

Дніпровський національний університет залізничного транспорту
імені академіка В. Лазаряна
Міністерство освіти і науки України

Дніпровський національний університет залізничного транспорту
імені академіка В. Лазаряна
Міністерство освіти і науки України

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

КОЗІК ЮРІЙ ГРИГОРОВИЧ

УДК. 629.4.083:001.76

ДИСЕРТАЦІЯ

**Поліпшення експлуатаційної надійності тягових електричних машин
локомотивів**

273 – Залізничний транспорт

27 –Транспорт

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і
текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

 Ю. Г. Козік

Науковий керівник

Капіца Михайло Іванович
доктор технічних наук, професор

Дніпро – 2020

АНОТАЦІЯ

Козік Ю.Г. Поліпшення експлуатаційної надійності тягових електричних машин локомотивів – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 273 «Залізничний транспорт». – Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, Дніпро, 2020.

Проблемі підвищення експлуатаційної надійності ізоляції тягових електродвигунів (ТЕД) локомотивів приділяється постійна увага. У відповідності з «Державною програмою стратегічного розвитку залізниць України», що підготовлена Державним науково-дослідним центром залізничного транспорту України сумісно із фахівцями Укрзалізниці, було розроблено галузеву Програму оновлення тягового рухомого складу залізниць на період до 2020 року, де вказано на необхідність створення сучасних систем обслуговування та ремонту тягового рухомого складу (ТРС) нового покоління та розробка відповідної нормативної документації. Одним з головних завдань «Програми...» є підвищення експлуатаційної надійності ТЕД і зниження експлуатаційних витрат за рахунок вдосконалення системи їх утримання.

Розвиток теоретичних і методичних засад, що забезпечать ефективність у прийнятті рішень з вибору та удосконаленню систем утримання ТРС та його складових, на поточний момент часу, є актуальною науковою проблемою, яка на цей час має велике значення для залізничного транспорту України.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в удосконаленні системи діагностування корпусної ізоляції ТЕД локомотивів з метою прогнозування її залишкового ресурсу та покращення системи відновлення корпусної ізоляції ТЕД з урахуванням технології відновлення:

- *вперше* встановлено еквівалентність величини максимального значення зворотної напруги та величини інтегральної оцінки якості корпусної ізоляції;
- *вперше* запропоновано інтегральний показник кривої зворотної напруги для класифікації станів корпусної ізоляції ТЕД з метою подальшого прогнозування залишкового ресурсу корпусної ізоляції до її відновлення або заміни ізоляції на

нову;

– *вперше* запропоновано стани якості корпусної ізоляції тягового електродвигуна на основі проведення класифікації ступеня її зношування;

– *удосконалено* математичну модель визначення раціональних періодів відновлення корпусної ізоляції ТЕД ЕД-118А з урахуванням технології відновлення, початкового стану якості ізоляції та обмеження на критичне значення зворотної напруги.

Практичне значення. Отримані в дисертаційній роботі результати досліджень використовуються:

- Службою локомотивного господарства Регіональної філії Придніпровська залізниця (акт впровадження результатів НДР № 0118U005059 від 05.02.2019 р.);

- ПрАТ «Металургтрансремонт» (акт впровадження результатів НДР № 0119U000430 від 23.04.2020 р.);

- Матеріали дисертаційної роботи та результати що отримані по завершенню науково – дослідних робіт (номери держреєстрації № 0118U005059, № 0119U000430) використовуються кафедрою «Локомотиви» університету в навчальному процесі та на курсах підвищення кваліфікації працівників Укрзалізниці.

При аналізі досліджень стосовно основних методів контролю якості ізоляції ТЕД відзначено, що у більшості випадків використовуються методи руйнівного контролю поточного стану ізоляції, які, як правило, не дають адекватної оцінки стану ізоляції електродвигунів. Дослідниками відмічається, що найбільшу інформативність про процес старіння ізоляції мають параметри, пов'язані з процесами абсорбції і ресорбції в динаміці. Моделі відновлення, що пропонуються в сучасних публікаціях, часто не враховують поточний стан ТЕД, що відновлюється і ступінь відновлення (технологію відновлення). Моделі, що стосуються прогнозування ресурсу ізоляції ТЕД, дослідниками однозначно не визначені. Ресурс моделюється як напрацювання (час) між суміжними неусувними відмовами. Вихідними даними, при цьому, є інформація про відмови протягом деякого часу експлуатації.

На підставі проаналізованих сучасних досліджень в роботі запропоновано для вибору раціональної системи утримання ТЕД локомотивів враховувати стан корпусної ізоляції через удосконалення системи діагностування та корегування міжремонтних пробігів ТЕД, враховуючи технологію відновлення ізоляції.

Розглянуто процеси старіння ізоляційних конструкцій, основні методи контролю ізоляції, а також контроль стану ізоляції за величиною зворотної напруги. Отримано вирази для обчислення ємності ізоляції та тангенсу кута діелектричних втрат за схемою мосту змінного струму. Розглянуті в роботі характеристики неоднорідності ізоляції обумовлено наявністю заряду абсорбції, мають параметри, які жорстко пов'язані з питомими електричними властивостями ізоляції. Тому вимір і аналіз таких характеристик може дати корисну інформацію про стан ізоляції, про кількість шарів з різними властивостями, про питомі параметри цих шарів. Формально всі абсорбційні характеристики містять практично однакову інформацію про ізоляцію.

Проаналізовано відмови ТЕД локомотивів, чинників відмов ізоляції через несправності інших елементів ТЕД. Поширеною причиною несправності ТЕД є пробій ізоляції та міжвиткові замикання, на долю яких припадає близько 20% і 24% від загального числа відмов для електровозів і тепловозів відповідно.

Було виконано виміри та проведено дослідження зміни опору ізоляції обмоток збудження головних полюсів ТЕД в залежності від пробігу в літній період та взимку. Як з'ясувалося, опір ізоляції, виміри якого проводились мегомметром, має рівномірний закон розподілу і не залежить від сезону. Тобто цей параметр (опір ізоляції) не є інформативним з точки зору діагностування і прогнозування стану ізоляції котушок головних полюсів. Були спроби встановити залежність опору ізоляції від пробігу, що також не дало очікуваних результатів.

Вимір опору ізоляції способом пропонованим «Правилами ремонту електричних машин...» є лише контроль цього параметра, щоб він не виходив за встановлені межі. А для отримання інформативного діагностичного параметра, за яким можна було б судити про стан ізоляції в даний момент часу і передбачити зміну її стану на майбутнє необхідна була розробка нових методів і способів оцінки

стану ізоляції. Акцентовано увагу на те, що, в процесі ремонту необхідно вирішувати завдання не лише відновлення працездатності ізоляційної системи, але й прогнозування її залишкового ресурсу.

Запропоновано показники класифікації, процедуру класифікації, граничні значення параметрів прогнозування залишкового ресурсу корпусної ізоляції ТЕД НБ-406. Метою задачі прогнозування залишкового ресурсу корпусної ізоляції є визначення станів якості корпусної ізоляції тягового електродвигуна за спостереженнями зворотної напруги на основі проведення класифікації ступеня зношування ізоляції що діагностується, а також визначення оцінок напрацювання до моменту відновлення або заміни ізоляції на нову. Методика визначення стану якості корпусної ізоляції містить в собі розроблене програмне забезпечення класифікації об'єктів за введеними показниками. За даною методикою прогнозується і залишковий ресурс корпусної ізоляції до її відновлення. Відповідно до отриманої класифікації, в процедурі розбиття на класи, введено наступні стадії стану корпусної ізоляції: 1-а стадія – «задовільний стан»; 2-а стадія – «перед ремонтний стан»; 3-я стадія – «стан підвищеного ризику». Даний спосіб визначення станів якості корпусної ізоляції прийнятий в межах одного депо, локомотиви якого зазвичай експлуатуються в однакових умовах.

Розроблено математичну модель побудови процесу відновлення корпусної ізоляції в об'ємі поточного ремонту (ПР-3) з урахуванням степені відновлення, визначено раціональні періоди відновлення корпусної ізоляції в об'ємах ПР-3, капітального ремонту (КР-1) та прогнозування ресурсу корпусної ізоляції для ТЕД ЕД-118А. Оптимальними за питомими витратами моментами відновлень ТЕД ЕД-118А до КР-2 є: 360000 км – ПР-3; 567715 км – КР-1; 927715 км – ПР-3; 1108430 км – КР-2. Періодичність відновлення ПР-3 складає $\tau=360000$ км. Результат досягається за отриманою раціональною технологією.

Оптимальними за пробігом моментами відновлень для ТЕД ЕД-118А до КР-2 є: 180000 км, 360000 км, 540000 км – ПР-3; 666715 км – КР-1; 846715 км, 1026715 км, 1206715 км – ПР-3; 1306430 км – КР-2. Періодичність відновлення ПР-3 складає, $\tau=180000$ км. Результат досягається за отриманою раціональною

технологією.

Періоди відновлення корпусної ізоляції необхідні для побудови раціональної системи утримання ТЕД, що в свою чергу призведе до підвищення їх експлуатаційної надійності, зменшенню експлуатаційних витрат та покращенню показників безпеки руху поїздів.

Ключові слова: корпусна ізоляція, математична модель, стан ізоляції, кластерний аналіз, показники якості ізоляції, періоди відновлення ізоляції, система утримання.

Список публікацій здобувача:

- включених до міжнародної наукометричної бази «Scopus»:

Kapitsa, M., Laguta, V., Kozik, Y. Selecting the parameters of the diagnosis of frame insulation condition in electrical machines of locomotives (2018) International Journal of Engineering and Technology (UAE), 7 (4), pp. 110-114. DOI: 10.14419/ijet.v7i4.3.19718. [Електрон.ресурс] / – *Режим доступу:*

<https://www.sciencepubco.com/index.php/ijet/issue/view/394>.

- включених до міжнародної наукометричної бази «Web of Science»:

Kapitsa, M. Classification of Quality Conditions of a Traction Motor Frame Insulation of Locomotives [Electronic resource] / Michail Kapitsa, Vasiliy Laguta, Yuriy Kozik // MATEC Web of Conferences. – 2019. – Vol. 294 : 2nd International Scientific and Practical Conference “Energy-Optimal Technologies, Logistic and Safety on Transport” (EOT-2019). – P. 1–7. – Access Mode: [Електрон.ресурс] / – *Режим доступу:* https://www.matec-conferences.org/articles/mateconf/pdf/2019/43/mateconf_eot18_03002.pdf (21.10.2019). – DOI: 10.1051/mateconf/201929403002.

- включених до фахових видань Переліку, затвердженого Атестаційною комісією МОН України:

Козік Ю. Г. Оптимальне за питомими витратами прогнозування ресурсу корпусної ізоляції тягових електричних двигунів локомотивів. Зб. наук.пр. Держ. ун-ту інфраструктури та технологій. Серія: Трансп. системи і технології. Київ, 2019. Вип. 34. С. 30–47. DOI: <https://doi.org/10.32703/2617-9040-2019-34-1-3>.

Лагута, В. В., Козік, Ю. Г. Визначення періодів відновлення корпусної ізоляції

тягового електродвигуна ЕД-118А за спостереженнями зворотної напруги. Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В.Лазаряна. 2020. № 3 (87). С. 163–173. DOI: 10.15802/stp2020/208270.

- які засвідчують апробацію матеріалів дисертації на наукових конференціях та семінарах:

Обґрунтування методу контролю стану корпусної ізоляції тягових електричних машин локомотивів. Лагута В.В., Козік Ю.Г. Тези [Текст] 78 Міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту» [Текст] Дніпропетр. нац. ун-т залізн. трансп. ім. акад. В.Лазаряна. – Дніпро: Дніпропетр. нац. ун-т залізн. трансп. ім. акад. В.Лазаряна, 2018, С.15

Вибір параметрів контролю стану корпусної ізоляції електричних машин локомотивів Козік Ю.Г., Лагута В.В. Тези [Текст]. XI Міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні інформаційні та комунікаційні технології на транспорті, в промисловості та освіті» Дніпропетр. нац. ун-т залізн. трансп. ім. акад. В.Лазаряна. – Дніпро: Дніпропетр. нац. ун-т залізн. трансп. ім. акад. В.Лазаряна, 2017, С.38

Методи випробувань ізоляційних конструкцій тягових електричних машин локомотивів Капіца М.І., Козік Ю.Г. Міжнародна науково-технічна конференція «Технології та інфраструктура транспорту», Харків, 14-16 травня 2018 р.: Тези доповідей. – Харків: УкрДУЗТ, С.107-109

Застосування енергозаощаджуючих технологій під час випробувань ізоляційних конструкцій тягових електричних машин локомотивів. Капіца М.І., Лагута В.В., Козік Ю.Г. Матеріали міжнародної науково – практичної конференції (Львів, 18-19 червня 2018 р.) – Дніпро.: Дніпропетр. нац. ун-т залізн. трансп. ім. акад. В.Лазаряна, 2018, С.46-47

Капіца М.І., Ю.Г. Козік Неруйнівні технології контролю корпусної ізоляції тягових електричних машин локомотивів [Текст]. Транспорт і логістика: проблеми та рішення: Збірник наукових праць за матеріалами VIII-ї Міжнародної науково-

практичної конференції, Сєвєродонецьк – Одеса – Вільнюс – Київ, 23-25 травня 2018р. / Східноукраїнський національний університет ім. В. Даля, Одеський національний морський університет – Одеса : КУПРІЄНКО СВ, 2018. – С.79

Козік Ю. Г., Капица М. І. Визначення оптимального напрацювання корпусної ізоляції ТЕД локомотивів з врахуванням ступені її відновлення [Текст]. Науково-технічний прогрес на транспорті: Тези доповідей 79 Всеукраїнської науково-технічної конференції молодих вчених, магістрантів та студентів / Дніпровський нац. ун-т за-лізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпро : Дніпровський нац. ун-т залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, 2019. – С78.

Козік Ю.Г., Лагута В.В. Прогнозування ресурсу корпусної ізоляції тягових електричних двигунів локомотивів за питомими витратами [Текст] / Козік Ю.Г., Лагута В.В.// Тези 79-ї Міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту» 16-17 травня 2019 р. – Дніпро: Вид-во ДНУЗТ, 2019. – С. 29 – 30.

Капица М.И., Козик Ю.Г., Лагута В.В. Оценка остаточного ресурса корпусной изоляции ТЭД методом классификации ее состояний [Текст] /Капица М.И., Козик Ю.Г., Лагута В.В.// ІКСЗТ, 2018 №4 (додаток): Тези 31-ї міжнародної практичної конференції «Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті» – Харків: Вид-во УкрДУЗТ, 2018. – С. 11 – 12.

M. Kapitsa, V. Laguta, and Yu. Kozik Classification of quality conditions of a traction motor frame insulation of locomotives AGENDA of the 2-nd international scientific and practical conference "ENERGY-OPTIMAL TECHNOLOGIES, LOGISTICS AND SAFETY ON TRANSPORT" DNIPRO NATIONAL UNIVERSITY OF RAILWAY TRANSPORT NAMED AFTER ACADEMICIAN V. LAZARYAN RAILWAY INSTITUTE; September 19-20th, 2019, Lviv, Ukraine.

ABSTRACT

Kozik Yu.H. Improving the Operational Reliability of Electrical Traction Machines of Locomotives. Qualifying Research Paper as Manuscript.

Thesis for the Degree of Doctor of Philosophy in Specialty 273 "Rail Transport". -

Dnipro National University of Rail Transport named after Academician V. Lazaryan, Dnipro, 2020.

The problem of improving the operational reliability of insulation of traction motors (TM) of locomotives has been given constant attention. In accordance with the State Program for Strategic Development of Railways of Ukraine, prepared by the State Research Centre of Rail Transport of Ukraine together with the specialists from Ukrainian Railways, a sectoral Programme for Renewal of Traction Rolling Stock of Railways for the period up to 2020 was developed, which indicated the need to implement the next generation systems for maintenance and repair of traction rolling stock (TRS) and development of relevant regulatory documents. One of the main tasks of the Program is to improve the operational reliability of traction motors and reduce operating costs by improving the system of their maintenance.

The development of theoretical and methodological foundations that will ensure effective decision making regarding the selection and improvement of systems for maintenance of TRS and its components is currently an urgent science issue, which is nowadays of great importance for the rail transport of Ukraine.

The scientific novelty of the obtained results lies in the improved system for diagnostics of frame insulation of TM of locomotives for the purpose of predicting its residual life and improving the system for repair of TM frame insulation, taking into account the restoration technology:

- *for the first time*, the equivalence of the maximum value of reverse voltage and the value of integrated estimation of frame insulation performance was established;
- *for the first time*, an integrated indicator of the reverse voltage curve was suggested for classifying the conditions of TM frame insulation in order to further predict the residual life of frame insulation before its restoration or replacement;
- *for the first time*, the conditions of TM frame insulation performance were suggested based on the classification of the degree of insulation wear;
- the mathematical model for determining rational periods for repair of frame insulation of ЕД-118А traction motor was *improved*, taking into account a restoring

technology, initial state of insulation performance and limits on the critical value of reverse voltage.

Practical importance. The research results obtained in the thesis are used:

- by the Service of Locomotive Facilities of the Regional Branch of Cisdnieper Railways (Certificate of Implementation of Research Work Results No. 0118U005059 dated 05.02.2019);
- by Metalurhtransremont PJSC (Certificate of Implementation of Research Work Results No. 0119U000430 dated 23.04.2020);
- Materials of the thesis and results obtained upon the completion of research work (state registration numbers No. 0118U005059, No. 0119U000430) are used by the Department of Locomotives of the university in the educational process and advanced training courses for employees of Ukrainian Railways.

When analysing the research regarding the main methods for monitoring the TM insulation performance, it was observed that in most cases the destructive testing methods were used for monitoring the current condition of insulation, which, as a rule, did not give an adequate assessment of the condition of electric motor insulation. The researchers point out that the parameters associated with the processes of absorption and desorption in dynamics have the highest informative value concerning the aging of insulation. The models of repair suggested in modern publications often do not take into account the current condition of TM, which is repaired and the degree of repair (restoration technology). The models related to predicting the residual life of TM insulation have not been unambiguously defined by the researchers. The residual life is modelled as operating time between two adjacent unavoidable failures. The initial data, at that, is the information about failures during certain time of operation.

Based on the analysed modern research, it was suggested in the thesis, when choosing a rational system for TM maintenance, to take into account the condition of frame insulation by improving the system for diagnostics and adjustment of time between repairs of TM, taking into consideration the insulation restoration technology.

The processes of aging of insulating structures, main methods for insulation monitoring, as well as control of insulation condition by the value of reverse voltage were

considered. Expressions for calculating the capacity of insulation and dielectric loss factor for the AC bridge circuit were obtained. The characteristics of inhomogeneous insulation considered in the work were conditioned by the presence of absorption charge and had parameters firmly related to the specific electrical properties of insulation. Therefore, the measurement and analysis of such characteristics can provide useful information about the condition of insulation, number of layers with different properties and specific parameters of these layers. Formally, all absorption characteristics contain almost identical information about insulation.

The failures of TM of locomotives and factors of insulation failures due to malfunctions of other TM elements were analysed. A common cause of TM malfunction is insulation breakdown and turn-to-turn short circuits, which account for about 20% and 24% of the total number of failures for electric and diesel locomotives, respectively.

Measurements were performed and the change in the insulation resistance of the excitation windings of TM main poles, depending on the operating time in summer and winter, were studied. It turned out that the insulation resistance, which was measured with a megohmmeter, had a uniform distribution law and did not depend on the season. That is, this parameter (insulation resistance) was not informative in terms of diagnostics and prediction of the condition of insulation of the main pole coils. The attempts were made to establish the dependence of insulation resistance on repair interval, which also did not yield the expected results.

The measurement of insulation resistance using the method suggested in the "Rules for Repair of Electrical Machines..." provided only control of this parameter so that it did not exceed the established limits. However, in order to obtain an informative diagnostic parameter, by which one could judge the condition of insulation at the given moment and predict the change of its condition in the future, it was necessary to develop new methods and techniques for assessing the condition of insulation. The attention was drawn to the fact that in the process of repair it was necessary to solve the problem of not only restoring the performance of the insulation system, but also predicting its residual life.

The indicators of classification, procedure for classification and limit values of parameters for predicting the residual life of frame insulation of HB-406 traction motor were

suggested. The purpose of the task of predicting the residual life of frame insulation was to determine the condition of TM frame insulation performance observing the reverse voltage based on the classification of the degree of wear of the insulation diagnosed, as well as to determine estimates of operating time before restoration or replacement of insulation. The technique for determining the condition of frame insulation performance included the developed software for classifying objects according to the indicators entered. The residual life of frame insulation before its repair was also predicted by this technique. According to the classification obtained, the following stages of the condition of frame insulation were distinguished in the procedure of dividing into classes: 1st stage - "satisfactory condition", 2nd stage - "before the repair condition" and 3rd stage - "high risk condition". This method of determining the condition of frame insulation was adopted within one depot, the locomotives of which were usually operated under the same conditions.

The mathematical model for creation of the process of frame insulation restoration within the scope of current repair (CR-3) was developed, taking into account the degree of restoration, and rational intervals of frame insulation repair within the scope of CR-3, overhaul (O-1) and prediction of the residual life of frame insulation for ЕД-118А traction motors were determined. The optimal, in terms of unit costs, moments of restoration for ЕД-118А traction motor before O-2 were: 360 000 km – CR-3; 567 715 km – O-1; 927 715 km – CR-3; 1 108 430 km – O-2. The interval of CR-3 was $\tau = 360\ 000$ km. The result was achieved using the developed rational technology.

The optimal, in terms of operating time, moments of restoration for ЕД-118А traction motor before O-2 were: 180 000 km, 360 000 km, 540 000 km – CR-3, 666 715 km – O-1, 846 715 km, 1 026 715 km, 1 206 715 km – CR-3; 1 306 430 km – O-2. The interval of CR-3 was $\tau = 180\ 000$ km. The result was achieved using the developed rational technology.

The intervals of frame insulation repair are necessary to create a rational system for maintenance of traction motors, which in its turn will improve their operational reliability, reduce operating costs and improve the train safety.

Key words: frame insulation, mathematical model, condition of insulation, cluster analysis, indicators of insulation performance, insulation repair intervals, maintenance system.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	15
Розділ 1 Огляд наукових досліджень з визначення стану корпусної ізоляції та утримання ТЕД	24
1.1 Діагностування як необхідний елемент системи утримання локомотивів і ТЕД	24
1.2 Методи контролю якості ізоляційних матеріалів	30
1.3 Аналіз досліджень і публікацій з контролю якості ізоляційних матеріалів ТЕД.....	33
1.4 Дослідження з визначення стану ізоляції ТЕД та надійності ТЕД локомотивів	34
1.5 Аналіз останніх досліджень з побудови систем утримання ТРС та ТЕД	38
1.6 Постановка проблеми. Обґрунтування мети і формулювання задач наукового дослідження	40
РОЗДІЛ 2 КОНТРОЛЬ ПОКАЗНИКІВ ЯКОСТІ СТАНУ ІЗОЛЯЦІЇ ТЕД.....	42
2.1 Процеси старіння ізоляції.....	42
2.2 Основні методи контролю показників стану ізоляції ТЕД.....	44
2.3 Методи контролю ізоляції, засновані на явищі абсорбції зарядів	57
2.4 Контроль ізоляції за величиною зворотної напруги.....	64
Висновки до розділу 2	67
РОЗДІЛ 3 АНАЛІЗ ВІДМОВ ТЯГОВИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ двигунів локомотивів ...	68
3.1 Аналіз несправностей тягових електродвигунів, електровозів і тепловозів	68
3.2 Аналіз відмов ТЕД локомотивів ВЛ-8 в депо Нижньодніпровськ-Вузол.....	72
Висновки до розділу 3	80
РОЗДІЛ 4 СТАНИ КОРПУСНОЇ ІЗОЛЯЦІЇ ТА ВИЗНАЧЕННЯ ЇЇ ЗАЛИШКОВОГО РЕСУРСУ	82
4.1 Аналіз методів прогнозування стану корпусної ізоляції	82
4.2 Вибір параметрів контролю стану корпусної ізоляції електричних машин локомотивів	83
4.3 Задача автоматичної класифікації в задачі розбиття об'єктів на класи.....	92

4.4 Контроль надійності технічних систем з використанням апарату розпізнавання образів.....	93
4.5 Постановка задачі прогнозування.....	95
4.6 Інтегральне оцінювання станів якості ізоляції.....	95
4.7 Кластерний аналіз станів корпусної ізоляції ТЕД НБ-406.....	100
4.8 Результати класифікації станів.....	103
Висновки до розділу 4.....	108
РОЗДІЛ 5 ПРОГНОЗУВАННЯ ЗАЛИШКОВОГО РЕСУРСУ КОРПУСНОЇ ІЗОЛЯЦІЇ ТЯГОВИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ ДВИГУНІВ ЛОКОМОТИВІВ.....	110
5.1 Метод дослідження.....	110
5.2 Результати прогнозування.....	113
Висновки до розділу 5.....	121
ВИСНОВКИ.....	122
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	124
ДОДАТОК А. Обчислення варіантів відновлення та прогнозування залишкового ресурсу до КР1 та КР1 відповідно до технологій відновлення.....	145
ДОДАТОК Б. Кластерний аналіз станів корпусної ізоляції ТЕД НБ-406 за зворотною напругою.....	212
ДОДАТОК В. Підпрограми до задачі кластеризації об'єктів.....	220
ДОДАТОК Г. Підпрограми до задачі дискримінантного аналізу.....	238
ДОДАТОК Д. Акти впроваджень та список публікацій.....	243

ВСТУП

У локомотивному господарстві залізниць України протягом багатьох десятиліть застосовується система планово-попереджувального ремонт (ППР) тягового рухомого складу (ТРС), тобто з нормативною періодичністю і регламентованим переліком основних робіт. При цьому використовуються єдині технологія та організація технічних обслуговувань (ТО) і поточного ремонту (ПР) ТРС.

Діюча система ППР орієнтована на середній рівень технічного стану ТРС. Для її удосконалення час від часу наказами Укрзалізниці встановлюється перелік видів ремонту і усереднені норми міжремонтних періодів по кожній із серій. На їхній основі залізницями вводяться диференційовані норми для депо з врахуванням умов експлуатації та можливостей баз ремонту.

Аналіз стану локомотивного парку «Укрзалізниці», що проводиться, показує, що кількість відмов тягових електричних двигунів (ТЕД) по причині пошкоджень ізоляції обмоток на 1 млн км пробігу в середньому становить від двох до п'яти випадків, що призводить до значних втрат в локомотивному господарстві. Тому, науковці, проблемі підвищення експлуатаційної надійності ізоляції ТЕД локомотивів приділяють значну увагу.

Актуальність теми дисертації

Проблемам підвищення ефективності використання локомотивів присвячені численні дослідження в нашій країні і за кордоном. В основному напрямок цих досліджень має пріоритет у визначенні оптимальної структури ремонтних циклів, впровадженні засобів діагностування в технологічні процеси обслуговування та ремонту і оцінки технічного стану до і після ремонту.

Дослідженнями виконаними науковцями встановлено, що біля 50% робіт передбачених регламентом, в залежності від умов експлуатації ТРС, виконується без фактичної їхньої необхідності. Крім того, для багатьох складових ТРС обслуговування та ремонти за регламентом не знижують частоту виходу їх із ладу. Більше того, надійність роботи локомотива після ТО та ПР знижується, іноді тимчасово (до моменту припрацювання деталей, вузла), а іноді закономірно, що

обумовлено появою дефектів, яких не було до втручання. Дослідженнями також встановлено, що біля 70% дефектів локомотива з'являється після виконання ТО та ПР.

До особливостей систем ізоляції ТЕД локомотивів слід віднести вимоги до їх системи утримування. Надійність роботи ТЕД можна відстежити за статистичною інформацією про відмови локомотивів під час експлуатації та подальшого відновлення. Встановлено, що внаслідок інтенсивного теплового і електричного старіння, а також втрати механічних властивостей в важких умовах експлуатації, значна кількість ТЕД не виробляють свій ресурс, передбачений нормами, і надходять в заводський ремонт завчасно.

