

---

---

## **АНАЛИЗ НА ВЪЗМОЖНОСТИТЕ ЗА ПРИЛАГАНЕ НА ТЕРМОВИЗИОНЕН КОНТРОЛ ЗА ПОВИШАВАНЕ НАДЕЖДНОСТТА В ТРАНСПОРТНИ ЕЛЕКТРОЕНЕРГИЙНИ СИСТЕМИ**

**Илко Търнов, Георги Павлов, Никола Стамболиев, Любомир Секулов**  
[stsb\\_plovdiv@abv.bg](mailto:stsb_plovdiv@abv.bg), [g\\_pavlov61@abv.bg](mailto:g_pavlov61@abv.bg), [nstamboliev@abv.bg](mailto:nstamboliev@abv.bg), [res\\_start@abv.bg](mailto:res_start@abv.bg)

**Висше транспортно училище „Тодор Каблешков”  
гр. София, ул. „Гео Милев” 158  
РЕПУБЛИКА БЪЛГАРИЯ**

**Ключови думи:** *електроснабдяване, контактна мрежа, електротранспорт, надеждност, електроизолационни материали, топлоотдаване, термовизионен контрол.*

**Резюме:** *Надеждността на електроснабдяването в железопътния транспорт е повлияна от много фактори и елементи, които участват в електрическата верига от подстанцията до токоснемателя на електрическото транспортно средство. Електроизолационните материали и елементи са съществена част от тази верига и са относими към надеждността на електротранспорта. За да се гарантира висока надеждност при експлоатацията на железопътното превозно средство е необходимо намиране на определящите фактори за безотказна работа на всички елементи в електрическата верига. В доклада са показани основните параметри, с които се обосновава прилагането на термовизионен контрол за изследване на изолационни системи в електрифицирания транспорт, и като вид контрол за повишаване на експлоатационната надеждност. Разгледани са факторите влияещи върху стареенето и дълготрайността на електроизолационните материали. Показани са условията за електротоплинен пробив на диелектрика в зависимост от материалните константи. Направен е анализ за отчитане на състоянието на изолационните системи, както и метод за откриването на повреда в диелектриците, посредством термовизионен контрол. Основното в резултат на анализа са случайните променливи, които влияят на надеждността на изолационните материали в системата за електроснабдяване в следствие стареенето на материала. Контролът, посредством термовизионна камера, ще повиши надеждността и ще намали отказите. Методът, приложен в този доклад, предвижда нов начин за оценка на надеждността при експлоатация на изолационните системи като елементи от електроснабдяването в железопътния електротранспорт.*

### **Увод**

Надеждната работа на системите за електрозахранване в транспорта е от особена важност и първостепенно значение за сигурността и безаварийността на транспортния процес. Това зависи преди всичко от начина на конструиране на изделията, правилното

механично и електрическо оразмеряване и качествено им изработване. Процеса на експлоатация е най-дълъг, разглеждайки жизненият цикъл на едно изделие, а цената на реализираните неизправности породени от грешки е най-висока, независимо, че броят на грешките е едва 8 % в сравнение с предните два етапа. Поради тази причина трябва да се търсят разнообразни методи и подходи за подобряване на експлоатационната надеждност на транспортните системи за електроснабдяване.

Това може да се постигне, чрез анализ на всички фактори, които влияят върху надеждността и чрез разработване на нови методи за нейното повишаване. Голямо значение за поддържане на необходимата надеждност в процеса на експлоатация имат обемът, технологията и качеството на периодичните прегледи и плановите ремонти прилагани за стационарните системи за електроснабдяване в транспорта.

### **1. Експлоатационна надеждност**

В периода на експлоатация възникват внезапни откази, които са по-чести и постепенни откази с постоянна интензивност. Постепенните откази са резултат на постепенни изменения на един или няколко от зададените производствени параметри. Проявяването на тези откази се дължи обикновено на износване, корозия, стареене, умора на материала и др. В повечето случаи, по отношение на изолационните материали тези откази могат да бъдат прогнозирани. Случайният им характер е само по отношение на времето на възникване или периода на отработка, но не и по място на възникване.

