

С. В. Немий, В. М. Бритковський
Національний університет “Львівська політехніка”,
кафедра експлуатації та ремонту автомобільної техніки

ЕФЕКТИВНІСТЬ ЗАХИСТУ ЕЛЕКТРИЧНОЇ МЕРЕЖІ АВТОМОБІЛІВ

© Немий С. В., Бритковський В. М., 2019

Мета дослідження – аналіз факторів, що впливають на безпеку експлуатації електричної мережі й підвищення пожежної безпеки автомобілів. Як впливає із результатів досліджень, якщо справний стан електромережі й елементів системи захисту, температурні режими проводів не досягають критичних значень. Однак через інерційність системи електричного захисту і певні порушення режиму експлуатації електрообладнання ймовірність виникнення КЗ чи критичного перегрівання проводів значна, що може призвести до виникнення джерела загоряння і пожежі на автомобілі. Щоб запобігти виникненню аварійних режимів у електрообладнанні, необхідно неухильно дотримуватися регламенту технічного обслуговування електричної мережі й вимог щодо безпеки її експлуатації, насамперед застосуванням запобіжників згідно з керівництвом з експлуатації.

Ключові слова: автомобіль, електрообладнання автомобіля, електрична мережа, запобіжники, коротке замикання, ампер-секундна характеристика, пожежна безпека автомобіля, температурна стійкість проводу.

S. Niemyj, V. Brytkovskyi

PROTECTION EFFECTIVENESS OF AUTOMOBILES ELECTRIC NETWORK

The purpose of the study is analysis of the factors affecting electric network operation safety and increasing cars fire safety. It follows from the results of researches, when the electric power system and the elements of the protection system are in proper condition, the temperature modes of the wires don't reach critical values. However, due to the inertia of the existing electrical protection system and certain violations of the operating conditions of the electrical equipment, there is a significant probability of a short circuit or wires critical overheating, which may result in the source of ignition and fire in the car. In order to prevent the occurrence of emergency modes in electrical equipment, it is necessary to strictly adhere to the maintenance rules of electrical network and the operation safety requirements, especially by using of fuses in accordance with the operating manual.

Key words: car, car electrical equipment, electric network, fuses, short circuit, ampere-second characteristic, car fire safety, wire temperature resistance.

Формулювання проблеми. Останніми роками статистичні дані [2, 3] підтверджують зростання кількості пожеж на автомобілях. До цього призводять різні фактори, зокрема: порушення правил експлуатації автомобілів водіями, неякісне виконання технічного обслуговування автомобілів на автотранспортних підприємствах і станціях технічного обслуговування, порушення протипожежних правил під час ремонту і зберігання автомобілів. Це свідчить про акту-

альність теоретичних і експериментальних досліджень, спрямованих на підвищення пожежної безпеки автомобілів.

Аналіз відомих рішень і публікацій. У роботі [1] розглянуто основні фактори, що впливають на виникнення пожеж на автомобілях через короткі замикання (КЗ) у їх електричній мережі. Досліджено особливості КЗ автомобільних електропроводів залежно від площі їх перерізу та довжини. У результаті експериментальних досліджень встановлено, що для автомобільного проводу, залежно від площі його перерізу і відстані між джерелом електроживлення і місцем КЗ, існує дві характерні ділянки його протікання. Якщо довжина проводу менша від певної величини, під час КЗ виникає потужна електрична дуга, внаслідок якої відбувається розплавлення і вигорання металу в зоні контакту та самоліквідація КЗ. Якщо довжина проводу більша від вказаної межі, перехідний контакт є стійким, струм у колі збільшується до певної величини, КЗ відбувається тривалий час, що може призвести до значного нагрівання жили проводу та її оголення через оплавлення ізоляції. У роботі [2] досліджено процес нагрівання проводів електричної мережі автомобілів під час коротких замикань (КЗ). Встановлено, що інтенсивність нагрівання проводу при КЗ залежить від його опору і зростає у разі збільшення співвідношення площі його перерізу до довжини. У разі КЗ час до початку оплавлення ізоляції проводу зменшується зі зменшенням його опору. У зв'язку із цим під час проектування чи ремонту електричної мережі автомобілів нецільно використовувати проводи із великим “запасом” понад номінал їх допустимого струмового навантаження. Під час КЗ проводи із малим опором, через збільшення площі їх перерізу, інтенсивніше нагріваються до високої температури, що становить значну пожежну небезпеку.

