-0.38
$m = Q/Q_H$	0.22-0.29	0.23 - 0.69	0.30-0.72	0.11-0.51	0.22-0.87	0.26-0.88	0.32-0.85	0.1-0.76	0.04-0.39
$\cos \varphi$	0.814	0.843	0.843	0.827	0.749	0.839	0.781	0.98	0.827
p	0.51-0.55	1.48 - 1.55	0.65-0.88	0.81-1.37	0.69-1.42	0.62-0.75	0.5-1.92	0.07-1.12	0.79-1.55
q	1.7-3.3	1.42 - 3.4	1.52-2.88	1.33-2.78	1.64-3.31	1.37-2.68	2.076-0.625	1.43-0.959	1.466-0.723
$H = \sqrt{\frac{p^2+q^2}{p \cdot q}}$	2.047-1.843	0.976-0.709	1.673-1.188	1.446-0.814	1.572-0.766	1.77-1.385	2.076-0.628	1.43-0.959	1.446-0.723
Осреднени конвен. загуби $\Delta P[\%]$	9.27	9.48	9.68	9.62	8.95	9.58	8.75	10.15	9.11
$K_{\Phi A}$	1.22	1.19	1.21	1.24	1.2	1.18	1.18	1.26	1.22
$K_{\Phi P}$	1.25	1.06	1.09	1.15	1.22	1.21	1.19	1.22	1.24
Осреднени загуби от влошени	4.35	4.88	4.28	4.32	4.79	3.89	4.52	4.45	4.83

ППКЕ $\Delta P_k[\%]$									
--------------------------	--	--	--	--	--	--	--	--	--

Като се вземе предвид израза $I_{\text{ср.кв.}}^2 = I_{\text{ср.}}^2 + \sigma_I^2$, където σ_I^2 е дисперсия на тока, за K_Φ на груповия Т.Г. се получава:

$$\frac{I_{\text{ср.кв.}}^2}{I_{\text{ср.}}^2} = 1 + \frac{\sigma_I^2}{I_{\text{ср.}}^2} \quad (3.1) \quad \text{т.е.} \quad K_\Phi^2 = 1 + K_U^2 \quad (3.2)$$

$$K_U = \sigma_p^2 / P_{\text{ср.}}^2 = \sigma_I^2 / I_{\text{ср.}}^2,$$

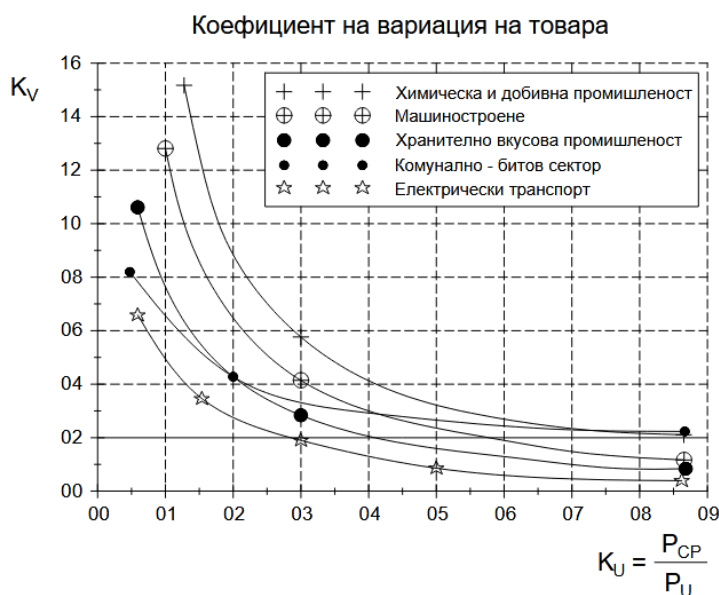
където: K_U – коефициент на вариация на товара.

Установено е, че [38,93,28].

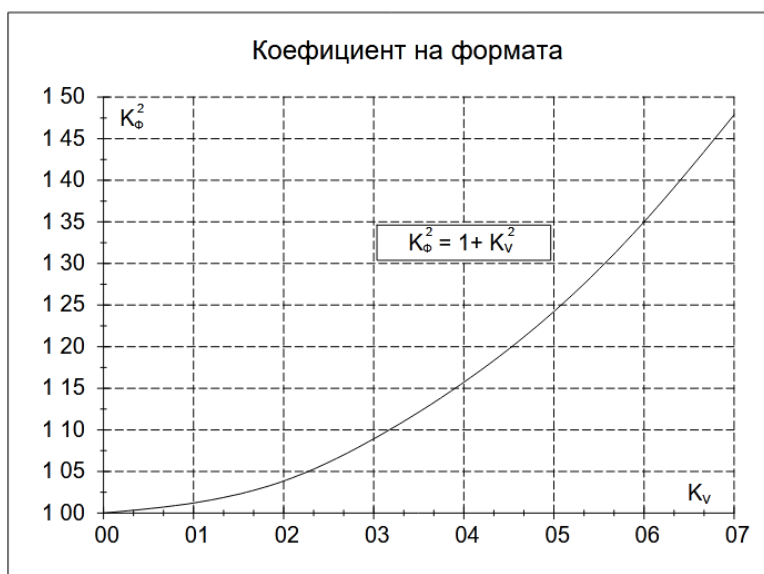
$$K_U = a + b \cdot K_{\text{И}}^{-1} + c \cdot K_{\text{И}}^{-2} \quad (3.4) \quad \rightarrow \text{центрирано}$$

е толкова по-голям, колкото промишленият обект работи с по-малък коефициент на използване K_n . В таблица 3.1 са представени данни за изследваните величини по отрасли, включително и регресионните коефициенти a, b и c от (3.4).

На Фиг. 3.1 са представени експериментално определени зависимости $K_U = f(K_{\text{И}})$ за 5 основни отрасли, а на Фиг. 3.2 е показана зависимостта $K_\Phi^2 = f(K_U)$. В таблица 3.1 са маркирани и осреднените стойности на активния и реактивния коефициент на формата за деветте изследвани отрасли.



Фиг. 3.1 Експериментално определени криви $K_U = f(K_H)$



Фиг. 3.2 В зависимост $K_{\Phi}^2 = f(K_U)$

СТ са основен елемент на ЕСС на промишлените обекти, поради което е проведено приоритетно изследване на надеждността им в процеси на експлоатация. В параграф 2.3. са маркирани най-общии откази на СТ в теоретичен аспект, а по долу са анализирани аварийни състояния при реални експлоатационни режими.

Работата на СТ е съпроводена с редица специфични особености. Те са основен източник на активни загуби, които нарастват с увеличаване на срока на експлоатацията им и при настъпване на аварийни режими, к. с. и ремонтни дейности. Освен това се изменят електромагнитните им характеристики и се генерират висши хармоници на тока и напрежението.

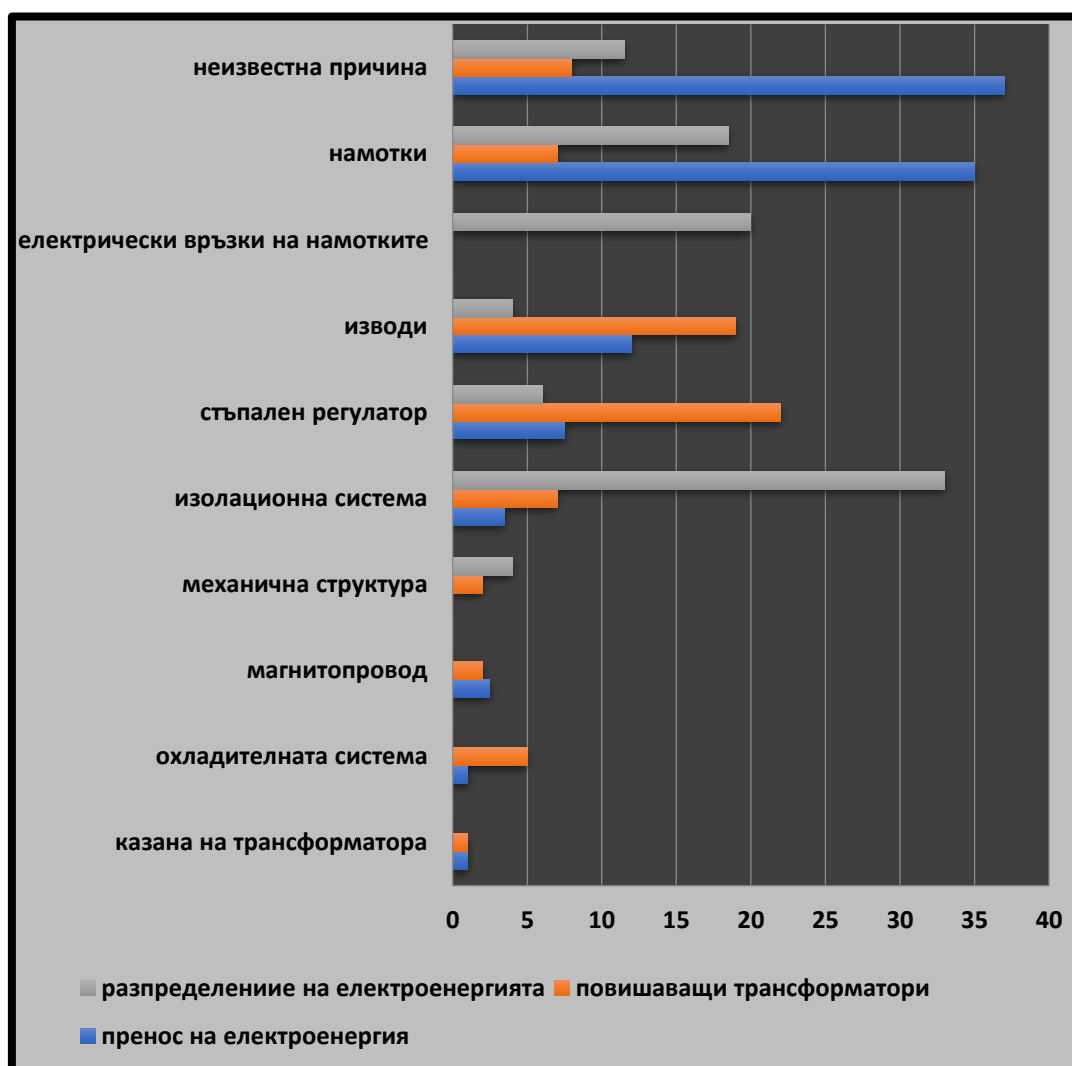
Една от основните причини за аварии на СТ е недостатъчната механична устойчивост на намотките при к.с. , т.к. тогава върху тях действат аксиални, радиални и тангенциални сили, които значително превишават нормалните механични сили. Могат да се систематизират още следните причини за настъпване на аварийно събитие при експлоатация на СТ [34, 71, 86];

- производствени дефекти;
- претоварване;

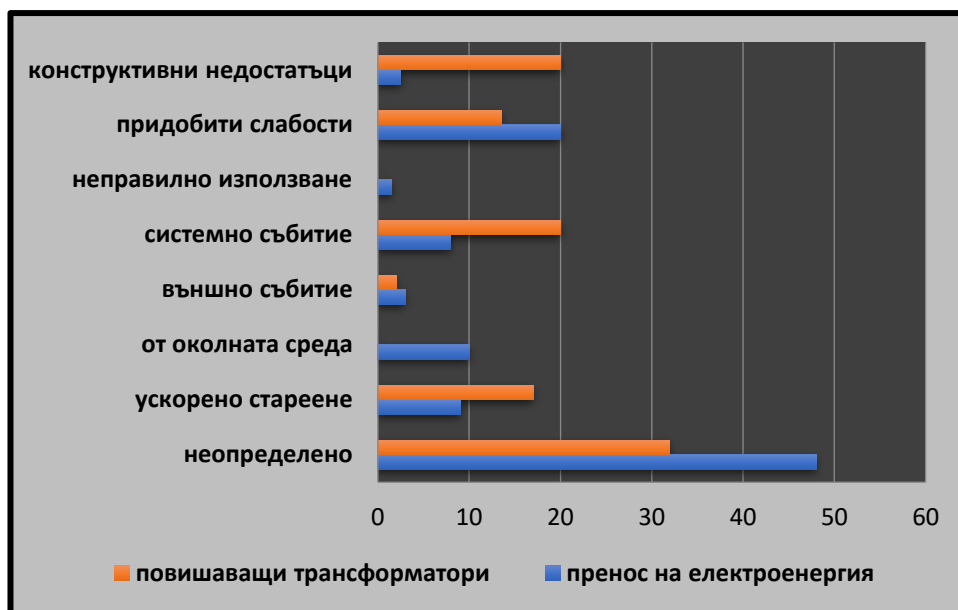
- външни к. с.;
- замърсяване на маслото;
- пожари и експлозиви;
- повишено напрежение;
- неправилна поддръжка;
- хлабави връзки;
- удар от мълния;
- влага;

В ЕСО е направена оценка на най-честите места на повреди в трансформаторите и причините за повреждането им. В наблюдаването са включени 3894 броя СТ с напрежение 110 kV и 466 броя СТ с напрежение 220 kV и по-високо, за периода от 1985 г. до 2006 г. Неизправностите завършили с авария на трансформатор 110 kV са 0,31% (12 трансформатора), а при по-високите напрежения са 0,64 % (3 трансформатора).