В електроенергийните съоръжения, обикновено, там където има реализирани връзки на шини, кабели и проводници с течение на времето се наблюдава повишаване на контактното съпротивление, поради електродинамичните сили и температурните разширения предизвикани в работния процес. Повишеното контактното съпротивление от своя страна обуславя по-големи токове и от там повишаване температурата на клемните връзки и прегаряне на изолацията в близост до тях. Този вид откази също може да бъде прогнозиран поради постепенния му характер на възникване.

Именно в тези предварително определени места може да се осъществява термовизионният контрол.

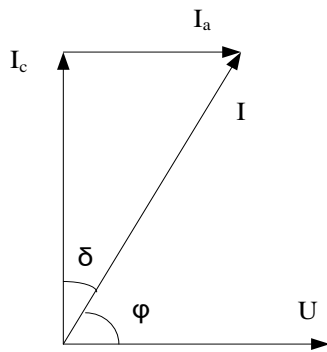
Настъпването на гранично състояние на практика е идентично на възникването на постепенен отказ. Поради тази причина трябва да се търсят методи за откриване на граничните състояния и да се прилагат такива срокове за технически прегледи, които да не допускат реализирането на пропуски на тези гранични състояния. При натрупване на статистическа информация за температурното състояние на възлите и електрическите съоръжения могат по-детайлно да се определят цитираните срокове.

Техническата диагностика е едно от основните направления за усъвършенстване на системата за ремонт на стационарните съоръжения за електроснабдяване и повишаване на тяхната надеждност в експлоатация, тъй като тя способства за прогнозирането на отказите в междуремонтните периоди. Чрез нея се проверява състоянието на изолационното и контактното съпротивление, допустими температурни диапазони, контактен натиск и др. Тя помага за рязко намаляване на количеството на отказите в периода между плановите ремонти. Познатите методи за установяване на техническото състояние на електрическите съоръжения са свързани с измерване на физични величини като ток, напрежение, съпротивление, температура и др. Проследяването им може да бъде периодично и постоянно.

Целта на всяко едно диагностиране е установяването на състоянието на съоръжението, чрез измерване на диагностичен параметър. Проследяването на работната температура на изолационните системи, клемните и кабелни връзки и съединения също може да се използва за нуждите на диагностиката.

## 2. Диелектрик в променливо електрическо поле

Когато изолационните материали са попаднали под напрежение през тях се осъществява електропроводимост, като тя се дължи на насоченото движение на свободни несвързани в структурата на материала електрически заредени носители като йони, електрони, а много рядко и малък брой диполи и др.



Фиг. 1 Векторна диаграма на токовете през диелектрик

на диелектричните загуби.

$$(1) \operatorname{tg} \delta = \frac{I_c}{I_a}$$

Където:  $I_a$  е активният ток през диелектрика;

$I_c$  – капацитивният ток през диелектрика.

Следователно за диелектрик с добри електроизолационни качества стойността на  $\operatorname{tg} \delta$  трябва да е малка.

Електропроводимостта на твърдите диелектрици се дължи, както на собствени йони, така и на йони от примеси, а в някои материали може да бъде предизвикана и от наличието на свободни електрони.

Повърхностната проводимост при тях зависи от наличието на влага и се влияе от замърсяването по повърхността им. Също така силно зависи и от естеството на твърдия диелектрик. Като вътрешни фактори влияещи на образуването на токоносители могат да се посочат молекулната и над молекулната структура на диелектрика, подвижността на токоносителите, състоянието на неплътните дефектни участъци в него и др.

## 3. Стареене и дълготрайност на електроизолационните материали

В работни условия, електрическата изолация е подложена на действието на различни външни фактори - електрическо поле, температура, механични натоварвания, химически въздействия, замърсявания, налягане, радиоактивни и йонизиращи лъчения, слънчева дейност, атмосферни влияния и др. Поведението на изолацията в процеса на работа зависи, както от големината на тези фактори, така и от тяхното взаимно съчетаване. Изброените фактори предизвикват т. н. стареене на изолационните материали и системи от тях.