ТЕД локомотивів відносяться до гранично навантаженого обладнання, і тому з позиції комплексного впливу на них теплових, електромагнітних, механічних і кліматичних чинників, незважаючи на постійні заходи конструктивно-технологічного характеру при виготовленні і ремонті, рівень пошкоджуваності їх в експлуатації залишається помітним.

Одним із шляхів зниження витрат на систему утримання ТЕД є удосконалення технічного обслуговування та відновлення ізоляції. Проблемі підвищення експлуатаційної надійності ізоляції тягових електродвигунів приділяється постійна увага. У відповідності з «Державною програмою стратегічного розвитку залізниць України», що підготовлена Державним науково-дослідним центром залізничного транспорту України сумісно із фахівцями Укрзалізниці, розроблено галузеву Програму оновлення тягового рухомого складу залізниць на період до 2020 року, де вказано на необхідність створення сучасних систем обслуговування та ремонту ТРС нового покоління та розробка відповідної нормативної документації. Одним з головних завдань Програми є підвищення експлуатаційної надійності ТЕД і зниження експлуатаційних витрат за рахунок вдосконалення системи їх утримування.

Розвиток теоретичних, методичних і практичних засад, що забезпечать ефективність у прийнятті рішень з вибору та удосконаленню систем утримання ТЕД на поточний момент часу є актуальною науковою і технічною задачею, яка має

велике значення для залізничного транспорту України. Звідси сформульовано мету і задачі дослідження.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами

Дисертаційна робота виконана на кафедрі «Локомотиви» Дніпровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна в період з 2016 по 2020 р.р. у відповідності з планами науково – дослідних робіт університету, які в свою чергу, виконувалися в рамках галузевих програм Укрзалізниці та промислових підприємств України за такими темами:

- «Підвищення надійності тягових електричних машин локомотивів», номер держреєстрації № 0118U005059;
- «Удосконалення системи утримання тягових електричних машин локомотивів», номер держреєстрації № 0119U000430.

В перерахованих вище науково дослідних роботах автор є співвиконавцем.

Мета та завдання дослідження

Метою дослідження даної роботи є: підвищення експлуатаційної надійності ТЕД локомотивів шляхом удосконалення системи їх діагностування та корегування міжремонтних пробігів і обсягів виконуваних робіт з обслуговування та ремонту.

Для досягнення сформульованої мети поставлені наступні задачі:

- Виконати огляд літературних джерел щодо надійності тягових електричних двигунів локомотивів, класифікації методів та пристроїв контролю та діагностування ізоляції.
- Проаналізувати моделі процесу старіння ізоляції.
- Виконати аналіз відмов тягових електричних двигунів локомотивів.
- Визначити ознаки що відображають процес старіння корпусної ізоляції і дозволяють прогнозувати зміну її технічного стану в умовах експлуатації.
- Дослідити залежності зворотної напруги від інтегрального показника стану якості корпусної ізоляції.
- Виконати класифікацію станів якості корпусної ізоляції ТЕД НБ-406.
- Розробити математичну модель побудови процесу відновлення корпусної ізоляції в об'ємі ПР-3 з урахуванням ступеня її відновлення.

- Визначити раціональні періоди відновлення корпусної ізоляції в об'ємі ПР-3 та прогнозування ресурсу корпусної ізоляції для ТЕД ЕД-118А.

Об'єкт дослідження – процес обслуговування та ремонту тягових електричних двигунів локомотивів.

Предмет дослідження – технологія технічного обслуговування та ремонту тягових електричних двигунів локомотивів.

Методи дослідження. Вирішення наукової проблеми базується на теоретичних основах удосконалення систем утримання тягового рухомого складу з використанням таких методів: теорії імовірності та математичної статистики – аналіз відмов тягових електричних двигунів локомотивів; дослідження залежності зворотної напруги від інтегрального показника стану якості корпусної ізоляції; математична теорія розпізнавання образів – визначення ознак що відображають процес старіння корпусної ізоляції і дозволяють прогнозувати зміну її технічного стану в умовах експлуатації; класифікація станів якості корпусної ізоляції ТЕД НБ-406; математичне моделювання – розробка математичної моделі побудови процесу відновлення корпусної ізоляції в об'ємі ПР-3 з урахуванням степені відновлення; математичне програмування – визначення раціональних періодів відновлення корпусної ізоляції в об'ємі ПР-3 та прогнозування залишкового ресурсу корпусної ізоляції для ТЕД ЕД-118А

Достовірність результатів роботи підтверджується задовільною збіжністю розрахункових і експериментальних даних, що зумовлено відповідністю прийнятих припущень характеру вирішуваних задач, правильним вибором способів і технічних засобів випробувань, виміральної апаратури, коректно створеною методикою, програмою проведення та методами обробки результатів експериментів. Наукові положення, висновки і отримані результати базуються на строго доведених і коректно використаних висновках математичного аналізу і математичного моделювання. Достовірність підтверджена також експериментальними дослідженнями якості корпусної ізоляції тягових електродвигунів із застосуванням розробленого раніше на кафедрі «Локомотиви» приладу для діагностування стану корпусної ізоляції ТЕД.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в удосконаленні системи діагностування корпусної ізоляції ТЕД локомотивів з метою прогнозування її залишкового ресурсу та покращення системи відновлення корпусної ізоляції ТЕД з урахуванням технології відновлення.

- *Вперше* встановлено еквівалентність величини максимального значення зворотної напруги та величини інтегральної оцінки якості корпусної ізоляції;
- *вперше* запропоновано інтегральний показник кривої зворотної напруги для класифікації станів корпусної ізоляції ТЕД з метою подальшого прогнозування залишкового ресурсу корпусної ізоляції до її відновлення або заміни ізоляції на нову;
- *вперше* запропоновано стани якості корпусної ізоляції тягового електродвигуна на основі проведення класифікації ступеня її зношування;
- *удосконалено* математичну модель визначення раціональних періодів відновлення корпусної ізоляції ТЕД ЕД-118А з урахуванням технології відновлення, початкового стану якості ізоляції та обмеження на критичне значення зворотної напруги.

Практичне значення отриманих результатів полягає в тому, що всі розробки, як теоритичного так і практичного плану, повністю відповідають «Державній програмі стратегічного розвитку залізниць України», галузевій Програмі оновлення тягового рухомого складу залізниць на період до 2020 року, а саме:

- розроблено автоматизований програмний комплекс для проведення кластерного та дискримінантного аналізу безлічі кривих зворотної напруги для визначення станів якості корпусної ізоляції ТЕД локомотивів на основі вимірів зворотної напруги;
- класифікація кривих зворотної напруги корпусної ізоляції ТЕД НБ-406 на кластери дозволила виділити 3 стійкі стадії стану ізоляції: «задовільний стан», «ремонтний стан», «стан підвищеного ризику». Стани ізоляції дозволяють прогнозувати залишковий ресурс до віднавлення;

– запропоновано періодичності відновлення властивостей корпусної ізоляції ТЕД ЕД-118А з урахуванням «технології відновлення», початкової якості ізоляції, питомих витрат на відновлення та пробігу, що дає можливість замовнику вибирати «технологію відновлення» для проведення відновлювальних робіт

Використання результатів роботи:

1. Отримані в дисертаційній роботі результати досліджень використовуються:

- Службою локомотивного господарства Придніпровської залізниці (акт впровадження результатів НДР № 0118U005059 від 05.02.2019 р.);

- ПрАТ «Металургтрансремонт» (акт впровадження результатів НДР № 0119U000430 від 23.04.2020 р.);

2. Матеріали дисертаційної роботи та результати що отримані по завершенню науково – дослідних робіт (номери держреєстрації № 0118U005059, № 0119U000430) використовуються кафедрою Локомотиви в навчальному процесі та на курсах підвищення кваліфікації працівників Укрзалізниці.

Особистий внесок здобувача. Усі наукові положення, розробки та результати досліджень, що виносяться на захист, отримані особисто автором або за його безпосередньої участі. Обробка матеріалів дисертації, формулювання наукових положень і висновків, підготовка публікацій і доповідей проводилась автором особисто. Постановку мети та задач дослідження виконано спільно з науковим керівником.

Усі положення та результати, що виносяться на захист дисертації приведені в роботах [1-4]. Дисертантом опубліковано особисто роботу з визначення оптимального прогнозування ресурсу корпусної ізоляції за питомими витратами на ремонт ТЕД ЕД-118А [2]. У наукових працях, опублікованих сумісно зі співавторами, дисертанту належить:

- експериментальні дослідження аналітичних залежностей показників стану ізоляції (електрична міцність), що запропоновано в статті, за вимірами зворотної напруги ТЕД НБ-406 [1];

- постановка задачі визначення станів корпусної ізоляції за вимірами зворотної напруги; метод розв’язання задачі класифікації станів ізоляції, спосіб

прогнозування залишкового ресурсу корпусної ізоляції на основі класифікації її станів; експериментальні дослідження з визначення станів корпусної ізоляції ТЕД НБ-406 [4];

– проведення обчислювального експерименту з визначення раціональних періодів відновлення корпусної ізоляції ТЕД ЕД-118А за вимірами зворотної напруги з мінімізацією суми питомих витрат на виконання ПР-3 і КР-1 протягом періоду від останнього проведення КР-2 до наступного КР-2 [3];

– побудова кластерів стану корпусної ізоляції та за кластерами запропоновано класифікацію станів корпусної ізоляції ТЕД НБ-406 [4].

Апробація результатів дисертації.

Дисертаційна робота в повному обсязі доповідалась на:

– науковому семінарі кафедри «Локомотиви» Дніпровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна (протокол №1 від 10.09.2020 р.);

– фаховому семінарі Дніпровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна (протокол № 1 від 20.11.2020 р.) кафедр „Локомотиви”, „Вагони та вагонне господарство”, „Теоретична та будівельна механіка”, „Електрорухомий склад залізниць”, „Автоматика та телекомунікації”, „Електротехніка та електромеханіка” та «Теплотехніка»;

– основні результати роботи доповідались автором на науково – технічних конференціях:

- Обґрунтування методу контролю стану корпусної ізоляції тягових електричних машин локомотивів. Лагута В.В., Козік Ю.Г. Тези [Текст] 78 Міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту» [Текст] Дніпропетр. нац. ун-т залізн. трансп. ім. акад. В.Лазаряна. – Дніпро: Дніпропетр. нац. ун-т залізн. трансп. ім. акад. В.Лазаряна, 2018, С.15;

- Неруйнівні технології контролю корпусної ізоляції тягових електричних машин локомотивів Капіца М.І., Козік Ю.Г. Науково-технічний прогрес на транспорті [Текст]. Тези доповідей Всеукраїнської науково-технічної конференції

молодих вчених, магістрів та аспірантів. Секція «Механіка»; Дніпропетр. нац. ун-т залізн. трансп. ім. акад. В.Лазаряна. – Дніпро: Дніпропетр. нац. ун-т залізн. трансп. ім. акад. В.Лазаряна, 2018, С.54-55;

- Вибір параметрів контролю стану корпусної ізоляції електричних машин локомотивів Козік Ю.Г., Лагута В.В. Тези [Текст]. XI Міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні інформаційні та комунікаційні технології на транспорті, в промисловості та освіті» Дніпропетр. нац. ун-т залізн. трансп. ім. акад. В.Лазаряна. – Дніпро: Дніпропетр. нац. ун-т залізн. трансп. ім. акад. В.Лазаряна, 2017, С.38;

- Методи випробувань ізоляційних конструкцій тягових електричних машин локомотивів Капіца М.І., Козік Ю.Г. Міжнародна науково-технічна конференція «Технології та інфраструктура транспорту», Харків, 14-16 травня 2018 р.: Тези доповідей. – Харків: УкрДУЗТ, С.107-109;

- Застосування енергозаощаджуючих технологій під час випробувань ізоляційних конструкцій тягових електричних машин локомотивів. Капіца М.І., Лагута В.В., Козік Ю.Г. Матеріали міжнародної науково – практичної конференції (Львів, 18-19 червня 2018 р.) – Дніпро.: Дніпропетр. нац. ун-т залізн. трансп. ім. акад. В.Лазаряна, 2018, С.46-47

- Капіца М.І., Ю.Г. Козік Неруйнівні технології контролю корпусної ізоляції тягових електричних машин локомотивів [Текст]. Транспорт і логістика: проблеми та рішення: Збірник наукових праць за матеріалами VIII-ї Міжнародної науково-практичної конференції, Северодонецьк – Одеса – Вільнюс – Київ, 23-25 травня 2018р. / Східноукраїнський національний університет ім. В. Даля, Одеський національний морський університет – Одеса : КУПРІЄНКО СВ, 2018. – С.79

- Козік Ю. Г., Капіца М. І. Визначення оптимального напрацювання корпусної ізоляції ТЕД локомотивів з врахуванням ступені її відновлення [Текст]. Науково-технічний прогрес на транспорті: Тези доповідей 79 Всеукраїнської науково-технічної конференції молодих вчених, магістрантів та студентів / Дніпровський нац. ун-т залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпро : Дніпровський нац. ун-т залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, 2019. – С78.

- Козік Ю.Г., Лагута В.В. Прогнозування ресурсу корпусної ізоляції тягових електричних двигунів локомотивів за питомими витратами [Текст] / Козік Ю.Г., Лагута В.В.// Тези 79-ї Міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту» 16-17 травня 2019 р. – Дніпро: Вид-во ДНУЗТ, 2019. – С. 29 – 30.

- Капица М.И., Козик Ю.Г., Лагута В.В. Оценка остаточного ресурса корпусной изоляции ТЭД методом классификации ее состояний [Текст] /Капица М.И., Козик Ю.Г., Лагута В.В.// ІКСЗТ, 2018 №4 (додаток): Тези 31-ї міжнародної практичної конференції «Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті» – Харків: Вид-во УкрДУЗТ, 2018. – С. 11 – 12.

- M. Kapitsa, V. Laguta, and Yu. Kozik Classification of quality conditions of a traction motor frame insulation of locomotives AGENDA of the 2-nd international scientific and practical conference "ENERGY-OPTIMAL TECHNOLOGIES, LOGISTICS AND SAFETY ON TRANSPORT" DNIPRO NATIONAL UNIVERSITY OF RAILWAY TRANSPORT NAMED AFTER ACADEMICIAN V. LAZARYAN RAILWAY INSTITUTE; September 19-20th, 2019, Lviv, Ukraine.

Публікації. Основні результати дисертаційної роботи надруковано в 14-ти наукових працях, у тому числі 4 статті у фахових виданнях, що затверджені Міністерством освіти і науки (в тому числі 1 публікація у виданні, що індексується в науково метричній базі *Scopus*, 1 публікація у виданні, що індексується в науково метричній базі *Web of Science*), та 10 тез доповідей.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається із вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел і п'яти додатків. Основний текст роботи викладено на 143 сторінках. Дисертація містить 36 рисунків та 15 таблиць; таблиці та рисунки що розташовані на окремих сторінках, займають 9 сторінок. Список використаних джерел із 175 найменувань приведений на 20 сторінках, додатки на 104 сторінках. Повний обсяг дисертації складає 248 сторінок.

РОЗДІЛ 1

ОГЛЯД НАУКОВИХ ДОСЛІДЖЕНЬ З ВИЗНАЧЕННЯ СТАНУ КОРПУСНОЇ ІЗОЛЯЦІЇ ТА УТРИМАННЯ ТЕД

Технічне обслуговування, поточні і капітальні ремонти тягових електричних двигунів локомотивів направлені на отримання найкращого економічного ефекту від експлуатації ТРС.

Система утримання транспортного засобу – важливий елемент транспортної індустрії. Зауважимо, що витрати на обслуговування і ремонт ТРС в 6 –12 разів перевищують витрати на виробництво нового рухомого складу.

Головною задачею системи утримання ТЕД є постійний контроль і підтримка його технічного стану та надійності на необхідному рівні в процесі експлуатації. При визначенні варіантів раціональної системи утримання будь-якого технічного об'єкту необхідно провести аналіз наукових напрямків розвитку систем технічного обслуговування та ремонту ТРС і ТЕД.

1.1 Діагностування як необхідний елемент системи утримання локомотивів і ТЕД

Створення інформаційно-вимірювальних систем контролю та діагностування сьогодні потребують перебудови технології та організації технічного обслуговування і ремонтів ТЕД і локомотивів в цілому. Головна задача технології та організації технічного обслуговування технічних об'єктів залізничного транспорту є створення комплексної системи ремонту з науково обґрунтованим регламентним впливом на устаткування з врахуванням реального технічного стану вузлів і агрегатів локомотива [11]. Необхідною умовою для одержання даних про технічний стан ТЕД і локомотива є використання засобів і методів технічного діагностування.

При діагностуванні ТЕД потрібне виконання трьох основних функцій: одержання необхідних даних про стан конкретного об'єкта методом виміру контрольованого параметра [11,12], обробка та аналіз даних з використанням обчислювальної техніки, оцінка стану діагностичних елементів [13] для діагностування та прогнозування їх залишкового ресурсу [14].

На етапі розвитку засобів технічної діагностики локомотивів [11] була висунута гіпотеза про можливість поступового «відмирання» основних взаємозалежних регламентів існуючої планової системи – норм періодичності, циклічності та перелік обов'язкових робіт для кожного виду технічного обслуговування та поточного ремонту. Всі ці норми втратять значення при умові, що депо буде мати засоби неруйнівного оцінювання технічного стану технічного об'єкту, коли терміни та об'єми контролю і ремонту стануть чисто індивідуальними. Дослідження які проводились в [14] дозволяють більш обґрунтовано відповісти на запитання – діагностування замість плановості технічного утримання локомотивів або поряд із плановістю в якості лише чинника, який корегує планову систему та об'єми ремонтних робіт?

Аналіз Правил ремонту ТРС (накази Укрзалізниці № 196-Ц від 4.04.2001 р., №30 – ЦЗ від 31.01.2005, №093-ЦЗ від 30.06.2010 р., №429 –Ц від 15.10.2016 р.) показав, що необхідність ТО визначається потребою не тільки виявляти дефекти, але й проводити додаткові ремонтні впливи, такі як добавка мастила, регулювання, профілактика гальм і т.п. Необхідність планових ремонтів визначається, потребою в заміні або ремонті елементів, які повільно зношуються або виходять з ладу.

Для парку ТЕД, що знаходиться зараз в експлуатації, відповідь на питання про мету збору даних про їх стан однозначна: діагностування не замінить планову систему утримання, а буде лише доповненням до неї, але діагностування робить систему утримання більш ефективною. Як правило, багатьом відмова елементу передуює поступовий розвиток його дефекту. Виявлення таких дефектів без розбирання вузла до їхнього переходу до відмовного стану дозволяє своєчасно усунути дефект і попередити втрати в процесі експлуатації.

В сучасних дослідках намітилася тенденція розглядати процедуру технічного діагностування як резерв підвищення ефективності роботи технічних об'єктів залізничного транспорту [15–17].

Удосконалення системи ТО і ПР ТЕД і локомотивів в експлуатації на базі використання систем діагностування дозволяє знизити число непланових ремонтів у середньому на 25%, зменшити експлуатаційні витрати палива на 5–8%, скоротити

час простоювання на непланових ремонтах приблизно 50% [18, 19].

Сьогодні засоби технічного діагностування знайшли широке застосування в машинобудуванні, авіації, автомобільній промисловості та інших галузях промисловості.

Інтенсивний розвиток засобів технічного діагностування локомотивів розпочався після того, як були розроблені автоматизовані системи контролю (АСК) літальних апаратів [20– 22]. Наукові основи розробок методів і засобів технічного діагностування розроблено вченими: А.А. Босов, Б.Є. Боднар, Г.Ф. Верзаков, О.В. Мозгалевський, Я.Я. Осіс, П.П. Пархоменко, Є.С. Павлович, Е.А. Пахомов, Е.Е. Рідель, В.В. Стрекопитов, Є.С. Согомоян, Е.Д. Тартаковський, В.О. Четвергов та інших.

Роботи з розвитку засобів і методів технічного діагностування об'єктів залізничного транспорту в тому числі і ТЕД локомотивів виконувалися та виконуються в науково-дослідних інститутах і вузах, як на Україні, так і в країнах СНД під керівництвом О.І. Володіна, О.Д. Глущенко, О.Л. Голубенко, І.П. Ісаєва, М.І.Капіци, В.Д. Кузьмича, Н.М. Лукова, Н.О. Малозьомова, Ю.А. Магнітського, Е.О. Пахомова, І.Ф. Пушкарьова, Т.Ф. Ставрова, В.В. Стрекопитова, Е.Д. Тартаковського, В.О. Четвергова, О.О. Чернякова та інших. В роботах, що виконані під керівництвом О.В. Мозгалевського, проведено широке узагальнення наукових результатів по технічному діагностуванню. Вони мають методологічний характер і присвячені переважно питанням технічного діагностування неперервних об'єктів [23]. Роботи П.П. Пархоменко містять основні результати по теорії технічного діагностування неперервних [24] і дискретних [25] об'єктів. Практичне застосування цих результатів спрямоване на діагностування з використанням обчислювальної техніки. Роботи Є.С. Павловича, Е.А. Пахомова, В.О. Четвергова, Е.Д. Тартаковського, Т.В. Буцько присвячені питанням удосконалення систем технічного утримання з використанням засобів технічного діагностування [26–29].

Поширеного застосування знайшли системи діагностування електроустаткування локомотивів до яких можна віднести і ТЕД. Це обумовлено простотою одержання необхідних даних з пристроїв узгодження, а також

можливістю застосування математичних методів з обробки даних діагностування [30].

Аналіз досліджень в області створення систем діагностування тепловозів як автоматизованих, так і не автоматизованих, показує, що переважна їх більшість присвячена питанням розробки систем діагностування тепловозів з електричною передачею та електровозів [31–33]. Основною особливістю опублікованих робіт з технічного діагностування локомотивів є їхня спрямованість на рішення окремих задач з використанням розроблених приладів і устаткування, що не дозволяють автоматизувати процес діагностування.

Створення і впровадження систем технічного діагностування (СТД) у практику роботи депо і локомотиворемонтних заводів у нашій країні та в країнах СНД зустрічає багато труднощів. Це обумовлено відсутністю завершеної та перевіреної науково обґрунтованої методології діагностування, недостатньою теоретичною розробкою систем діагностування локомотивів, неповнотою представленого статистичного матеріалу, що відбиває вплив діагностування на експлуатацію і ремонт локомотивів, відсутністю спеціалізованого устаткування.

Практика впровадження технічного діагностування тепловозів показує, що на приєднання і від'єднання діагностичних засобів затрачується до 70% загального часу, необхідного для процесу діагностування (на встановлення режиму роботи агрегатів і вимір діагностичних параметрів 15–20%, на аналіз і фіксацію результатів 10–15%). Отже основний резерв скорочення часу на діагностування пов'язаний зі зменшенням витрат на установку та зняття діагностичних приладів. Найважливіший шлях зменшення цього часу – підвищення контролепридатності локомотивів.

Орієнтовані розрахунки показали, що ефективність технічних засобів діагностування може бути підвищена за рахунок покращення контролепридатності на 80%, а в результаті удосконалювання систем діагностування – на 20–30% [32].

Тому для зменшення вартості діагностування слід використовувати автоматизовані комплексні системи, що забезпечують зниження трудомісткості і часу простою локомотивів в період обслуговування.

Впровадження діагностування в планово-попереджувальну систему ремонту

призводить до адаптації технічного стану кожного ТЕД або локомотива до норм періодичності ремонту та обсягу ремонту. В результаті регулярного діагностування значної кількості ТЕД при накопичені даних результатів діагностичного контролю в депо накопичується інформація про технічний стан. Для зменшення трудомісткості, підвищення оперативності обробки такої інформації необхідна організація автоматизованого діагностично-статистичного комплексу (АДСК). За звичай дані про технічні параметри, одержані за допомогою діагностичних пристроїв, використовуються для створення бази даних, на основі якої з різною періодичністю вирішуються задачі неоперативного характеру. До числа оперативних відносять задачі виявлення несправності і організація відновлення працездатності технічного об'єкту.

Оперативні впливання по відновленню працездатності об'єкта можуть прийматися і без використання АДСК оскільки діагностичні пристрої надають інформацію про технічний стан вузлів, які підлягають контролю, що дозволяє співставити фактичне значення контрольованих параметрів. У цьому випадку роль АДСК зводиться тільки до роздрукування протоколів діагностування і до поповнення бази даних з наступним її збереженням. В подальшому статистика необхідна для рішення неоперативних задач. Одною з таких задач є оцінка залишкового ресурсу технічного об'єкту.

Прогнозування термінів закінчення ресурсу устаткування здійснюється тільки для устаткування, відмови якого не є «раптовими», а відносяться до числа «поступових». Наявність оцінок залишкового ресурсу технічних об'єктів, відновлення яких визначає термін чергового планового ремонту (ПР або КР) дозволяє ревізувати цей термін для кожного конкретного об'єкта з використанням даних АДСК.

За допомогою АДСК можливе вирішення задач оцінки економічної ефективності застосування того чи іншого діагностичного пристрою та запропонованої системи поточного ремонту і технічного обслуговування в цілому. Для цього використовується деповська інформація про надійність, експлуатаційних і ремонтних показників. При організації нової комплексної системи утримання на

основі впровадження засобів технічного діагностування в основу закладається принцип моніторингу технічного стану устаткування, тобто постійного за часом або періодичного контролю рівня параметрів, які знаходяться під контролем. Відповідно до цього задачі діагностування устаткування ТЕД повинні вирішуватися за допомогою функціональних підсистем (наприклад підсистема діагностування стану корпусної ізоляції ТЕД). Функціональні підсистеми ТЕД мають таке призначення:

- стаціонарна система діагностування для локального контролю, поглибленого діагностування (до рівня елементів), аналізу дефектів, а також прогнозування залишкового ресурсу та рівня безпеки основних вузлів і агрегатів устаткування ТЕД;

- бортова (вбудована) автоматизована система діагностування для оперативного контролю та діагностування основних вузлів устаткування, контролю готовності устаткування до роботи, вводу в оперативну пам'ять характеристик дефекту, який розвивається, індикації технічного стану ТЕД;

- автономна система діагностування для контролю обраних параметрів з метою оцінки працездатності ТЕД.

В загальному випадку необхідно в локомотивних депо та локомотивах одночасно використовувати стаціонарні та автономні підсистеми діагностики.

Для того щоб впровадити описану АДСК необхідно розробити пропозиції відносно переліку локомотивного устаткування, яке повинно підлягати діагностуванню бортовими, а яке засобами стаціонарної діагностики. Оснащення локомотивів бортовими діагностичними пристроями суттєво підвищує вартість одержання інформації (про стан вузлів локомотива) у порівнянні з пристроями наземними (автономними або стаціонарними). Це обумовлено тим, що загальна вартість бортових пристроїв, число яких дорівнює кількості локомотивів у депо перевищує вартість незначної кількості переносних приладів або стаціонарної діагностичної установки.

За результатами регулярного техніко-економічного аналізу результатів застосування системи ремонту з регламентованим використанням діагностування в цю систему періодично повинні вноситися корективи, спрямовані на її

удосконалення. Для цього і повинен бути організований збір, обробка та використання даних по надійності, значенням параметрів, що підлягають контролю [33].

1.2 Методи контролю якості ізоляційних матеріалів

У минулому кількість пошкоджень ізоляції обладнання під час роботи було основним показником надійності і правильності методу експлуатації. Впровадження профілактичних випробувань ізоляції дозволило, у якійсь мірі, попереджати пошкодження обладнання в роботі й заздалегідь оцінювати його стан.

В роботі [34] обґрунтовується, що основними електричними характеристиками ізолюючих матеріалів електроустаткування, що набули поширення для оцінки стану ізоляції в електричному полі при експлуатаційних випробуваннях, є: питомий опір, діелектричні втрати, електрична міцність (пробивна напруга). Перші два види характеристик, які отримують при випробуваннях, дозволяють на основі вимірних абсолютних показників судити про стан ізоляції, а визначаючи електричну міцність, можна судити про міцність або запас міцності в цілому.