На Фиг. 3.3 са посочени местата и честотата на проява на повредите в трансформаторите според приложението им.



Фиг. 3.3 Място на възникване на повреди



Фиг. 3.4. Причини за повреди в трансформаторите

На Фиг. 3.4 са посочени причините, предизвикали повредите в СТ за генераторни повишаващи трансформатори и такива, участващи в преноса на електро енергия.

От направените изследвания са установени следните статистически зависимости:

1. Лоша контактна връзка по схемата на свързване на страна ВН: на СТ, които са изпълнени с алуминиев проводник, а отводите са медни. Дефектът се явява в болтовата връзка между отвода и отклонението на намотката. За 2009г. са ремонтирани 6 броя такива трансформатора, на които се е наложило ревизия на активната част с повдигане на камбаната. При тях дефектът е констатиран от електрическо измерване и рязко влошаване на резултатите от анализа на разтворените в маслото газове. От извършени електрически измервания се констатира, че развитие на такъв дефект може да се очаква в още 40 трансформатора, т. е. този вид дефект се явява в около 4% от всички измерени трансформатори (336 броя).

2. Лоша контактна връзка по схемата на свързване на страна СН и НН: такъв вид дефект е отстранен на два броя трансформатори, като същият е констатиран с електрическо измерване и от рязко влошаване от анализа на разтворените в масло газове. От извършените електрически измервания се констатира, че развитие на такъв дефект може да се очаква въобще в 12 трансформатора.

3. Дефекти по схемата на заземление на притегателната система на активната част: 4 броя констатирани при извършване ревизия на активната част с повдигане на камбаната на 9 броя СТ.

4. Дефекти по центровката на струйни и газови релета - 18 броя от 88 съоръжения, на които е извършен ремонт, т.е. 20%.

5. Дефекти, свързани с течове на масло по изводната система, стъпалния регулатор и охладителната система - 20 броя от 88 съоръжения, на които е извършен ремонт, т. е. 22%.

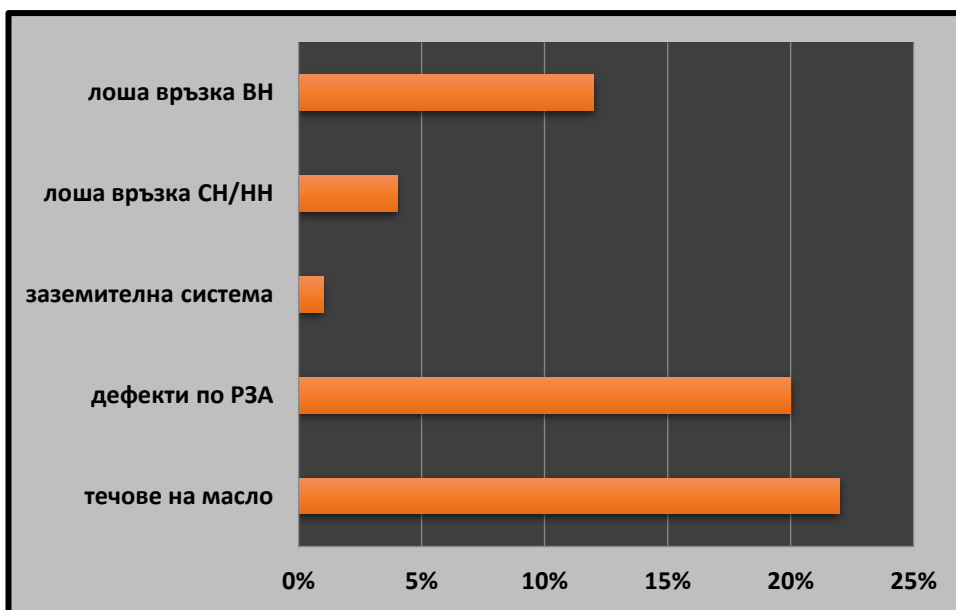
6. Дефекти, в маслените съдове на стъпалните регулатори: от извършените 79 ревизии на стъпални регулатори са констатирани 36 дефекта, като основните са разхерметизиране 16 броя, т. е. 20% и дефект на редукторната кутия 11 броя, т.е. 14%.

7. Дефекти в мощностния превключвател на стъпалния регулатор: от извършените 79 броя ревизии на стъпални регулатори са констатирани 35 дефекта, като основният е по-дълго време на превключване - 17 броя, т. е. 22%, което е основната причина за оставане в не заключено положение на мощностните превключватели. Повредени контактни системи на 14 броя, т.е. 18%, което е също и причина за оставане в не заключено положение. Прекъснати резистори 5 броя, т. е. 6%, не заключено положение 3 броя, т. е. 4%.

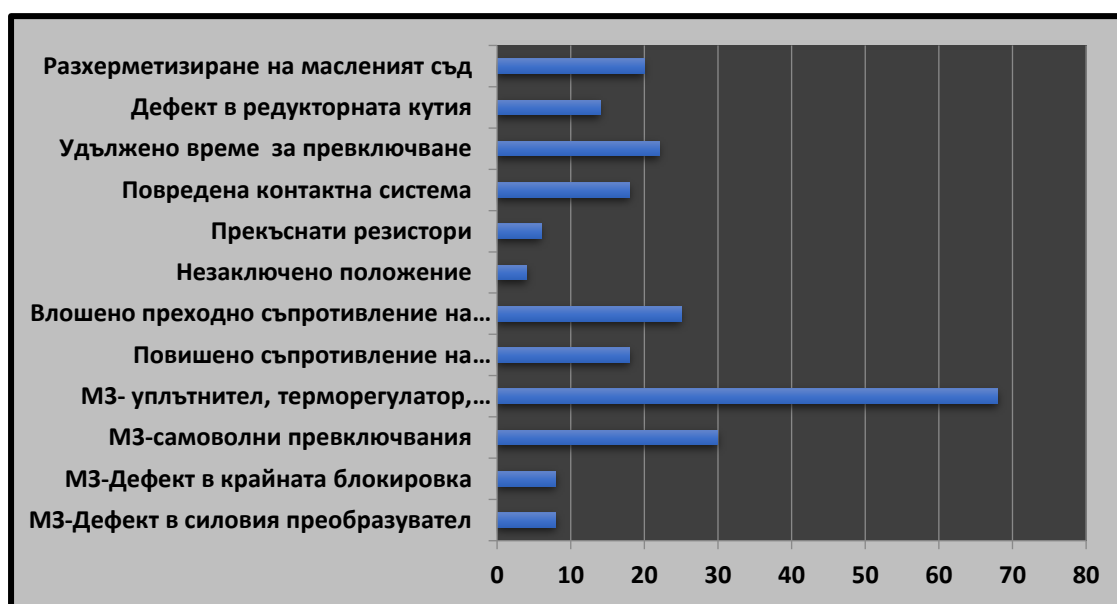
8. Избирач и предизбирач: от извършените 79 броя ревизии на стъпални регулатори са констатирани 24 дефекта, като основните е влошаване преходното съпротивление на контактните системи 20 броя, т.е. 25% и повишено съпротивление в тоководещите контури на 14 броя, т.е. 18%.

9. Моторно задвижване: от извършените 79 броя ревизии на стъпални регулатори са констатирани 112 дефекта, като основните са неработоспособни нагреватели, терморегулатор и негоден уплътнител - общо 54 броя, т. е. 68%, като това са основните причини за възникване на самоволни превключване в следствие корозиране котвите на контакторите за управление, самоволни превключвания, предизвикани от негодни контактори и неработещи защитни автомати 24 броя, т.е. 30%, неработещи крайни блокировки в броя, т. е. 8%, заменени задвижвания поради дефект в силовия преобразувател в седем броя, т.е. 8%.

На Фиг. 3.5 и Фиг. 3.6 са изобразени графично обобщение статистически данни за дефектите при трансформаторите и системата за регулиране (СР).



Фиг. 3.5 Дефекти в трансформаторите, открити по време на измерване



Фиг. 3.6 Дефекти в СР на трансформаторите и моторните им задвижвания (МЗ) (сумата на процентите е > 100%, защото едновременно са наблюдавани повече от един дефект).

От всичките 541 трансформатора в експлоатацията на 210 се констатира нива на разтворени газове в маслото, показващи някакво развитие на дефекти (най-често ефектът е от топлинен характер).

Подстанция „Чернозем“ 110/20 kV захранва голям брой въздушни и въздушно кабелни електропроводи на 20 kV, възлови станции и

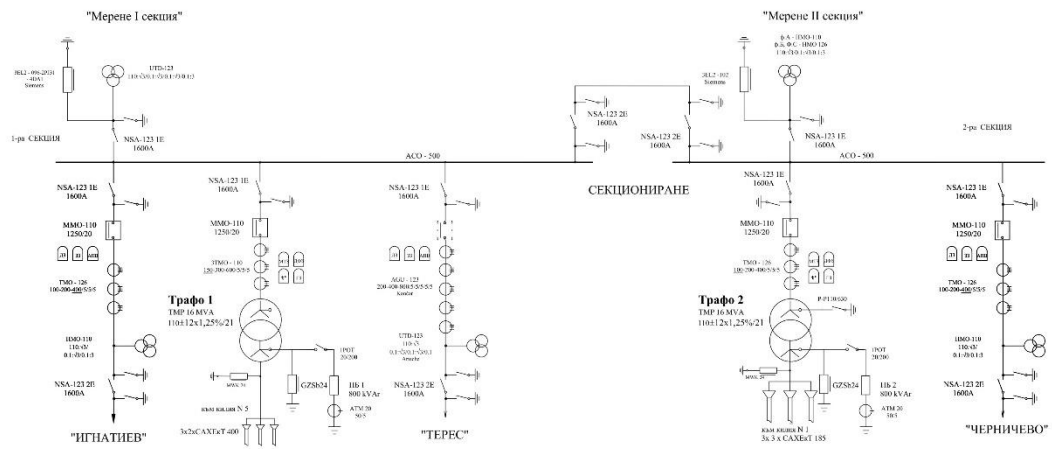
трафопостове в централната част на България в Пловдивския електроенергиен регион. Вследствие на активните атмосферни явления в района (вятър, снеговалеж, мълнии и др.) се наблюдават голям брой повреди и смущения в електроснабдяването, респективно автоматични и ръчни изключения на изводите 20 kV.

