

*С. В. Немий, канд. техн. наук, доцент
(Національний університет «Львівська політехніка»)*

ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛОВОЇ СТІЙКОСТІ ЕЛЕКТРИЧНИХ ПРОВОДІВ АВТОМОБІЛЯ

Досліджено процес нагрівання проводів електричної мережі автомобілів при коротких замиканнях (КЗ). Встановлено, що інтенсивність нагрівання проводу при КЗ залежить від його опору і зростає при збільшенні співвідношення площі його перерізу та довжини. При КЗ час до початку оплавлення ізоляції проводу зменшується із зменшенням його опору. У зв'язку із цим, при проектуванні чи ремонті електричної мережі автомобілів недоцільно використовувати проводи із значним «запасом» понад номінал їх допустимого струмового навантаження. При КЗ проводи із малим опором, через збільшення площі їх перерізу, більш інтенсивно нагріваються до високої температури, що становить значну пожежну небезпеку.

Ключові слова: автомобіль, нагрівання проводів, пожежа на автомобілі, пожежна безпека, коротке замикання, електрична мережа автомобіля, електричні проводи.

С. В. Немий

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОВОЙ СТОЙКОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРОВОДОВ АВТОМОБИЛЯ

Исследовано процесс нагревания проводов электрической сети автомобилей при коротких замыканиях (КЗ). Установлено, что интенсивность нагревания провода при КЗ зависит от его сопротивления и возрастает при увеличении соотношения площади его сечения и длины. При КЗ время до начала оплавления изоляции провода уменьшается с уменьшением его сопротивления. В связи с этим, при проектировании или ремонте электрической сети автомобилей нецелесообразно использовать провода со значительным «запасом» свыше номинала их допустимой токовой нагрузки. При КЗ провода малого сопротивления, из-за увеличения площади их сечения, более интенсивно нагреваются до высокой температуры, что представляет значительную пожарную опасность.

Ключевые слова: автомобиль, нагревание проводов, пожар на автомобиле, пожарная безопасность, короткое замыкание, электрическая сеть автомобиля, электрические провода.

S. V. Niemyj

STUDY OF AUTOMOTIVE ELECTRIC WIRES THERMAL STABILITY

Investigated process of automotive electric network wires heating by short circuits (S/C). Founded that intensity of wire heating by S/C depends on its resistance and grows by increasing of sectional area to length correlation. By short circuit, time of wire melting beginning reduces with reducing its resistance. In this regard, in designing or repairing of automotive electric network using wires with considerable reserve over nominal of their working current loading is inexpedient. By S/C low resistance wires heats to high temperature more intensive, by increasing their sectional area, which is significant fire risk.

Key words: automobile, wires heating, fire on a car, fire safety, short circuit, automotive electric network, electric wires.

Постановка проблеми. Кількість пожеж на легкових, вантажних автомобілях і автобусах (далі по тексту – автомобілі) у всьому світі постійно зростає з темпами, що перевищують зростання їх чисельності [1]. У промислово розвинених країнах Євросоюзу, наприклад, впродовж 1997 – 2007 років кількість пожеж на автомобілях зросла більш ніж на половину [7]. Це свідчить про актуальність теоретичних і експериментальних досліджень, спрямованих на підвищення пожежної безпеки автомобілів.

Аналіз відомих досліджень і публікацій. В роботі [5] отримано залежності величин нагрівання провідника електричним струмом, які мають практичне застосування для промислових і побутових електричних мереж. У публікації [4] відзначено, що активні джерела загоряння автомобілів утворюються аварійними режимами електричної мережі, внаслідок яких виникають короткі замикання (КЗ). Причиною виникнення аварійних режимів у електричній мережі є, насамперед, її незадовільний технічний стан: порушення кріплення проводів і їх механічні та температурні пошкодження, використання запобіжників більшого номіналу тощо. Горючим матеріалом (речовиною), що спричинює пожежу на автомобілях є, насамперед, пальне і експлуатаційні рідини, що підтікають на поверхню двигуна і елементів моторного відсіку та горючі конструкційні матеріали.