Стареенето е физикохимичен процес, протичащ в материала под действие на посочените външни фактори. В изолационния материал настъпват необратими изменения. „Стареенето води до постепенно влошаване на електрофизичните характеристики на материала и настъпването на пълен отказ в изолацията.“ [1]

Скоростта на стареене определя и една от най-важните характеристики на изолационните системи - тяхната дълготрайност.

Експлоатационният срок на материала при дадени условия се определя до момента, в който той загубва електроизолационните си качества. Този срок при нормални експлоатационни условия се нарича дълготрайност или живот на изолацията.

Трябва да се отбележи, че според [2], пределният срок на служба на изолационните елементи, обусловен от ограниченията по отношение на скрепителните детайли за контактната мрежа е 20 години.

Дълготрайността на изолацията зависи, както от изходното, начално качество на използваните материали, така и от тяхното правилно съчетаване в изолационната конструкция, също и от скоростта на процеса на стареене в работни условия. Самата скорост на стареене се разглежда като функция на изходното качество на изолационните материали, на вида и интензивността на действащите фактори.

$$(2) t = k_1 T \cdot e^{k_2 T},$$

Където:  $t$  е дълготрайност на изолатора, години;

$T$  – устойчивост на пропълзващ ток на трекингозащитната обвивка на изолатора,  $h$ ;

$k_1$  и  $k_2$  – корелационни коефициенти,  $k_1 > 0$ ,  $k_2 < 0$ .

Установено е, че за метеорологичните условия на българските железници  $k_1=0,0446$ , а  $k_2=0,00057$ . [4] Срокът на служба на изолационните елементи в железопътната инфраструктура е не по-малко от 25 г., съгласно общите изисквания на Техническата спецификация на ДП НКЖИ 007/2006.

Видът на електрическата изолация има различна устойчивост, в зависимост от енергията на свързване на атомите в макромолекулата, което обуславя различно време на деградация и образуването на продукти на стареене. При наличие на микро пукнатини независимо от характера на възникването им в обема на електрическата изолация, влагата прониква в тях и значително намалява съпротивлението на изолационния материал.

Поради изтъкнатите фактори, влияещи върху процесите на стареене на изолационните материали, може да се стигне до опасни откази поради голяма вероятност за възникване на къси съединения и условия за крупни аварии и човешки жертви.

### **Възникване на електротоплинен пробив**

Електротоплинен пробив в твърдите диелектрици настъпва, когато отделената в тях топлина в резултат на диелектричните загуби –  $p$  превиши количеството топлина, което се излъчва в околната среда. Съгласно [3] загубите могат да бъдат изразени с формула 3.

$$(3) p = E^2 \cdot \omega \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot tg \delta$$

Където:  $E$  е интензитета на електрическото поле;

$\epsilon_0$  - диелектрична константа;

$\epsilon_r$  - диелектричната проницаемост.

Вследствие нарушаване на топлинното равновесие процесът на загряване се развива лавинообразно и довежда до стопяване или овъгляване на диелектриците или части от тях.

Електротоплинният пробив е сравнително бавен процес. Той може да се развива при влошено охлаждане или аварийни режими на работа на електросъоръженията. Времетраенето му е в порядъка на стотни от секундата до няколко часа, тъй като е необходимо време за натрупване на топлина и повишаване на температурата.

Проследяването на работната температура на изолационните системи може да се осъществява чрез термовизионни камери и да се събира статистика за евентуалното ѝ повишаване за определени периоди от време.

При едно и също работно напрежение, честота –  $\omega$  и геометрични размери –  $h$  на изолационния материал съгласно формула 4, виждаме, че понижаването на пробивното напрежение –  $U_{пр}$  ще зависи единствено от диелектричната проницаемост –  $\epsilon_r$  на

изолационния материал,  $tg\delta_0$  и температурният коефициент –  $\alpha$  за определен температурен интервал.

$$(4)U_{\text{пр}} = \sqrt{\frac{2 \cdot \sigma \cdot h}{\omega \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot tg\delta_0 \cdot \alpha \cdot e}}$$

Където  $\sigma$  е коефициентът на топлоотдаване;

$tg\delta_0$  - тангенс от ъгъла на диелектричните загуби при температура на околната среда;

$e$  – Неперово число.