На Фиг. 3.13 и 3.14 са представени еднолинейни схеми на ОРУ 110 kV и ЗРУ 20 kV, като за десетте въздушни електропровода на 20 kV с обща дължина около 180 км, през 2018 г. са регистрирани 140 автоматични изключения. При възприета средно за страната норма около 20 изключения на година за 100 км дължина на въздушната мрежа, се вижда, че този брой е 3,88 пъти по-голям от нормативно възприетия. Това е сериозно основание да се потърсят начини и възможности за овладяване на възникналите пренапрежения и повишаване на надеждността в подстанцията.

Аварийните състояния от пренапрежение са съществен проблем в експлоатацията на ЕСС. Според причините за възникване пренапреженията са външни и вътрешни. Външните пренапрежения се причиняват от удари на мълнии върху тоководещите елементи или тяхната арматура. Причина за вътрешните пренапрежения са различни комутации в мрежата, планови и аварийни превключвания, земни к.с. изместване на неутралата, възникване на резонансни явления и др.

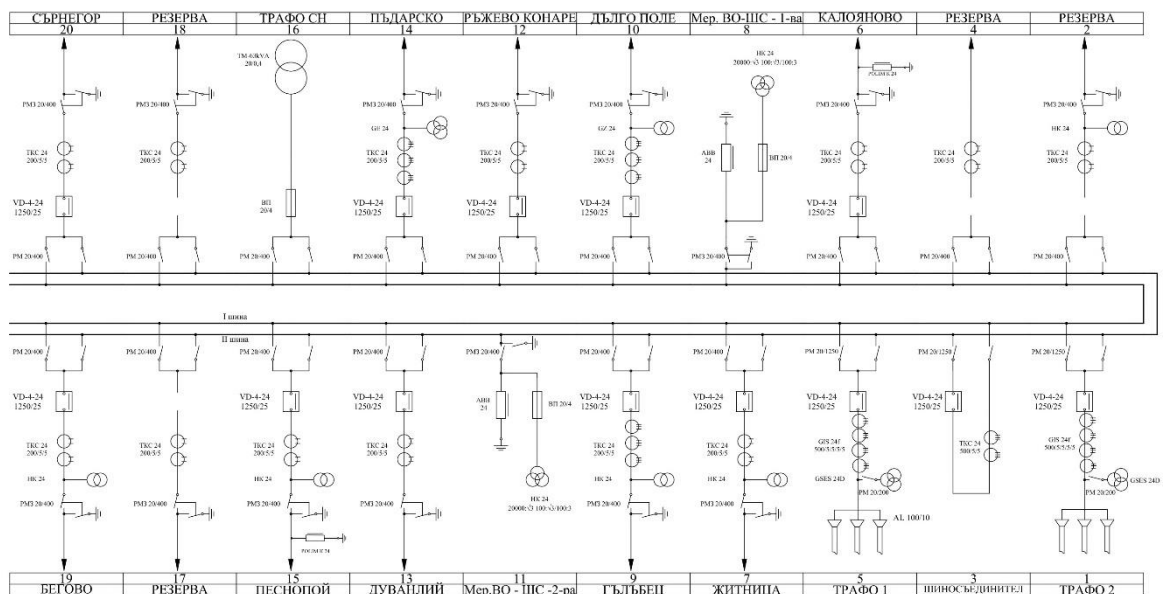
Възникването на мълниите се причинява от облаците наелектризирани с положителни (в горната част) и отрицателни (в долната част на 1-2 км от Земята) заряди и при напрегнатост на полето над критичната (около 300 kV/км), към земната повърхност се образува „стример“, който се движи със скорост около 10^4 км/с. Той се захранва със заряди от облака в долната му част, след надвишаване на критичната напрегнатост, се образува втори стример. В следствие това се повтаря многократно и се образува т.н. „лидер“, представлява периодично възникващи стримери в рамките на по-малко от секунда. Потенциала на стъпаловидния лидер е около 50 MV и когато той наближи обект от земната повърхност и потенциала му е около 500 KV/M, от обект се оформя насрещен стример [17, 18, 51, 52].

ОРУ - 110 kV



Фиг.3.13 Еднолинейна схема на ОРУ 110 kV на подстанция „Чернозем“.

ЗРУ - 20 kV



Фиг.3.14 Еднолинейна схема на ЗРУ 20 kV на подстанция „Чернозем“.

ИЗВОДИ И РЕЗУЛТАТИ КЪМ ТРЕТА ГЛАВА НА ДИСЕРТАЦИОННАТА РАБОТА

1. В трета глава на дисертационната работа е проведено експериментално изследване на надеждността в условията на несиметрично и несинусоидално натоварване на енергетичните обекти. Направен е анализ на надеждността и аварийността на СТ, като е изследвано влиянието на режимните характеристики и качеството на ЕЕ върху експлоатационния ресурс на силовите трансформатори. Установено е, че при влошено качество на ЕЕ, живота на СТ намалява в границите 8,24-12,24 пъти, а загубите на мощността на празен ход и к.с. се увеличават значително.

2. Представени са прогнозни показатели на надеждността за девет отрасли на промишлеността, като са предложени възможности за тяхното подобряване. За отрасъла химическа и добивна промишленост подробно са маркирани интензивността на отказите и средната продължителност на аварийното състояние за основните елементи на силовото обзавеждане. Анализирани са основните причини за повреди, като е оценен приноса на влошеното качество на ЕЕ в микса на аварийните състояния.

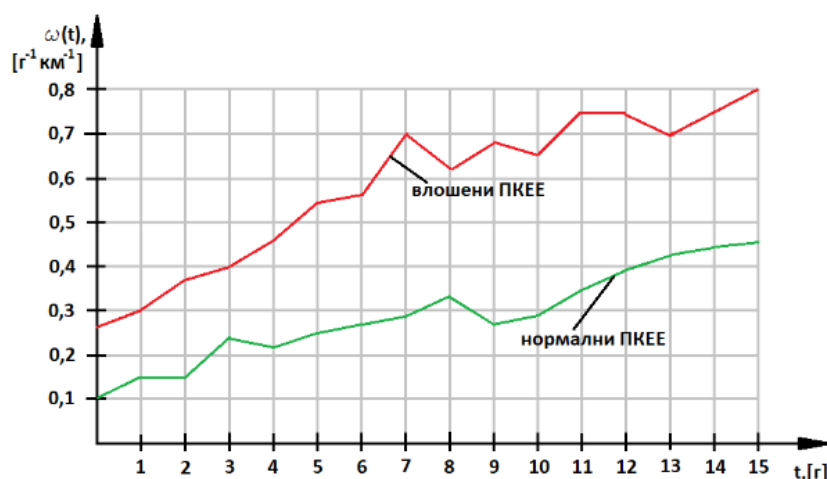
3. Проведено е изследване и е направен пълен количествен анализ на основните показатели на надеждността в две големи подстанции – подстанция „Чернозем” и подстанция „Титан Златна Панега Цимент”. Резултатите дават възможност да се направи генералния извод за влошено състояние на основните показатели на надеждността и за двата обекта. Причините за такъв обобщен извод трябва да се разглеждат както от схемотехнически аспект, така и като резултат на влошено състояние на енергетични показатели и ниско ниво на качеството на електрическата енергия, трансферирана и консумирана в тези обекти.

ЧЕТВЪРТА ГЛАВА

ЕКСПЕРТНО – ФАКТОРЕН ПОДХОД ЗА РАЦИОНАЛИЗИРАНЕ НАДЕЖДНОСТТА В ЕСС.

Проведено е изследване на надеждността на кабелните линии на 6, 10 и 20 kV в отрасъл Машиностроене за 15 годишен период. Броят на изследваните промишлени обекти в отрасъла е 18 със сумарна пълна мощност $S_{\Sigma}=568$ MVA, а общата дължина на изследваните кабелни линии е 183 км, развити като магистрали и радиали с общ брой приблизително 720. Регистрираните аварийни състояния за периода са 874 на брой, с обща продължителност на аварийния престой около 9600 часа. Недоставената електрическа енергия е около 220 000 MWh, а загубите на промишлените обекти в отрасъла от прекъсване на захранването се оценяват на около 92,5 млн. лева, което означава, че един недо отпуснат MWh електроенергия води до щета на промишления обект в размер на 420 лева.[29].

В изследването от генералната съвкупност са обособени две извадки за аварийните състояния - първото в обем от 138 аварии на кабелни линии на 6,10 и 20 kV с дължина около 22 км се отнася за промишлени обекти с влошени ПКЕЕ със стойности приблизително еднакви с тези от табл.4.1. Втората извадка е с обем от 143 аварии с дължина на кабелите около 35 км и е със сравнително нормални ПКЕЕ. На Фиг. 4.1 са предоставени кривите на изменение на $\omega(t)$ съответно за извадката с влошени и нормални ПКЕЕ.



Фиг. 4.1 Криви на изменение на $\omega(t)$ за влошени и нормални ПКЕЕ

Аварии в кабелните линии не се разглеждат диференцирано, а са анализирани в общ план – отнасят се за самия кабел, кабелните муфи, кабелните накрайници (заделка) и кабелната изолация. Изчислените стойности за ω са отнесени за 1 км дължина на кабелната линия. Анализът на представените в графичен вид резултати показва, че стойностите за $\omega(t)$ и при двете графики не се подчиняват на нито един от законите за разпределение на с.в., формулиран по-горе. Това се дължи на различните условия на експлоатация при твърде дългия период на изследване, с продължителност от 15 години. За двете криви съществува обща тенденция за увеличаване на $\omega(t)$ като при кривата с влошена ПКЕЕ тази тенденция е по-силно изразена и $\omega(t)$ е в границите 2 до 3 пъти по-голямо в сравнение с кривата с нормални ПКЕЕ. И при двете криви се наблюдават спадове, което се дължи на подмяна на аварирани кабели с нови или замяната им с такива с по-голямо сечение и по-голяма пропускателна способност, респективно по-голяма надеждност.

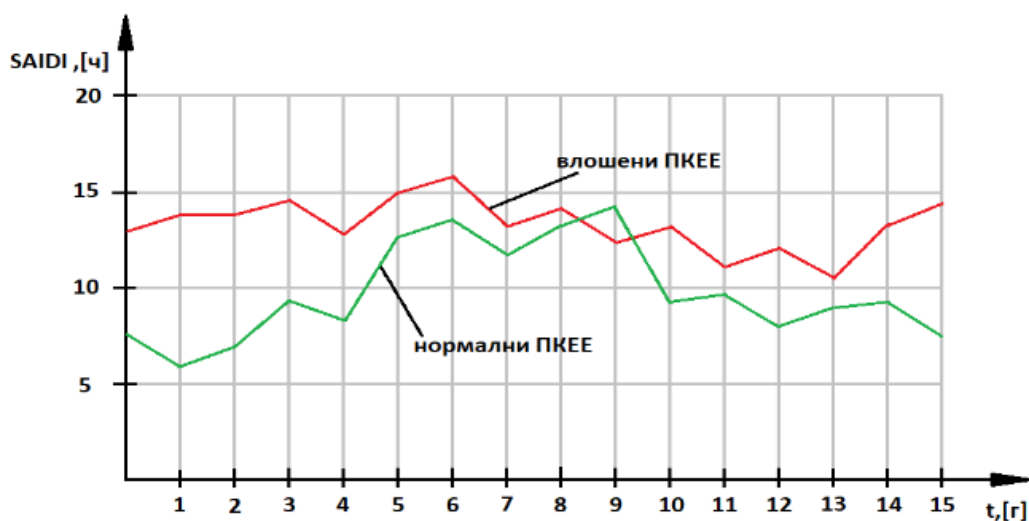
На фиг. 4.2 в съответствие с параграф 2.5 са представени графики на изменение на SAIFI за влошени и нормални ПКЕЕ. Сравнителният анализ на $\omega(t)$ и SAIFI показва, че съществуват общи тенденции за двете характеристики на надеждността [99, 72, 69].