У роботі [2] наведено загальні відомості про струми КЗ у електричних мережах, а також основні причини виникнення і характер їх розвитку в пожежно-вибухових умовах. У роботі [3] розглянуто принципи формування пожежної безпеки автомобілів на основі вивчення статистики пожеж на них. Відзначається, що через несправність електрообладнання стається майже 20 % пожеж автомобілів. У роботі [6] висвітлено теоретичні аспекти та їх практичне застосування при дослідженнях пожежної безпеки електропроводок та їх причетності до виникнення пожеж.

У всіх наведених джерелах відзначається актуальність проблеми гарантування пожежної безпеки автомобілів у конструктивному і експлуатаційному аспектах. Однак, на даний час, процеси, що призводять до раптових загорянь АТЗ у процесі експлуатації, досліджені недостатньо.

Постановка завдання. Дослідження теплової стійкості проводів електричної мережі автомобілів в аварійних режимах і її потенційного впливу на пожежну безпеку автомобіля.

Виклад основного матеріалу. У процесі експлуатації легкових і вантажних автомобілів та автобусів (далі по тексту – автомобілі) можуть виникнути аварійні режими роботи проводів електричної мережі автомобілів (проводів), що призводять до їх значних струмових перевантажень. При струмовому перевантаженні проводів можуть виникнути два характерних види їх аварійного стану: коротке замикання (КЗ) на «масу» із виникненням потужної електричної дуги, що руйнує контакт у місці КЗ, або нагрівання, впродовж певного, часу жили проводу до високої температури, що перевищує теплову стійкість ізоляції із подальшим її оплавленням, тобто руйнуванням і оголенням жили проводу. У першому випадку потужна електрична дуга здатна запалити розташовані поряд горючі матеріали. У другому – нагріта до високої температури оголена жила проводу теж здатна запалити горючі матеріали з якими вона контактує. Крім цього, оголена жила проводу у подальшому, як правило, неминуче контактує із «масою», що призводить на певних відстанях між місцем КЗ і джерелом живлення до виникнення електричної дуги [4]. У будь-якому випадку вказані аварійні стани проводів є основною причиною виникнення пожеж при експлуатації автомобілів.

Найбільш ефективним конструктивним захистом від подібних наслідків є система захисту електричної мережі автомобілів запобіжниками і забезпечення стабільних номінальних значень струму у проводах із відповідною площею перерізу. Однак у цьому випадку проблемою є чутливість запобіжників, тобто величина струму перевантаження і час, протягом якого вони спрацьовують при вказаних аварійних станах проводів. Як правило, при раптовому виникненні КЗ із електричною дугою плавкі і біметалеві запобіжники спрацьовують практично миттєво. При тривалому перевантаженні проводу до температури теплового руйнування ізоляції при певному струмі перевантаження (коефіцієнт струмового перевантаження при «нечутливості» автомобільних запобіжників становить 1,3–1,7 [3]) запобіжник може не спрацювати і це може призвести до виникнення КЗ.

З метою визначення динаміки нагрівання жили автомобільних проводів марки ПГВА при КЗ були проведені відповідні випробування проводів перерізом 1,0, 1,5 і 2,5 мм². Оскільки експериментально встановлено [4], що при малих довжинах проводів у момент КЗ вини-

кає потужна електрична дуга і контакт у місці КЗ руйнується, то з метою збереження цілісності проводів довжина кожного відрізка була прийнята однаковою – 5 м. Випробування проводилися у лабораторних умовах імітацією глухого КЗ з'єднанням кінців проводу з клеммами акумуляторної батареї рубильником. Записи досліджуваних параметрів здійснювалися методом осцилографування і містили визначення таких величин: струм і напруга у процесі КЗ в проводі до оплавлення ізоляції по всій його довжині на 80 – 90 %; час тривалості КЗ до вказаного ступеню оплавлення ізоляції. Початкова температура досліджуваних проводів прийнята рівною температурі навколишнього повітря + 27 °С.

У випробувальну електричну схему входили акумуляторні батареї 3 СТ-150 (2 шт. з'єднані послідовно з сумарною напругою 12,6 В), рубильник (300 А), випробувальний провід і магнітоелектричний осцилограф К 12-22, на стрічці якого реєструвалися значення струму, напруги і часу КЗ.