В публікації [35] розглядаються додаткові показники при вимірюваннях: залежності абсорбції, значення струмів витоку, температурні залежності від опору або місткості, залежності місткості від частоти або за часом, розподіл напруги по товщі або по поверхні ізоляції, наявність розрядів у товщі діелектрика.

Питання про допустимість і доцільність випробування *підвищеною напругою* устаткування, що діє, було предметом численних обговорень. Існує точка зору, що в результаті випробування виникають залишкові явища, що скорочують термін служби ізоляції електричних машин і ізоляції силових кабелів.

Випробування змінною напругою є основним способом визначення наявності запасу міцності, як в заводських умовах, так і в умовах експлуатації, в останньому випадку, виходячи з наявності випробувальних засобів. Через останню обставину в експлуатації випробуванням піддається устаткування на напругу до 35 кВ включно, а лише в лабораторних умовах - на більшу напругу [36]. Не розглядаються також випробування *підвищеною напругою* при підвищеній вологості і порівняльні

випробування для визначення розрядних характеристик зовнішньої ізоляції в умовах забруднень, які є чисто лабораторними [37].

Замість *випробування підвищеною напругою* ізоляційних конструкцій, для яких характерно часткове пошкодження - пробій, наприклад гірлянд ізоляторів або штирьових ізоляторів [38], автор обмежується вимірюванням розподілу напруги по елементам під робочою напругою. Даний метод заснований на тому, що часткове пошкодження ізоляції викликає спотворення електричного поля і супроводжується зміною розподілу напруги. Вимірний розподіл напруги порівнюється з нормованим або раніше вимірним. Обмеженням застосування даного методу є можливе спотворення результатів, що викликаються зовнішніми чинниками: значною вологістю повітря (більше 70%), низькою температурою (менш 5°C) і, нарешті, великою поверхневою провідністю при забрудненні або наявності напівпровідного покриття.

Електричні контрольні випробування змінним струмом багатьох видів лінійних ізоляторів, а також чисто фарфорових на напругу 3-10 кВ проводять одночасно для великої партії або на конвеєрі. Для цих випадків з метою одержали широке застосування методи електричних випробувань при дії напругою змінного струму такого значення, при якому на поверхні ізолятора утворюється *безперервний потік іскор*, який не переходить в дугу. Це випробування ізолятор повинен витримати протягом 3 хв. без пробою. Подібні випробування також можуть знайти застосування і в лабораторній практиці енергосистем. Випробування ізоляторів *потокм іскор* запропоновано в роботі [39].

При випробуванні *напругою постійного струму* потужність випробувальної установки визначається тільки струмом наскрізної провідності, що не перевищує декількох міліампер (1-10 мА). Останнім часом встановлено, що при випробуванні *підвищеною напругою* обмоток генераторів доцільно здійснювати контроль їх як змінним, так і *постійним струмом*, що дозволить виявляти більше число різних по характеру дефектів. Через це в практиці експлуатаційних, заводських (для генераторів) і профілактичних випробувань ізоляції кабелів високої напруги, а також і деяких видів устаткування (розрядники) набуло широке поширення

випробування підвищеною напругою постійного струму [36].

Випробування постійним струмом дозволяє виявляти загальне зволоження, тобто дефект, що часто зустрічається в експлуатації, і воно в найбільшій мірі ефективно в тих випадках, коли відстань від електроду до електроду невелика і необхідно визначити наявність запасу міцності через появу місцевого дефекту, наприклад випадкового часткового пошкодження товщі ізоляції. Оскільки пробивна напруга ізоляції машин в межах 15-25% залежить від її температури, в експлуатаційній практиці прийнято випробування підвищеною напругою проводити до охолодження обмоток, тобто в умовах, що найбільшою мірою наближаються до робочих [35].

Вимірювання струму провідності (струму витoku) [35] є найстарішим і широко поширеним видом випробувань в практиці контролю стану ізоляції.

Вимірювання провідності ізоляції проводиться при постійній (стабільній) напрузі постійного струму з відліком протікаючого струму або безпосередньо омичного опору. При визначенні опору ізоляції вимірювання виконують щодо корпусу, приєднуючи джерело напруги до струмоведучих частин. При вимірюванні опору ізоляції устаткування, з великою кількістю обмоток, схеми вимірювання аналогічні тим, які застосовуються і при випробуванні підвищеною напругою.

Вимірювання діелектричних втрат (тангенса кута діелектричних втрат) [35] є одним з основних, а в деяких випадках, як, наприклад, при профілактичних випробуваннях устаткування на номінальну напругу більше 35 кВ, і єдиним методом, що дозволяє оцінювати стан ізоляції. *Вимірювання діелектричних втрат* звичайно виконують при підведенні напруги змінного струму частотою 50 Гц. Як показали спостереження, з пониженням частоти діелектричні втрати збільшуються. Так, у паперово-масляній ізоляції при частоті 25 Гц збільшення діелектричних втрат може досягти 20-30% в порівнянні із зміряними при частоті 50 Гц.

У практиці польових умов випробування проводяться при напрузі не більше номінальної напруги випробовуваного об'єкту і в межах до 10 кВ. Звичайно *діелектричні втрати* із збільшенням напруги до номінальних меж не змінюються або трохи зростають. В результаті додаткових втрат $tg\delta$ різко зростає, що і дозволяє

виявляти цей вид дефекту, в більшості випадків пов'язаний із старінням діелектрика або недоліками виробництва. Важливе значення має точність *вимірювань діелектричних втрат*. Точність і межі вимірювання визначаються вживаними приладами, а також похибками, умовами вимірювання, що викликаються впливом зовнішніх електричних і магнітних полів, а також паразитними струмами.

При дослідженні діелектриків [35] звернули увага на те, що стан ізоляції можна характеризувати по значенню ємності і зміні її залежно від температури, частоти струму, прикладеної напруги і ходу зміни характеристики абсорбції. Виявилось, що при сухому стані ізоляції її місткість у області температур 20-80°C мало змінюється при нагріванні. У зволоженої ізоляції, значне зростання ємності, особливо в інтервалі температур від +50 до 100°C, що і дозволяє судити про її стан по співвідношенню ємностей, визначених при двох прийнятих в практиці температурах 20°C і 80°C. Якщо збільшення ємності при вказаних двох температурах не перевищує 15-20%, ізоляція вважається практично не зволоженою. Основний недолік цього методу визначення ступеня зволоженості ізоляції - це значні витрати часу і засобів на нагрівання великих мас устаткування, а при нерівномірності розподілу температури по ізоляції метод дає результати зі значною похибкою.

1.3 Аналіз досліджень і публікацій з контролю якості ізоляційних матеріалів ТЕД

Стан ізоляції характеризується рядом параметрів, значення яких визначаються процесами, що відбуваються в діелектрику (поляризація, абсорбція, провідність і т.п.). До числа таких параметрів відносяться: діелектричні характеристики ізоляції (ємність, тангенс кута діелектричних втрат); опір; параметри, пов'язані з абсорбційними процесами (зміна в часі опору і ємності) [40-42].

Необхідність прогнозування стану ізоляції ТЕД створює передумови для визначення раціональних термінів проведення її профілактичних заходів і ремонтів. Таке прогнозування доцільно проводити на основі математичних моделей зміни стану ізоляції. До теперішнього часу розроблені математичні моделі поступового

зношення ізоляції, що дозволяють прогнозувати зміну її технічного стану в реальних умовах експлуатації [40-43]. У згаданих роботах описуються деякі процеси старіння ізоляції, але найчастіше користувача цікавить саме прогнозовані моменти відмови корпусної ізоляції. Найбільш повно процес зносу корпусної ізоляції і методи оцінки її стану описані в роботах [44-46].

Як показали дослідження [42,43,46] найбільшу інформативність про процес старіння ізоляції мають параметри, що пов'язані з процесами абсорбції (процес заряду неоднорідної ізоляції з накопиченням поглиненого заряду) і ресорбції (процес вимірювання зворотної напруги, обумовленого віддачею поглиненого заряду) в динаміці.

В даний час сучасні системи утримування ТЕД будуються з використанням спостережень про поточний стан, що з необхідністю призводить до вдосконалення систем утримання ТЕД, розробці пристроїв і систем діагностування, [47-55].

Деякі питання надійності тягових електричних машин, ізоляційних конструкцій і колекторно-щіткового вузла ТЕД знайшли відображення в роботах [56-62].

1.4 Дослідження з визначення стану ізоляції ТЕД та надійності ТЕД локомотивів

Вивченню несправностей електричних машин та їх вплив на надійність, присвячена значна кількість публікацій.

Серед них слід відзначити роботи Глущенко М.Д, Дурандіна М.Г., Попова В.Н. і Серебрякова А.С., [34, 62-66] в яких розглянуті питання діагностування ТЕД, методи прогнозування стану ізоляції електричних машин і ін. Особливу зацікавленість викликає робота Серебрякова А.С., [34], в області розробки пристрою контролю ізоляції тягових двигунів по зворотній напрузі.

В останні роки активно впроваджується методологія діагностування дефектів що зароджуються в ТЕД. Використання системи діагностування, що орієнтована на виявлення дефектів що зароджуються і прогнозування оптимальних термінів проведення ТО, дозволяє забезпечити максимально можливий економічний ефект за

рахунок зниження трудовитрат, витрат запасних частин і зменшення часу простоювання локомотивів. Нові підходи цього напрямку знайшли відображення в роботах Гіюєва З. Г., [67], Кучерова С.В., Осяєва А.Т. та ін.

Раптова відмова електричної машини зазвичай пов'язана з різким погіршенням стану деяких основних елементів. Статистика показує, що понад 50% відмов машин пов'язані з пошкодженням ізоляції [68]. Встановлено, що старіння ізоляції є найважливішим фактором, який викликає пошкодження ізоляції. Дослідження старіння ізоляції стали важливим завданням для виробників і користувачів електрообладнання, щоб оцінити реальний його термін експлуатації. Старіння та деградація ізоляції електричних машин, і є тими явищами, які визначають термін служби електричних машин в експлуатації [69].

В (ІЕС 2011) зазначено, що старіння це «незворотні зміни властивостей електроізоляційної системи (EIS) через дію однієї або декількох напруг» [70]. Для електричних машин та іншого електричного обладнання діагностування стану ізоляційних конструкцій стає все більш важливим.

Стан ізоляції характеризується рядом параметрів, значення яких визначається процесами, що відбуваються в діелектрику (поляризація, абсорбція, провідність і т.п.). До числа таких параметрів відносяться: діелектричні характеристики ізоляції (ємність, тангенс кута діелектричних втрат); опір; параметри, пов'язані з абсорбційними процесами (зміна в часі опору і ємності) [71, 72].

Необхідність прогнозування стану ізоляції ТЕД створює передумови для визначення раціональних термінів проведення профілактичних заходів і ремонтів. Таке прогнозування доцільно проводити на основі математичних моделей зміни стану ізоляції. До теперішнього часу розроблені математичні моделі поступового зношування ізоляції, що дозволяють прогнозувати зміну її технічного стану в реальних умовах експлуатації [68-71]. У згаданих роботах описуються деякі процеси старіння ізоляції, але найчастіше користувача цікавлять саме прогнозовані моменти відмови корпусної ізоляції. Найбільш повно процес зносу корпусної ізоляції і методи оцінки її стану описані в роботах [48, 72].

Широкий спектр питань дослідження надійності, визначення залишкового

ресурсу та продовження ресурсу ТРС, в тому числі і ТЕД, розглядаються в роботі [48]. В роботі [48] значна увага приділяється підвищенню надійності корпусної ізоляції ТЕД електровозів та визначенню її ресурсу. В роботі [73] виконано аналіз надійності ізоляції тягових електродвигунів з урахуванням особливостей кліматичних умов зовнішнього середовища. Аналіз показав, що найбільш слабким елементом є електрична ізоляція двигунів. Залежно від кліматичних умов експлуатації відмови цього елемента складають від 75% до 85%. В дослідженнях [48, 73] методи покращення функціональної надійності технічних об'єктів засновуються на випадкових потоках відмов і не враховують поточний стан корпусної ізоляції. Стаття [74] присвячена оптимальній стратегії обслуговування, заснованій на умовах експлуатації ізоляції. Об'єднавши інформацію що отримана шляхом періодичних перевірок з інформацією про стан ізоляції протягом експлуатації, в [74] запропонована комплексна математична модель технічного обслуговування. Запропоновано також модель, що заснована на пуассонівському потоці відмов (пробою) ізоляції. Вдосконалення систем утримування ТЕД, в тому числі і корпусної ізоляції, з необхідністю призводить до розробок пристроїв і систем діагностування [75, 76].

Оцінка станів ізоляції в динаміці розглянута і виділена в роботі [77]. Автори вказують, що в процесі старіння ізоляції можна спостерігати такі явища: старіння, деградація і руйнування. Старіння і деградація ізоляції безпосередньо впливають на руйнування ізоляції, але між старінням і деградацією не спостерігається чіткої межі [77]. Відмінності між явищами деградації і пробую (раптова відмова) ізоляції також наводиться в [77]: «The essential difference between the degradation and breakdown phenomena consists in the fact that the degradation is a process that takes place in a long period of time, while the failure is a process that occurs suddenly and it is catastrophic, insulation being unable to support the nominal voltage after its failure». Деградація, викликана розвитком електричних дерев, може займати години, дні, місяці або навіть роки до пошкодження ізоляції на відміну від раптового пошкодження (пробою).

У роботах [78, 79] зміна стану якості ізоляції процес старіння розглядається з

точки зору молекулярної фізики. Молекулярні зміни в ізоляції сприяють погіршенню електричних, механічних та інших властивостей, що веде до розвитку механізмів деградації ізоляції.

Особливості вимог до технічного обслуговування локомотивів на залізницях України вимагають дещо іншого підходу до визначення стадій стану якості ізоляції електричних машин в часі, ніж розглянуті вище підходи. Відносно корпусної ізоляції, для визначення стадій її старіння, необхідно визначитися з видом технологічних операцій відновлення:

- відновити корпусну ізоляцію шляхом просочення;
- замінити корпусну ізоляцію на нову.

Для оцінки стану ізоляції розроблено декілька методів діагностування:

- виміри струму поляризації та депольоризації (PDC - polarization and depolarization current) [80];
- спектроскопія в частотній області (FDS - frequency domain spectroscopy) [81];
- виміри зворотної напруги (RVM - recovery voltage measurement), [82, 83].

Досить доступними та надійними для отримання достовірної інформації про стан ізоляції є виміри зворотної напруги.

Метод RVM заснований на аналізі значень вимірної зворотної напруги. Зазвичай використовуються параметрами кривих зворотної напруги, а саме: значення максимальної зворотної напруги, час наростання до максимуму зворотної напруги і початковий нахил кривої s . Даний метод відомий давно. Вимірювання надійні щодо отримання достовірної інформації. Крім того, вимірювання зворотної напруги менш чутливі до зовнішніх шумів. Отриману інформацію можна порівняти з тією, яка може бути отримана за допомогою інших діелектричних методів. На жаль, інтерпретація даних вимірів не орієнтована на реальні фізичні параметри.

Визначення залишкового ресурсу ізоляції пов'язано з математичним моделюванням процесу старіння ізоляції.

Моделі [84-86] розроблено з урахуванням зміни структури ізоляції в результаті електромеханічних напружень, які руйнують диполі або ушкоджують

інтерфейси в композитних матеріалах.

У моделі [87] автори виходили з того, що просторовий заряд, утворений в ізоляції з часом, є причиною старіння. Заряд, накопичений в різних зонах ізоляції, локально підвищує електричне поле, збільшує механічні напруження і далі відбувається руйнування хімічних зв'язків.

Модель в [88] виходить з припущення, що утворення просторового заряду є наслідком старіння, а сам процес старіння обумовлений високими електричними полями, які руйнують хімічні зв'язки в ізоляції. Найбільш прийнятними моделями для прогнозування залишкового ресурсу ізоляції є статистичні методи та моделі. Даний напрямок моделювання досить широко представлено дослідниками. Розглянемо лише деякі з них.

Серед статистичних моделей слід виділити моделі, які використовують нейромережеве моделювання діагностування стану ізоляції [89]. У даній роботі використовуються моделі на основі штучних нейронних мереж прямого поширення. Дослідниками в [90, 91] запропоновані експоненціальні моделі і моделі на основі закону розподілу Вейбулла. Використовуються також регресивні моделі для визначення залишкового ресурсу [92, 93].

Регресійна модель Кокса це найбільш загальна регресійна модель, оскільки вона не пов'язана з припущеннями щодо розподілу часу «виживання». Модель передбачає, що процес зносу ресурсу відбувається незалежно від експлуатаційних впливів.

До недоліків статистичних моделей можна віднести той факт, що всі вони вимагають великого обсягу достовірних статистичних спостережень.

1.5 Аналіз останніх досліджень з побудови систем утримання ТРС та ТЕД

Засоби і методи сучасного технічного обслуговування в змозі запобігти раптовому ушкодженню ізоляції (ТЕД). Планування технічного обслуговування ізоляційних конструкцій має життєво важливе значення для безпеки руху поїздів.

Робота [47] є фундаментальною роботою з теоретичних основ ремонтних впливів на надійність технічних об'єктів. В роботі сформульовано ряд задач по

визначенню раціонального утримування технічних об'єктів. Запропонований в роботі підхід можна застосовувати як для окремих елементів рухомого складу, так і для об'єктів в цілому.

Основними стратегіями профілактичного обслуговування ТЕД є: регламентне обслуговування (РО) і технічне обслуговування засноване на умовах експлуатації (ОУЕ) [94].

Спираючись на статистичну обробку даних про відмови ізоляції, деякі дослідники намагалися встановити спільні оптимальні моделі РО і ОУЕ [95, 96, 97]. Такі моделі сьогодні є інноваційними, максимально використовують інформацію про «життєвий цикл» ізоляції і інформацію про її стан. Автори [98, 99], використовуючи авторегресію, запропонували модель для опису процесу деградації ізоляції. Автори [100] створили модель обслуговування ізоляції як системи з поступовими відмовами з урахуванням ефекту електричного ураження, в основу поклавши марковський процес. Деякі дослідники вдосконалили модель оптимального обслуговування «деградація-поріг-удар», яка інтегрувала процес деградації ізоляції і ефекти руйнації, спираючись на стохастичні методи [101-104]. Як стверджують автори, інтегрована модель РО і ОУЕ остаточно не розроблена і визначення її є важливим завданням для дослідників.

У статті [105] аналізується надійність роботи тягових електродвигунів. Показано, що найбільшу кількість відмов припадає на ізоляцію обмотки якоря та головних полюсів. Дослідження причин зносу ізоляції обмотки якоря проводилося з використанням динамічної теплової моделі електродвигуна. Перевірка моделі проводилася шляхом порівняння з результатами теплових випробувань електродвигунів серій НБ-406 і ЕД-118. В роботі показано, що ресурс електродвигуна в основному визначається зносом ізоляції.

Стаття [106] присвячена оптимальній стратегії обслуговування заснованій на умовах експлуатації ізоляції. Об'єднавши інформацію що отримана з періодичних перевірок з інформацією про стан ізоляції протягом експлуатації, в [106] запропонована комплексна математична модель технічного обслуговування. Запропоновано також модель, що заснована на пуассонівському потоці відмов

(пробою) ізоляції. Вдосконалення систем утримування ТЕД, в тому числі і корпусної ізоляції, з необхідністю призводить до відповідних розробок пристроїв і систем діагностування, [1, 107, 108].

Як висновок може бути корисною публікація [109], в якій автори проводять поетапний вичерпний огляд однієї системи ізоляції, і дають детальний звіт про стандарти, що пов'язані з системами ізоляції взагалі. У статті звертається увага на те, що жоден стандарт не може забезпечити гарантію на термін служби, і ніякі випробування ізоляції не включають всі робочі умови: термічні, механічні, вплив вологи і хімічний вплив. Як замовник, так і виробники будуть використовувати стандарти, знаючи, що такі документи не можуть повністю задовольнити їхні побажання. Автори підкреслюють, що протягом 20-ти років спостерігаються тенденція поліпшення якості ізоляції і деякі досягнення в удосконаленні стандартів.

1.6 Постановка проблеми. Обґрунтування мети і формулювання задач наукового дослідження

Моделі відновлення корпусної ізоляції, що пропонуються в розглянутих публікаціях, базуються на випадкових потоках відмов (пробій ізоляції) і не враховують поточний стан ізоляції та ступінь відновлення (технологію відновлення).

Моделі, що стосуються прогнозування ресурсу ізоляції ТЕД, дослідниками однозначно не визначаються.

В розглянутих дослідженнях у більшості випадків використовуються методи руйнуючого контролю ізоляції, які, як правило, не дають дійсної оцінки стану корпусної ізоляції електродвигунів локомотивів.

Прогнозування терміну служби корпусної ізоляції ТЕД з застосуванням параметрів поступових відмов не вивчено.

В дослідженнях зазначено, що методом для отримання більш повної інформації про стан ізоляції є вимір зворотної напруги.

Це все свідчить про актуальність даного напрямку дослідження, тобто про необхідність усунути в певній мірі існуючі прогалини та удосконалити існуючі

методи та технології з підвищення експлуатаційної надійності корпусної ізоляції тягових електричних двигунів локомотивів.

А тому метою дисертаційної роботи є поліпшення експлуатаційної надійності ТЕД локомотивів шляхом удосконалення системи їх діагностування та корегування міжремонтних пробігів і обсягів виконуваних робіт з обслуговування та ремонту.

Для досягнення сформульованої мети необхідно вирішити такі задачі:

- проаналізувати моделі процесу старіння корпусної ізоляції ТЕД локомотивів;
- виконати аналіз відмов тягових електричних двигунів локомотивів;
- визначити ознаки що відображають процес старіння корпусної ізоляції і дозволяють прогнозувати зміну її технічного стану в умовах експлуатації;
- дослідити залежності зворотної напруги від інтегрального показника стану якості корпусної ізоляції;
- виконати класифікацію станів якості корпусної ізоляції ТЕД НБ-406;
- розробити математичну модель побудови процесу відновлення корпусної ізоляції в об'ємі ПР-3 з урахуванням ступеня її відновлення;
- визначити раціональні періоди відновлення корпусної ізоляції в об'ємі ПР-3 та прогнозування ресурсу корпусної ізоляції для ТЕД ЕД-118А.

РОЗДІЛ 2

КОНТРОЛЬ ПОКАЗНИКІВ ЯКОСТІ СТАНУ ІЗОЛЯЦІЇ ТЕД

Модель тягового електродвигуна постійного струму електричного рухомого складу, як об'єкта діагностування включає в себе електроізоляційну конструкцію, колекторно-щітковий апарат і механічну частину. Тому відмови тягових двигунів мають різну природу і можуть відбуватися внаслідок:

- пробую ізоляції і міжвиткових замикань обмоток якоря;
- пробую ізоляції і міжвиткових замикань обмоток головних і додаткових полюсів;
- пробую ізоляції компенсаційної обмотки;
- пошкоджень виводів котушок полюсів;
- пошкоджень вивідних кабелів, виплавлення припою з півників колектора;
- руйнування якірних бандажів;
- пошкодження якірних підшипників;
- пошкодження пальців, кронштейнів та щіткотримачів;
- кругового вогню по колектору.

Необхідно відзначити, що для визначення несправностей тягових двигунів, електровозів і електропоїздів можна використовувати однакові підходи.

2.1 Процеси старіння ізоляції

В експлуатації на ізоляцію електрообладнання впливають електричні, теплові, механічні і інші навантаження. Вони неминуче викликають в ізоляції складні процеси, наслідком яких є поступове погіршення властивостей, а іншими словами це є старіння. Як правило, зміна властивостей ізоляції носять незворотній характер і завершуються пробоем. В окремих випадках наслідки старіння можуть бути усунені шляхом відновлювального ремонту ізоляції.

Практичне значення процесів старіння складається з того, що вони обмежують терміни служби ізоляційних конструкцій. У зв'язку з цим при розробці і виготовленні обладнання високої напруги, а також при організації його експлуатації повинні передбачатися заходи, які знижують темпи старіння ізоляції до такого

рівня, при якому забезпечується потрібний термін служби ізоляційних конструкцій (зазвичай 20-30 років і більше), [110].

Розрізняють електричне, теплове і механічне старіння ізоляції. Крім того, старіння ізоляції може бути обумовлене проникненням в неї із навколишнього середовища забруднень, зокрема вологи.

Електричне старіння може відбуватися при напруженості електричного поля в багато разів (5-20) менше пробивних значень. З підвищенням напруги, прикладеної до ізоляції, темпи електричного старіння зростають, а термін служби відповідно зменшується [111].

Інтенсивність процесу електричного старіння будь-якої ізоляційної конструкції залежить не тільки від значення впливаючої напруги, але й від ряду факторів, які не піддаються контролю, наприклад від кількості, розмірів і розташування мікронерівностей на поверхнях електродів.

При робочих температурах (90-180°C) в ізоляційних матеріалах або виникають, або різко прискорюються хімічні реакції, які змінюють структуру матеріалів і викликають погіршення властивостей всієї ізоляції вцілому. Ці процеси називають тепловим старінням. Тверді діелектричні матеріали в процесі теплового старіння поступово знижують механічну міцність. Це призводить до пошкодження ізоляції під дією механічних навантажень, а потім вже і до пробою.

В деяких діелектриках в результаті теплового старіння виникають газоподібні, рідкі та тверді продукти хімічних реакцій. По мірі накопичення цих продуктів, забруднюючих ізоляцію, провідність і діелектричні втрати зростають, а електрична міцність знижується.

Темпи теплового старіння ізоляції визначаються швидкостями хімічних реакцій, які залежать від температури. Зазвичай вважають, що термін служби при тепловому старінні обернено пропорційні швидкості хімічних реакцій [112, 113].

Ізоляція чи її окремі елементи з твердих діелектричних матеріалів зазвичай піддаються в експлуатації значним статичним і динамічним ударним механічним навантаженням. Під дією цих механічних навантажень (розтягнення, стиснення, вигин, вібрація і т.п.) в діелектрику утворюються і поступово збільшуються

мікротріщини. Коли кількість і розміри мікротріщин досягають деяких критичних значень, настає механічне руйнування матеріалу. Проте крім механічного руйнування діелектрика наявність мікротріщин призводить до передчасного пробою ізоляції, так як наявність тріщин істотно знижує електричну міцність діелектрика.

В процесі експлуатації у внутрішню ізоляцію електроустановок може потрапляти волога. Вона може потрапляти з навколишнього повітря чи утворитися в самій ізоляції в результаті термоокислювальних процесів.

Поява вологи в ізоляції (адсорбція вологи) призводить до різкого зниження опору витoku, так як у волозі містяться розчинені і дисоційовані домішки, тобто вільні іони. Зменшення опору витoku небезпечно тим, що призводить до зростання діелектричних втрат. Внаслідок цього знижується напруга теплового пробою і крім цього відбувається додатковий нагрів ізоляції, що тягне за собою прискорення темпів теплового старіння. Наприклад, якщо при вологомiсткостi 0,3%, паперова ізоляція вважається добре висушеною і має повний термін служби, то при вологомiсткостi 1,5% старіння починає прискорюватись, а при вологомiсткостi більше 3,3% процеси старіння і окислення стають небезпечними для ізоляції [114].

Вода – сильно полярний діелектрик, її відносна діелектрична проникність дорівнює 80, тобто в багато разів більша, ніж у діелектричних матеріалів, які використовуються у внутрішній ізоляції. У зв'язку з цим сильне зволоження може впливати на діелектричну проникність зволoжених слоїв. При нерівномірному зволоженні ця обставина може призвести до спотворення електричного поля в ізоляції і зниженню пробивної напруги.

Зволоження в принципі – процес зворотний, тобто адсорбована волога може бути видалена з ізоляції шляхом сушіння. Проте сушіння потребує витрат часу і енергії [114-116].

2.2 Основні методи контролю показників стану ізоляції ТЕД

Для виявлення дефектів в ізоляції обмоток статора і якоря необхідний постійний контроль тягових двигунів в процесі їх експлуатації.