Разликата между тях в теоретичен план и като получени резултати е, че при $\omega(t)$ изчисленията се правят, като се приема, че авариралите кабели не се подменят с нови, докато при SAIFI те се подменят с нови ($N_0 < N$, в съответствие с израз 1.3)



Фиг. 4.2 Криви на изменение на SAIFI за влошени и нормални ПКЕЕ

По аналогичен начин са направени изчисления и е представена графична интерпретация за показателя SAIDI за двете извадки на ПКЕЕ, показани на фиг. 4.3. От графиките се вижда, че доста често получените стойности за SAIDI, са по-високи от времетраенето на средната продължителност на прекъсванията, която е $9600 \text{ h} / 874 \text{ аварии} = 10,98$ часа за една авария. Това се дължи на факта, че двете извадки за включени значими аварийни състояния с по-голяма продължителност на възстановителния процес. Освен това средната продължителност на SAIDI за извадката с вложени ПКЕЕ е около 13 часа и е по-висока от средната продължителност на SAIDI за малката е нормални ПКЕЕ.



Фиг. 4.3 Криви на изменение на SAIDI за вложени и нормални ПКЕЕ

Това показва, че вложените ПКЕЕ има негативно отражение не само върху броя на отказите, но и върху сложността на аварийното състояние, респективно върху времето за възстановяване на аварията [96, 87, 56].

Проведените изследвания показват, че качеството на ЕЕ оказва влияние на надеждността на кабелните мрежи СН. Получените конкретни резултати дават основание да се направи изводът, че животът на кабелните мрежи, работещи в условията на вложени ПКЕЕ, се намалява около два пъти. Също така в резултат на претоварване и възникналите необратими фико-химически процеси, освен експлоатационният ресурс на кабелите, рязко се намалява тяхната надеждност и повишава вероятността за настъпване на аварийни състояния. Повишаването на токовото натоварване в резултат на възникване на пулсиращи и деформационни мощности води до съществено повишаване на активните загуби. Отчитайки тези факти е необходимо сечението на кабелните мрежи, работещи в условията на несиметрични и нелинейни режими, да се преизчислява в съответствие с възникналото претоварване.

В параграф (2.4.3) беше показано, че за дълги кабелни линии, със значителен брой муфи, плътностната функция на разпределение на времето на аварийно състояние $t_{в\text{ ср}}$ и интензивността на отказите $\lambda(t)$ се подчиняват на закона на Вейбул (което не се потвърди в разглеждания случай за $\omega(t)$) в съответствие с изрази (2.56) и (2.57):

$$\begin{aligned} f(t) &= \alpha \cdot c \cdot t^{\alpha-1} \cdot e^{-ct^2}; \\ \lambda(t) &= \alpha \cdot c \cdot t^{\alpha-1} \end{aligned} \quad (4.1)$$

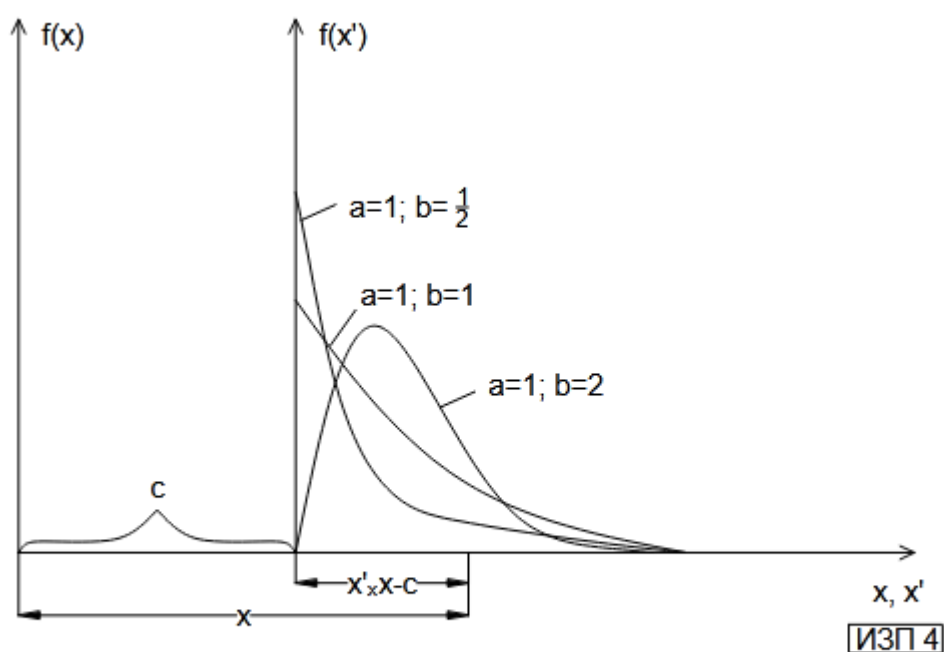
Българският държавен стандарт регламентира методика за определяне законите на разпределение на случайната величина [47]. При закона на Вейбул, плътността на разпределение по аналогия с (4.1) се задава с изрази [69, 90, 92].

$$f(x) = \frac{b}{a} \left(\frac{x-c}{a} \right)^{b-1} \cdot e^{-\left(\frac{x-c}{a} \right)^b} \quad (4.2)$$

където: x – разглежданата случайна величина;

a и b са параметри, които оказват влияние върху формата на кривата на разпределение;

c – параметър, който определя изместването на кривата на разпределение спрямо началото на координатната система, без да влияе върху нейната форма .



Фиг. 4.4 Разпределение по закона на Вейбул

При $b = 1$ разпределението на Вейбул се превръща в експоненциално разпределение, а при $b = 2$ в разпределение на Релей (Фиг. 4.4, Фиг. 2.13 и Фиг. 2.14). Ако вместо случайната величина x се разглежда случайната величина $x' = x - c$, тогава в плътността крива ще участват само параметрите a и b .

Вероятността $P(x_1 \leq x \leq x_2)$ за попадане на с. в. x в даден интервал $(x_1 - x_2)$ се пресмята по формулата:

$$P(x_1 \leq x \leq x_2) = e^{-\left(\frac{x_1-c}{a}\right)^b} - e^{-\left(\frac{x_2-c}{a}\right)^b} \quad (4.3)$$

В проведеното изследване от генералната съвкупност, което е 874 аварии за изследвания период е направена извадка $n = 118$ аварийни състояния, който по експертна оценка на специалистите, се дължат изцяло на влошени ПКЕЕ, без участие на други фактори, или с пренебрежително ниско такова. Общата продължителност на аварийното състояние е 308 часа. Извадката за средното време на аварийното състояние $t_{ср}$ (средно време на възстановяване) е разделено в 10 класа (емпиричното им разпределение е показано в таблица 4.1), като за периметъра c е прието най-малката стойност за $t_{ср} = 39$ часа. Тъй като разпределението на Вейбул е дефинирано в интервала $(39 - \infty)$ за лява граница на първия клас се приема $t_{ср} = 39$ часа., а аз дясна граница на последния клас $-\infty$. Абсолютните емпирични честоти ν_i на случайната величина $t_{ср}$ са представени в третата колонка на табл. 4.1, каро сумата естествено е 118 ч.

$$P = (t_{ср i-1}) = e^{-\left(\frac{t_{ср i-1}-c}{a}\right)^b} ; P_i = P(t_{ср i-1}) - P(t_{ср i})$$

Таблица 4.1 Емпирични (v_i) и теоретични (v_{Ti}) честоти по Вейбул

Клас № i	Граница на класа		Абсолютна емпирична честота v_i	$\frac{t_{\text{вср}i} - c}{a}$	$P = (t_{\text{вср}i-1}) = e^{-\left(\frac{t_{\text{вср}i-1}-c}{a}\right)^b}$	$P_i = P(t_{\text{вср}i-1}) - P(t_{\text{вср}i})$	$v_{Ti} = n \cdot P_i$
	$t_{\text{вср}i-1}$	$t_{\text{вср}i}$					
1	39-70		20	0	1,000	0,451	18,12
2	70-100		25	0,298	0,849	0,219	28,5
3	100-130		19	0,586	0,636	0,200	24,60
4	130-160		18	0,879	0,460	0,100	19,20
5	160-190		17	1,172	0,270	0,110	18,20
6	190-220		8	1,465	0,160	0,060	7,20
7	220-250		6	1,758	0,100	0,047	5,61
8	250-280		2	2,051	0,053	0,026	3,12
9	280-308		2	2,344	0,027	0,013	1,56
10	308-∞		1	2,642	0,014	0,014	1,68

За определяне на параметрите a и b е необходимо да се изчислят математическото очакване (средна стойност) $[M t_{\text{вср}}]$ и средно квадратичното отклонение $G[t_{\text{вср}}]$ на $t_{\text{вср}}$ по следния начин (всеки клас се представя със своята среда):

$$[M t_{\text{вср}}] = \overline{t_{\text{вср}}} = \frac{\sum_{i=1}^{10} t_{\text{вср}i}}{n} = \frac{55,5 \cdot 20 + 85 \cdot 25 + 115 \cdot 19 + \dots + 323 \cdot 2}{118} = 132,2$$

$$G[t_{\text{вср}}] = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{10} (\overline{t_{\text{вср}}} - t_{\text{вср}i})^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{(55,5-132,2)^2 + (85-132,2)^2 + \dots + (323-132,2)^2}{117}} = 63,6$$

В съответствие с методиката в стандарта [47] се изчислява отношението C_B/K_B по изрази:

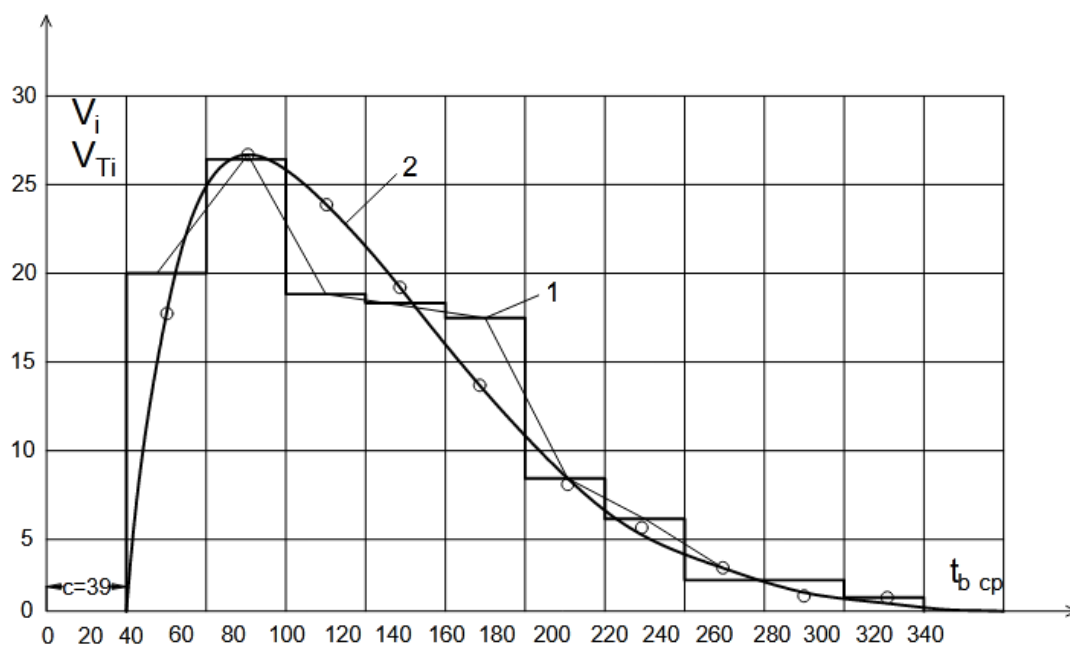
$$C_B/K_B = \frac{G[t_{\text{вср}}]}{\overline{t_{\text{вср}}} - c} = \frac{63,62}{132,2-39} = 0,683$$

По стандартна таблица се определя стойността на b : $b \approx 1,45$, а също и стойността на K_B : $K_B \approx 0,906$. Следователно $a = \frac{\overline{t_{\text{вср}}} - c}{K_B} = \frac{132,2-39}{0,906} = 102,86$.