Температура жили випробовуваних проводів T визначалася виходячи із відомої залежності [8]:

$$R_T = R_{T_1} [1 + \alpha(T - T_1)], \quad (1)$$

звідки

$$T = \frac{R_T}{\alpha R_{T_1}} - \frac{1}{\alpha} + T_1 = \frac{1}{\alpha} \left(\frac{R_T}{R_{T_1}} - 1 \right) + T_1, \quad (2)$$

де R_T – змінний опір жили проводу у процесі КЗ; R_{T_1} – опір жили проводу при навколишній температурі перед проведенням експерименту; α – температурний коефіцієнт опору (прийнято для міді при $T_1=27$ °С $\alpha = 0,004$ [2]); T – змінна температура жили проводу при КЗ; T_1 – температура навколишнього середовища.

Результати випробувань наведено у табл. 1.

Таблиця 1

Показники КЗ залежно від перерізу проводів

Площа перерізу проводу, S мм ²	Напруга у момент КЗ $U_{кз}$, В	Струм на початку КЗ $I_{кз}$, А	Напруга у момент оплавлення ізоляції $U_{он}$, В	Струм у момент оплавлення ізоляції $I_{он}$, А	Тривалість КЗ до моменту оплавлення ізоляції t , с
1,0	11,8	135	12,0	50	105
1,5	11,6	200	11,8	73	80
2,5	11,2	310	11,6	110	50

У результаті обробки осцилограм побудовано графіки залежності струму КЗ і температури нагрівання жили проводу від часу (рис. 1). За даними осцилограм температура нагрівання жили проводу підраховувалася через кожні 10 с тривалості КЗ за формулою (2). При цьому значення R_T розраховувалися діленням вимірених значень напруги на відповідну величину струму.

Лінії А і Б на рис. 1 відділяють періоди цілісності ізоляції і початку її оплавлення. Час до початку оплавлення ізоляції фіксувався секундоміром, починаючи із моменту замикання рубильника. У процесі нагрівання ізоляція спочатку ставала м'якою і, надалі, починала спливати із проводу. Час до оплавлення ізоляції на 80 – 90 % по всій довжині проводу прийнятий як тривалість КЗ до моменту оплавлення ізоляції і експеримент припинявся із міркувань безпеки. Загоряння матеріалу ізоляції у процесі КЗ досліджуваних проводів не було.

Як бачимо на рис. 1, для всіх випробовуваних проводів, при глухому КЗ їх ізоляція руйнується при температурі нагрівання жили проводу до 460 – 510 °С впродовж 50 – 100 с. Цілком очевидно, що наділі їх температура буде зростати до досягнення рівноваги між величиною нагрівання і розсіянням тепла (передачею) у навколишнє середовище або розплавлення жили проводу при малій його довжині. Це з огляду на пожежну небезпеку, навіть за відсутності КЗ із виникненням електричної дуги, є неприпустимим, оскільки температура займання деяких експлуатаційних і конструкційних матеріалів не перевищує 450 °С [3].