Според всеки клас на топлоустойчивост съгласно Таблица 1 се допускат пределни стойности на работна температура, преминаването над тези стойности води до съкращаване срока на експлоатация на изолацията.

Освен с клас на топлоустойчивост електроизолационните материали се характеризират и с температурен индекс, който представлява температурата, при която срокът на експлоатация е 20000 часа.

**Таблица 1. Гранични температури и клас на топлоустойчивост**

Клас	Максим. работна температура °C
Y	90
A	105
E	120
B	130
F	155
H	180
C	над 180

### Изводи

От така направеното подробно разглеждане на свойствата на електроизолационните материали в експлоатация могат да се направят следните изводи:

- ✓ Проследяването на промените в работната температура на изолационните материали може да послужи като характеристика на техните диелектрични качества;
- ✓ Прилагането на термовизионен контрол по отношение на електрически връзки може да се прилага и по отношение на състоянието на дълготрайността на електроизолационните материали;
- ✓ Междуремонтният термовизионен контрол и прилагането на превантивни мерки, води до подобряване на експлоатационната надеждност на електроенергийните съоръжения;
- ✓ Натрупването на статистическа информация за работната температура и състояние на възлите, електрическите съоръжения и кабелната изолация спомага за по-детайлното определяне на междуремонтните им срокове.

С цел установяване на възможността за диагностика състоянието на изолационните системи посредством проследяване на работната им температура е закупена термовизионна камера, с която са започнати изследвания по посоченият метод. Резултатите от изследването ще бъдат обработени и публикувани в следващ доклад.

### Литература

- [1]. Тодорова А., Г. Дюстабанов, Електротехнически материали, София, 2004;
- [2]. Бакалов З., Резултати от изследване на устойчивостта на пропълзващ ток (трекингоустойчивост) на различни полимерни електроизолационни материали и полимерни изолатори, НДЕТ, София, 2006;
- [3]. Генчев М., Електроматериалознание, Пловдив, 2011;
- [4]. Божичкова И., Бакалов З., Златков М. Сравнително изследване на електроизолационните показатели на полимерни материали за изолиращи елементи за контактна мрежа 25 kV, 50 Hz, „Механика, Транспорт, Комуникации“ том 16, брой 3/2, 2018 г. ISSN 1312-3823 (print) ISSN 2367-6620 (online), стр. X-64.

# **ANALYSIS OF THE OPPORTUNITIES FOR USING THERMOVISUAL CONTROL TO IMPROVE THE RELIABILITY OF TRANSPORT ELECTRIC POWER SYSTEMS**

**Ilko Tarpov, Georgi Pavlov, Nikola Stamboliev, Lyubomir Sekulov**

*Todor Kableshkov University of Transport  
Sofia, 158 Geo Milev Str.  
THE REPUBLIC OF BULGARIA*

***Key words:** insulators, power supply, contact network, electric transport, electric insulation materials, heat release.*

***Summary:** The reliability of electric power supply in railway transport is dependent on numerous factors and elements comprising the electric circuit from the electrical substation to the electric vehicle's pantograph. The electric insulation materials and elements are an essential part of this circuit and bear relevance to the reliability of electric transport. In order to ensure a highly reliable exploitation of a railway vehicle, it is necessary to identify the determining factors for the fail-safe work of all elements of the electric circuit. The report presents the key parameters to justify the application of thermovisual control for testing the insulation systems in electrified transport, and also for establishing it as a type of control to improve exploitation reliability. It reviews the factors relevant to the ageing and the durability of electric insulation materials. The dielectric thermal breakdown conditions are shown in relation to the material constants. The paper draws an analysis of the insulation systems condition and presents a thermovisual detection method for potential dielectric failure. The key results of the analysis are the random variables, which influence the reliability of the insulation materials in the power supply system as a consequence of material ageing. The thermovision camera control will improve the reliability and decrease failure incidents. The method applied in this report describes a new reliability evaluation approach for the exploitation of insulation systems taken as the elements of power supply in railway transport.*