Розвиток дефектів в ізоляції в основному пов'язаний з проникненням в неї

вологи.

Всі методи контролю ізоляції можна розділити на руйнівні та неруйнівні. До перших належать випробування підвищеною напругою, другі проводяться без додавання до ізоляції високих напруг, здатних призвести до пробою.

Для виявлення виникаючих в ізоляції дефектів розроблені і застосовуються наступні методи неруйнівних випробувань ізоляції:

- а) вимір тангенса діелектричних втрат $tg\delta$;
- б) вимір часткових розрядів в ізоляції;
- в) вимірювання ємності;
- г) вимірювання опору ізоляції та ін.

Кут діелектричних втрат δ є в першу чергу показником наявності в ізоляції сторонніх включень, зокрема зволоження ізоляції. Характер зміни $tg\delta$ при періодичних вимірах дозволяє судити про погіршення властивостей ізоляції. Вимірювання $tg\delta$ ізоляції здійснюється приладами, в основі яких лежить принцип високовольтного моста Шерінга.

Недоліком цього методу є низька перешкодозахищеність і складність автоматизації процесу вимірювання.

Вимірювання часткових розрядів, які є основною причиною електричного старіння ізоляції, дає більш об'єктивну інформацію про стан ізоляції, але такі вимірювання дуже складні і мають малу перешкодозахищеність. Тому вони в основному застосовуються лише в лабораторіях і мало придатних для умов депо.

Ємність ізоляційної конструкції при незмінній температурі та частоті є величина постійна. Тому зміна ємності свідчить про дефекти в ізоляції, в тому числі і про її зволоженні. На принципі вимірювання абсорбційної ємності засновані методи контролю вологості ізоляції: «ємність - частота», «ємність - температура» і «ємність - час».

Методи неруйнівного контролю широко використовуються для виявлення дефектів, але в умовах депо і на ремонтних заводах найбільше поширення з них отримало *вимірювання опору ізоляції*, а з методів руйнівного контролю - *випробування ізоляції підвищеною напругою промислової частоти*.

2.2.1 Контроль ізоляції по її опору

При прикладанні до ізоляції постійної напруги U в ній виникають процеси поляризації. Розрізняють наступні види поляризації: електронну, іонну, дипольну і міжшарову. Їх зручно розглядати не по фізичній ознаці, а по постійній часу T на швидку (декілька мілісекунд) і повільну (декілька секунд та вище) поляризацію.

Для обох видів поляризації можна ввести схему заміщення ізоляції (рис. 2.1). Якщо до цієї схеми прикласти постійну напругу U , то струм в джерелі буде мати наступні складові [8]:

– імпульс струму заряду ємності C_∞ ;

– абсорбційний струм $i_{abc} = \frac{U}{r} e^{-\frac{t}{T}}$, який змінюється з постійною часу T ;

– струм наскрізної провідності $i_{np} = \frac{U}{R}$.

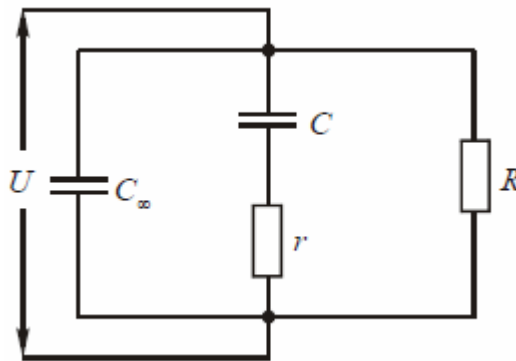


Рисунок 2.1 – Еквівалентна схема заміщення ізоляції для визначення опору ізоляції [117]

Поляризаційні явища і наскрізні канали підвищеної провідності обумовлені в основному зволоженням ізоляції.

Так як опір ізоляції зазвичай вимірюється стрілочними приборами, то на їх показання впливають тільки процеси повільної поляризації.

Дослідами встановлено, що в більшій частині випадків T менше 1 хв. Це означає, що через проміжок часу приблизно 1 хв. після прикладання напруги U опір ізоляції досягне встановленого значення R . Величина R визначає наявність наскрізних провідних каналів в ізоляції. Різке падіння R стверджує про розвиток

дефекту, що проник глибоко. Зазвичай судження про ізоляцію складається на підставі порівняння з заводськими даними чи результатами попередніх вимірів R , [118, 119].

Опір ізоляції вимірюють мегомметром, який складається з генератора постійного струму малої потужності напругою від 0,5 до 2,5 кВ (з ручним приводом) і стрілочного прибору.

2.2.2 Визначення вологості ізоляції

Аналіз впливу кліматичних умов на роботу ТЕД показав, що в період з листопаду по березень різко зростає кількість відмов електричних машин (в 3.5 рази у порівнянні з середньою кількістю за рік). Досить часто опір ізоляції зменшується до гранично допустимих значень 1-1.5 мОм, [120].

Вплив причин зниження величини опору є актуальною задачею, так як неправильне визначення причини може призвести до помилкової заміни тягового двигуна замість відновлення його ізоляції шляхом сушіння.

Про вологість ізоляції тягових двигунів судять по величині коефіцієнта абсорбції, [121]

$$K_{abc} = \frac{R_{60}}{R_{15}},$$

де R_{15} і R_{60} – опори ізоляції, які вимірювалися через 15 і 60 с. відповідно.

При хорошій і сухій ізоляції коефіцієнт абсорбції складає $1.5 \div 2.0$, а для зволоженої наближається до одиниці. Найменшим значенням коефіцієнта абсорбції ізоляції тягових двигунів слід вважати $1.1 \div 1.2$ (при температурі навколишнього середовища $20 \pm 10^\circ\text{C}$).

Випускаються спеціальні пристрої промислового виготовлення, які дозволяють з достатнім ступенем точності визначати опір ізоляції і коефіцієнт абсорбції. Одним з таких приборів є мегомметр Ф4100. Він має вихідну напругу на розімкнутих затискачах ($2500 \pm 250\text{В}$). Коефіцієнт абсорбції визначають за допомогою реле з витримкою часу 15 і 60 с. і сигнальної лампи, яка вказує моменти відліку. Похибка прибору не більше $\pm 2.5\%$.

Ступінь об'ємного зволоження ізоляції можна також оцінити за допомогою приладу для контролю вологості (ПКВ). Дія прибору заснована на методі «ємність – частота». В шаруватому діелектрику, крім явищ поляризації, відбувається повільне накопичення зарядів на межах цих шарів – внутрішньосарову поляризацію, що підвищує діелектричну проникність діелектрика. Процеси внутрішньосарової поляризації помітні при нагріванні ізоляції і, особливо, при її зволоженні. Зі зміною частоти прикладеної випробувальної напруги змінюється ємність, що свідчить про внутрішньосарову поляризацію. Порівняння ємностей ізоляції на двох частотах випробувальної напруги, одна з яких буде дорівнювати кільком герцам, друга – кільком десяткам герц, дає можливість судити про ступінь об'ємного зволоження ізоляції. Прибором ПКВ виміряють відношення ємності C ізоляції при частоті 2 і 50 Гц (C_2 і C_{50}). Якщо відношення ємностей C_2/C_{50} при вказаних частотах напруги більше 1,4, то ізоляція зволожена і потребує сушіння. Виміряти ємність обмотки потрібно при температурі від 15 до 35°C, але не у всіх випадках, коли перевищує 1.4, ізоляція виходить з ладу [122].

Ще більш простий метод вимірювання абсорбційної ємності, отримавший назву «ємність – час». В цьому методі вимірюються миттєві значення ємностей ізоляції через проміжок часу ~ 1 мсек і 0.5 – 1 с. після прикладання зарядної напруги або, навпаки, після розряду. В першому вимірюванні визначається геометрична ємність ізоляції C_∞ , в другому вимірюванні визначається ємність C_0 . Відношення [122]

$$\frac{\Delta C}{C_\infty} = \frac{C_0 - C_\infty}{C_\infty}$$

служить характеристикою ізоляції.

Встановлено, що для нормальної ізоляції відношення $\Delta C/C_\infty$ не перевищує 0.1, а для зволоженої ізоляції відношення $\Delta C/C_\infty > 0.1$.

Метод «ємність-температура» ґрунтується на вимірюванні ємності при збільшенні температури.

Зволоження особливо небезпечне для тієї ізоляції, яка має хоча б часткові

внутрішні пошкодження.

2.2.3 Випробування ізоляції підвищеною напругою

Цей метод випробування відноситься до методів руйнівного контролю.

Випробування підвищеною напругою виконуються для перевірки наявності необхідного запасу електричної міцності ізоляції. Так як зниження електричної міцності визвано як правило, місцевими дефектами в ізоляції, то вказаний спосіб випробувань також виявляє в ізоляції місцеві дефекти. Він також гарантує, що ізоляція обладнання має необхідний рівень міцності по відношенню до перенапруг, що виникають під час експлуатації, [123, 124].

Випробувальна напруга повинна прикладатись до ізоляції упродовж часу достатнього для розвитку часткових розрядів або навіть розвитку розряду до пробою. Надлишково довге прикладання напруги не рекомендується, так як це призводить до псування органічної ізоляції процесами іонізації.

В депо перевіряють електричну міцність ізоляції двигунів між струмоведучими частинами та корпусом і між обмотками. Перевірку виконують на нагрітій нерухомій машині підвищеною напругою змінного струму промислової частоти. При перевірці ізоляції відносно корпусу, випробуванню піддають послідовно кожний ланцюг, що має окремі виводи початку і кінця. При цьому, один вивід джерела випробувальної напруги підключають до будь-якого з виводів випробуваної обмотки, а другий – надійно заземлюють, з'єднавши з корпусом машини.

На заземленому виводі, на час випробувань даної обмотки, з'єднують виводи всіх інших обмоток, що не беруть участь у випробуванні. В якості джерела напруги, застосовують спеціальні однофазні пробивні трансформатори. Первинну обмотку трансформатора вмикають в мережу 220 В. Регулюють випробувану напругу плавно або ступенями, за рахунок зміни на стороні низької напруги трансформатора (величина ступеня випробуваної напруги не повинна перевищувати 5% її кінцевого значення).

Випробування починають з напруги, величина якої не перевищує $1/3$ випробуваної, час підйому напруги від половини значення до повного, повинно бути

не менше 10 с. Повну випробувну напругу витримують протягом 1 хв, після чого, поступово знижують до 1/3 випробувальної та відключають живлення трансформатору.

Величина випробувальної напруги визначається «Правилами ремонту електричних машин електрорухомого складу» [123]. Дані по випробування напруги наведені в табл. 2.1 та 2.2.

Таблиця 2.1

Випробувальні напруги тягових електродвигунів електровозів

Показник	Тип тягового електродвигуна									
	ДПЭ-400	НБ-406Б	ТЛ-2К1	НБ-407Б	НБ-412К	НБ-418к6	АЛ-4846еТ	2АЛ-4846еТ, 3АЛ-4846еТ, 4АЛ-4846еТ	АЛ-4846дТ	АЛ-4442пР, 1АЛ-4442пР
Випробувана напруга, В, при ремонті:										
- капітальному	8800	8800	8800	8800	6800	4800	8800	8800	8800	4100
- середньому	7000	7000	7000	7000	5500	3800	7000	7000	7000	3300
- поточному ПР-3	6000	6000	6000	6000	4800	3400	6000	6000	6000	2900

Таблиця 2.2

Випробувальні напруги тягових електродвигунів МВРС

Показник	Тип тягового електродвигуна									
	ДПЭ-400	НБ-406Б	ТЛ-2К1	НБ-407Б	НБ-412К	НБ-418к6	АЛ-4846еТ	2АЛ-4846еТ, 3АЛ-4846еТ, 4АЛ-4846еТ	АЛ-4846дТ	АЛ-4442пР, 1АЛ-4442пР
Випробувана напруга, В, при ремонті:										
- капітальному	8800	8800	8800	8800	6800	4800	8800	8800	8800	4100
- середньому	7000	7000	7000	7000	5500	3800	7000	7000	7000	3300
- поточному ПР-3	6000	6000	6000	6000	4800	3400	6000	6000	6000	2900

Випробувальну напругу контролюють зі сторони трансформаторної напруги електричним вольтметром. Результати випробувань відносно корпусу та між обмотками вважають задовільними, якщо під час випробувань не відбулось пробоя ізоляції або її перекриття розрядами що ковзають. Якщо стрілка приладу встановлюється на нулі, то це вказує на пробій ізоляції обмотки.

2.2.4 Контроль ізоляції по величині $tg\delta$

Контроль якості ізоляції по величині діелектричних втрат ($tg\delta$) є одним з найбільш ефективних і розповсюджених. Він дозволяє визначити такі дефекти ізоляції, як наявність в ній газових (повітряних) включень, її зволоження і т.п.

Тангенс кута діелектричних втрат ($tg\delta$) – одна з основних електричних характеристик ізоляційного матеріалу, працюючого на змінній напрузі [125, 126].

На рис. 2.2 зображена схема заміщення ізоляційного матеріалу (діелектрика), а на рис. 2.3 – векторна діаграма, що відповідає цій схемі.

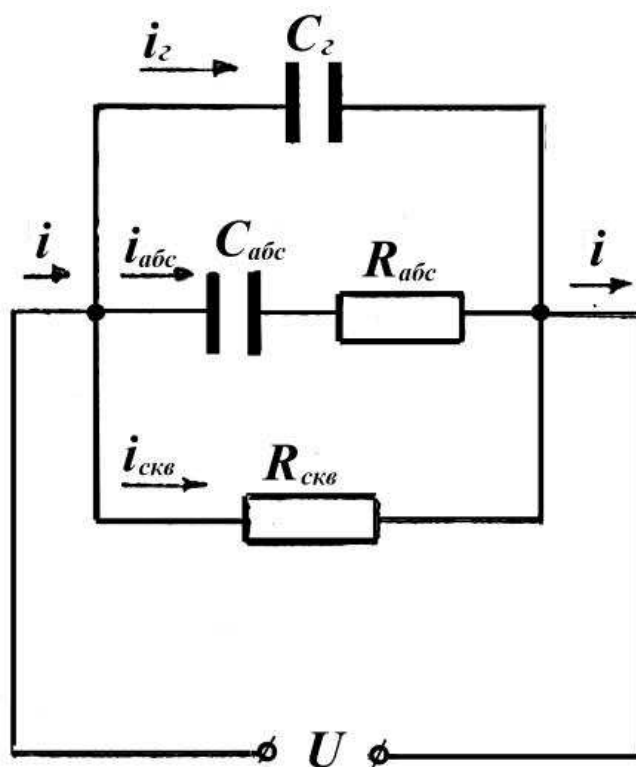


Рисунок 2.2 – Схема заміщення ізоляції для визначення величини діелектричних втрат ($tg\delta$) [18]

На рис. 2.2 прийняті наступні позначення:

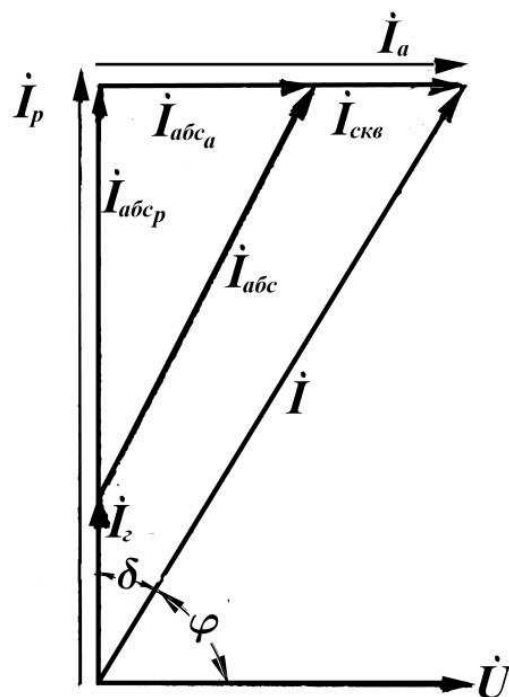


Рисунок 2.3 – Векторна діаграма до схеми заміщення [18]

C_2 – геометрична ємність, яка визначає розміри діелектрика і обумовлена миттєвими видами поляризації (електронної та іонної). Ці види поляризації завершуються за час, не більше 10^{-10} с і не супроводжуються втратами енергії;

i_2 – ємнісний струм (струм зміщення), обумовлений обмеженим зміщенням електронів і іонів при проходженні миттєвих видів поляризації;

C_{abc} – ємність, пов'язана з уповільненими видами поляризації (основні з яких: дипольно-релаксаційна, викликана орієнтацією дипольних молекул по силовим лініям електричного поля; структурна, яка полягає в накопиченні зарядів різних знаків на межі різних структур (шарів) неоднорідного діелектрика);

i_{abc} – струм абсорбції (струм, викликаний зміщенням зарядів під час проходження уповільнених видів поляризації);

R_{abc} – опір струму абсорбції, що вказує на наявність втрат енергії за рахунок уповільнених видів поляризації;

$i_{екв}$ – наскрізний струм провідності;

$R_{екв}$ – опір наскрізного струму.

Виміром ступеня поляризації є відносна діелектрична проникність

$$\varepsilon = \frac{C}{C_0}, \quad (2.1)$$

де C – ємність конденсатора з даним діелектриком;

C_0 – ємність таких же розмірів вакуумного конденсатора.

Тобто ε визначає здатність діелектрика до створення електричної ємності. Для різних ізоляційних матеріалів ε може приймати значення від 1 до десятків тисяч на змінній напрузі

$$\underline{P} = UI \cos \varphi = UI_a, \quad (2.2)$$

де I_a – повний активний струм, який представляє суму струму $I_{екв}$ і активну складову струму абсорбції $I_{абс а}$

$$I_a = I_p \cdot \operatorname{tg} \delta, \quad (2.3)$$

де I_p – повний реактивний (ємнісний) струм, який дорівнює сумі струму I_2 і реактивній складовій струму абсорбції $I_{абс p}$;

δ – кут, який доповнює кут φ до 90° і іменований кутом діелектричних втрат

$$I_p = \omega C U, \quad (2.4)$$

де ω – кутова частота, дорівнює $2\pi f$;

C – повна (фізична) ємність ізоляції. Після підстановки виразів (2.3) і (2.4) у вираз (2.2) останній прийме вигляд

$$\underline{P} = \omega C U^2 \operatorname{tg} \delta, \quad (2.5)$$

де $\operatorname{tg} \delta$ – характеризує втрати в ізоляції і ε , наряду з ε , однією з основних електричних характеристик ізоляційного матеріалу. Значення $\operatorname{tg} \delta$ і ε даються в довідкових даних на будь-який ізоляційний матеріал.

Для якісної ізоляції величина $\operatorname{tg} \delta \leq (0.001 \div 0.01)$. З метою оцінки якості ізоляції

високовольтних пристроїв вимірюють величину $tg\delta$ при виготовленні пристрою і через певні проміжки часу в процесі його експлуатації і виконують порівняння з встановленими значеннями $tg\delta$.

Крім того при профілактичних випробуваннях визначають залежність $tg\delta = f(U)$ зазвичай в інтервалі $(0.5 \div 1.5) U_{роб\ ном}$ (номінальної робочої напруги пристрою). При цьому можуть бути отримані два види залежностей (1 чи 2, рис. 2.4), [127].

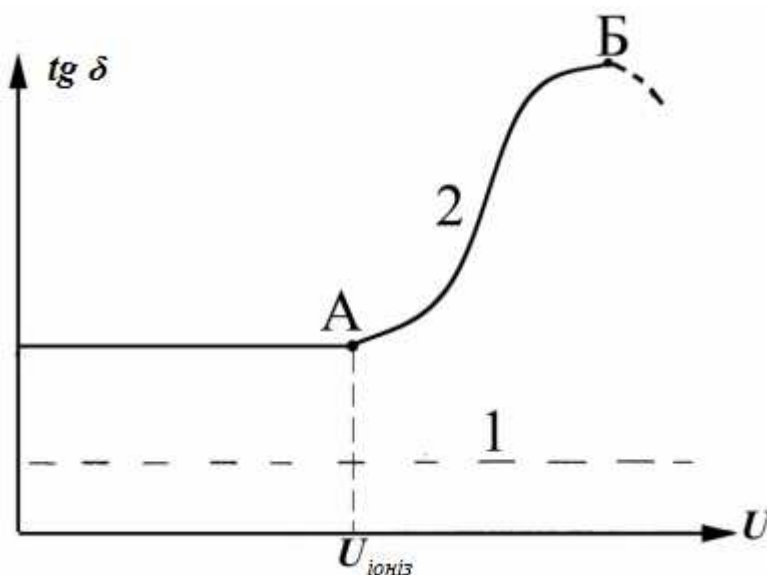


Рисунок 2.4 – Дві залежності $tg\delta = f(U)$

Залежність виду 1 відповідає якійсь однорідній ізоляції. Наявність зламу кривої 2 (точка A) при напрузі іонізації – $U_{іоніз}$ вказує на присутність в ізоляції газових (повітряних) включень, в яких починається процес іонізації при напрузі $U_{іоніз}$. При цьому швидко зростає наскрізний струм $i_{екв}$ через ізоляцію, а, отже і втрати в ній. При напрузі, що відповідає точці B, газові (повітряні) включення в ізоляції повністю іонізовані і втрати в ній досягають максимуму. Робота високовольтного пристрою, в ізоляції якого різко вирости втрати недопустима, так як надалі може наступити пробій ізоляції і вихід з ладу високовольтного пристрою. Визначення ϵ і $tg\delta$ ізоляції на промисловій частоті зазвичай досягають за допомогою моста змінного струму, рис. 2.5.

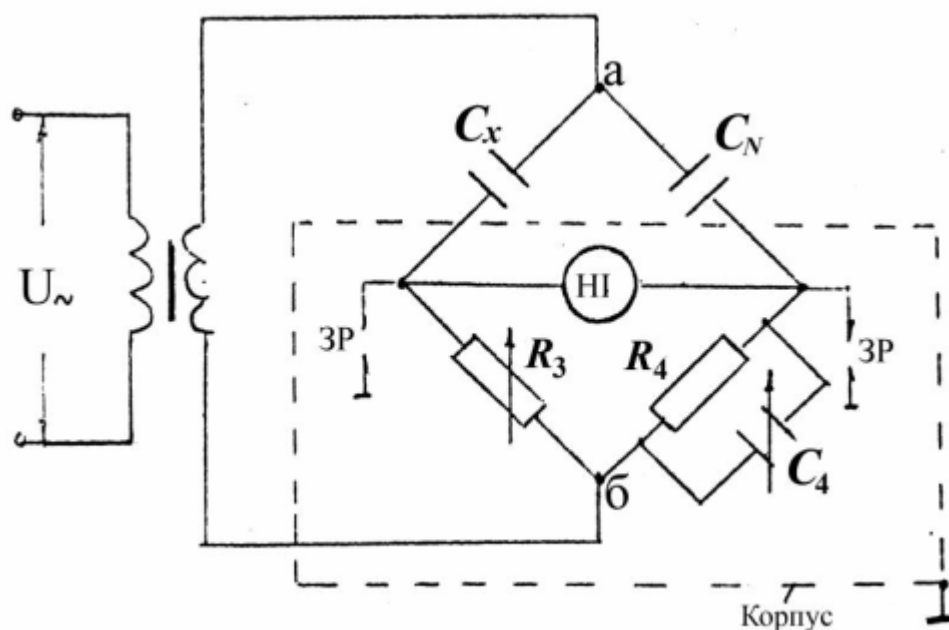


Рисунок 2.5 – Принципова схема мосту змінного струму:

C_x – ємність ізоляції об'єкта виміру; C_N – зразковий повітряний конденсатор (без втрат); R_3 – змінний, зразковий, безіндуктивний опір; C_4 – ємності з малими втратами; R_4 – зразковий резистор; HI – нульовий індикатор

Мостова схема рис. 2.5, в якій заземлена точка «б» називається нормальною схемою. Вимірювання за цією схемою здійснюється коли обидва електроди випробуваного об'єкта (C_x) ізолювані від землі. Мостова схема рис. 2.5, в якій заземлена точка "а", називається перевернутою. Вимірювання по ній виконуються при наявності "глухого" заземлення одного з електродів випробуваного об'єкта (оболонка кабелю, корпус трансформатора і т.п.)

Ряд заводських високовольтних мостів змінного струму допускають роботу по двох схемах, а деякі можуть працювати тільки за нормальною схемою.

У заводських мостах ряд елементів схеми поміщається в спеціальний корпус (пунктир на рис. 2.5), який надійно заземлюється для забезпечення безпечної роботи з мостом. Для захисту від перенапруг при можливих пробоях ізоляції випробуваного об'єкта (C_x) встановлюються розрядники ЗР, рис. 2.5.

Визначення C_x і $tg\delta$ проводиться в момент рівноваги моста, який визначається по нульовому показанню індикатора HI .

При рівновазі моста змінного струму добутки комплексних опорів його

протилежних плечей рівні

$$Z_x Z_4 = Z_N Z_3, \quad (2.6)$$

де

$$Z_x = R_x - j \frac{1}{\omega C_x}; \quad (2.7)$$

$$Z_4 = \frac{R_4 \left(-\frac{1}{j\omega C_4} \right)}{R_4 - \frac{1}{j\omega C_4}}; \quad (2.8)$$

$$Z_N = -j \frac{1}{j\omega C_4}; \quad (2.9)$$

$$Z_3 = R_3. \quad (2.10)$$

Після підстановки виразів (2.7) - (2.10) у вираз (2.6) і його перетворень отримаємо

$$C_x = C_N \frac{R_4}{R_3}; \quad (2.11)$$

$$\operatorname{tg} \delta = \omega C_4 R_4; \quad (2.12)$$

Якщо взяти $R_4 = \frac{10000}{\pi} = 3184$ Ом, тоді при $2\pi f = 100\pi$ маємо

$$\operatorname{tg} \delta = \omega C_4 R_4 = \frac{100\pi \cdot 10000}{\pi} C_4 = C_4 \cdot 10^6. \quad (2.13)$$

При підстановці ємності C_4 в мікрофарадах (10^{-6} Ф) $\operatorname{tg} \delta$ чисельно дорівнює ємності C_4 ($\operatorname{tg} \delta = C_4$, мкФ).

Величина ε розраховується в разі C_x , що має форму плоского конденсатора, за формулою

$$\varepsilon = \frac{C_x a}{\varepsilon_0 S}, \quad (2.14)$$

де S – площа електродів конденсатора;

a – товщина ізоляції;

ε_0 – діелектрична постійна, $\varepsilon_0 = 8,86 \cdot 10^{-12} \text{ Ф / м}$.

У разі циліндричної форми C_x значення ε розраховується відповідно до виразу

$$\varepsilon = \frac{C_x \ln \frac{r_3}{r_B}}{2\pi l \varepsilon_0}, \quad (2.15)$$

де r_3 і r_B – зовнішній і внутрішній радіуси ізоляції об'єкта, м ;

l – довжина об'єкта, м .

2.3 Методи контролю ізоляції, засновані на явищі абсорбції зарядів

Ізоляція електричних машин високої напруги складається, як правило, з декількох діелектриків з різними діелектричними проникностями ε і питомими об'ємними опорами ρ_v . У таких випадках ізоляція вже в силу конструктивних особливостей є неоднорідною. При дії електричного поля в неоднорідній ізоляції відбувається відносно повільна міграційна поляризація, яка на відміну від інших видів поляризації обумовлена переміщенням не пов'язаних, а вільних зарядів. Внаслідок міграційної поляризації на межах шарів різних діелектриків утворюються заряди абсорбції. З процесами накопичення і розтікання зарядів абсорбції пов'язані деякі характерні явища, які використовуються для контролю стану ізоляції. У найпростішому випадку неоднорідна ізоляція складається з двох шарів, кожен з яких характеризується своїм питомим об'ємним опором ρ і діелектричною проникністю ε (рис. 2.6(a)). В схемі заміщення такої ізоляції [20, 21] $R_1 = \frac{\rho_1 d_1}{s}$

і $R_2 = \frac{\rho_2 d_2}{s}$ – опори витоку відповідних шарів в сталому режимі; $C_1 = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_1 S}{d_1}$ і

$C_2 = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_2 S}{d_2}$ – ємності цих шарів; S – площа електродів.