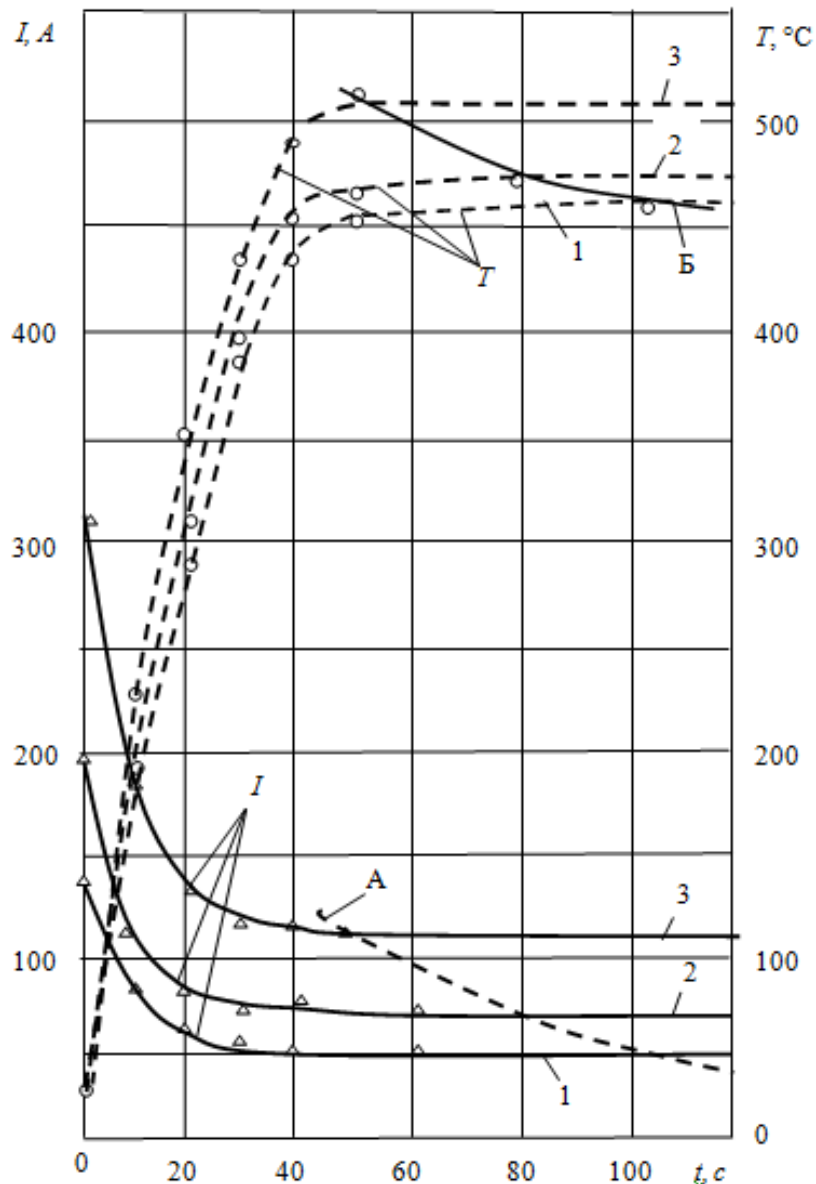


Рисунок 1 – Залежність струму і температури нагрівання проводів від часу і площі їх перерізу при глухому КЗ:
 1 – 1,0 мм²; 2 – 1,5 мм²; 3 – 2,5 мм²

Цю схему випробування проводів можна розглядати як нелінійне електричне коло, оскільки впродовж процесу КЗ через нагрівання зростає опір жили проводу і, відповідно зменшується струм навантаження. Особливістю такого кола є те що джерело електричної енергії автомобіля – стартерна акумуляторна батарея може віддати впродовж короткого часу великий струм без істотної зміни її напруги. Як бачимо у табл. 1, різниця напруги на клеммах акумуляторної батареї впродовж КЗ до руйнування ізоляції не перевищує 1,7 – 3,5 %.

Кількість теплоти, що виділяється у проводі впродовж КЗ можна визначити за відомими [8] співвідношеннями

$$Q = UI t = I^2 R t. \quad (3)$$

Прийнявши величину напруги $U = U_{аб}$, тобто рівній постійній напрузі акумуляторної батареї, а поточні значення струму $I = I_i$ змінними у залежності від зміни опору проводу R_{Ti} і розв'язавши рівняння (3) відносно I_i , з врахуванням формули (1) отримаємо:

$$I_i = \frac{U_{аб}}{R_{T_i} [1 + \alpha(T_i - T_1)]} \quad (4)$$

Розв'язавши рівняння (4) відносно T_i , прийнявши $R_{T1} = \rho_l l/S$, отримаємо залежність динаміки збільшення нагрівання проводу при КЗ ΔT від площі його перерізу S і динаміки зміни струму у колі ΔI :

$$\Delta T = \frac{1}{\alpha} \left(\frac{U_{аб}}{R_{T1} \Delta I} - 1 \right) + T_1 = \frac{1}{\alpha} \left(\frac{U_{аб} S}{\rho_l l \Delta I} - 1 \right) + T_1, \quad (5)$$

де ρ_l – питомий опір жили проводу при температурі навколишнього середовища.