Постановка задачі. Аналіз факторів, що впливають на безпеку експлуатації електричної мережі й підвищення пожежної безпеки автомобілів.

Основний матеріал. Процес виникнення аварійної ситуації в електричних проводах із подальшим виникненням загоряння на автомобілі має певні характерні особливості. У першому випадку контакт жили проводу із масою автомобіля супроводжується виникненням електричної дуги із загорянням розташованих поряд конструкційних матеріалів (термшумоізоляції та внутрішнього облицювання), пролитого палива і олив тощо. В іншому випадку перехідний опір у місці пошкодження ізоляції та контакту жили проводу із масою порівняно невеликий, миттєвого короткого замикання не виникає, але по проводу починає проходити струм, більший від номінального, жила проводу поступово нагрівається до оплавлення ізоляції, а потім контакт уже оголеної ділянки проводу із масою призводить до виникнення короткого замикання.

Залежно від величини перехідного опору (жила проводу – “маса”) КЗ може бути прямим (глухе, металеве, повне) і неповним, яке виникає за великого перехідного опору внаслідок нещільного контакту, наявності окисної плівки тощо.

Повне КЗ проходить у двох режимах: 1) у місці контакту, перехідний опір якого є більшим, ніж опір проводу, відбувається значне теплове виділення, виникає електрична дуга, метал у місці контакту розплавляється і КЗ самоліквідується; 2) перехідний контакт є стійким, струм у колі збільшується до певної величини, що призводить до значного нагрівання жили проводу і її оголення через оплавлення ізоляції. Ці обставини спрощено ілюструються відомими залежностями [1]:

$$I_{кз} = \frac{U}{R_n + R_k + R_a + R_b} = \frac{U}{\rho_l \frac{l}{S_{np}} + R_k + R_a + R_b}, \quad (1)$$

де $I_{кз}$ – струм короткого замикання; U – напруга джерела живлення (акумуляторної батареї); R_n – еквівалентний опір проводу на ділянці “джерело живлення – місце КЗ”; R_k – перехідний опір у місці КЗ; R_a – опір “масової” ділянки кола: місце КЗ – мінусова клемма акумуляторної батареї; R_b – внутрішній опір акумуляторної батареї; ρ_l – питомий опір матеріалу проводу залежно від його температури; l – довжина проводу на ділянці “джерело живлення – місце КЗ”; S_{np} – площа перерізу жили проводу.

Аналізуючи рівняння (1), бачимо, що величина струму КЗ істотно залежить від опору проводу на ділянці “джерело живлення – місце КЗ”, тобто від довжини ділянки проводу l . У цьому аспекті становить практичний інтерес особливість перебігу процесу КЗ у електричній мережі АТЗ, залежно від площі перерізу жили проводу S_{np} і його довжини на ділянці “джерело живлення – місце КЗ” l . З цією метою у роботі [1] проведено відповідні експериментальні дослідження із автомобільними проводами типу ПВА різних перерізів. Результати експериментів із проводами типу ПВА найпоширеніших перерізів 1,0, 1,5 і 2,5 мм² наведено на рис. 1, де горизонтальні відрізки відображають діапазон меж між зонами електричної дуги і повного КЗ з оплавленням ізоляції в окремих експериментах.