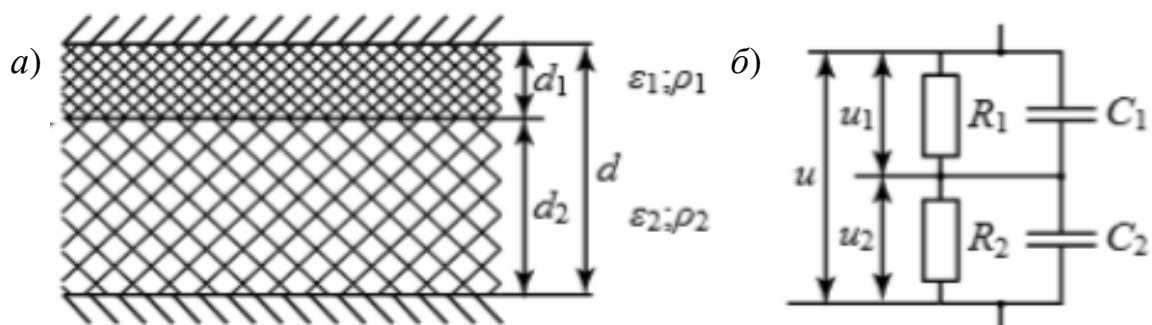


Рисунок 2.6 – Двошарова ізоляція (а) і схема її заміщення (б)

Користуючись схемою заміщення, можна показати, що при впливі на ізоляцію постійної напруги U в сталому режимі заряд на межі шарів, тобто заряд абсорбції дорівнює

$$q_{abc} = q_1 - q_2 = U_1 C_1 - U_2 C_2 = U \frac{C_1 R_1 - C_2 R_2}{R_1 + R_2}. \quad (2.16)$$

З цього виразу випливає, що $q_{abc} \neq 0$ при умові $C_1 R_1 \neq C_2 R_2$, або якщо скористатися приведеними вище виразами для R_1, R_2, C_1, C_2 за умовою

$$\varepsilon_1 \rho_1 \neq \varepsilon_2 \rho_2, \quad (2.17)$$

Нерівність (2.17) є умова існування міграційної поляризації при якій $q_{abc} \neq 0$ двошарова ізоляція є неоднорідною.

Для аналізу явищ в неоднорідній ізоляції, що використовуються для контролю її стану, іноді застосовують схему заміщення рис. 2.6(б), на якій $R_Y = R_1 + R_2$ – опір витоку всієї ізоляції в сталому режимі, $C_\Gamma = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}$ – геометрична ємність ізоляції, яка визначається лише її розмірами і діелектричною проникністю шарів, [131].

У схемі, рис. 2.6(б), накопичення заряду абсорбції q_{abc} відбувається на

ємності ΔC включеної послідовно з опором r . З умови рівності повних опорів двох схем заміщення слідує

$$r = \frac{R_1 R_2 (R_1 + R_2) (C_1 + C_2)^2}{(R_1 C_1 - R_2 C_2)^2}, \quad \Delta C = \frac{(R_1 C_1 - R_2 C_2)^2}{(R_1 + R_2)^2 (C_1 + C_2)}. \quad (2.18)$$

Згідно (2.18) у разі однорідної ізоляції, коли $R_1 C_1 = R_2 C_2$, $\rho_1 \varepsilon_1 = \rho_2 \varepsilon_2$ опір $r = \infty$ і ємність $\Delta C = 0$. Схема заміщення на рис. 2.6(б) включає лише R_y і C_Γ , і заряд абсорбції не утворюється, що узгоджується з (2.16). У разі багатошарової ізоляції схеми заміщення матимуть вигляд, показаний на рис. 2.7, слід звернути увагу на те, що при числі шарів n число елементів ΔC_i , в схемі 2.7(б), дорівнює $n-1$ по кількості меж між шарами, на яких можуть накопичуватися заряди абсорбції, [118, 119, 132].

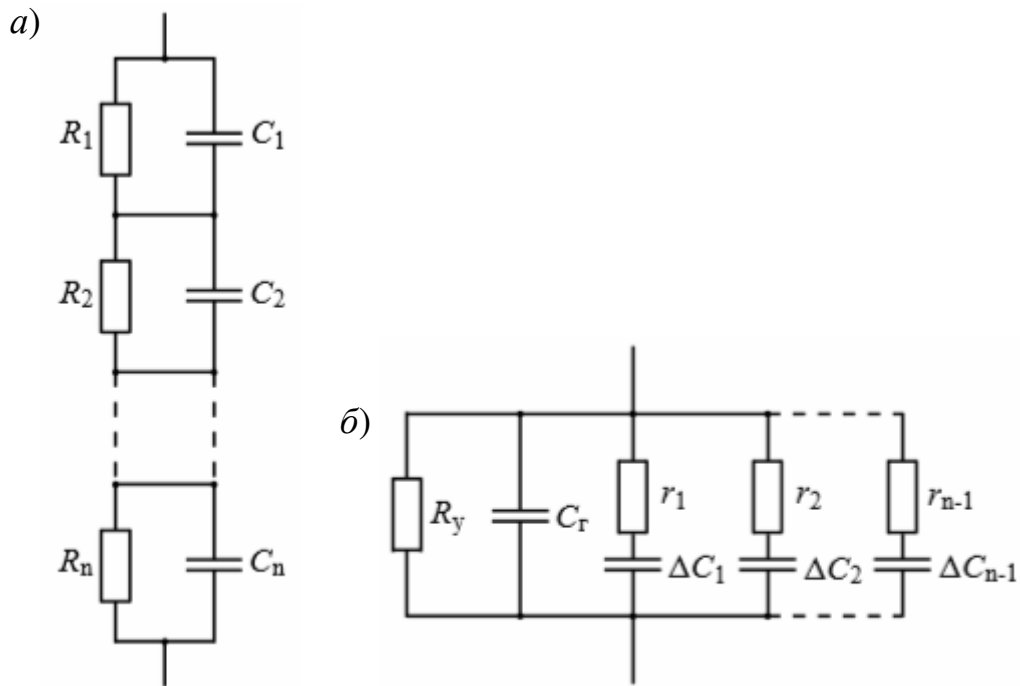


Рисунок 2.7 – Схеми заміщення багатошарової ізоляції

$$R_y = \sum_{i=1}^n R_i; \quad \frac{1}{C_\Gamma} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{C_i}.$$

З накопиченням заряду абсорбції $q_{абс}$ пов'язані такі явища, що

використовуються для контролю стану ізоляції:

- зворотна напруга;
- самозаряд;
- залежність від часу струму ємності ізоляції;
- залежність від часу струму розряду ємності ізоляції.

Зворотна напруга. Про ступінь неоднорідності ізоляції можна судити на підставі наступного досліду. Після тривалої витримки під постійною напругою ізоляцію від'єднують від джерела і короткочасно (доли секунди) замикають її електроди. У разі однорідної ізоляції при цьому відбувається "миттєва" і повна нейтралізація всіх зарядів. Якщо ж ізоляція неоднорідна, то нейтралізуються лише заряди на геометричній ємності, а заряд абсорбції зберігається практично повністю.

Поки електроди замкнуті, ємності шарів ізоляції C_1 і C_2 з'єднані паралельно. В цей час заряд абсорбції розподіляється по ємностям C_1 і C_2 , заряджаючи їх до однакової за значенням напруги $U_{abc} = q_{abc}(C_1 + C_2)$. Після розмикання електродів ємності C_1 і C_2 знову з'єднані послідовно, причому заряджені до однієї й тієї ж напруги U_{abc} , але різної полярності. Тому в момент розмикання електродів сумарна напруга на ізоляції залишається рівною нулю. Потім ємності C_1 і C_2 розряджаються на опори витoku своїх шарів, причому з різними постійними часу, так як для неоднорідної ізоляції $R_1C_1 \neq R_2C_2$. В результаті на ізоляції з'являється напруга, яка і називається зворотною [24, 25], (рис. 2.8(a)). Для двошарової ізоляції з урахуванням (2.16) вираз для напруги $U_{звор}$ має вигляд, [135]

$$U_{звор} = U_{abc} \left(e^{-\frac{t}{R_1C_1}} - e^{-\frac{t}{R_2C_2}} \right) = U_0 \frac{R_1C_1 - R_2C_2}{(R_1 + R_2)(C_1 + C_2)} \left(e^{-\frac{t}{R_1C_1}} - e^{-\frac{t}{R_2C_2}} \right), \quad (2.19)$$

де U_0 – напруга джерела.

Чим більше неоднорідність ізоляції, тим вище максимальне значення зворотної напруги і тим більше розрізняються швидкості його підйому і спаду.

Описане вище явище зворотної напруги в експлуатації для контролю стану

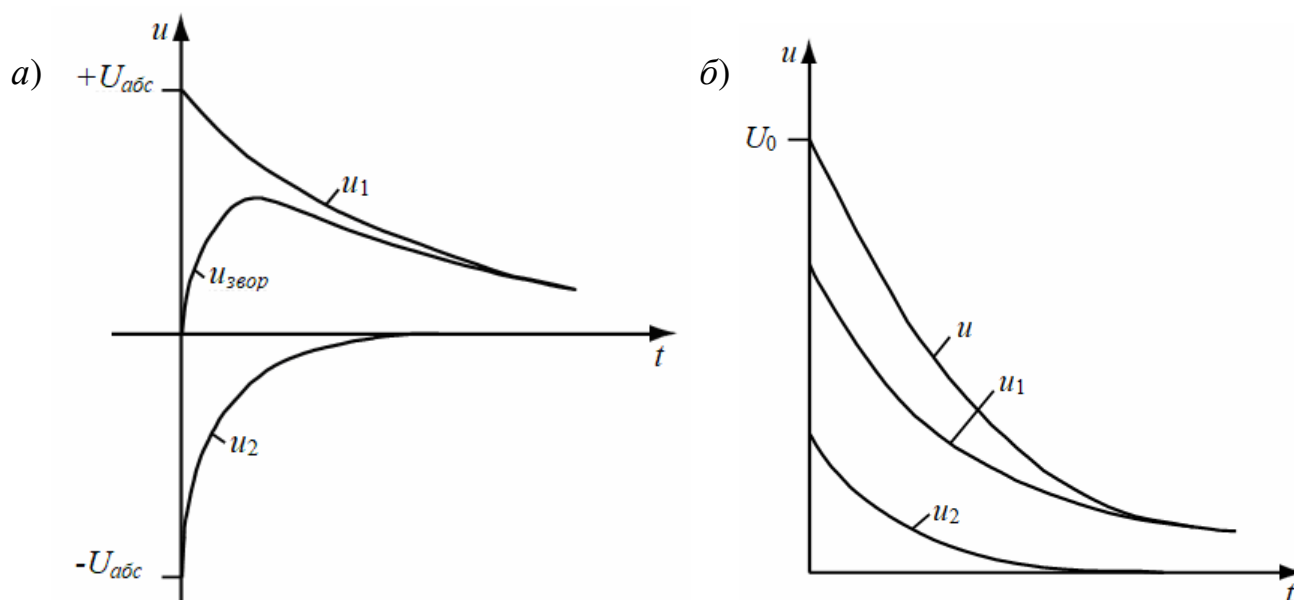


Рисунок 2.8 – Зміна в часі зворотної напруги (а) і напруги саморозряду (б)

ізоляції використовується рідко, так як відповідні досліди вимагають значних витрат часу. Однак це явище має важливе практичне значення. Зворотна напруга становить серйозну небезпеку для персоналу при проведенні випробувань ізоляції з прикладенням високої постійної напруги. Можливість появи цієї напруги повинна обов'язково враховуватися при розробці заходів, що забезпечують безпечне проведення випробувань.

Явище саморозряду. При тривалому застосуванні до ізоляції постійної напруги U_0 остання розподіляється по шарах пропорційно опорам витоку шарів. У сталому режимі на першому шарі напруга буде $U_1 = U_0 R_1 / (R_1 + R_2)$, на другому – $U_2 = U_0 R_2 / (R_1 + R_2)$. Після від'єднання ізоляції від джерела напруги, ємності C_1 і C_2 розряджаються на опори витоку своїх шарів. В результаті напруга на ізоляції знижується (рис. 2.8(б)) відповідно до виразу

$$U(t) = \frac{U_0}{R_1 + R_2} \left(R_1 e^{-\frac{t}{R_1 C_1}} + R_2 e^{-\frac{t}{R_2 C_2}} \right). \quad (2.20)$$

Саморозряд має місце і в разі однорідної ізоляції. Чим швидше знижується напруга на ізоляції в процесі саморозряду, тим, очевидно, більша провідність її

шарів.

Залежність струмів $i_{зар}(t)$ та $i_{розр}(t)$ від часу. Зі схеми заміщення рис. 3.8(б), слідує, що при підключенні неоднорідної ізоляції до джерела постійної напруги U_0 струм заряду $i_{зар}(t)$ (без врахування короткотермінового струму заряду геометричної ємності C_{Γ}) змінюється в часі відповідно до виразу

$$i_{зар}(t) = \frac{U_0}{R_y} + U_0 \sum_{i=1}^{n-1} \frac{1}{r_i} e^{-\frac{t}{r_i \Delta C_i}}. \quad (2.21)$$

Під час замикання електродів ізоляції після тривалої дії напруги U_0 струм розряду $i_{розр}(t)$ (без врахування короткотермінового струму заряду геометричної ємності C_{Γ}) буде відповідати виразу

$$i_{розр}(t) = U_0 \sum_{i=1}^{n-1} \frac{1}{r_i} e^{-\frac{t}{r_i \Delta C_i}}. \quad (2.22)$$

З формул (2.19) - (2.22) випливає, що всі розглянуті характеристики неоднорідності ізоляції, обумовлені наявністю заряду абсорбції, мають параметри, жорстко пов'язані з питомими електричними властивостями ізоляції. Тому вимір і аналіз цих характеристик може дати корисну інформацію про стан ізоляції, наприклад, про кількість шарів з різними властивостями, про питомих параметрах цих шарів. Формально всі абсорбційні характеристики містять практично однакову інформацію про ізоляцію. Однак техніка їх вимірювання і методика аналізу є різною.

Для вимірювання абсорбційних характеристик ізоляції на поточний момент часу розроблені і використовуються (поки в обмежених масштабах) спеціальні прилади, наприклад, прилад KDO-1 (Німеччина) для вимірювання зворотної напруги або ЦИТА (Росія) для вимірювання струму заряджування.

Найбільш простим і найпоширенішим способом використання абсорбційних характеристик для контролю ізоляції є вимірювання опору ізоляції $R(t)$, як функції

часу. Вимірювання проводять за допомогою мегомметрів. Опір $R(t)$ при цьому визначається на підставі співвідношення (закону Ома) $R(t) = U_0 / i_{зар}(t)$.

З урахуванням (2.6) для неоднорідної ізоляції залежність від часу опору $R(t)$ має вигляд, показаний на рис. 2.9.

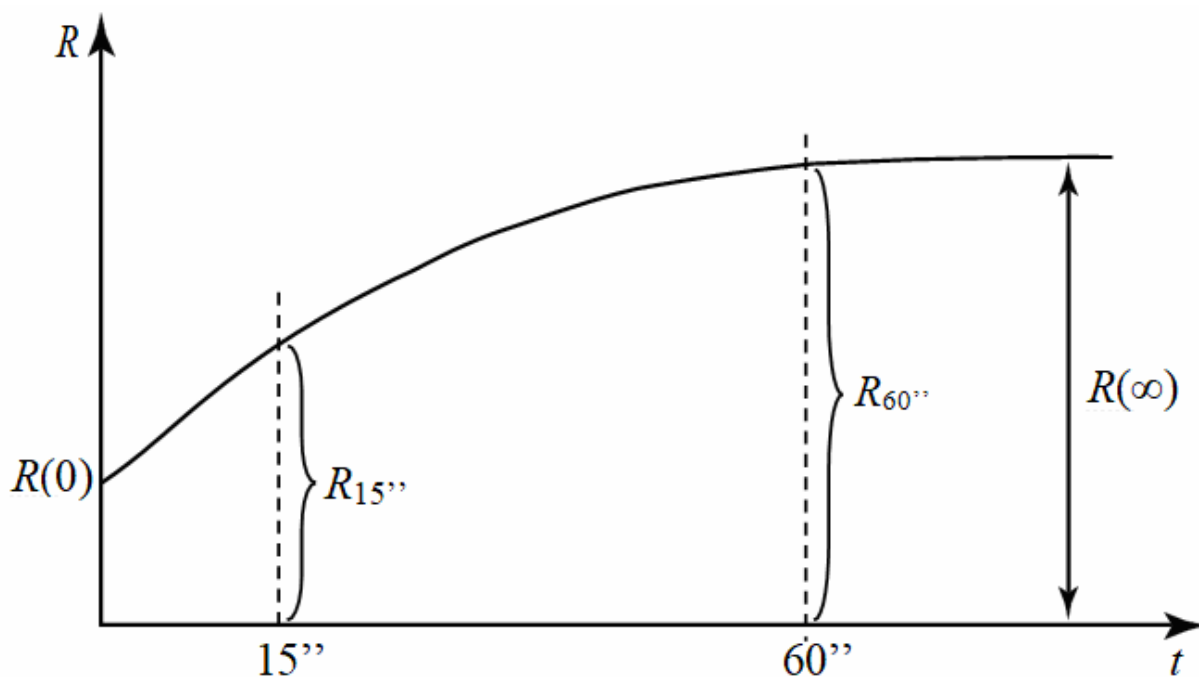


Рисунок 2.9 – Зміна в часі вимірюваного значення опору R неоднорідної ізоляції

Опір будь-якого виду внутрішньої ізоляції сильно залежить від температури. З підвищенням температури опір ізоляції знижується. Тому для величини R_{60} встановлюють різні допустимі значення для різних температур.

При необхідності повторення вимірювань R_{15} і R_{60} необхідно зробити паузу між вимірами 3-5 хв, щоб встигли повністю нейтралізуватися накопичені при попередніх вимірах заряди абсорбції.

Опис лабораторної установки і об'єктів обстеження. Сучасні промислові прилади для отримання кривої саморозряду та зняття зворотної напруги зазвичай являють собою достатньо складні пристрої, [136, 137]. До основного обладнання лабораторної установки відноситься джерело регульованої постійної високої напруги, яка використовується для зняття кривих саморозряду і зворотної напруги (рис. 2.10). Він включає в себе підвищуючий трансформатор T_p (наприклад, типу

НОМ-16), випрямляч Д, регулятор напруги РН, перемикач високої напруги П і електростатичний кіловольтметр (наприклад, типу С-96 або С-196).

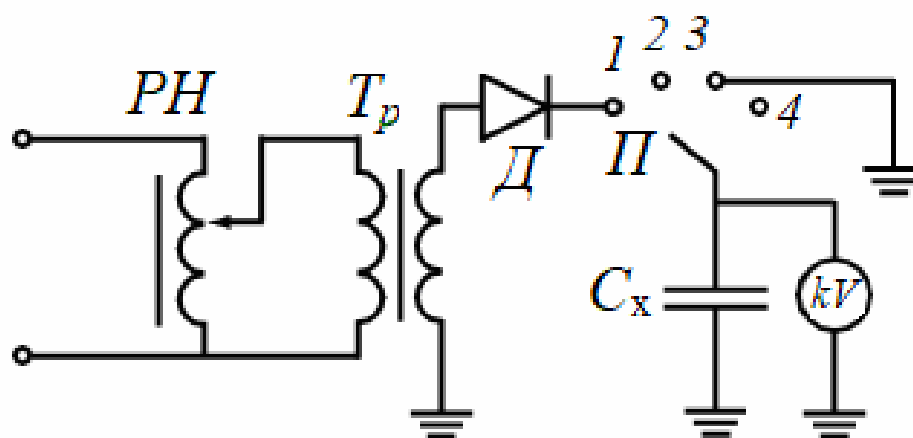


Рисунок 2.10 – Схема установки для визначення зворотної напруги і саморозряду.

При визначенні кривої зворотної напруги перемикач П попередньо встановлюється в положення 1 і ємність випробуваної ізоляції C_x заряджається протягом 2-3 хв до заданої напруги. Потім перемикач П з імпульсними контактами швидко переводиться з положення 1 в положення 4, так щоб при проходженні перемикача через положення 3 встигла розрядитися тільки геометрична ємність ізоляції.

При визначенні кривої саморозряду ізоляція, що випробовується, попередньо заряджається протягом 2-3 хв. Після цього перемикач П переводиться в положення 2 з положення 1. Опір ізоляції вимірюється мегаомметром з напругою 2500 В.

2.4 Контроль ізоляції за величиною зворотної напруги

В процесі старіння ізоляції змінюється її в'язкість, що призводить до зменшення струму абсорбції ($i_{\text{абс}}$). Отже за $i_{\text{абс}}$ можна судити про стан ізоляції і ступень її старіння.

Для проведення діагностичних вимірювань стану корпусної ізоляції ТЕД було виготовлено мікропроцесорний пристрій, що дозволяє методом вимірювання зворотної напруги визначати термін служби корпусної ізоляції [138-141]. Пристрій дозволяє здійснювати виміри: величини зворотної напруги, часу наростання

напруги, часу спаду напруги на ізоляції, та величини накопиченої енергії. Блок-схема пристрою приведена на рис. 2.11:

ВДЖ - високовольтне джерело живлення (діапазон зміни напруги - від 500 В до 2000 В);

МЖ - модуль живлення (імпульсний перетворювач напруги 50 В постійного струму або 220 В змінного струму в напруги, необхідні для живлення мікропроцесорного пристрою);

МК – мікроконтролер;

K1 і K2 – два високовольтних реле, що керуються мікропроцесорним контролером;

схема заміщення неоднорідної ізоляції тягового двигуна представлена у вигляді конденсатора C_x , зашунтованого резистором R_x .

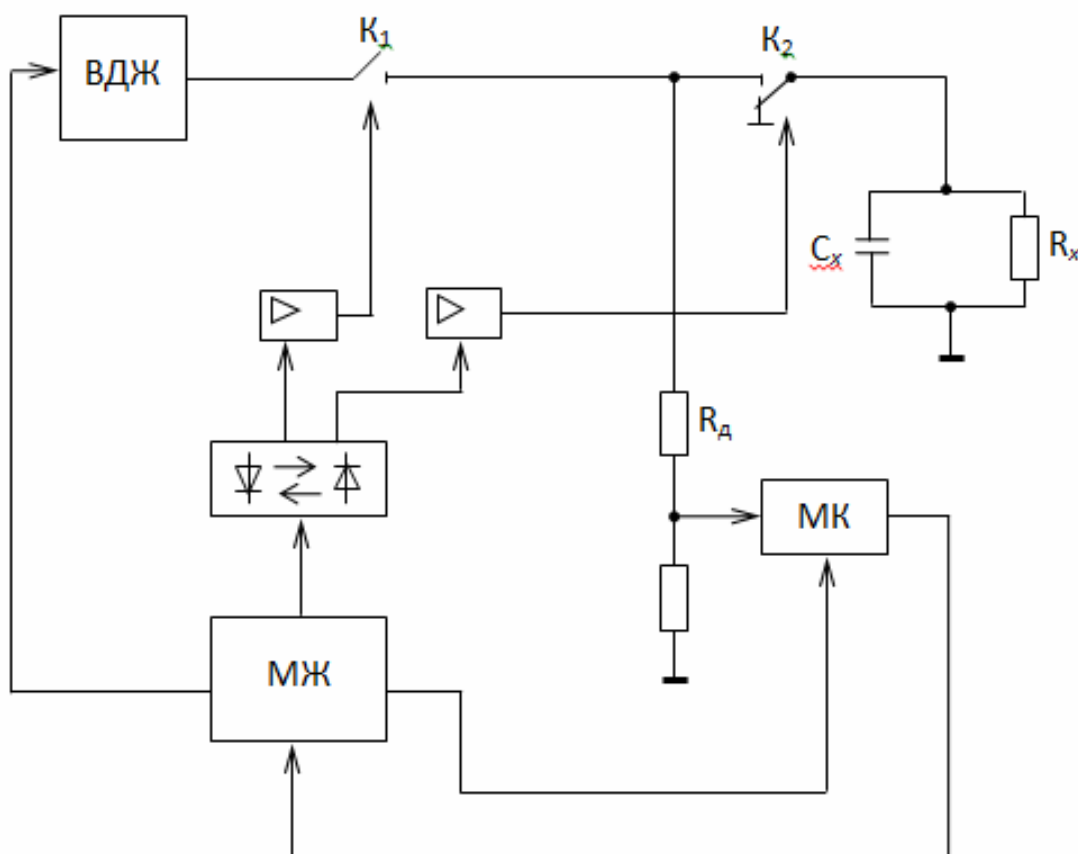


Рисунок 2.11 – Принципова схема пристрою для виміру зворотної напруги ізоляції обмоток тягових електричних машин локомотивів

Модуль живлення МЖ видає стабілізовану постійну напругу, гальванічно

разв'язану від мережі живлення (або бортової мережі локомотива). Електрична схема модулю складається з випрямляча напруги, пристрою запуску, блокінг-генератора, пристрою стабілізації та захисту, пристрою затримки, розподільчого трансформатора і випрямлячів імпульсної напруги.

Мікроконтролер вимірювання і управління (далі «модуль») призначений для видачі сигналів управління при проведенні вимірювань зворотної напруги на ізоляції обмотки збудження ТЕД, а також для контролю стану сигналів.

Модуль виконує наступні функції:

- безперервне опитування датчиків і вимір необхідних параметрів;
- безперервний контроль внутрішніх ланцюгів управління і обмоток зовнішніх реле;
- прийом по інтерфейсу RS-485 керуючих команд і видача відповідних повідомлень про стан модуля;
- видача сигналів управління на проміжні реле системи.

Модуль призначений для експлуатації в закритих приміщеннях при температурі навколишнього повітря від $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+70\text{ }^{\circ}\text{C}$, відносної вологості повітря до 95% при температурі $25\text{ }^{\circ}\text{C}$, атмосферному тиску 84 - 106.7 кПа.

Процес визначення стану ізоляції ТЕД проводиться в автоматичному режимі під управлінням мікроконтролера (МК).

Модуль управління пристроєм (МУП) за програмою, записаною в пам'яті МК, дає команду ВБЖ на подачу випробувальної напруги (1,5 кВ) на ізоляцію протягом трьох хвилин. Потім МУП виконує запрограмовані перемикання і розпочинається процес вимірювання зміни зворотної напруги з певним кроком квантування в часі (крок квантування програмно може бути реалізований в широких межах). Отримані результати вимірювань записуються в пам'ять МК і виводяться на екран дисплея в зручному для аналізу вигляді. Передбачена також можливість накопичення інформації та передача її в банк даних, встановлений у визначеному місці, де і оцінюватиметься стан ізоляції ТЕД.

За величиною зворотної напруги можна судити про стан ізоляції. Як показали дослідження, найбільш інформативною для ТЕД НБ - 406 є зворотна напруга,

виміряна на 30-й секунді після початку вимірювання, яку позначають U_{30}^{36} .

Якщо значення зворотної напруги не менше 80 В, то властивості такої ізоляції можна відновити середнім ремонтом, тобто, просоченням ізоляції і її сушінням, що дозволяє економити дефіцитні обмотувальні та ізоляційні матеріали, необхідні при капітальному ремонті, і подовжує термін служби тягового електродвигуна до наступного ремонту.

Під час проведення досліджень встановлено, що основні процеси наростання та спаду зворотної напруги знаходяться в межах 15–20 с. Виконувалось це з метою визначення частоти опитування датчиків на встановлених проміжках часу з подальшим програмуванням міні – ЕОМ. Встановлено також час подачі та величину випробувальної напруги. Дослідження також показали, що короткочасне замикання ізоляції в часі повинно складати 1 с.

Дослідження проводились в лабораторіях Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту на ТЕД НБ-406 (ЕД-107) та локомотивному депо Н.-Д.Вузол Придніпровської залізниці на ТЕД НБ-406 [120, 142, 143].