Із залежності (5) слідує, що інтенсивність нагрівання проводу залежить насамперед від співвідношення S/l , тобто від геометричних складових опору проводу. Цілком очевидно, що, наприклад, при зменшенні довжини проводу з площею перерізу 1 мм^2 у 2,5 рази ($l = 2 \text{ м}$) час нагрівання проводу до руйнування ізоляції, його температура і струм будуть практично такими ж, як і для досліджуваного проводу з площею перерізу $2,5 \text{ мм}^2$ і $l = 5 \text{ м}$ (рис. 1). При цьому слід врахувати те, що при малих довжинах проводів між місцем КЗ і акумуляторною батареєю взагалі не відбувається нагрівання до оплавлення ізоляції, а миттєво виникає потужна електрична дуга (табл. 2) [4].

Таблиця 2

Найбільша довжина проводу, при якій виникає електрична дуга і починається оплавлення його ізоляції при КЗ

Площа перерізу проводу S , мм^2	Найбільша довжина проводу при якій виникає електрична дуга і починається оплавлення ізоляції без електричної дуги l_0 , м
1,0	3,8 – 4,25
1,5	2,75 – 3,25
2,5	1,6 – 2,25

Із аналізу графіків (рис. 1) випливає, що час нагрівання проводу до руйнування ізоляції, з достатньою для практичних цілей точністю, можна визначити за лінеаризованою емпіричною залежністю

$$t = l(A + BS)/S, \quad (6)$$

де l – довжина проводу, м; A і B постійні коефіцієнти; S – площа перерізу проводу, мм^2 .

Для нашої групи досліджуваних автомобільних проводів довжиною 5 м $A = 18$, $B = 3,2$, тобто $t = 5(18 + 3,2S)/S$.

У процесі експлуатації оголена жила проводу при КЗ контактує із масою автомобіля із тиском, що створюється вагою цієї ділянки проводу у місці контакту. У цьому разі опір кола може значно збільшитися через великий перехідний опір у місці КЗ. Збільшення величини струму у проводі і інтенсивність його нагрівання можуть бути порівняно незначними і коло буде відімкнуте запобіжником, або на перших порах КЗ взагалі може залишитися непоміченим. Однак, при КЗ всередині функціональних апаратів електрообладнання та при загальмовуванні пошкодженими елементами конструкції чи сторонніми предметами електродвигунів (склоочисник, вентилятор опалювача тощо) перехідний опір зони КЗ може бути значно меншим від опору ділянки проводу між місцем КЗ і акумуляторною батареєю, або струм у колі електродвигуна зросте настільки, що спричинить перегрівання і оплавлення ізоляції.

Характерною ілюстрацією сказаного було загоряння восени 2010 р. маршрутного таксі № 85 у м. Львові на повороті із вул. С. Бандери на вул. Шептицьких. Помітивши пожежу водій негайно зупинив автобус і висадив усіх пасажирів. Джерело загоряння виникло в кабіні під лобовим склом, у ніші для склоочисників. Причиною було те, що водій, готуючись до зими утеплів цю нішу, ущільнивши її, очевидно, горючим матеріалом. При цьому матеріалом ущільнення було загальмовано рухомі ланки склоочисників. Через це струм у проводі живлення електродвигунів зріс настільки, що у процесі руху ізоляція оплавилася і розігріта до високої температури його жила, контактуючи із матеріалом ущільнення, спричинила загоряння. Вогонь дуже швидко перекинувся на горючі матеріали салону. Внаслідок пожежі вигоріло все на робочому місці водія, м'яка частина всіх пасажирських сидінь та облицюван-

ня боковин і стелі салону. Цілком можливо, що у колі живлення склоочисників було ще й застосовано запобіжник невідповідного номіналу, або саморобну вставку.