Теоретичната абсолютна честота v_{Ti} за i - а клас се пресмята по формулата:

$$v_{Ti} = n \left[e^{-\left(\frac{t_{\epsilon cp i-1}-c}{a}\right)^b} - e^{-\left(\frac{t_{\epsilon cp i}-c}{a}\right)^b} \right] = n \left[P(t_{\epsilon cp i-1}) - P(t_{\epsilon cp i}) \right] = n P_i \quad (4.4)$$

В табл. 4.1 са представени определените по 4.4 стойности за v_{Ti} . На фиг. 4. 5 са дадени графики на емпиричното и теоретичното разпределение по закона на Вейбул за средното време на възстановяване $t_{\epsilon cp}$.



Фиг. 4.5 Емпирично (1) и теоретично разпределение за $t_{\epsilon cp}$

В съответствие с израза (4.3), може да се определи вероятността за попадане на с.в. $t_{\epsilon cp}$ в диапазона на $t_{\epsilon cp} = (200-300)$ часа т.е. искаме да определим каква е вероятността аварийната ситуация да е със сравнително голяма продължителност в интервала (200-300) часа. За целта в (4.3) заместваем определените по-горе стойности за параметрите a , b и c и съответните граници на интервала $t_{\epsilon cp1} = 200$ ч. и $t_{\epsilon cp2} = 300$ ч.

$$P(200 \leq t_{\epsilon cp} \leq 300) = e^{-\left(\frac{200-39}{102,86}\right)^{1,45}} - e^{-\left(\frac{300-39}{102,86}\right)^{1,45}} = 0,183 - 0,0259 = 0,157$$

Следователно вероятността за настъпване на аварийна ситуация в изследваните кабелни линии с такава значима продължителност на аварията е по-голяма от 15% , което е доста висока стойност и е необходимо да се вземат необходимите мерки за ограничаването ѝ.

Извършено е определяне на капацитивните токове (токовете на земно съединение) в мрежата 20 kV на подстанцията по теоретичен и практичен начин. Изчисляването на тока по земно съединение се извършва по формулата:

$$I_{3c} = I_c = j3\omega cU \quad (4.5)$$

където: потенциално съответната фаза, определен в съответствие с методиката в [17]; c – капацитет на въздушната и кабелната линия с права и нулева последователност определен от материали на фирмата производител.

Осреднени относителни стойности за капацитивните токове за някои типове въздушни линии и кабели са дадени в табл. 4.2.

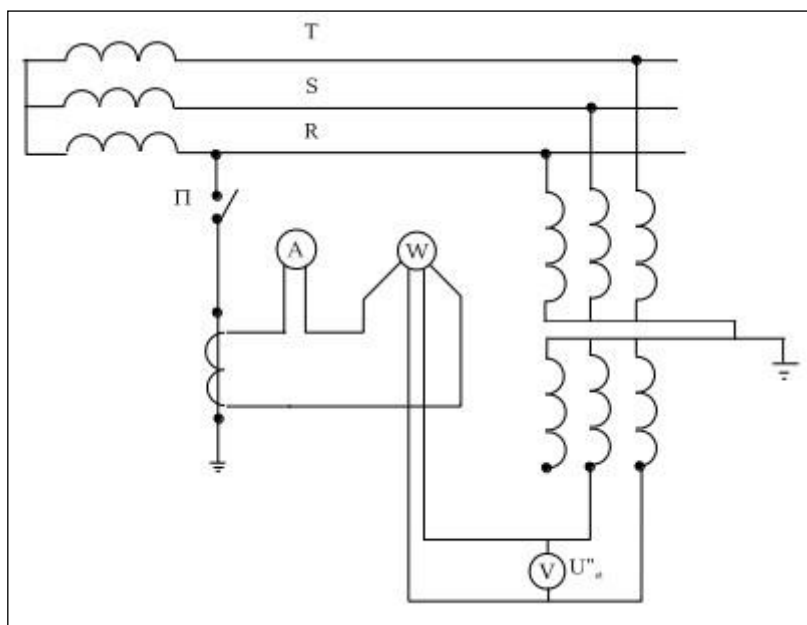
Таблица 4.2 Капацитивните токове I_c за 1 км дължина

Въздушна линия		Кабелна линия	
Тип	I_c A/км	Тип	I_c A/км
АС 35	0,063	САПЕКТ 3X50 (АОСБ)	2,1
АС 50	0,062	САПЕКТ 3X95 (АОСБ)	3,1
АС 70	0,061	САПЕКТ 3X120 (АОСБ)	3,4
АС 95	0,059	САПЕКТ 3X185 (АОСБ)	3,9

Измерването на капацитивните токове е направено при изкуствено земно съединение по схемата от фиг. 4.6. Измервания ток освен капацитивна съставляща, съдържа и активна съставляща, която е само няколко процента от капацитивната. При наличие на висши хармоници на тока в мрежата капацитивната проводимост нараства пропорционално на номера на хармоника. Поради това в такива случаи се използват данните от включеният в схемата на линейно напрежение ватметър. По този начин анулират кратните на три хармоници. В табл. 4.3 са

представени изчисленията и измерени стойности на тока на земно съединение за различните изводи и типоразмери за въздушни и кабелни линии (сухите кабели са означени с „С”, а маслените с „А” .

Сравнението на резултатите от теоретичните изчисления и тези от измерването показва много добра сходимост, като разликите не надвишават 15%.



Фиг. 4.6 Схема за измерване на капацитивни токове

Табл. 4.3 Таблица за дължините и типоразмера на проводниците

№	Наименование на извода	Електропроводи [М]			Кабели [М]				Изчислен ток на земно съединение [А]		
		АС-35	АС- 50	АС-95	С95	С120	А50	А95	кабел	Въздушна линия	Общо [км]
1	Житница		24945			840			2,69	1,55	4,24
2	Дуванлий	3020	4270	1760						0,56	0,56
3	Гълъбец			11138						0,67	0,67
4	Песнопой	2952	11250							0,89	0,89
5	Бегово	4716	5950	9270						1,22	1,22
6	Сърнегор	17790	4520	9270						1,96	1,96
7	Пъдарско	900	10400							0,70	0,70
8	Ръжево конаре	8260	13960			85	1917		5,08	1,39	6,47
9	Дълго поле	5170	12400	7936	550		490		2,93	1,57	4,5
10	Калояново		11458	8086	1570		1800		9,37	1,195	10,56
	Общо	39,856	87,903	47,460	2,120	0,925	4,207		20,07	10,81	31,77

Получените стойности на токовете на земно съединение по теоретичен и практичен път, показва необходимостта от монтиране на земни защиты на всички изводи 20 kV в подстанция „Чернозем”.

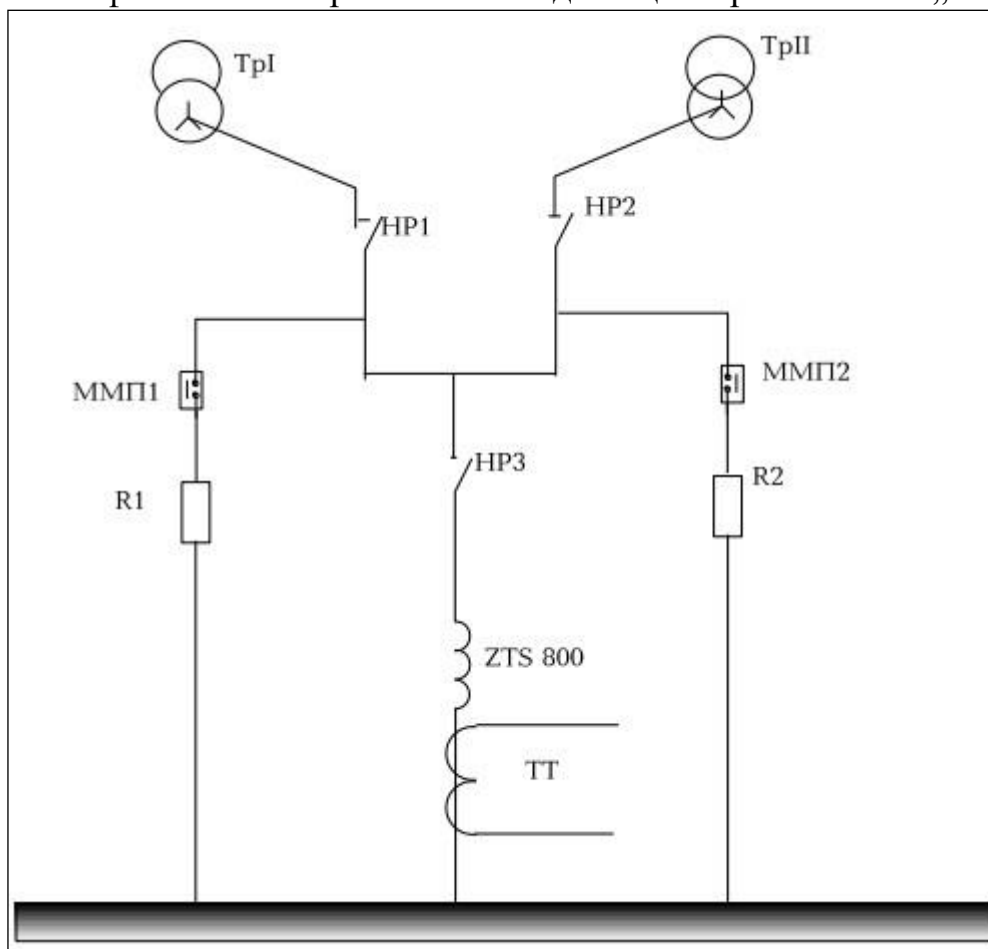
В компенсирани мрежи неутралата на трансформаторите е заземена през голямо индуктивно съпротивление (дъгогасителна бобина). Поради това при земно съединение на една фаза от мрежата освен капацитивните токове протича и индуктивен ток от дъгогасителната бобина към повредата. Този ток е дефазирован спрямо индуктивния на π rad в повредения електропровод и мястото на земно съединение протича разликата от двата тока. При точна компенсация тази разлика е нула. При над компенсация сумарният ток е малък и не е достатъчен да задейства токовата защита. По тази причина в компенсирани радиални мрежи не може да се използва токовата защита на пълния ток с нулева последователност. За задействане на релейната защита тук се използват активни съставки, хармонични съставки на тока, токове с непромишлена честота, токове в преходния процес на земното съединение и др.