Як бачимо на рис. 1, для кожного проводу, залежно від площі його перерізу і довжини, є дві характерні зони (ділянки). Якщо довжина проводу мала, менша від певної величини (ліворуч кривої на рис. 1), під час КЗ виникає потужна електрична дуга, внаслідок якої відбувається розплавлення і вигорання металу в зоні контакту та самоліквідація КЗ. Якщо довжина проводу більша від вказаної межі, опір проводу більший, струм у колі зростає до певної величини, перехідний контакт є стійким і КЗ відбувається тривалий час, що може призвести до значного нагрівання жили проводу і її оголення через оплавлення ізоляції.

Малі довжини проводів між джерелами електроживлення і точками КЗ характерні для проводів електромережі, прокладеної на незначній відстані від акумуляторної батареї, переважно у моторному відсіку. У цьому випадку незадовільний технічний стан автомобіля – підтікання пального й оливи на нагрітий корпус двигуна і його систем, особливо покритих шаром пилу, стає ідеальним середовищем для займання під час виникнення часткових електричних розрядів чи електричної дуги за КЗ. У цьому випадку небезпечним є те, що пожежа на автомобілях через КЗ може несподівано виникнути під час руху, що часто є основною причиною неефективності її гасіння.

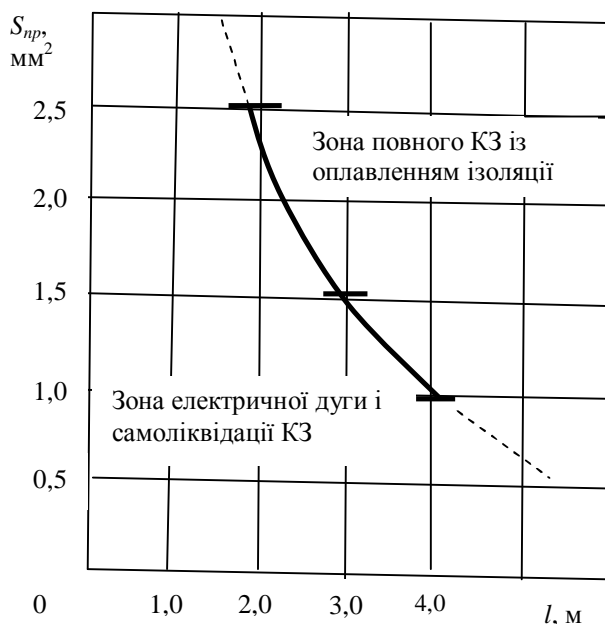


Рис. 1. Межа між зонами виникнення електричної дуги і повного КЗ з оплавленням ізоляції, залежно від площі перерізу і довжини проводу [1]

У проводах більших довжин, правіше від межі між вказаними зонами (праворуч кривої на рис. 1) під час КЗ струм у колі збільшується до певної величини, що може призвести до значного нагрівання жили проводу і її оголення через оплавлення ізоляції із подальшим займанням розташованих у контактній близькості горючих конструкційних матеріалів. Це є причиною виникнення загоряння за КЗ електропроводу в зонах автомобіля, віддалених від моторного відсіка, здебільшого в салоні та багажних відділеннях. У цьому випадку небезпечним є те, що пожежа на

автомобілях через КЗ може виникнути через деякий час після того, як водій зупинить і залишить автомобіль без нагляду із увімкненою “масою” акумуляторної батареї. Крім цього, у випадку оплавлення ізоляції можливий контакт жили проводу із “масою” на невеликій відстані від джерела електроживлення, внаслідок якого виникне КЗ із електричною дугою.

У обох випадках небезпечно також те, що пожежу на автомобілях, яка може виникнути через КЗ, під час її розвитку на перших порах приховуватиме зустрічний потік повітря, який відноситиме дим і запах продуктів горіння від кабіни чи салону.

Для ізоляції автомобільних проводів використовують полівінілхлоридний пластикат, який є оливо- і бензостійким, не поширює горіння (проводи марок ПВА). Проводи марок ПВА використовують за температури навколишнього середовища від -40 до $+105$ °C [6]. Під час нагрівання ізоляції до 150 °C відбувається її руйнування.