Висновки до розділу 2

Про ступінь неоднорідності ізоляції можна судити на підставі заряду абсорбції, що зберігається практично повністю після тривалої витримки під постійною напругою. Якщо ізоляція неоднорідна, то нейтралізуються лише заряди на геометричній ємності, а заряд абсорбції зберігається практично повністю.

Чим більше неоднорідність ізоляції, тим вище максимальне значення зворотної напруги і тим більше розрізняються швидкості його підйому і спаду.

Для вимірювання абсорбційних характеристик ізоляції до теперішнього часу розроблені і використовуються (поки в обмежених масштабах) спеціальні прилади, наприклад, прилад КДО-1 (Німеччина) для вимірювання зворотної напруги або ЦИТА (Росія) для вимірювання струму зарядки.

РОЗДІЛ 3

АНАЛІЗ ВІДМОВ ТЯГОВИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ ДВИГУНІВ ЛОКОМОТИВІВ

3.1 Аналіз несправностей тягових електродвигунів, електровозів і тепловозів

Рухомий склад залізниць знаходиться в різних експлуатаційних кліматичних умовах і схильний до комплексної дії на нього теплових, електричних, механічних і кліматичних чинників. Тягові машини відносяться до найбільш навантаженого устаткування тягового електрорухомого складу (ТРС). Робота тягового електродвигуна (ТЕД) при значних перепадах температур призводить до прискорення старіння ізоляції, зміни характеристик мастильних матеріалів, порушення монолітності колектора. Експлуатація в умовах низьких температур призводить до підвищення динамічної дії на електродвигун з боку колії, отже, і до збільшення числа відмов. На сьогодні актуальним залишається задача вдосконалення технології ремонту ТЕД, яка забезпечувала б збереження і відновлення параметрів, що встановлюються технічними умовами на роботу ТЕД. Статистичні дані по відмовах вузлів ТРС за період з січня 2015 р. по серпень 2017 р. свідчать про те, що на долю тягових двигунів припадає 20-25% від загального числа відмов. На рис. 3.1 і 3.2 приведені діаграми несправностей ТЕД локомотивів [144].

Проаналізувавши відмови, можна зробити висновок про те, що причини несправностей ТЕД електровозів і тепловозів однакові за своєю природою. Однією з причин виходу тягового електродвигуна локомотива з ладу є викид мастила з підшипникових камер всередину двигуна і попадання останньої на колектор, що погіршує параметри функціонування ТЕД. Викид мастила призводить до відмови тягового електродвигуна електровозів в 27% випадків, тепловозів - в 7% випадків за розглянутий період. Ця несправність виникає із-за великих зазорів в лабіринтових ущільненнях, перетікання мастила, засмічення вентиляційних каналів сердечника якоря. Іншою поширеною причиною, що призводить до виходу ТЕД з ладу в 21% випадків для електровозів і в 10% випадків для тепловозів, є ушкодження якірних підшипників. Як правило, причинами цих відмов є перевищення допустимої температури нагріву підшипників, їх забруднення при складанні або наявність

забрудненого мастила, їх надлишкове зношування або руйнування деталей підшипника зважаючи на установку останнього з перекосом, малого радіального зазору, наявність тертя в ущільненнях підшипників. Поширеною причиною несправності ТЕД є пробій ізоляції і міжвиткове замикання обмотки якоря, на долю яких припадає близько 20% і 24% від загального числа відмов для електровозів і тепловозів відповідно. Слід зазначити, що за даний період кількість пробіїв ізоляції і міжвиткових замикань (МВЗ) обмотки якоря ТЕД електровозів з пробігом до 400 тис. км після останнього капітального ремонту зменшується, а при пробігу 400 тис. км і більше - зростає. Стан ізоляції багато в чому визначається кліматичними умовами, в яких працює ТЕД. Робота в умовах вологості і різких перепадів температур (особливо в зимовий період) призводить до погіршення об'ємного і поверхневого опору ізоляції і збільшення вірогідності пробією. Попадання металевих стружок під котушки головних і додаткових полюсів при складанні остову і під обмотку якоря в процесі ремонту, механічне ушкодження обмотки при складанні і розбиранні машини, послаблення кріплення міжкатушкових з'єднань і ушкодження ізоляції може згодом стати причиною її пробією.

Існуючий технологічний процес ремонту ТЕД в об'ємі ПР-3 передбачає [145, 111] вимір опору ізоляції обмоток відносно корпусу ТЕД і між обмотками, випробування ізоляції на електричну міцність відносно корпусу ТЕД і між обмотками, перевірку обмотки якоря на МВЗ, обрив витків і якість пайки півників колектора методом падіння напруги з використанням мілівольтметра, а також шляхом візуальної оцінки. Якір є найбільш відповідальним в експлуатації вузлом ТЕД. Стан колекторно-щіткового вузла значною мірою визначає якість роботи електродвигуна.

Биття робочої поверхні колектора і заповнення міддю міжламельного простору є однією з причин значного іскріння під щітками і появи кругових вогнів, що може привести до відмови ТЕД і, як наслідок, до непланового ремонту. Підвищене биття поверхні колектора призводить до відмови ТЕД електровозів в 3% усіх випадків, а ТЕД тепловозів в 4%. Для визначення діаметру колектора в умовах локомотивного депо використовують скобу вимірювальну СІК- 600-750. Величина

биття в умовах локомотивного депо, згідно технологічної документації, не визначається за допомогою вимірювальних інструментів. Усунення биття по поверхні колектора відбувається шляхом механічної обробки, при цьому точність форми визначається жорсткістю і точністю технологічної системи верстат - пристосування - інструмент - деталь і станом вузлів, що поєднуються.

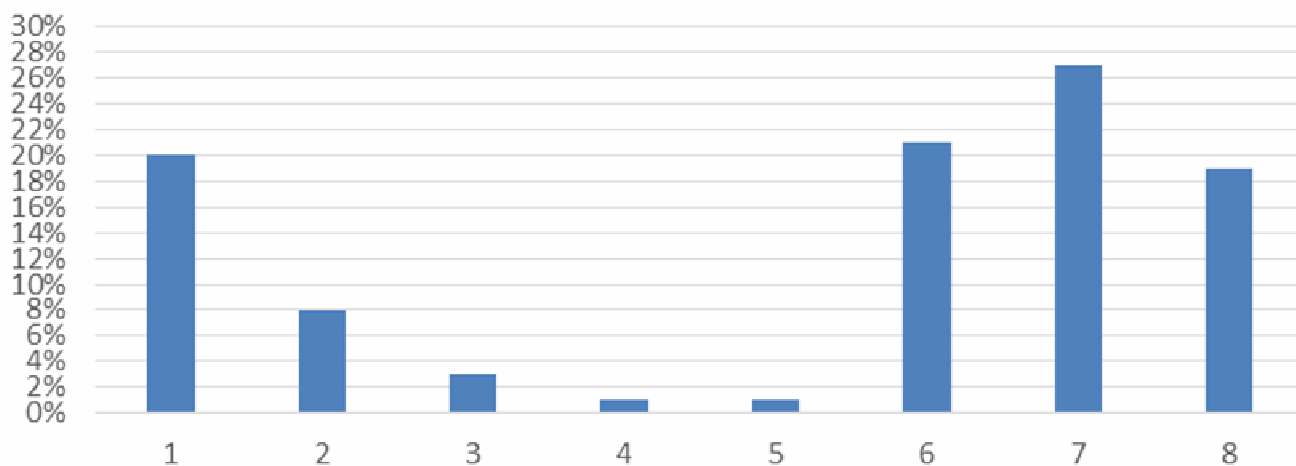


Рисунок 3.1 - Діаграма несправностей ТЕД електровозів:

1 - попадання мастила; 2 - ушкодження якірних підшипників; 3 - перекидання, оплавлення, підгари, затягування ламелей колектора; 4 - задир колектора; 5 - биття поверхні колектора; 6 - виплавлення припою з півників колектора; 7 - пробій і міжвиткові замикання обмотки якоря; 8 - інші несправності

Згідно із статистичними даними, число відмов унаслідок підвищеного биття поверхні колектора в різні роки немонотонно зростає зі збільшенням пробігу від останнього капітального або ПР-3 ремонту. Річке зростання числа відмов від пробігу свідчить про незадовільну якість ремонту. Подальше зниження числа відмов може обумовлюватися якіснішим ремонтом, поліпшенням існуючої технології. Задир колектора як причина відмови зустрічається досить рідко і складає близько 1% від усіх несправностей тягового електродвигуна. Заповнення міддю міжламельного простору колектора призводить до відмови тягової машини також в 1% усіх випадків.

Причинами виникнення цієї несправності є попадання стружки при ремонті, зміна властивостей поверхневого шару колектора при інтенсивному іскрінні щіток і

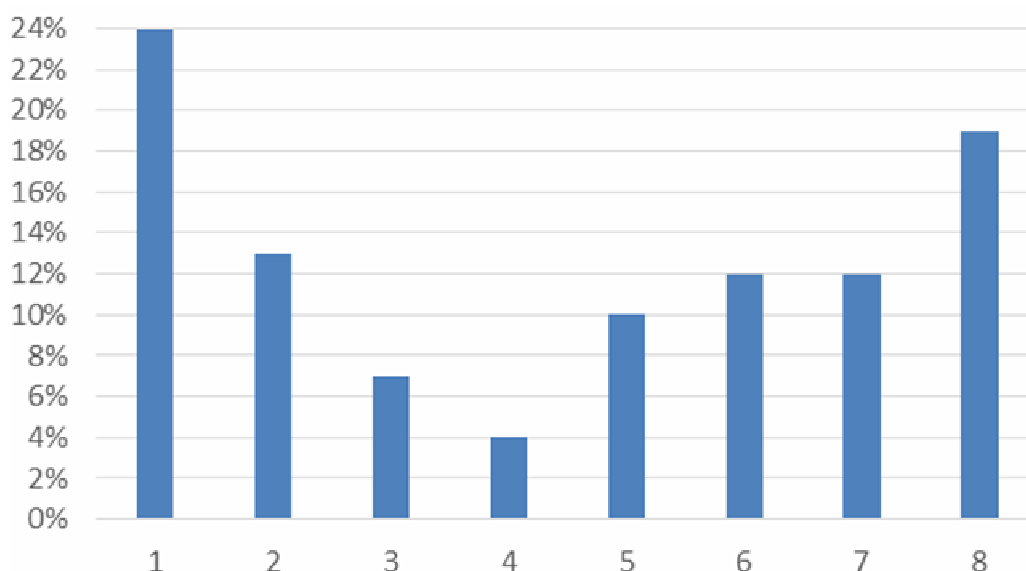


Рисунок 3.2 – Діаграма несправностей тягових електродвигунів тепловозів:

1 - пробій ізоляції і міжвиткові замикання якоря; 2 - виплавлення припою з півників колектора; 3 - попадання мастила в остов; 4 - биття колектора; 5 - ушкодження якірних підшипників; 6 - низька ізоляція обмоток; 7 - пробій ізоляції і міжвиткові замикання головних і додаткових полюсів; 8 - інші несправності

перенесення продуктів зносу щіткою в міжламельний простір, підвищене биття поверхні колектора. Технологічний процес, що усуває перелічені вище несправності, полягає в механічній обробці колектора і його продорожці. В умовах локомотивного депо не передбачається зміцнення поверхневого шару колектора.

Виплавлення припою з півників колектора призводить до відмови ТЕД електровозів в 8% випадків, тепловозів - в 13% і обумовлюється перевантаженням якоря струмом при роботі або поганою якістю пайки. Пайка півників колектора виконується контактним способом на установці для контактної пайки колекторів, якість пайки перевіряється методом падіння напруги. На поточний момент часу існують спроби безконтактного контролю якорів для виявлення зон локального перегрівання в місцях з'єднання виводів якірної обмотки з колекторними "півниками", що є наслідком незадовільної якості пайки контактних з'єднань [146]. В період життєвого циклу ТЕД відбувається зміна технічних параметрів його вузлів і деталей, в першу чергу під впливом старіння і зношування, причому погіршення технічних параметрів ТЕД призводить до збільшення числа непланових ремонтів. В

процесі ремонту повинно вирішуватися завдання не лише відновлення працездатності системи, але і прогнозування її залишкового ресурсу. Діагностування ТЕД до і після ремонту дозволить визначати вузли, найбільш схильні до виходу з ладу, їх залишковий ресурс і виконувати ремонт за їх технічним станом [147]. Існуючий технологічний процес в умовах локомотивного депо спрямований на встановлення факту відмови і усунення несправності [134]. Оцінка технічного стану елементів ТЕД у ряді випадків виконується візуально, причому такий контроль не дозволяє об'єктивно оцінювати стан електричного устаткування, оскільки визначається кваліфікацією виконавця [62]. Технологічний процес ремонту має бути спрямований не лише на усунення існуючої несправності, але і побудований таким чином, щоб запобігти виникненню відмови в майбутньому. На сьогодні деякі причини відмов ТЕД закладаються в процесі технічного обслуговування і ремонту, інші - обумовлені експлуатацією. Звідси виникає потреба не лише в проведенні діагностування ТЕД, але і в оцінці якості ремонту, що виконується в умовах локомотивного депо [148].

3.2 Аналіз відмов ТЕД локомотивів ВЛ-8 в депо Нижньодніпровськ-Вузол

Локомотиви, що експлуатуються в даний час на мережі залізниць України, по суті, є рухомим складом старого покоління, для якого характерні недостатній рівень надійності, високі витрати на обслуговування і ремонт. В життєвому циклі цього рухомого складу його вартість складає 36%, а експлуатаційні витрати - 64%. У локомотивному парку витрати на паливо і електроенергію складають 33% [149].

Спостереження за пошкодженнями локомотивів ВЛ-8 здійснювалися в депо Нижньодніпровськ-Вузол РФ Придніпровська залізниця [149-152]. Обов'язковою умовою відбору локомотивів для збору статистичних даних була умова, що локомотиви пройшли капітальний ремонт (КР) та ТЕД повністю відновлені. Статистичні дані щодо загальних відмов ТЕД (НБ-406), електричної апаратури, механічного обладнання, допоміжного обладнання, гальмового обладнання та ін. в процентному відношенні по всьому парку локомотивного депо представлено на рис. 2.3. Як видно тягові електродвигуни локомотивів мають високий рівень відмов –

12% (при умові, що локомотив складається з 6 елементів).

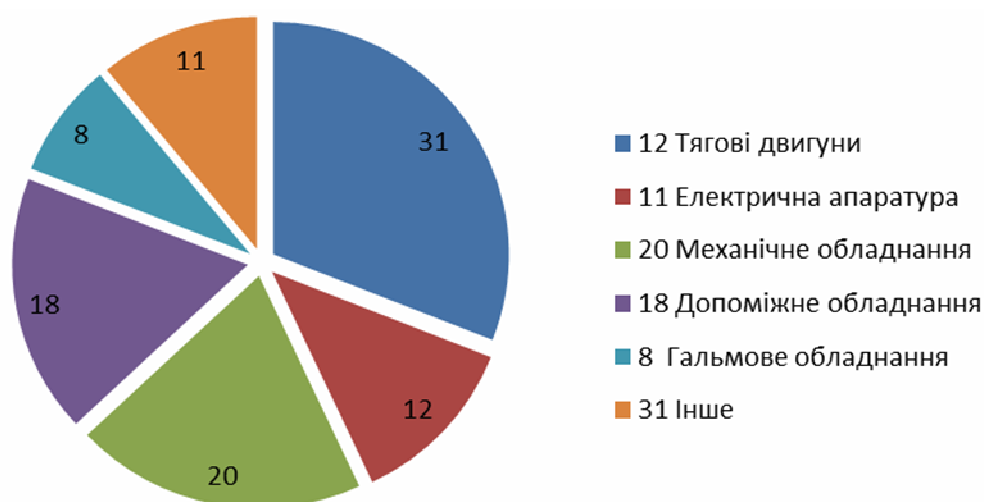


Рисунок 3.3 – Відмови обладнання локомотивів ВЛ-8 у процентному відношенні

Майже третина відмов ТЕД приходить на відмови ізоляції обмоток збудження ТЕД, рис. 3.4.

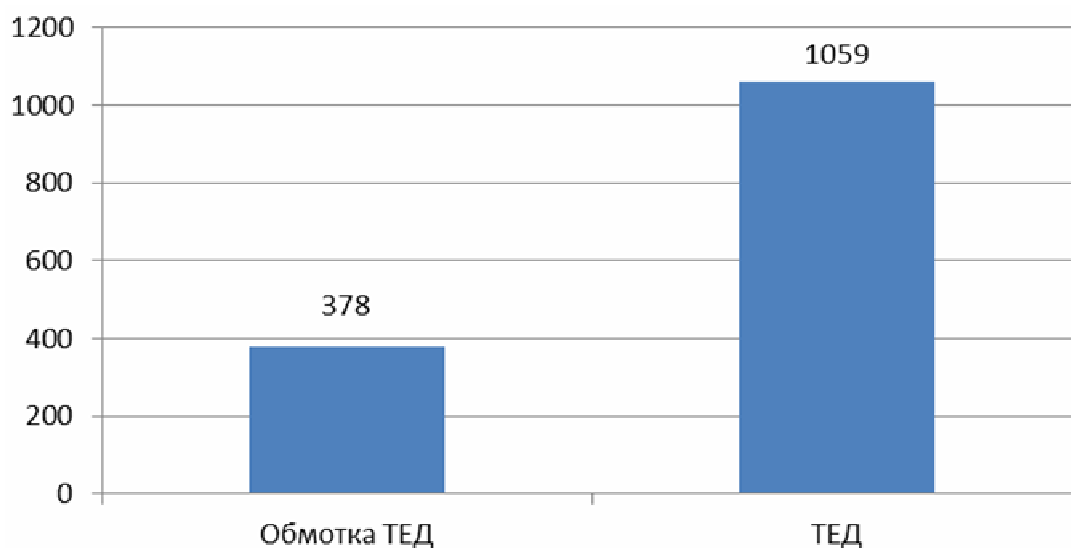


Рисунок 3.4 – Відмови ізоляції обмоток відносно загальної кількості відмов ТЕД

В табл. 3.1 наведено відмови основних конструктивних елементів ТЕД в динаміці. Особливу увагу необхідно звернути на ТЕД, де спостерігається тенденція збільшення відмов.

Процентне співвідношення непланових ремонтів тягових електродвигунів по їх основним конструктивним елементам

У відсотках

Елемент ТЕД	Відмови по роках			
	2015	2016	2017	2018
Якір	70,5	73,5	69,5	64,4
Обмотки полюсів	11,6	8,55	10,5	16,8
З'єднання кабелів	8,53	6,84	16,8	9,9
Моторно-якірні підшипники	9,3	11,1	3,16	8,91

Було виконано виміри та проведено дослідження зміни опору ізоляції обмоток збудження головних полюсів ТЕД в залежності від пробігу в літній період та взимку. Як виявилось, опір ізоляції, виміри якого проводились мегомметром з відносною точністю, не має усталеної закономірності і не підпорядковується жодному із законів опису. Тобто цей параметр не є інформативним з точки зору діагностування і прогнозування стану ізоляції котушок. Були спроби встановити залежність опору ізоляції від пробігу і посезонно експлуатації зима-літо (рис. 3.5, 3.6), що також не дало очікуваних результатів [151].

Вимір опору ізоляції способом пропонованим «Правилами ремонту електричних машин...» [123] є лише контроль цього параметра, щоб він не виходив за встановлені межі. А для отримання інформативного діагностичного параметра, за яким можна було б судити про стан ізоляції в даний момент часу і передбачити зміни її стану на майбутнє необхідна розробка нових методів і способів оцінки стану ізоляції.

Заходи щодо усунення відмов обмоток ТЕД дозволять підвищити надійність ТЕД і зменшити штрафні санкції з приводу відмов під час роботи, які виставляються експлуатаційними службами відносно депо.

Для побудови функції інтенсивності відмов ТЕД та обмотки ТЕД взяті дані про пробіг (напрацювання) локомотивів. Пробіг в дослідженні, що надано в таблиці,

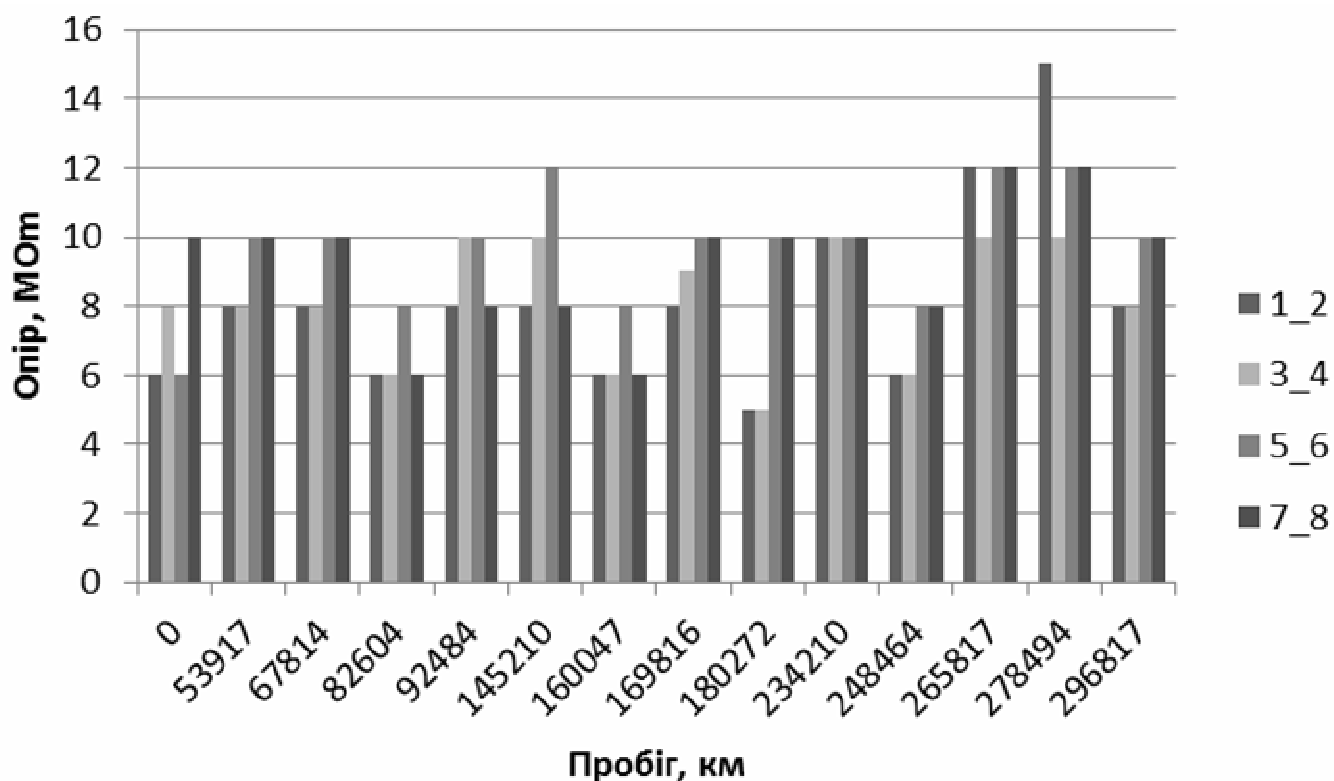


Рисунок 3.5 – Зміна опору ізоляції обмоток збудження головних полюсів ТЕД в залежності від пробігу (літо); 1_2, 3_4, 5_6, 7_8 – полюса

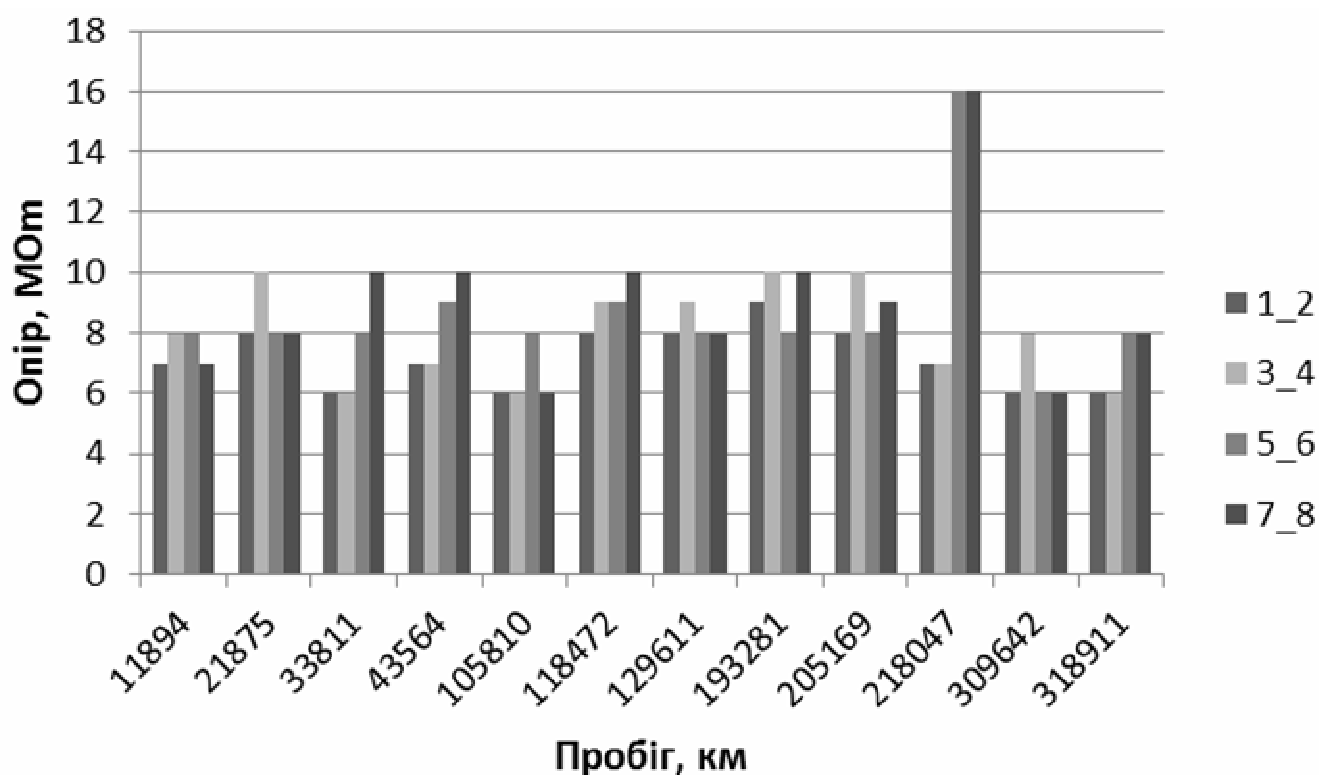


Рисунок 3.6 – Зміна опору ізоляції обмоток збудження головних полюсів ТЕД в залежності від пробігу (зима); 1_2, 3_4, 5_6, 7_8 – полюса

має одиницю вимірювання «млн·т·км·брутто», тобто виконана робота. Напрацювання в наведених таблицях відповідає загальному пробігу локомотивів. Загальний пробіг обчислювався як сума пробігів локомотивів за період спостереження. Експериментальна оцінка інтенсивності відмов за рік рахується як відношення відповідної кількості відмов до величини пробігу [153].

$$\lambda_i = \frac{h_i}{t_i}, \quad (3.1)$$

де λ_i – оцінка значення інтенсивності відмов за i -й рік спостереження при напрацюванні t_i , коли відмов за відповідний період було h_i .

В табл. 3.2 та на рис. 3.7 зведено інформацію по відмовам ізоляції обмоток, ТЕД в цілому та всіх локомотивів по роках спостереження. ТЕД, як технічний об'єкт, умовно представляється наступними елементами: якір, обмотка збудження ТЕД (далі обмотка), МЯП (моторно-якірні підшипники). Результати, що надані в табл. 3.2, можна використовувати для визначення функції інтенсивності відмов (а також побудови H -характеристики) як ізоляції обмоток так і ТЕД в цілому [154, 155].