Селективна земна защита може да се осъществи, ако се използва изкуствено създадената активна съставка на тока [1]. За целта паралелно на дъгогасителната бобина се поставя резистор с голямо активно съпротивление. Нормално той е изключен. При земно съединение специална автоматика го включва за определено време. В тока се получава активна съставка. В радиална мрежа, каквато е на подстанция „Чернозем”, тя преминава през трансформатора, повреденият електропровод и земното съединение. На електропроводите се оставят и токови релета, които реагират само на активната съставка на тока, получена от съответен филтър. При земно съединение реагира само защитата на повредения електропровод и го изключва селективно.

При земно съединение в компенсирани мрежи наред с капацитивните и индуктивни токове с основна честота, в тока се появяват и висши хармонични съставки. Те протичат в мрежата по същия начин както капацитивните токове и могат да се използват като въздействаща величина за релейната защита. Тя реагира или на големината на сумата им, или на тяхната посока. Установено е, че в повредения електропровод сумата на хармоничните съставки е най-голяма [1]. Затова се разработват защиты, които сравняват сумите на хармоничните съставки в различните електропроводи и реагират на най-голямата. Всички защиты селективно изключват повредения участък.

За да бъдат ограничени пренапреженията при поява на „земя” по който да е въздушен извод и намаляване броя на прерасналите еднофазни

земни съединения в междуфазни през „земя”, се препоръчва използване на схема от фиг. 4.7 за свързване на звездния център на СТ към „земя”.



Фиг. 4.7 Схема на за свързване на звездния център на трансформаторите към земя

Така показаната схема работи по следния начин: ножовите разединители 1,0'; 2, 0' се превключват тогава, когато се сменя режима на работа на подстанция „Чернозем” - размяна на работните трансформатори така, че трансформатора, който работи в момента, звездния му център да бъде включен през петерсоновата бобина с плавно регулиране ZTS 800. ММП - 1,2 работят със закъснение 0.5" при поява на „земя” по който да е извод 20 kV. При поява на земно съединение по който да е извод 20 kV могат да се получат следните режими на работа:

1. Появява се земно съединение по който да е от изводите 20 kV Петерсоновата бобина изгасява дъгата в мястото на земно съединение за време под 0,5". Земното съединение е било преходно и системата продължава да работи в нормален режим.

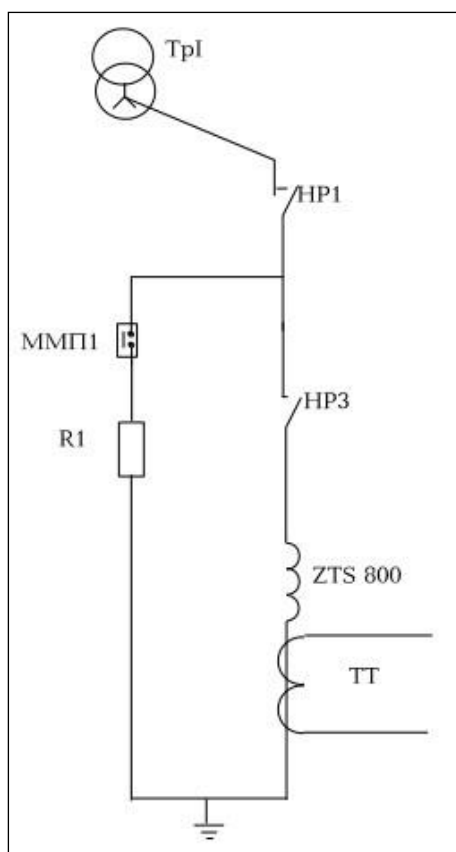
2. Появява се земно съединение по който да е извод 20 kV. Петерсоновата бобина не успява да изгаси дъгата за 0,5" или пък земното съединение е „метално”. След 0,5" се включват съпротивления R1 или R2 паралелно на петерсоновата бобина от ММП-1 или ММП-2. По този

начин към тока с нулева последователност, който тече през земната защита и не може да я задейства (системата е компенсирана и тока е много малък) се вкарва изкуствено активна съставляща на тока през земното-съединение и земната релейна защита задейства селективно и изключва извода по който се е появило земното съединение. След 1" се задейства АПВ и ако земното съединение е било „преходно” извода се включва, а ако е било „метално” се изключва само извода, по който е земното съединение.

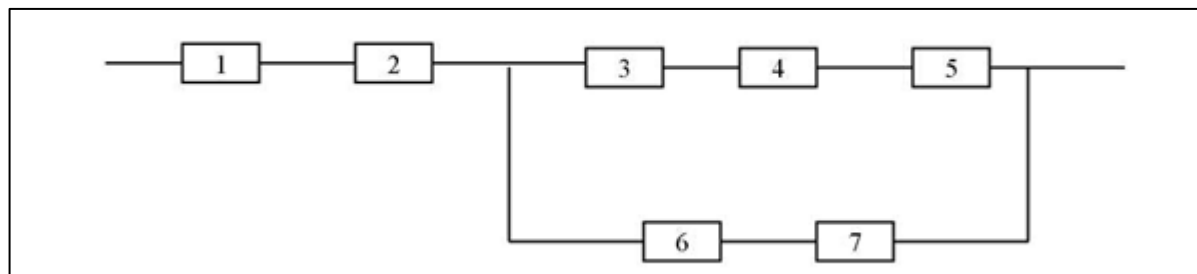
С реализирането на тази схема и земната защита в подстанция „Чернозем” ще бъдат избегнати:

- пренапреженията от „метално” земно съединение и преходна дъга, продължили над 0,5", които атакуват изолацията на съоръженията по електропроводите 20 kV;
- прерастванията на еднофазни земни съединения в междуфазни през „земя”. Както е видно по статистиката на аварийността повечето от автоматичните изключвания, при които имаме констатирана повреда са при междуфазни къси съединения, които явно са прераснали от еднофазни земни съединения и тъй като подстанция „Чернозем” не е снабдена със земна защита, извода по който има земно съединение не е изключен селективно.
- ще се намали времето за локализиране на повредата. При сегашното положение с неселективна земна контрола, при поява на земно съединение се изключват ръчно последователно изводите 20 kV. По този начин се смущават консуматорите и безпричинно остават без напрежение за определен период от време.
- едната от петерсоновите бобини ще премине в студен резерв.

По същество схемата на фиг 4.8 представлява смесено съединение от седем елемента. Тя може да бъде представена във вида показан на фигура 4.9 с показателите на надеждността от табл. 4.4. [11,58,19].



Фиг. 4.8 Схема на свързване на звездния център на един трансформатор към земя



Фиг. 4.9 Блоков вид на схемата от Фиг.4. 8

N	Наименование	λ	t_{BCR}
		1/год	h
1	Трансформатор	0.015	100
2	Ножов разединител	0.002	3
3	Ножов разединител	0.002	3
4	Петерсонова бобина	0.008	80
5	Токов трансформатор	0.004	4
6	Маломаслен прекъсвач	0.01	20
7	Активно съпротивление	0.008	6

Табл. 4.4 Показатели на надеждността

В съответствие с параграф 2.2 за последователно, паралелно и смесено съединение от елементите се определят следните показатели:

- среден брой на отказите за 1 година:

$$\lambda_{(3,4,5)} = \lambda_3 + \lambda_4 + \lambda_5 = 0,002 + 0,008 + 0,004 = 0,014 \text{ [Г}^{-1}\text{]}$$

- средно време за възстановяване:

$$t_{в\text{ ср}}(3,4,5) = \frac{\lambda_3 \cdot t_{в\text{ ср}3} + \lambda_4 \cdot t_{в\text{ ср}4} + \lambda_5 \cdot t_{в\text{ ср}5}}{\lambda_3 + \lambda_4 + \lambda_5} =$$

$$= \frac{0,02 \cdot 3 + 0,008 \cdot 80 + 0,004 \cdot 4}{0,002 + 0,008 + 0,004} = 47,28 \text{ [h]}$$

- средно време за безотказна работа:

$$t_p\text{ ср} = \lambda_{(3,4,5)}^{-1} = 0,014^{-1} = 71,43 \text{ [Г.]}$$

- вероятност за безотказна работа и за авария за 1 година R(t) и Q(t)

$$R(t) = l^{-(\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3)} = l^{-0,014} = 0,986$$

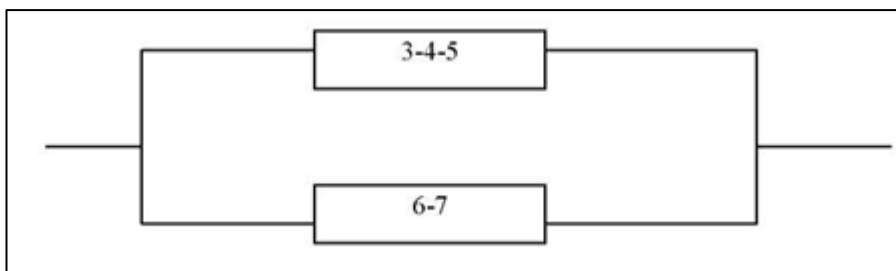
$$Q(t) = 1 - R(t) = 0,014$$

В табл. 4.5 са представени показателите на надеждността за елементите 6, 7 и 1, 2.

Табл. 4.5 Показателите на надеждността за елементите 1, 2 и 6, 7

Елементи	$\lambda \text{ [Г}^{-1}\text{]}$	$t_{в\text{ ср}} \text{ [h]}$	$t_p \text{ [Г.]}$	R(t)	Q(t)
6 и 7	0,01	13,77	55,5	0,982	0,018
1 и 2	0,017	88,58	58,82	0,983	0,017

Определянето на показателите на надеждността за елементи (3, 4, 5) и (6,7) в съответствие с фиг. 4.10 е представено в табл. 4.6, като са използвани формулите (пакет I, II).



Фиг. 4.10 Блоков вид на елементите от схемата от Фиг.4. 9

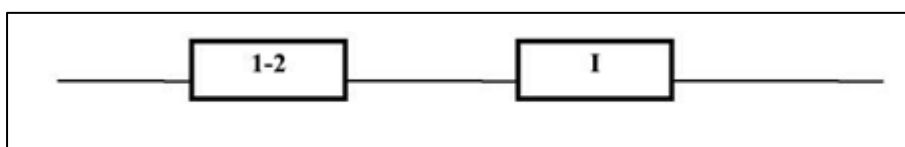
$$\lambda_I = \lambda_{(3,4,5)} \cdot \lambda_{(6,7)} \cdot (t_{в\text{ ср } (3,4,5)} + t_{в\text{ ср } (6,7)}); \quad t_{в\text{ ср } I} = \frac{t_{в\text{ ср } (3,4,5)} \cdot t_{в\text{ ср } (6,7)}}{t_{в\text{ ср } (3,4,5)} + t_{в\text{ ср } (6,7)}}$$

$$t_{pI} = \frac{1}{\lambda_{(3,4,5)}} + \frac{1}{\lambda_{(6,7)}} + \frac{1}{\lambda_{(3,4,5)} + \lambda_{(6,7)}}; \quad R(t)_I = e^{-\lambda_{(3,4,5)} t} + e^{-\lambda_{(6,7)} t}; \quad Q(t) = 1 - R(t)$$

Таблица 4.6

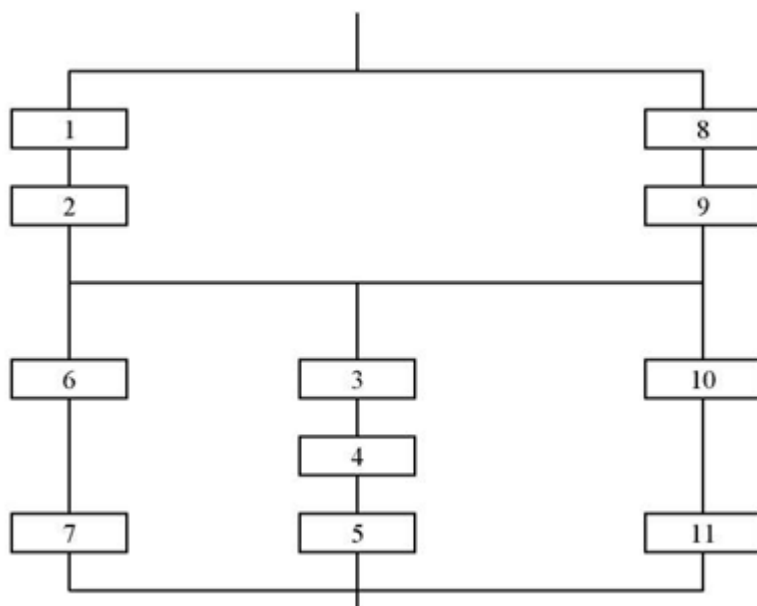
Елементи	λ_I [г ⁻¹]	$t_{в\text{ ср } I}$ [h]	t_{pI} [г.]	$R_I(t)$	$Q_I(t)$
Пакет I	$3,908 \cdot 10^{-8}$	30,82	86,82	0,99975	0,000248
	λ_{II} [г ⁻¹]	$t_{в\text{ ср } II}$ [h]	t_{pII} [г.]	$R_{II}(t)$	$Q_{II}(t)$
Пакет II (1, 2 + I)	0,0170039	88,56	58,82	0,9831	0,0168

Надеждността на пакет II , конфигурирана от пакет I и елементи 1, 2 (фиг. 4, 6) е представена в табл. 4. 6.