Згідно з результатами попередніх досліджень [4] оптимальний діаметр циліндричних оболонок теплової ізоляції становить приблизно 20 мм. За меншого діаметра, що відповідає діаметру ізоляції проводів ПВА, електрична ізоляція втрачає свою роль як теплова, і в разі збільшення товщини оболонки ізоляції теплопередача від жили проводу збільшується. Отже, розрахунки теплових навантажень проводів необхідно вести з урахуванням зовнішнього діаметра проводу d_3 (зовнішній діаметр по ізоляції).

Теплопередача від нагрітого проводу в зовнішнє середовище визначається законом Ньютона [7, 8]:

$$Q = \pi d_3 l \alpha (T_{np} - T_{cp}), \quad (2)$$

де d_3 – зовнішній діаметр проводу по ізоляції; l – довжина проводу; α – коефіцієнт тепловіддачі; T_{np} – температура проводу; T_{cp} – температура навколишнього середовища.

В нормальних умовах роботи сталий режим теплопередачі проводу урівноважується тепловиділенням джерела нагрівання:

$$Q = I^2 R = I^2 \rho_l l / S_{np}, \quad (3)$$

Із рівнянь (2) і (3) отримаємо формулу для розрахунку температури проводу T_{np} :

$$T_{np} = \frac{I^2 \rho_l}{\pi S_{np} d_3 \alpha} + T_{cp}. \quad (4)$$

Значення коефіцієнта тепловіддачі α для автомобільних проводів ПВА на основі табличних даних [4] наведено на рис. 2.

Згідно з нормами [9] допустиме тривале струмове навантаження одиничних проводів за температури навколишнього середовища $T_{cp} = 50$ °C I_{oon} становить для площі перерізу жили проводу S_{np} мм²: 1,0 – 13,5 А; 1,5 – 17 А; 2,5 – 22,7 А.

Основним засобом системи електричного захисту автомобільної електромережі від КЗ і перевантажень є використання плавких і біметалевих запобіжників. Основною характеристикою запобіжників, що визначає їх ефективність, є ампер-секундна характеристика, що являє собою залежність часу спрацювання запобіжника від величини струму навантаження.

Зіставлення ампер-секундних характеристик автомобільних запобіжників різних конструкцій показує, що біметалеві запобіжники, порівняно із плавкими, інерційніші у зоні великих перевантажень ($I/I_n \geq 3$), де I – струм навантаження проводу; I_n – номінальний струм запобіжника. З іншого боку, біметалеві запобіжники чутливіші в зоні малих перевантажень ($I/I_n \leq 2$) [6].

Для правильного вибору номінального струму запобіжника I_n необхідно порівняти ампер-секундні характеристики запобіжників і проводу, який захищають. Під ампер-секундною характеристикою проводу розуміють залежність часу досягнення ізоляцією проводу граничної температури від струму навантаження I .

Промодельємо можливість виникнення аварійної ситуації в електропроводці автомобіля на прикладі одиничних проводів площею перерізу 1,0, 1,5 і 2,5 мм². На рис. 3 [9] наведено ампер-секундні характеристики запобіжників. Як бачимо, на тривалі струмові перевантаження проводу близько 50 % ($I/I_n \leq 1,5$) плавкі запобіжники практично не реагують.