Таблиця 3.2

Кількість відмов (непланові ремонти) елементів ТЕД та локомотивів в цілому

Рік	Пробіг	Загальний пробіг*	Відмови ТЕД			Всього відмов ТЕД	Відмови локомотивів
			Якір	Обмотка	МЯП		
1	2	3	4	5	6	7	8
2002	29,60	29,60	44	61	10	115	724
2005	26,57	56,17	25	41	18	84	1043
2006	26,20	82,37	12	33	6	51	730
2007	22,40	104,77	19	35	6	60	576
2008	22,00	126,77	23	26	7	56	543
2009	17,23	144,00	14	18	0	32	541
2010	14,57	158,57	20	16	6	42	511

1	2	3	4	5	6	7	8
2011	16,20	174,77	57	28	12	97	538
2012	14,79	189,56	91	26	12	129	514
2013	14,59	204,15	86	18	13	117	473
2014	15,57	219,72	66	26	3	95	440
2015	15,83	235,55	65	27	9	101	440
2017	15,99	251,54	52	23	5	80	436
Сума			574	378	107	1059	

Примітка: * – одиниця вимірювання: «млн·т·км·брутто»

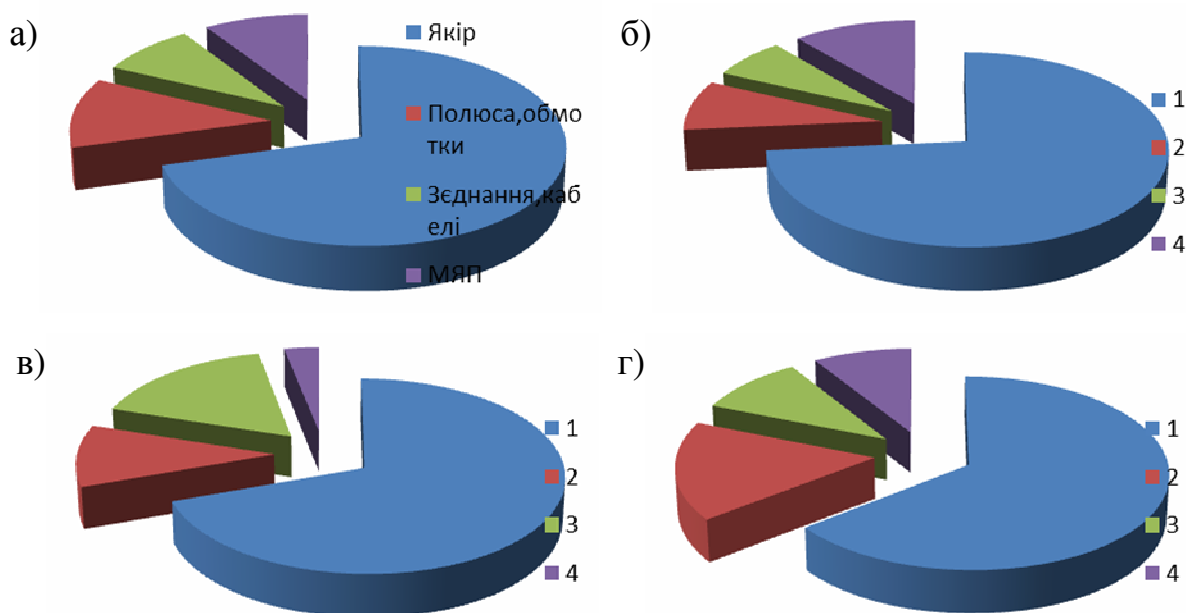


Рисунок 3.7 – Діаграма розподілу непланових ремонтів ТЕД НБ-406 [10]: а) – 2005 р.; б) – 2010 р.; в) – 2014 р.; г) – 2017 р.

На рис. 3.8 представлено графічно залежності відмов ізоляції обмоток збудження ТЕД і самого ТЕД. З рисунку видно, що функція відмов ізоляції обмоток має майже лінійну залежність (H -характеристику можна наблизити лінійною функцією). Функція відмов ТЕД має не зовсім чіткий вираз лінійної залежності, але цю функцію також можна наблизити лінійною функцією. Напрацювання локомотивів в функціях наближення виступає аргументом.

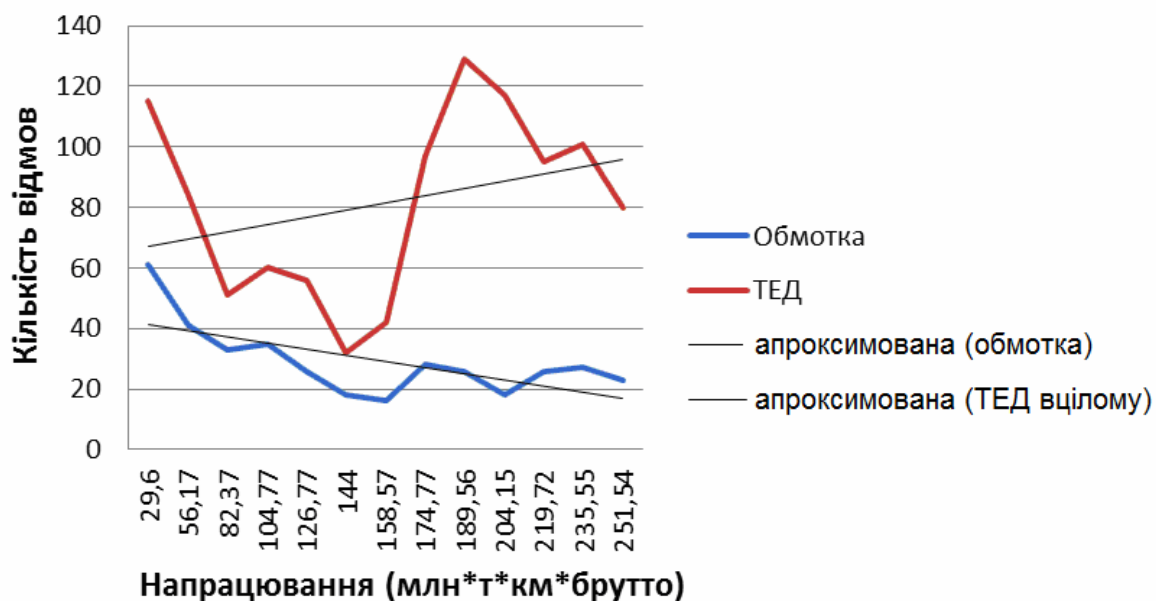


Рисунок 3.8 – Залежність відмов ізоляції обмоток ТЕД та ТЕД вцілому

Загальні відмови локомотива наближаються до лінійної тенденції, рис. 3.9. Інтенсивність відмов ізоляції обмоток збудження ТЕД, ТЕД та локомотиву наведено в табл. 3.3. Відповідні графічні зображення інтенсивностей відмов обмоток збудження та ТЕД представлено на рис. 3.5. З рисунку видно, що функція інтенсивності відмов обмоток може мати постійне значення. Цей факт підтверджує, що відповідна функція H -характеристики в такому випадку повинна мати лінійну залежність. Функція інтенсивності відмов ТЕД складніша в порівнянні з функцією інтенсивності відмов обмоток. Для апроксимації функції інтенсивності відмов ТЕД та визначення відповідної функції H -характеристики необхідно використовувати нелінійні залежності.

Інтенсивність відмов ізоляції обмоток збудження ТЕД та локомотиву вцілому наведено в табл. 3.3. Відповідні графічні зображення інтенсивностей відмов обмоток збудження та ТЕД представлено на рис. 3.10. З рисунку видно, що функція інтенсивності відмов обмоток має тенденцію до постійної величини. Цей факт підтверджує, що відповідна функція H -характеристики, в такому випадку, повинна мати лінійну залежність. Функція інтенсивності відмов ТЕД складніша в порівнянні з функцією інтенсивності відмов обмоток. Для апроксимації функції інтенсивності відмов ТЕД та визначення відповідної функції H -характеристики необхідно використовувати лінійну залежність.

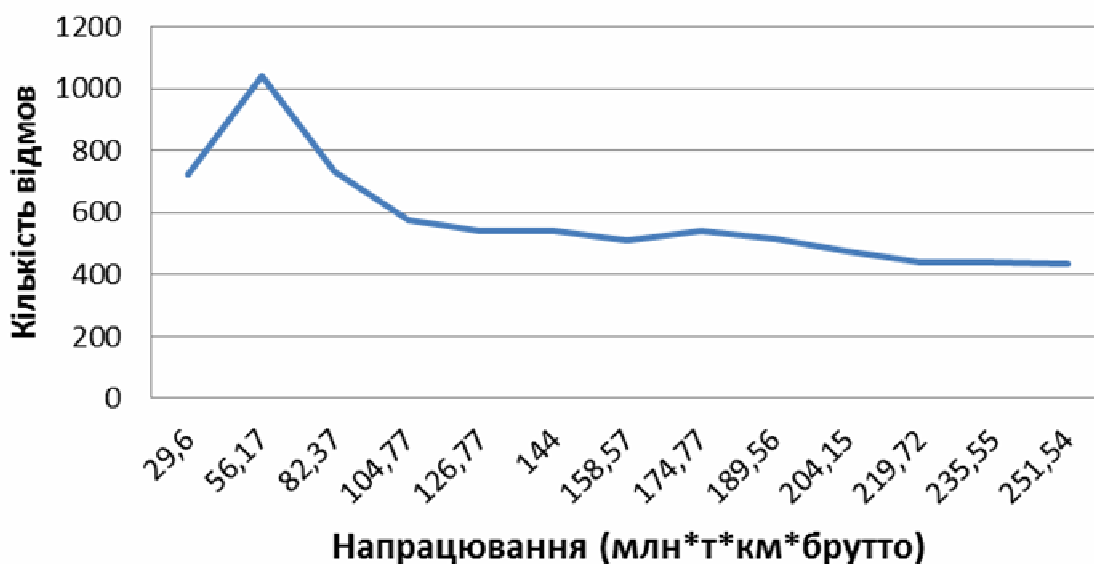


Рисунок 3.9 – Динаміка загальних відмов локомотивів

Апроксимація відповідно з методом найменших квадратів, отриманих значень інтенсивності відмов ізоляції обмоток збудження по експериментальним даним для депо, в припущенні, що інтенсивність відмов на розглянутому інтервалі часу є постійна величина, дає значення $\lambda(t) = 1.56$ відмов на один млн·т·км·брутто.

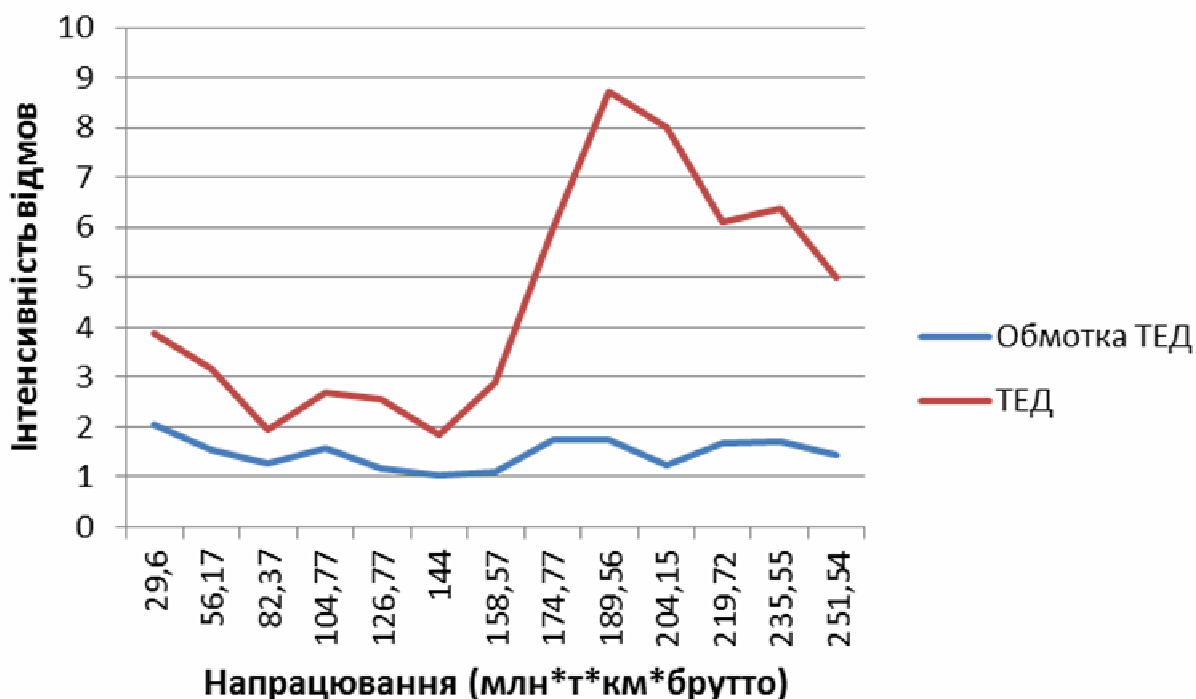


Рисунок 3.10 – Залежність інтенсивності відмов ізоляції обмоток ТЕД та ТЕД вцілому відносно напрацювання (млн·т·км·брутто)

Інтенсивність відмов ізоляції обмоток ТЕД, ТЕД та загальна інтенсивність відмов локомотива в цілому

Рік	Пробіг *	Загальний пробіг *	Обмотка **	ТЕД **	Локомотиви **
2002	29,60	29,60	2,06	3,89	24,45946
2005	26,57	56,17	1,54	3,16	39,2548
2006	26,20	82,37	1,26	1,95	27,8626
2007	22,40	104,77	1,56	2,68	25,71429
2008	22,00	126,77	1,18	2,55	24,68182
2009	17,23	144,00	1,04	1,86	31,39872
2010	14,57	158,57	1,1	2,88	35,07207
2011	16,20	174,77	1,73	5,99	33,20988
2012	14,79	189,56	1,76	8,72	34,75321
2013	14,59	204,15	1,23	8,02	32,41947
2014	15,57	219,72	1,67	6,1	28,25947
2015	15,83	235,55	1,71	6,38	27,79533
2017	15,99	251,54	1,44	5	27,26704

Примітка: * – одиниця вимірювання: «млн·т·км·брутто»;

** – одиниця вимірювання: «1/млн·т·км·брутто».

Методику визначення функції H -характеристики $h(t)$ і відповідної функції інтенсивності відмов $\lambda(t) = h'(t)$, коли H -характеристика має лінійну залежність досить повно розглянуто в [156]. Побудова H -характеристики з точки зору визначення її структури розглянуто в [157, 158].

Висновки до розділу 3

Кількість відмов ТЕД від загальної кількості відмов локомотивів по депо Нижньодніпровськ-Вузол РФ Придніпровська залізниця складає 12%, третя частина відмов ТЕД приходить на ізоляцію обмоток збудження ТЕД.

Функція інтенсивності відмов ізоляції обмоток збудження для локомотивів

депо Нижньодніпровськ-Вузол РФ Придніпровська залізниця може бути представлена постійною величиною

$$l(t) = C, C = const.$$

На розглянутому інтервалі часу і для даного депо константа C має значення 1.56 відмов на один млн·т·км·брutto для одного локомотива.

В межах однієї ділянки обороту умови роботи локомотивів суттєво різняться. Це відноситься до швидкостей руху, маси поїздів, станом колії та ін. Тому напрацювання деталей до граничного стану є випадковою величиною. Очевидно, що визначення термінів ремонту деталей і вузлів локомотива вимагає використання методів теорії ймовірностей і математичної статистики. Такий підхід дозволить побудувати математичну модель процесу відмов, зносу або старіння деталей і вузлів, визначити числові характеристики закону розподілу ресурсу і з урахуванням технічних і економічних факторів встановити терміни планової їхньої заміни або ремонту.

Запобігання відмов рухомого складу в системі технічного обслуговування і ремонту найбільш результативно досягається тоді, коли вдається виявити втрату працездатності обладнання на самих ранніх її стадіях. Це можливо забезпечити шляхом використання технічної діагностики в якості складової частини системи обслуговування і ремонту локомотивів. Від того, наскільки система діагностування здатна виявляти ті елементи устаткування, які наближаються до свого граничного стану, залежить ефективність планово-попереджувальної системи технічного обслуговування і ремонту локомотивів в цілому.

Вимір опору ізоляції способом пропонованим Правилами ремонту локомотивів є лише контроль цього параметра, щоб він не виходив за встановлені межі. А для отримання інформативного діагностичного параметра, за яким можна було б судити про стан ізоляції в даний момент часу і передбачити зміни її стану на майбутнє необхідна розробка нових методів і способів.

РОЗДІЛ 4

СТАНІ КОРПУСНОЇ ІЗОЛЯЦІЇ ТА ВИЗНАЧЕННЯ ЇЇ ЗАЛИШКОВОГО РЕСУРСУ

4.1 Аналіз методів прогнозування стану корпусної ізоляції

Для безаварійної роботи тягових електродвигунів (ТЕД) та іншого електрообладнання локомотивів необхідно, перш за все, мати справну і надійну ізоляцію. В процесі експлуатації відбувається старіння електричної ізоляції, властивості її погіршуються, електрична міцність знижується. Якщо не вжити відповідних заходів по відновленню властивостей ізоляції, то процес старіння буде носити незворотній характер.

Старіння парку електрообладнання, тенденції до зменшення експлуатаційних витрат, а також вимоги до підвищення надійності ТЕД вимагають реорганізації підходу до експлуатаційних випробувань і діагностування ізоляції ТЕД. Чинний на даний момент підхід до діагностування та технічного обслуговування і ремонту електричних машин зводиться до наступної схеми [48]:

- вибір діагностичних критеріїв;
- перевірка на відповідність критерію граничним значенням, зазначеним у нормах, або для ненормованих критеріїв – на відповідність досвіду діагноста;
- видача експертного висновку на підставі досвіду або вимог норм про необхідність виведення з експлуатації електричної машини або продовження її функціонування.

Системи технічного обслуговування, ремонту і міжремонтного діагностування в локомотивному господарстві залізниць України є періодичними і регламентуються нормами. Більшість вимірювань проводиться з виведенням обладнання з роботи. Однак, така система діагностування не відповідає сучасним вимогам. Неперервний моніторинг технічного стану ізоляції ТЕД є оптимальним рішенням задачі реорганізації експлуатаційної діагностики. Автоматизований неперервний контроль з прогнозуванням має ряд переваг перед періодичним контролем: скорочення періодів контролю, облік впливу експлуатаційних факторів, накопичення

діагностичної інформації, віддалене надання інформації різного рівня та ін. Впровадження автоматизованого моніторингу дозволить планувати ремонти обладнання і при необхідності проводити термінове виведення ТЕД з експлуатації. Такий підхід дозволить здійснити перехід від застарілої системи періодичного обслуговування до обслуговування за реальним технічним станом об'єкта [124]. Системи безперервного контролю потребують специфічних методик, алгоритмів і моделей, необхідних для ефективного їх функціонування.

Для того щоб перейти від системи обслуговування за пробігом до системи обслуговування по реальному технічному стану, необхідно мати арсенал методів і приладів для об'єктивної оцінки стану ізоляції.

Стан корпусної ізоляції обмотки головних полюсів тягових електричних машин є серйозним фактором забезпечення надійної роботи ТЕД. Проведення і розвиток робіт з управління терміном служби корпусної ізоляції було стимульовано рішенням про продовження експлуатації локомотивів понад проектний термін служби. Важливою складовою управління терміном служби є неруйнівне діагностування стану корпусної ізоляції та прогнозування її терміну служби. Під терміном удосконалення методів прогнозування стану корпусної ізоляції мається на увазі уточнення граничних значень показників її старіння [42].

Одним з методів, за допомогою якого можна прогнозувати залишковий ресурс корпусної ізоляції, може бути проведення процедури класифікації [43] її станів за показниками що характеризують криву зворотної напруги. Процедура класифікації, показники класифікації, граничні значення параметрів прогнозування залишкового ресурсу корпусної ізоляції ТЕД НБ-406 запропоновано в даному розділі.

4.2 Вибір параметрів контролю стану корпусної ізоляції електричних машин локомотивів

Однією з задач утримання ТЕД є визначення інтенсивності старіння корпусної ізоляції та своєчасне вживання заходів з підтримки її заданої якості.

Старіння ізоляції змінює в часі структуру діелектрика, що впливає на процес її руйнування. У зв'язку з цим відбуваються характерні зміни діелектрично-

релаксаційної поведінки ізоляційної конструкції. Ці релаксаційні процеси ведуть при розряді діелектрика, після формування його постійною напругою, до виникнення релаксаційного струму, який залежно від механізму старіння має різні складові час – струм, що можуть бути застосовані для неруйнівної оцінки стану ізоляції ТЕД.

Методи контролю стану ізоляції тягових електричних машин локомотивів сьогодні є констатуючими або руйнівними, але ці методи не дають загальної картини про дійсний стан діелектрика.

Контроль опору корпусної ізоляції ТЕД з використанням спеціальних методів і обладнання необхідно регулярно проводити в процесі експлуатації. За динамікою зношеності ізоляції важливо прогнозувати запас її ізолюючих якостей в майбутньому з метою недопущення раптової відмови ТЕД.

Далі в роботі визначаються ознаки, які відображають процес старіння ізоляції, що дозволяє прогнозувати зміну її технічного стану в умовах експлуатації.

4.2.1 Основні показники опору ізоляції

Несподіване виведення з експлуатації електричних машин зазвичай пов'язане з раптовою відмовою основних його компонентів. Статистика показує, що понад 50% відмов машин пов'язані з пошкодженням ізоляції [159]. Виявлено, що старіння ізоляції є найважливішим фактором, який викликає пошкодження ізоляції. Дослідження старіння ізоляції стало важливим завданням для виробників і користувачів електрообладнання при оцінюванні життєвого запасу обладнання. Старіння і деградація ізоляції електричних машин є явищами, що визначають термін служби електричних машин в експлуатації [160].

В (ІЕС 60505) показано, що старіння це «незворотні зміни властивостей електроізоляційної системи (EIS) через дію однієї або декількох напруг» [70]. Переважно контроль поточного стану ізоляційних матеріалів здійснюється величинами, які перераховані нижче [161].

Опір ізоляції постійному струму R_{i3} . Наявність грубих внутрішніх і зовнішніх дефектів (пошкодження, зволоження, поверхневе забруднення) знижує опір ізоляції. Визначення R_{i3} проводиться методом вимірювання струму витoku, що

проходить через ізоляцію, при прикладанні до неї випрямленої напруги.

Коефіцієнт абсорбції визначає зволоження ізоляції. Коефіцієнт абсорбції - це відношення виміряного опору ізоляції через 60 секунд після прикладення напруги (R60) до виміряного опору ізоляції через 15 секунд (R15). Якщо ізоляція суха, то коефіцієнт абсорбції набагато більше одиниці, а у вологому ізоляції коефіцієнт абсорбції близький до одиниці. Значення коефіцієнта абсорбції має відрізнитися (в сторону зменшення) від заводських даних не більше ніж на 20%, а його значення повинно бути не нижче 1.3 при температурі 10-30 °С. При невиконанні цих умов виріб підлягає сушінню.

Коефіцієнт поляризації показує здатність заряджених частинок переміщатися в діелектрику під впливом електричного поля, що визначає ступінь старіння ізоляції. Метод вимірювання базується на порівнянні показань мегомметра, знятих через 60 і 600 секунд після початку випробувань.

Коефіцієнт поляризації характеризується наступними показниками:

- менше 1 - ізоляція є небезпечною;
- від 1 до 2 - ізоляція сумнівна;
- більше 2 - ізоляція хороша.

Зазначені показники не дозволяють визначати інтенсивність старіння корпусної ізоляції і безпосередньо визначати терміни проведення її відновлення.

4.2.2 Показники якості стану корпусної ізоляції за зворотною напругою

Коефіцієнт абсорбції для корпусної ізоляції можна ввести подібно визначенню коефіцієнта абсорбції для діелектрика [40]

$$U_{звор} = k_a \cdot U_{випр},$$

де k_a – коефіцієнт абсорбції;

$U_{випр}$ – випробувальна напруга;

$U_{звор}$ – зворотня напруга – максимальне значення при випробуванні.

Коефіцієнт абсорбції показує, у скільки разів максимум зворотної напруги менше випробувальної напруги.

Враховуючи баланс енергій, що накопичується в ізоляції під впливом випробувальної напруги до перехідного процесу і після його завершення, з урахуванням макро- і мікронеоднорідності діелектрика, в роботі [40] показано, що для коефіцієнту абсорбції справедливо співвідношення

$$k_a = \frac{W_{зал}}{W}, \quad (4.2.1)$$

де $W_{зал}$ – залишкова енергія після завершення перехідного процесу в конструкції ізоляції;

W – повна енергія, що накопичується в конструкції ізоляції внаслідок дії випробувальної напруги $U_{вип}$.

Вираз (4.2.1) встановлює наступний фізичний зміст коефіцієнту абсорбції: коефіцієнт абсорбції – це число, що показує, яка частина загальної енергії, запасеної в ізоляції при макро- та мікрополяризації, повертається при відновленні. Інша частина енергії $W(1-k_a)$ йде на переміщення мікрочастинок і на переміщення макрозарядів при відновленні.

Припустимо, перед початком експлуатації електроізоляційної конструкції під час проведення замірів встановлено, що $U_{звор.}^{(1)}$ відповідає випробувальній напрузі $U_{випр.}^{(1)}$. Будемо вважати цей час випробувань рівним t_1 . При цьому

$$k_a^{(1)} = \frac{U_{звор.}^{(1)}}{U_{випр.}^{(1)}}.$$

Через який-небудь інший період експлуатації ізоляції будемо вважати це часом випробувань t_2 одержали $U_{звор.}^{(2)}$ для випробувальної напруги $U_{випр.}^{(2)}$. Якщо $U_{випр.}^{(1)} = U_{випр.}^{(2)}$ (за таких умов проводилися виміри), то

$$k_a^{(2)} = \frac{U_{звор.}^{(2)}}{U_{випр.}^{(2)}}.$$

Коефіцієнт абсорбції за умови $U_{випр.}^{(1)} = U_{випр.}^{(2)}$ є величина постійна.

Введемо нову величину

$$S_{міцн}^{(1)} = \frac{k_a^{(1)}}{k_a^{(2)}}.$$

Назвемо цю величину показником стану ізоляції. Якщо $S_{міцн}^{(1)} = 1$, то це значить, що за час експлуатації $\Delta t = t_2 - t_1$ в ізоляції не відбулося ніяких змін.

Якщо $S_{міцн}^{(1)} > 1$, то це нове значення $S_{міцн}^{(1)}$ є величина, що показує, у скільки разів погіршився стан ізоляція за час Δt у порівнянні з тим, яким він був при випробуваннях до уведення її в експлуатацію (для часу t_1).

Для ізоляційних конструкцій малої ємності звичайно використовувати коефіцієнт абсорбції k_a як показник зміни стану ізоляції.

У процесі експлуатації змінюється не тільки величина абсорбційної ємності, але й опір ізоляції R . Зміна R впливає як на величину коефіцієнта абсорбції k_a , так і на величину коефіцієнта стану ізоляції $S_{міцн}^{(1)}$.

Якщо мікрополяризаційними процесами абсорбції знехтувати, то для імітації абсорбційних процесів можливо прийняти схему заміщення, у якій абсорбцію імітують ємність C_a та опір r_a , рис. 4.1. Математичне моделювання абсорбційного процесу з урахуванням струмів витоку дозволило сформулювати наступний показник стану ізоляційної конструкції великої ємності [40].