Фиг. 4.11 Блоков вид на елементите от схемата на фиг. 4.9.

Режим на съвместна работа на двата трансформатора (фиг. 4.12) във връзка с показатели на надеждността от табл. 4.7 [11, 58, 19].



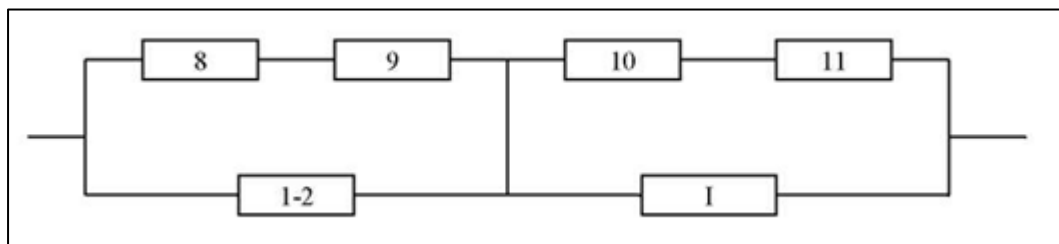
Фиг. 4.12 Блоков вид на елементите от схемата на фиг. 4.7.

Табл. 4.12 Показатели на надеждността

№	Наименование	λ	t_{BCR}
		1/год	h
1	Трансформатор	0,015	100
2	Ножов разединител	0,002	3
3	Ножов разединител	0,002	3
4	Петерсонова бобина	0,008	80
5	Токов трансформатор	0,004	4
6	Маломаслен прекъсвач	0,01	20
7	Активно съпротивление	0,008	6
8	Трансформатор	0,015	100
9	Ножов разединител	0,002	3
10	Маломаслен прекъсвач	0,01	20
11	Активно съпротивление	0,008	6

Тъй като количествената оценка на надеждността на елементите 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 от фиг. 4.7 бе направено, то опростяваме схемата до

следната блокова схема, показана на фиг. 4. 13, като изчислените показатели са представени в табл. 4.13.



Фиг. 4.13 Опростен блоков вид на схемата по фиг. 4.7.

Табл. 4.13 Показатели на надеждността за фиг. 4.12

Елементи	λ [г ⁻¹]	$t_{в\text{ ср}}$ [h]	t_p [г.]	R(t)	Q(t)
8 и 9	0,017				
10 и 11	0,018				
	λ_{III} [г ⁻¹]	$t_{в\text{ ср}III}$ [h]	t_{pIII} [г.]	$R_{III}(t)$	$Q_{III}(t)$
III пакет 1 и 2 8 и 9	$5,844 \cdot 10^{-6}$	44,29	88,23	0,99971	0,000284
	λ_{IV} [г ⁻¹]	$t_{в\text{ ср}IV}$ [h]	t_{pIV} [г.]	$R_{IV}(t)$	$Q_{IV}(t)$
IV пакет 10 и 11 I	$3,58 \cdot 10^{-6}$	9,517	255940	0,9999	$6,971 \cdot 10^{-6}$
	λ_v [г ⁻¹]	$t_{в\text{ ср}V}$ [h]	t_{pV} [г.]	$R_v(t)$	$Q_v(t)$
V пакет III и IV послед.	$5,844 \cdot 10^{-6}$	4429	171115	0,9999	$584 \cdot 10^{-6}$

В параграф 3.2.1 бе изчислена надеждността на съществуващото схемно решение за подстанция „Чернозем” като получената стойност за работа на Тр. I с дъгогасителна бобина ZTS-1 е: $Q(t) = 0,029$, а при съвместна работа на двата трансформатора: $Q(t) = 8.17 \cdot 10^{-4}$.

Сравнителния анализ показва, че при новото схемно решение се получават по-добри резултати на надеждност на ел. захранването и за двата случая.

Относителната стойност на повишението на вероятността за отказ за една година за двата случая са съответно:

$$\Delta Q'(t) = \frac{0,029 - 0,0168}{0,029} \cdot 100 = 42,06\%$$

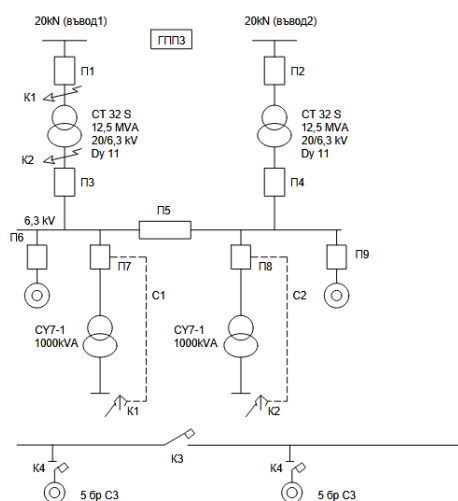
$$\Delta Q''(t) = \frac{8,17 \cdot 10^{-4} - 5,84 \cdot 10^{-6}}{8,17 \cdot 10^{-4}} \cdot 100 = 99,28\%$$

където $\Delta Q'(t)$ е относителна стойност на повишение на вероятността за отказ за работа на Тр.1 с дъгогасителна бобина ZTS-1,

а $\Delta Q''(t)$ е относителната стойност на повишение на вероятността за отказ за съвместна работа на двата трансформатора.

4.3. Възможности за подобряване надеждността при експлоатация на СД в химическата промишленост чрез рационализиране на схемотехническите постановки.

Масовото използване на СД в химическата промишленост налага търсене на режимни и схемотехнически постановки, осигуряващи висока устойчивост и надеждност при тяхната експлоатация. Кратковременно прекъсване на електроснабдяването, вследствие на различни к.с., може да бъде причина СД, да излезе от синхронизъм и да се предизвикат смущения от технологичен характер. За подобряване надеждността и устойчивостта на СД, се използват различни схемни решения с АВР и др. средства за автоматично управление. [97,96,5,55].



фиг. 4.14 Фрагмент от ЕСС на ф. „Солвей соди”.

Голям промишлен обект с масово инсталирани СД на ф. „Солвей соди”, гр. Девня, фрагмент от ЕСС на която е показана на фиг. 4.14.

Фирмата произвежда лека и тежка калцинирана сода, сода бикарбонат, разсол, вар и други химически съединения. Захранването на фирмата се осъществява от ТЕЦ „Девен”, който е свързан с ЕЕС на страната посредством три въздушни електропровода на 110 kV - две линии идват от ГПП „Полимери” и една (Соди-Моряк) от ТЕЦ Варна. В ТЕЦ-а е изградена диспечерска система „SCADA POWER CC” на ф. Сименс, чрез която се контролира електроснабдяването на Солвей - Соди, в това число генератори, СТ и оперативни превключвания [35].

ЕСС на ф. „Солвей Соди” е изградена от едно ГРП №1, две ГПП (№2 и №3) и двадесет и пет ЦП. Силовите трансформатори в ГПП са 2x20 MVA и 2x12,5 MVA, а в ЦП са съответно 55 бр. x1000 kVA; 8 бр. x 1600 kVA и 5 бр. X 2000 kVA.

Поради ниските стойности на $\cos \varphi$, които варират в границите $\cos \varphi = 0,77 + 0,86$ [35, 80], се извършва компенсация на реактивните товари (КРТ) с помощта на кондензаторни батерии (КБ), а също и с помощта на 6 от осемте СД, захранени от ГППЗ на 6 kV и задвижващи помпи с високо налягане ПВН 1, 2, ... 6 (фиг. 4.14). СД са съоръжения с управляема тиристорна възбудителна система тип ТВЕ 320/75 Т-6 УХЛ4 с номинално напрежение и ток съответно $U_H = 59$ V; $I_H = 320$ A. Данните за СД, работещи с коефициент на натоварване $\beta = 0,3 - 0,7$ са следните: СДХ 15-39-10; $P_H = 1000$ kW; $Q_H = 511$ [kVAч]; $U_H = 6$ [kV]; $I_H = 113$ [A]; $\eta = 94,6$ [%]; $\cos \varphi = 0,9$; $n = 660$ [об./мин]; компенсираща способност $q = 455$ [%].

За група от N паралелно работещи еднотипни СД с еднакъв режим на работа и сумарна реактивна мощност Q, големината на сумарните загуби $\Delta P_{сд}$ се определят изразом [80, 53, 58];

$$\Delta P_{сд} = \frac{D_1}{Q_{H\text{ сд}}} \cdot Q + \frac{D_2}{Q_{H\text{ сд}} \cdot N} \cdot Q^2 \quad (4. 6)$$

където D_1 и D_2 [kW] — коефициенти, зависещи от техническите параметри на СД ($D_1 = 7,66$ kW, $D_2 = 5,38$ kW)

Ако до присъединяване на разглежданите СД с обща реактивна мощност Q, се е генерирала за К.Р.Т. реактивна мощност Q_0 , то тогава в съответствие с (4. 6) $\Delta P_{сд}$ се определя като разлика на общите загуби $\Delta P_{общо}$ определени от реактивната мощност $Q + Q_0$ и загубите ΔP_0 , определени от реактивната мощност Q_0 , т. е. [80, 49, 66, 75]:

$$\Delta P_{сд} = \Delta P_{общо} - \Delta P_0 =$$

$$= \left[\frac{D_1}{Q_{0\text{ сд}}} (Q + Q_0) + \frac{D_2}{Q_{H\cdot N}} (Q + Q_0)^2 \right] - \left(\frac{D_1}{Q_{H\text{ сд}}} \cdot Q_0 + \frac{D_2}{Q_{H\text{ сд}}^2 \cdot N} \cdot Q_0^2 \right)$$

или

$$\Delta P_{\text{сд}} = \frac{D_1}{Q_{H\text{ сд}}} \cdot Q + 2 \cdot \frac{D_2}{Q_{H\text{ сд}} \cdot N} \cdot Q_0 Q + \frac{D_2}{Q_{N\text{ сд}} \cdot N} \cdot Q_0^2 \quad (4.7)$$

Следователно, след присъединяване и използване на СД за К.Р.Т. възникват допълнителни загуби на активна мощност, които се определят като сума от три съставлящи – първата е пропорционална на Q , втората на $Q_0 \cdot Q$ и третата на Q^2 . Тези допълнителни загуби оказват съществено влияние върху експлоатацията на СД и се изисква да бъде извършена оценка на тази надеждност [10, 48, 49].