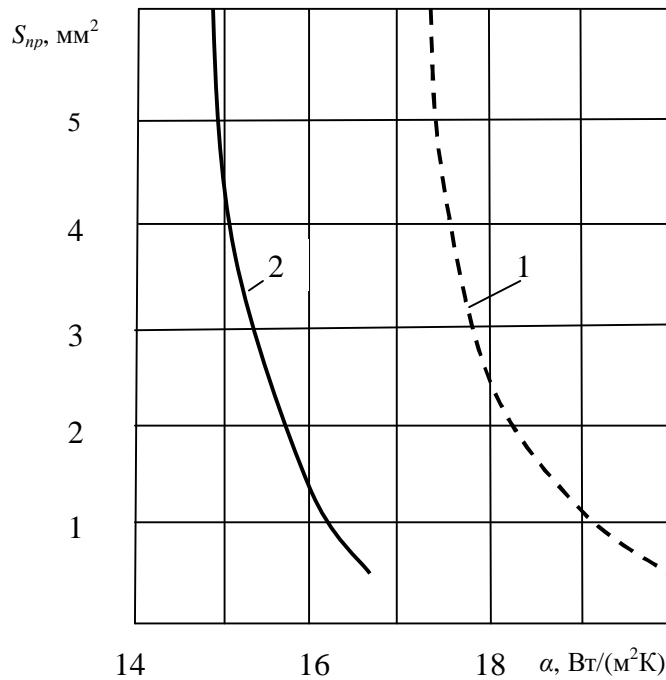


Рис. 2. Значення коефіцієнта тепловіддачі α для автомобільних проводів ПВА:
1 – $T_{cp} = 20\text{ }^\circ\text{C}$; 2 – $T_{cp} = 60\text{ }^\circ\text{C}$

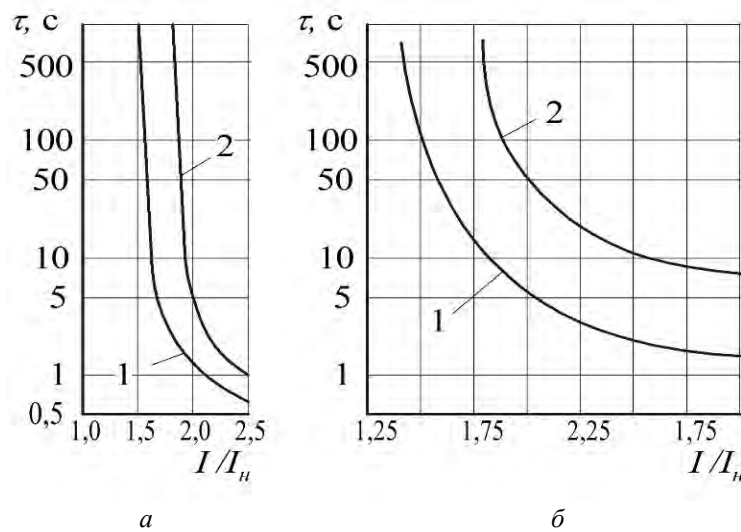


Рис. 3. Ампер-секундні характеристики запобіжників:
а – плавких; б – біметалевих; 1 – $T_{cp} = 50\text{ }^\circ\text{C}$; 2 – $T_{cp} = -40\text{ }^\circ\text{C}$

Згідно з нормами [9] у колах з проводами площею перерізу 1,0, 1,5 і 2,5 мм² повинні використовуватися плавкі запобіжники із номінальним струмом I_n відповідно 10, 16 і 20 А.

Задаючи різні значення температури навколишнього середовища T_{cp} , за струму навантаження $I = 1,5I_n$, розрахунки за формулою (4) зводимо у табл. 1.

Із наведених розрахунків (табл. 1) випливає, що за 50 % струмового перевантаження понад номінали I_n запобіжників температурні режими проводів не досягають критичних значень. Однак за певного збільшення струму, зокрема у колах живлення обмоткових виробів (електродвигуни, електромагніти) через міжвиткові замикання, температура проводів може досягти критичних значень унаслідок порушення стабільного режиму тепловіддачі, який характеризується рівністю значень теплоти, визначених за формулами (2) і (3).