Висновки. За результатами проведених досліджень можна констатувати таке:

1. Інтенсивність нагрівання проводу при КЗ залежить від його опору і зростає при збільшенні співвідношення площі його перерізу до довжини.
2. При КЗ час до початку оплавлення ізоляції проводу зменшується із зменшенням його опору.
3. При проектуванні чи ремонті електричної мережі автомобілів недоцільно використовувати проводи із значним «запасом» понад номінал їх допустимого струмового навантаження. При КЗ проводи із малим опором, через збільшення площі їх перерізу, більш інтенсивно нагріваються до високої температури, що становить значну пожежну небезпеку.
4. Характер протікання глухого КЗ визначається величиною перехідного опору у місці КЗ, однак у процесі експлуатації автомобілів можливі випадки КЗ через внутрішні замикання у функціональних апаратах електрообладнання із малим перехідним опором. У цьому випадку вирішальне значення має опір проводу живлення між місцем КЗ і акумуляторною батареєю.
5. Для захисту електричних кіл актуальним залишається використання запобіжників відповідного номіналу.

Список літератури

1. Брушлинский Н. Н. Мировая пожарная статистика в начале XXI века / Н. Н. Брушлинский, С. В. Соколов // Пожарная безопасность. – М., 2005, № 5. – С. 78-88.
2. Забиров А. С. Пожарная опасность коротких замыканий. – М.: Стройиздат, 1987. – 104 с.
3. Исхаков Х. И. Пожарная безопасность автомобилей /Х. И. Исхаков, А. В. Пахомов, Я. Н. Каминский. – М.: Транспорт, 1987. – 87 с.
4. Немий С. В. Електрична мережа автомобіля як джерело пожежної небезпеки / С. В. Немий, Т. В. Ребот // Вісник Львівського державного університету безпеки життєдіяльності: Зб. наукових праць. – Львів: ЛДУ БЖД, 2015. – № 26. – С. 116-121.
5. Семерак М. М. Дослідження режимів нагрівання провідників електричним струмом / М. М. Семерак, В. І. Гудим, О. М. Коваль // Пожежна безпека : Зб. наук. праць. – 2006. – № 8. – С. 67 – 72.
6. Смелков Г. И. Пожарная опасность электропроводок при аварийных режимах. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 184 с.
7. Хасанов Р. Х. О повышении противопожарной безопасности автомобилей / Р. Х. Хасанов, Е. С. Сидорин // Вестник Оренбургского гос. ун-та. – Оренбург, 2011, № 10 (129). – С. 70 – 75.
8. Электротехника / В. Г. Герасимов, Х. Э. Зайдель, В. В. Коген-Далин и др. Под ред. В. Г. Герасимова. – М.: Высш. шк., 1983. – 480 с.

References

1. Brushlinskiy N.N. The world fire statistics at the beginning of XXI century /N.N. Brushlinskiy, S.V. Sokolov //Pozharnaya bezopasnost'. – Moscow: 2005, № 5. – p. 78 – 88.
2. Zabirov A.S. Fire danger of short circuits. – Moscow: Stroyizdat, 1987. – 104 p.
3. Iskhakov H.I. Fire safety of cars /H.I. Iskhakov, A.V. Pahomov, Y.N. Kaminskiy. – Moscow: Transport, 1987. – 87 p.
4. Niemyj S. V. Electrical network of car – the source of fire danger /S. V. Niemyj, T. V. Rebot //Fire of safety. Lviv: LDU BGD, 2015, № 24, 116 – 121 (in Ukr.).
5. Semerak M. M. Research of modes of heating conductors of electric shock //Fire of safety. Lviv: LDU BGD, 2006, №8, 67 – 72 (in Ukr.).
6. Smelkov G.I. Fire danger of electrical network during the emergency modes. – Moscow: Energoatomizdat, 1984. – 184 p.
7. Hasanov R.H. About the automotive fire safety increasing /R.H. Hasanov, E.S. Sidorin. Herald of Orenburg's state university. Orenburg, 2011, № 10 (129). – p. 70 – 75.
8. Elektricion. /V. G. Gerasimow, H. E. Seidel, V. V. Kogen-Dalin and oth.– Moskow: Wysch. schk,1983. – 480 s