В представената на Фиг4.14. еднолинейна схема, силовите трансформатори 31 S и 32 S работят разделно, а СТ 7-1 и 7-2 са в паралел. Секционния прекъсвач П5 е съоръжен с двустранно АВР, което реагира на отпадане на напрежението в една от двете секции на 6,3 kV в ГППГ 3 [4,5,8,9].

Нарушаване на електроснабдяването може да имаме при настъпване на някои от следните аварийни състояния – трифазни, двуфазни и еднофазни К.С. с директно заземен звезден център, трифазно и двуфазно к.с. в силовите трансформатори или при нерегламентирано (лъжливо) изключване на прекъсвачите.

При традиционните схемотехнически решения. К.С. в т. K_1 или K_2 ще предизвика изключване на въвод 1 от прекъсвача П1, задействане на АВР и включване на прекъсвач П5, като в най-общия случай ще се наруши синхронизма на включените към първа секция на ГПП 3 три броя СД. При по-натоварените СД не се наблюдава процес на самопускане и те въобще не могат отново да влязат в синхронизъм. Това води до разстройване на технологичния процеси и съществените загуби на фирмата от непроизведена продукция.

Възможността СД да не изпаднат от синхронизъм може да се реализира чрез бързо отстраняване на смущаващото въздействие. Ако продължителността на прекъсване на електроснабдяването е в границите (0,12 - 0,2) секунди, двигателят запазва синхронната честота на въртене и не предизвиква нарушаване на технологичния процес [50, 51, 52].

В конкретния случай се използва бързо действащо АВР, което обезпечава, при възникнало трисово к. с. в т. K_1 или K_2 , превключване на работната секция на 6,3 kV към резервния източник за време по-малко от 0,2 сек. За целта секционния прекъсвач П5 има собствено време на включване в границите (0,05-0,07) сек.

АВР се задейства с помощта на телеуправление от диференциалната защита на шинната система, към която е включен

прекъсвач П1, който няма времезадръжка. При неизползване на телеуправление, АВР се активира от диференциалната защита на СТ31S или газовата защита на трансформатора, а при лъжливо сработване – от защитата на прекъсвач ПЗ.

При трифазно к.с. в т. К₂, напрежението на първа секция 6,3kV спада до нула. Контур, образуван от двата цехови трансформатора СТ 7- 1 и СТ 7 – 2 до т. К₂, може да се разглежда като делител на напрежение със средна точка шинната система 0,4kV. Следователно напрежението на шините ще бъде не по-малко от $0,5U_H \approx 200 \text{ V}$. Контактите К₁ – К₅ имат напрежение на изключване $U_{изкл.} \approx (0,25-0,4) U_H$ и дават възможност СД на НН да останат включени [50, 51].

След изключване на к.с. от прекъсвач П1 и преди АВР да включи секционния прекъсвач П5, синхронните двигатели към първа секция на 6,3kV се захранват от СТ 7 - 1 и СТ 7 – 2, като те работят претоварени около 5-6 пъти за период от време, по-малък от 0,2 сек., което е допустимо от гледна точка на електро-динамична устойчивост за СТ ($I^n = 15 I_H$).

При възникване на аварийна ситуация в паралелно работещи СТ 7 – 1 и СТ 7 – 2, с цел на нейното локализиране е въведено едновременно изключване на контактори К₁ и К₂ заедно с прекъсвачи П7 и П8. За целта са осъществени, комуникационни връзки С₁ и С₂, осигуряващи предаване на управляващи импулси по тези канали [10, 50].

ИЗВОДИ И РЕЗУЛТАТИ КЪМ ЧЕТВЪРТА ГЛАВА НА ДИСЕРТАЦИОННАТА РАБОТА

1. В четвърта глава на дисертационната работа е определено количествено влиянието на фактора „Качество на електрическата енергия” върху надеждността на електроснабдяването. Установено е, че живота на кабелните мрежи, работещи в условията на влошени ПКЕЕ, се намалява около два пъти. Освен повишаване на активните загуби на мощност, в резултат на намаляване на експлоатационния ресурс на кабелите от възникналите необратими физико химически процеси, рядко се намалява тяхната надеждност и вероятността за настъпване на аварийни състояния се повишава. Това е потвърдено при продължителни 15 годишни изследвания на показателите $\omega(t)$, SAIFI, SAIDI, регламентирани в стандарта EN50160.

2. За извадка от аварийни състояния на кабелни линии, предизвикани изцяло от влошени ПКЕЕ, е установено емпирично и теоретично разпределение на показателя средно време на възстановяване $t_{в\ ср}$, много близко до закона на Вейбул. Вероятността за висока продължителност на аварийното състояние в диапазона (200-300) часа е по-голяма от 15%, от която следва извода за вземане на адекватни мерки за тяхното ограничаване.

3. Във връзка с влошените показатели на надеждността на подстанция „Чернозем” е предложено подобро схемно решение за свързване на звездния център на СТ към „земя”. Сравнителният анализ показва значително повишаване на надеждността при новото схемно решение в сравнение със съществуващото, като относителната стойност за понижаване на вероятността за отказ за една година е в границите (42 – 99)%.

4. За подобряване на надеждността и устойчивостта на синхронните двигатели в химическата промишленост е предложено подобро схемно решение с бързодействащо АВР, което осигурява по-високи показатели за безаварийност и отпадане на захранването в сравнение с класическите схемни решения.

ОСНОВНИ ИЗВОДИ И РЕЗУЛТАТИ КЪМ ДИСЕРТАЦИОННАТА РАБОТА

1. Направен е широк, всеобхватен и задълбочен литературен обзор върху основните понятия, свойства, събития влияещи фактори и изисквания към надеждността на електроснабдяването. Анализирани са основни показатели и зависимости, свързани с надеждността на електроснабдяването, както и допълнителни показатели на надеждността систематизирани тематично и адаптирани към провеждане на експериментални изследвания. Проведен е сравнителен анализ на методите за определяне на загубите на промишлените обекти от прекъсване на електроснабдяването и е препоръчан за използване най-обоснования и адекватен метод. Констатирано е, че съществуващите методики за оценка на надеждността в електроснабдяването не отчитат режимни параметри, динамиката на процесите и качеството на ЕЕ, което е съществено основание за провеждане на научно обоснован изследователски процес в тази насока.

2. Синтезирани са теоретични постановки за оценка на надеждността на ЕСС и са съставени математически модели, даващи възможност да се проведе сравнителен анализ на различни показатели и съоръжения като елементи от електроснабдяването. Обоснована е корелационната връзка на надеждността на електроснабдяването с режимните характеристики на СТ, респективно с качеството на ЕЕ. Анализирани са законите на разпределение на различни откази и е потвърдено, че времето на безотказна работа на изолацията на съоръженията се подчинява на закона на Вейбул. Дефинирани са допълнителни показатели на надеждността, ориентирани към потребителя и съответни показатели, оценяващи вероятността за недоставяне на ел. енергия.

3. За най-често срещаната гама от мощности на СТ в диапазона $S_H = (320-1000)$ kVA, характерно за изследваните 9 отрасли от промишлеността е оценено съкращаването на нивото им γ в условията на несиметрични и несинусоидални режими, което е в границите $\gamma = (8,24-12,24)$. Представени са прогнозни резултати за надеждността на посочените 9 отрасли, а за отрасъла химическа и добивна промишленост е оценен приноса на влошеното качество на ЕЕ в микса на аварийните състояния. За две големи подстанции е направен пълен

количествен анализ на основните показатели на надеждността, като е потвърдено негативното влияние на влошените електрически показатели и ниското качество на ЕЕ върху незадоволителното състояние на надеждността.

4. Приложен е експертно факторен подход за определяне на вероятността за настъпване на аварийни състояния в електрическите мрежи СН и подстанциите на големи промишлени обекти. Доказано е, че показателя „време на възстановяване” се подчинява на закона на Вейбул, което може да послужи като база за вземане на адекватни и рационални решения за подобряване на надеждността. Въз основа на проведения експертен анализ чрез прилаганите изчислителни процедури, са предложени схематически решения за подобряване на надеждността на СТ и синхронните двигатели, с което се постига висока безаварийност и устойчивост в експлоатацията на съоръженията.

В. АВТОРСКА СПРАВКА ЗА ПРИНОСИТЕ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

Научни приноси.

1. Предложена е иновативна теоретична постановка за оценка на зависимостта на надеждността от влошеното качество на ЕЕ. Аprobацията на методиката е извършена при оценка на експлоатационния ресурс на СТ и определяне на допълнителните показатели на надеждността на електрическите мрежи. Ефективността на предложеният подход се изразява в получени конкретни резултати за рационализиране на показателите на надеждността за електрообзавеждането на мощни промишлени обекти и за действащи подстанции от ЕЕС на страната.

2. Доказано е в теоретичен аспект, че времето за безотказна работа на изолацията на съоръженията се подчинява на закона на Вейбул. На тази база е потвърдено в реални изследвания, че средното време за възстановяване на кабелни мрежи СН също има разпределение на Вейбул. Тези доказателства създават реални възможности за рационализиране на надеждността в ЕСС.

Научно-приложни приноси

1. Чрез експериментални изследвания за 15 годишен период е доказано съществено влияние на влошените ПКЕЕ върху интензивността на отказите $\lambda(t)$, отнесено към почти всички основни силови и комутационно защитени елементи от ЕСС, а също така практически е потвърдена силната корелационна зависимост между $\lambda(t)$ и динамиката на изменение на натоварването.

2. За отрасловата структура на страната експериментално е потвърдено влошеното състояние на надеждността на редица силови елементи и съоръжения, като стойностите за $\lambda(t)$ и $R(t)$ са съществено влошени в сравнение с препоръчаните от редица документи и изследвания.

3. Предложени са схемотехнически решения за подобряване на надеждността на експлоатацията на подстанция 110 kV и синхронни

двигатели на СН, с което се постига по-висока безаварийност и устойчивост в експлоатацията на съоръженията.

4. За широка гама от мощности на СТ, работещи в условията на силно изявени несиметрични и несинусоидални режими е доказано в практически приложен аспект съществено снижаване на живота им (от порядъка на 10 пъти), с което чувствително се понижава надеждността на електроснабдителните системи в страната като цяло.

Публикации на автора във връзка с дисертационния труд

1. Илиев И. Х., Панчев Х. И., **Тодоров В.В.**, Изследване надеждността на електрическите мрежи средно напрежение при влошено качество на електрическата енергия, Международна научна конференция Унитех 2021, Габрово, ISSN 1313-230X.

2. Илиев И. Х., Панчев Х. И., **Тодоров В.В.**, Изследване влиянието на компенсацията на реактивните товари при нелинейни режими върху надеждността на електроснабдяването, Международна научна конференция Унитех 2021, Габрово, ISSN 1313-230X.

3. Димитров Ц. Д., Самет И.И., **Тодоров В.В.**, Приложение на метода „Полза разходи“ за оценка и прогнозиране на управляеми светодиодни осветителни уредби, Сборник доклади, Енергиен форум, 28 юни-1 юли 2022, стр. 311-315, ISSN 2367-6728.

4. **Тодоров В.В.**, Възможности за повишаване на надеждността и устойчивостта при експлоатацията на синхронните двигатели в химическата промишленост, Сборник доклади, Енергиен форум, 28 юни-1 юли 2022, стр. 353-359, ISSN 2367-6728.