Розрахунок температури проводу T_{np}

$S_{np}, \text{мм}^2$	$d_3, \text{мм}$	$I, \text{А}$	$T_{cp} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$			$T_{cp} = 50 \text{ }^\circ\text{C}$		
			$\alpha, \text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{град})$	$\rho_t, \text{Ом} \cdot \text{мм}^2/\text{м}$	$T_{np}, \text{ }^\circ\text{C}$	$\alpha, \text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{град})$	$\rho_t, \text{Ом} \cdot \text{мм}^2/\text{м}$	$T_{np}, \text{ }^\circ\text{C}$
1,0	3,2	15	19,2	0,01873	41,80	16,3	0,02125	79,2
1,5	3,6	24	18,5	0,01967	56,12	15,7	0,0222	98,0
2,5	4,3	30	18,0	0,01936	48,68	15,5	0,02189	87,6

У разі значного збільшення струму температурне поле у проводі стає функцією часу. Виникає нестационарний тепловий процес: кількість тепла, що виділяється у проводі, може бути більшою від кількості тепла, яке відводиться від проводу в навколишнє середовище.

Час, впродовж якого провід витримає перевантаження без пошкодження ізоляції, визначається за формулою [6]

$$\tau = \tau_n \ln \frac{I_{доп}^2 \rho_t}{I_{доп}^2 \rho_t - \pi \alpha S_{пр} d_3^2} \quad (5)$$

де τ_n – стала часу за нагріванням, що залежить від співвідношення теплоємності та теплопровідності, с.

Для визначення тривалості часу до виникнення джерела загоряння (оплавлення ізоляції із подальшим КЗ) необхідно виходити із ампер-секундних характеристик проводів (приклад наведено на рис. 4).

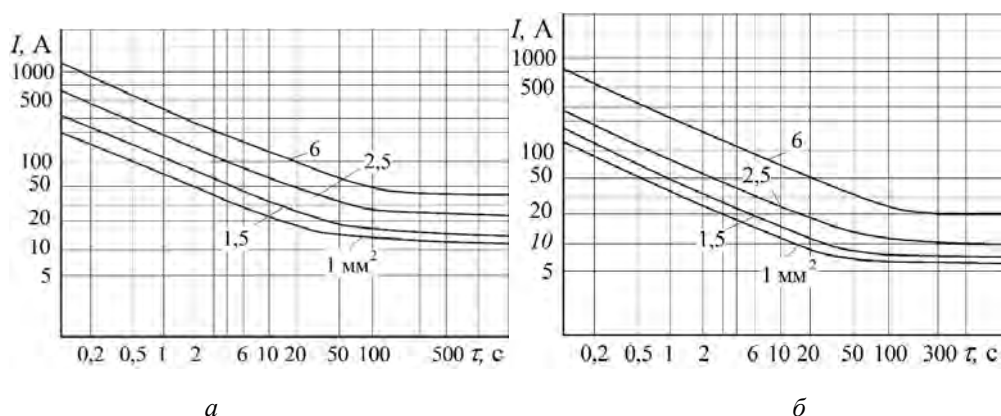


Рис. 4. Ампер-секундні характеристики проводів: а – $T_{cp} = 50 \text{ }^\circ\text{C}$; б – $T_{cp} = 65 \text{ }^\circ\text{C}$

КЗ і перегрівання проводів становлять значну пожежну небезпеку і їх виникнення не повинна допускати система захисту. Однак практика показує, що пожежна безпека електрообладнання не може бути гарантована через декілька причин. Такими причинами є [5]: а) значне зниження струму КЗ через обмежувальну дію дуги (опір дуги коливається в межах 0,05–0,4 Ом), за якого величина струму в дузі іноді не досягає значень номінальних струмів запобіжників; б) переривчастий характер горіння дуги, за якого час безперервного проходження струму КЗ сягає 0,05–0,4 с, тобто часто менше ніж потрібно для спрацювання захисту – перегорання плавких і спрацювання біметалевих запобіжників. В цих умовах горючі матеріали у місці виникнення дуги КЗ встигають загорятися у разі короткочасної, але часті дії на них високої температури електричної дуги. Також у разі зростання струмових навантажень під час міжвиткових замикань у обмоткових комплектуючих або у випадку виникнення аварійних режимів їх роботи з інших причин, що супроводжується перегріванням проводів і виникненням нестационарного теплового процесу – кількість тепла, що виділяється у проводі, більша від кількості тепла, яке відводиться від проводу в навколишнє середовище, через деякий час ізоляція проводу оплавляється із виникненням джерела загоряння.

Характерною ілюстрацією цього став випадок на новому автобусі ЛАЗ-5207, поданому на летовище для перевезення членів урядової делегації під час візиту до Львова 26.02.2004 р. Коли члени делегації зайшли у автобус і почали побіжно оглядати його інтер'єр, раптом з-під підлоги, із каналу опалення пішов дим і почалася локальна пожежа. Салон автобуса швидко спорожнів. Розслідування цього прикрого випадку виявили, що загорілася обмотка електродвигуна вентилятора опалювача салону і розжарилися провoda його електроживлення до оплавлення ізоляції. Причиною стало загальмовування крильчатки вентилятора шматком пінопласту, який потрапив у його робочу зону із термоізоляційного пакета кузова, запобіжник електричного кола вентилятора не спрацював.

Висновки. 1. Як впливає із результатів досліджень, якщо справні електромережі й елементи системи захисту, температурні режими проводів не досягають критичних значень.

2. Через інерційність існуючої системи електричного захисту і певні порушення режиму експлуатації електрообладнання висока ймовірність виникнення КЗ чи критичного перегрівання проводів, що може призвести до виникнення джерела загоряння і пожежі на автомобілі.

3. Щоб запобігти виникненню аварійних режимів у електрообладнанні, необхідно неухильно дотримуватися регламенту технічного обслуговування електричної мережі та вимог щодо безпеки її експлуатації, насамперед застосуванням запобіжників згідно з керівництвом з експлуатації заводу-виготовлювача автомобіля.

1. Немий С. В. Електрична мережа автомобіля як джерело пожежної небезпеки / С. В. Немий, Т. В. Ребот // Пожежна безпека: збірник наукових праць Львівського державного університету безпеки життєдіяльності. – Львів, 2015. – № 26. – С. 116–121. 2. Немий С. В. Дослідження теплової стійкості електричних проводів автомобіля // Пожежна безпека: збірник наукових праць Львівського державного університету безпеки життєдіяльності. – 2016. – № 27. – С. 104–109. 3. Брушлинский Н. Н. Мировая пожарная статистика в начале XXI века / Н. Н. Брушлинский, С. В. Соколов // Пожарная безопасность. – М., 2005. – № 5. – С. 78–88. 4. Каминский Я. Н. Исследование и расчеты электрических цепей из условий тепловой нагрузки проводов и особенностей монтажа на автобусах. В сб.: Труды ГСКБ по автобусам, 1970. – С. 19–36. 5. Забиров А. С. Пожарная опасность коротких замыканий. – М.: Стройиздат, 1987. – 104 с. 6. Исхаков Х. И. Пожарная безопасность автомобилей / Х. И. Исхаков, А. В. Пахомов, Я. Н. Каминский. – М.: Транспорт, 1987. – 87 с. 7. Семерак М. М. Дослідження режимів нагрівання провідників електричним струмом / М. М. Семерак, В. І. Гудим, О. М. Коваль // Зб. наук. праць “Пожежна безпека”. – 2006. – № 8. – С. 67–72. 8. Х Уонг. Основные формулы и данные по теплообмену для инженеров: пер. с англ. / Справочник. – М.: Атомиздат, 1979. – 216 с. 9. Чижков Ю. П. Электрооборудование автомобилей: учеб. для вузов / Ю. П. Чижков, А. В. Акимов. – М.: За рулем, 1999. – 384 с.