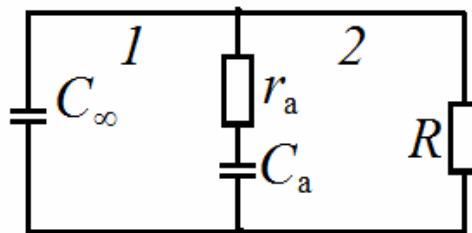


Рисунок 4.1 – Схема заміщення для розгляду процесу абсорбції з врахуванням струмів витоку

В електричних машинах з великою ємністю корпусної ізоляції [40] зміна її стану може бути визначена часом наростання зворотної напруги t_H , рис. 4.2

$$U_{звор}(t_H) = U_{звор}^{max} \cdot$$

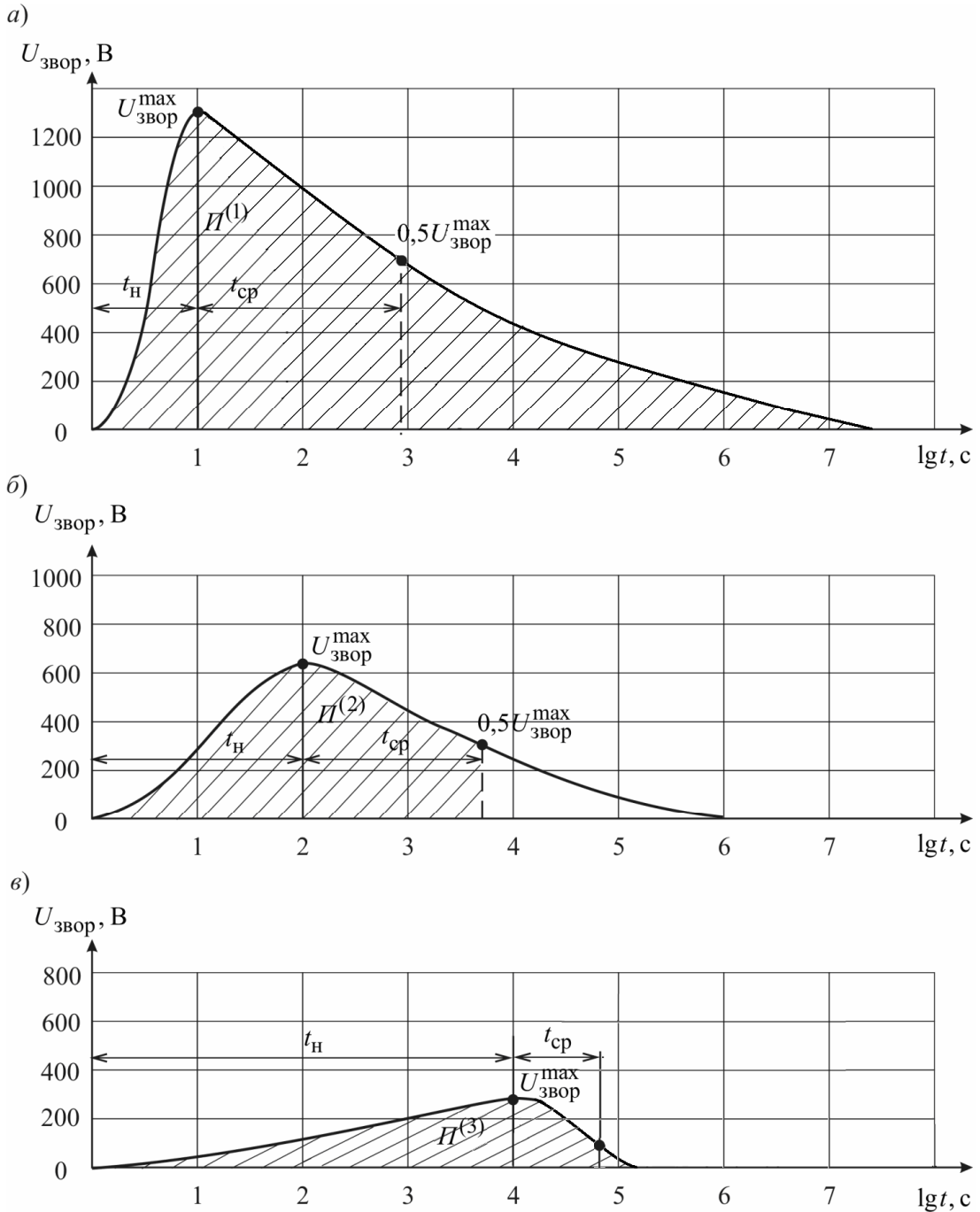


Рисунок 4.2 – Залежність величини зворотної напруги від часу її наростання та спадання: а) нова ізоляція, пробіг ТЕД L_0 ; б) після певного періоду експлуатації L_1 ; в) зношена ізоляція, період експлуатації L^*

Можна показати, що незначна зміна величини $C_a \cdot r_a$ при незмінному значенні R викличе значну зміну величини t_H . З появою зосереджених дефектів для об'єктів великої ємності зміна k_a практично не буде відчуватися, а процес відновлення напруги розтягнеться в часі. Після того як $U_{звор}$ досягне максимуму, почнеться саморозряд ємності C_a .

У процесі експлуатації в ізоляції змінюється не тільки абсорбційна ємність та опір абсорбції, але й опір ізоляції. Тому зміни макроабсорбції та опору ізоляції найкраще можливо врахувати виміром t_H . Зміну опору ізоляції в процесі експлуатації можна оцінювати ще одним показником стану ізоляції [40]

$$S_{міцн}^{(2)} = \frac{t_H^{(2)}}{t_H^{(1)}},$$

де $t_H^{(1)}$ – час наростання зворотної напруги при першому вимірі;

$t_H^{(2)}$ – час наростання зворотної напруги при наступному вимірі в процесі експлуатації.

Іншою величиною, що характеризує стан ізоляції прийнято значення часу t_{cp} саморозрядження до рівня зворотної напруги

$$U_{звор}(t_{cp}) = 0,5 \cdot U_{звор}^{\max}.$$

Відстежувати час спадання зворотної напруги до значення $0,5 \cdot U_{звор}^{\max}$ під час проведення випробувань має сенс тому, що зміна як неоднорідності діелектрика, так і його опору оцінюється часом саморозрядження [40]

$$S_{міцн}^{(3)} = \frac{t_{cp}^{(2)}}{t_{cp}^{(1)}},$$

де $S_{міцн}^{(3)}$ – показник, що оцінює зміну стану ізоляції.

В якості інтегральної оцінки стану ізоляції можна розглядати площу, яку обмежує крива зворотної напруги [40]. Така інтегральна оцінка найбільш повно та точно характеризує поточний стан ізоляції. Цей критерій заснований на порівнянні площі накопиченої енергії нової ізоляції, та ізоляції яка вже була в експлуатації $P^{(2)}$ і $P^{(1)}$, рис. 4.2.

4.2.3 Пристрій для визначення стану корпусної ізоляції

На основі теоретичних та експериментальних досліджень корпусної ізоляції тягових електричних машин локомотивів розроблено та виготовлено портативний переносний пристрій, рис. 4.3, для визначення стану корпусної ізоляції. За допомогою такого приладу можна також діагностувати стан ізоляції силових електричних кабелів, ізоляції трансформаторів та ін. [40].

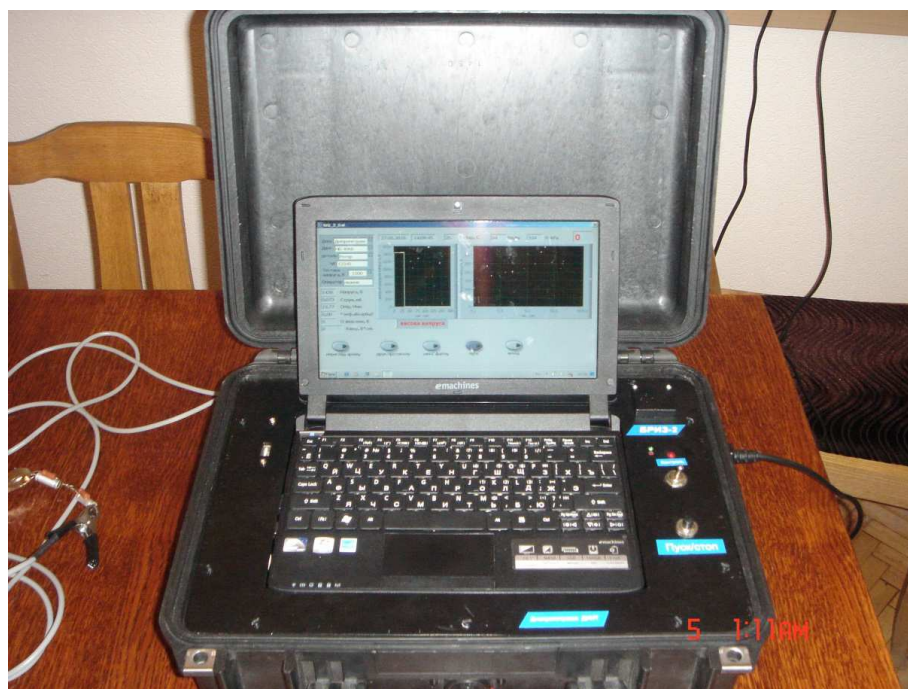


Рисунок 4.3 – Пристрій оцінювання стану корпусної ізоляції електричних машин локомотивів

Основні вимоги що встановлені до пристрою:

- захищеність сигналу від зовнішніх та внутрішніх чинників;
- мінімальна величина похибки отриманого сигналу (величини параметру);
- достовірність та інформативність параметру;

- доступність в отриманні параметра;
- процес проведення виміру параметра не впливав негативно на стан ізоляції;
- мінімально можливий час проведення виміру параметра;
- простота в обробці та наглядність отриманої інформації;
- автономність системи для проведення досліджень та простота в її обслуговуванні;
- безпечність системи.

За допомогою пристрою можливо отримувати наступну інформацію: струм витоку; опір ізоляції; величину зворотної напруги; час наростання та спадання зворотної напруги; величину накопиченої енергії – інтегральний показник; коефіцієнт абсорбції; вологість повітря; температуру повітря.

Автономність приладу дає можливість виконувати необхідні заміри безпосередньо на локомотиві під час проведення технічного обслуговування та ремонтів, а також в умовах локомотиворемонтних заводів.

Застосування приладу дає:

- можливість виявляти дефекти ізоляції на ранніх стадіях їх появи;
- відпадає необхідність у довготривалих та енергоміських випробуваннях;
- відпадає необхідність у вантажопідйомних засобах для пересування ТЕД до місця проведення випробувань;
- можливість під час виконання ремонтів комплектувати ТЕД додатними якорями та магнітними системами;
- можливість зберігати інформацію на кожний якір (магнітну систему) та про ТЕД у цілому;
- відсутність передчасного руйнування ізоляції ТЕД.

Прилад виконано на сучасній мікропроцесорній елементній базі, він працює сумісно з портативним комп'ютером, який керує режимами випробування (автономний, запрограмований) [40]. Досліди проводилися на ТЕД НБ-406 та ЕД - 107. На рис. 4.2.2 наведено результати випробувань тягових електродвигунів НБ-406. Дискретні значення вимірної зворотної напруги апроксимувались за методом кубічного сплайну без урахування значень похідних на початку та кінці інтервалу

спостереження.

Застосування розробленої системи оцінки якості корпусної ізоляції дає можливість оцінювати поточний стан ізоляції, автоматизувати збір, реєстрацію, обробку та аналіз поточної діагностичної інформації, отриманої в процесі випробувань ізоляції. За допомогою запропонованої системи можливо формувати паспорт із необхідними параметрами на кожен окремо взятий ТЕД.

4.3 Задача автоматичної класифікації в задачі розбиття об'єктів на класи

Задача проведення автоматичної класифікації носять скоріше евристичний, ніж статистичний характер, що залишає питання про оптимальну класифікацію відкритим [162, с.159-166]. Автоматична класифікація, синонімами якої можна вважати терміни "розбиття", "таксономія", "кластерний аналіз", застосовується з метою отримання гіпотез про логічну структуру досліджуваної статистичної сукупності об'єктів. Слово «автоматична» підкреслює той факт, що поділ проводиться без попереднього навчання за допомогою вчителя або навчальної вибірки, на якій всі об'єкти рознесені по класах. Результатом класифікації є розбиття вихідної сукупності об'єктів на деяке число класів (кластерів). Змістовний сенс поділу на класи полягає у виділенні якісно різних станів об'єктів, що характеризуються своїми особливими закономірностями. Подальше дослідження може як підтвердити, так і спростувати гіпотезу про існування виявленої кластерної структури. Підтвердженням правильності класифікації є її пояснююча та предбачаюча складова при виході за межі вихідної вибірки, як за ознаками, так і за об'єктами.

Класифікація застосовується на попередньому етапі дослідження, коли до проведення основної статистичної обробки (побудови регресійних моделей, оцінки параметрів генеральної сукупності і т.п.) домагаються розшарування цієї множини на однорідні (в сенсі проведеного потім статистичного аналізу) порції даних [162, с.27].

Сучасний стан розвитку методів автоматичної класифікації такий, що дає підстави стверджувати, що вона "є не стільки звичайним статистичним методом,

скільки набором різних алгоритмів розподілу об'єктів по кластерам. ... Тому перевірка статистичної значущості в дійсності тут непридатна "[163]. У разі кластерного аналізу складність розбиття інтерпретується як кількість кластерів.

У розглянутій задачі результатом кластерного аналізу є розбиття наявних у вихідній вибірці об'єктів на деяку кількість кластерів. При цьому кожен кластер включає до свого складу один або більше об'єктів. Ми будемо описувати кластер не просто як безліч об'єктів, а як якийсь ідеальний об'єкт, що має свої координати в просторі ознак. Приймаємо, далі, що ці координати є арифметичним середнім координат реальних об'єктів, що входять до складу кластера, тобто координати кластера збігаються з координатами його центру. Що буде, якщо замість реальних координат об'єкту, будемо використовувати координати кластеру, до якого він віднесений? Очевидно, при цьому втрачається частина інформації про об'єкт, оскільки всередині кластерів об'єкти не ідентичні. Але, чим краще кластерна структура описує реальні скупчення об'єктів в просторі ознак, тим менша частина інформації буде втрачена і тим більшу її частину буде нести в собі кластер, як представник всіх належних йому об'єктів.

4.4 Контроль надійності технічних систем з використанням апарату розпізнавання образів

Одним з методів контролю надійності елементів системи, заснованих на вивченні непрямих параметрів, є використання теорії розпізнавання образів. В теорії розробляються прийоми і методи, що дозволяють за деякими, часто вельми незначними, ознаками відносити об'єкт вивчення до того чи іншого класу і охарактеризувати його стан.

Розв'язання задачі класифікації засновується на кластерному аналізі. В даному дослідженні використані основні ідеї кластерного аналізу що розглянуті в роботах [162, 164].

Кластерний аналіз – математична процедура багатовимірною аналізу, що дозволяє на основі деякої безлічі показників, що характеризують ряд станів об'єктів (образів), згрупувати їх в класи (кластери) таким чином, щоб об'єкти, що входять в

один клас (образ), були більш однорідними, подібними по порівняно з об'єктами, що входять в інші класи. На основі чисельно виражених параметрів об'єктів обчислюються відстані між ними, які можуть виражатися як в евклідовій метриці, так і в інших метриках. Використовуючи отримані відстані, проводиться об'єднання об'єктів в класи відповідно до обраного алгоритму класифікації.

Щоб вирішити задачу кластерного аналізу необхідно кількісно визначити поняття подібності та різнорідності. Задача була б вирішена якщо T_i , T_j об'єкти потрапляли в один і той же клас щоразу коли відстань між точками (X_i, X_j) була б достатньо малою і, навпаки, об'єкти потрапляли б в різні класи коли між відповідними точками відстань була б досить великою.

Кластерний аналіз застосовується для ідентифікації небезпечних станів системи в разі, якщо порушення в об'єкті суттєво змінюють залежно вихідних змінних від вхідних впливів або областей значень змінних.

Виявлення та діагностування порушень при кластерному аналізі проводиться на основі ідентифікації деякого образу - кластера - в просторі декількох змінних y_1, y_2, \dots, y_n , відповідного певному стану працездатності h , за даними вимірювання цих змінних. Межі кластерів визначають на основі обробки експериментальних даних, отриманих в різних станах працездатності.

Щоб охарактеризувати кластер за експериментальними даними, в найпростішому випадку оцінюють параметри розподілу математичного очікування, середнього квадратичного відхилення, змінної y_i , відповідні одному стану працездатності, а отже, і кластеру, визначають його границю як границю області з призначеної довірчою ймовірністю. Якщо змінні y_i незалежні і розподілені за нормальним законом, то головні осі кластерів розташовані паралельно координатним осям.

Порушення в роботі системи, методами кластерного аналізу, виявляють наступним чином. У момент часу t_j виробляють чергове j -е вимір вектора $y[j] = (y_1[j], \dots, y_k[j])$. На основі взаємного розташування точки $y[j]$ кластерів в L -вимірному просторі визначають стан працездатності $h[j]$ в момент часу t_j . Рішення приймають на основі обчислення узагальненої відстані від конкретних точки $y[j]$ до центрів

кластерів.

У ряді випадків простір значень вектора u містить певний кластер. Залежно від того, якому сектору належить точка $u[j]$, роблять висновок про приналежність її до відповідного кластеру, а отже, про те, який стан працездатності і порушення має місце в даний період часу.

Класифікаційні лінії або функції, які ділять область значень u , що спостерігаються, на частини, які відповідають різним станам працездатності, визначають методами дискримінаційного аналізу і розпізнавання образів, які, як правило, реалізуються на ЕОМ.

4.5 Постановка задачі прогнозування

Більшість відомих методів і пристроїв вимірювання опору ізоляції розроблено для застосування в автономному режимі. У зв'язку з цим необхідні методи оцінювання станів ізоляції що дозволять здійснювати як автономний, так і безперервний контроль станів ізоляції. Незважаючи на значну кількість і різноманітність існуючих методів і пристроїв [126, 136], відсутня класифікація частки зносу ізоляції, що ускладнює прийняття рішення щодо вибору моменту її відновлення.

Метою задачі прогнозування залишкового ресурсу корпусної ізоляції, що розглядається в розділі, є визначення станів якості корпусної ізоляції ТЕД за спостереженнями зворотної напруги на основі проведення класифікації ступеня зносу ізоляції що діагностується, а також визначення оцінок напрацювання до моменту відновлення або заміни ізоляції на нову.

4.6 Інтегральне оцінювання станів якості ізоляції

Інтегральна оцінка може враховувати не тільки величину деякого процесу, а й швидкість його зміни і т.п. Інтегральне оцінювання має на меті дати загальну оцінку швидкості загасання і величини відхилення процесу від заданого значення без визначення того або іншого окремо. Найпростішою інтегральною оцінкою може служити величина площі що обмежується кривою значень заданої характеристики

процесу дослідження та його сталим значенням [165].

Основною характеристикою для визначення оцінки стану корпусної ізоляції в даній роботі використовується зворотна напруга. Зворотна напруга [166-168] має найбільшу інформативність про процес зносу (старіння) ізоляції.

Для проведення класифікації станів корпусної ізоляції важливо вибрати інформативні показники. В розділі 4.2.2 помічено, що в якості оцінки стану ізоляції можна розглядати площу $\Pi^{(1)}$, рис. 4.2.2. Ще одною величиною, яка б могла характеризувати стан ізоляції і прийнята в якості показника в задачі класифікації, це величина максимального значення зворотної напруги. Було проведено дослідження залежності інтегральної оцінки $\Pi^{(1)}$ та максимального значення зворотної напруги з вимірів. Спостереження проводилися для ТЕД ЕД-118А.

Для обраного локомотива зворотна напруга та інтегральна оцінка усереднювалися при проведенні одного діагностування по всім ТЕД. Залежність середніх значень інтегральної оцінки для одного локомотива від пробігу приведено на рис. 4.4.

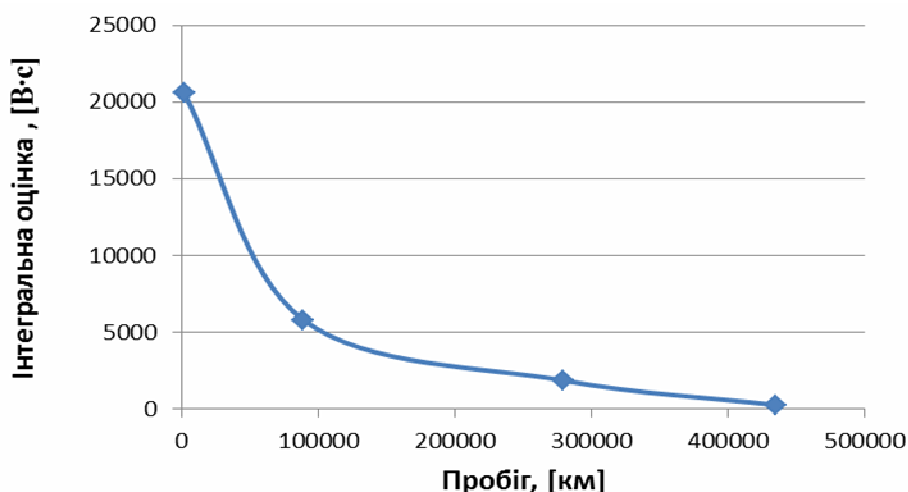


Рисунок 4.4– Залежність середніх значень інтегральної оцінки якості ізоляції від пробігу по всім ТЕД для одного локомотива

З проведеного статистичного дослідження перевірки залежності інтегральної оцінки якості ізоляції від зворотної напруги за всіма даними спостережень можна стверджувати, що ця залежність носить лінійний характер, рис. 4.5. З цього факту

слідуює, що визначення якості стану ізоляції при проведенні її діагностування методом зворотної напруги може бути виконано як по вимірам зворотної напруги так і за інтегральною оцінкою $\Pi^{(1)}$.

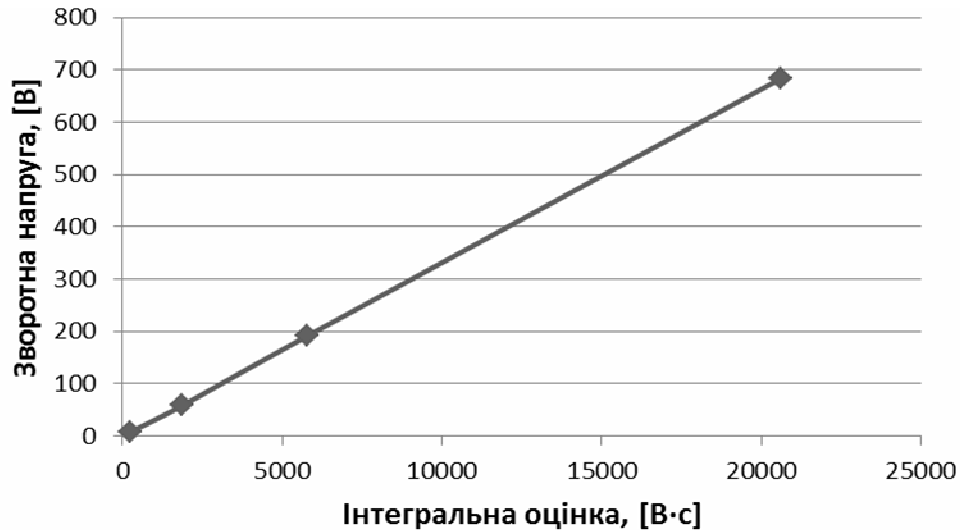


Рисунок 4.5– Залежність середнього значення інтегральної оцінки якості ізоляції по всім ТЕД від максимального значення вимірів зворотної напруги для одного локомотива

Із статистичного дослідження слідуює еквівалентність величини максимального значення зворотної напруги та величини інтегральної оцінки якості за кривою зворотної напруги, що важливо для проведення процедури класифікації станів ізоляції.

Характеристики стану ізоляції умовно можливо поділити на два типи: прямі і непрямі. До прямих характеристик віднесемо такі, що безпосередньо визначаються з графіку (вимірювань) зворотної напруги. До непрямих характеристик віднесемо такі, що обчислюються за даними спостережень зворотної напруги. Інтегральне оцінювання стану ізоляції відносять до непрямой характеристики. Вибір та визначення характеристик будемо здійснювати на основі інформації про зворотну напругу за спостереженнями.

Інтегральна оцінка стану ізоляції дозволяє характеризувати криву зворотної напруги певним числом, яке комплексно оцінює криву в цілому на заданому інтервалі. Такі оцінки, як правило, є функціоналом і виражаються у вигляді

інтегралів.

Наведемо деякі інтегральні характеристики. Оскільки умови вимірювань в різний час можуть бути різними (нестабільність напруги живлення, метеоумови та інше) слід виконати нормування послідовності виміряних значень [169] зворотної напруги. Діапазон значень зворотної напруги U_k , $k = \overline{1, n}$, приведемо до єдиного інтервалу $u_k \in [0, 1]$ за допомогою залежності

$$u_k = \frac{U_k - U_{\min}}{U_{\max} - U_{\min}}, \quad k = \overline{1, n}, \quad (4.1)$$

де U_{\min} і U_{\max} – відповідно, мінімальне і максимальне значення зворотної напруги;

u_k – нормоване значення k -го вимірювання;

U_k – виміряне значення зворотної напруги;

n – кількість вимірювань.

З огляду на особливість, що $U_{\min} = 0$, тоді вираз (1) буде мати більш простий вигляд

$$u_k = \frac{U_k}{U_{\max}}, \quad k = \overline{1, n}. \quad (4.2)$$

Нормовані значення u_k апроксимуємо залежністю $u(t)$ на інтервалі вимірювань $t \in [0, t_C]$. У дослідженні апроксимація вимірювань зворотної напруги виконувалася за допомогою кубічних сплайнів.

Інтегральний показник стану ізоляції J_0 засновується на оцінці роботи, яка проробляється диполями ізоляції під впливом постійного електричного поля. Великою, що характеризує роботу диполів може служити площа що обмежена кривою зворотної напруги та віссю часу [124]. Формально час спаду зворотної напруги $U(t)$ прямує до нескінченності. Оцінка роботи диполів при саморозрядженні, інтервал часу оцінювання t_C вибирається так, щоб

$U(t_C) = U_{\max} / 2$, де U_{\max} – максимальне значення зворотної напруги. Тепер оцінка, що нас цікавить, може бути отримана з виразу

$$J_0 = \int_0^{t_c} u(t) dt. \quad (4.3)$$

Подібний спосіб оцінювання властивостей діелектриків розглядається при визначенні надійності конденсаторів.

Інтегральна оцінка (4.3) враховує лише адитивну якість кривої зворотної напруги. Комплексне оцінювання кривої зворотної напруги можна зробити за допомогою оцінки

$$J_{01} = \int_0^{t_c} [u(t) + \gamma \cdot u'(t)] dt, \quad \gamma > 0. \quad (4.4)$$

Інтегральна оцінка (4.4) враховує як адитивну якість кривої зворотної напруги так і швидкість зміни кривої (швидкість наростання зворотної напруги та швидкість саморозряду). Зауважимо, що нормування шкали для похідної зворотної напруги $u'(t)$ здійснюється аналогічно, як і для вимірювань зворотної напруги.

Оцінка якості кривої зворотної напруги також може бути здійснена за допомогою інтегральної квадратичної оцінки

$$J_{21} = \int_0^{t_c} [u^2(t) + \gamma \cdot (u'(t))^2] dt, \quad \gamma > 0, \quad (4.5)$$

або

$$J_{12} = \int_0^{t_c} [u(t) + \gamma \cdot (u'(t))^2] dt, \quad \gamma > 0, \quad (4.6)$$

параметр γ є параметром настройки і вибирається в залежності від важливості обліку похідної (доданка).

Вид виразу, що використовується в якості інтегральної оцінки, залежить від типу корпусної ізоляції і підбирається експериментально. В цілому, стан якості ізоляції будемо характеризувати двома показниками (J, t_C) , де J – інтегральна оцінка кривої зворотної напруги; t_C – час оцінювання кривої (верхня межа інтегрування у виразі інтегральної оцінки). За величину інтегральної оцінки може бути прийнята одна з величин $J_0, J_{01}, J_{21}, J_{12}$.

4.7 Кластерний аналіз станів корпусної ізоляції ТЕД НБ-406

У технічній діагностиці прогнозування стану технічних об'єктів засновано на даних про зміни, що відбуваються в об'єкті з плином часу під впливом зовнішніх впливів і внутрішніх необоротних фізико-хімічних перетворень [170]. Зміни параметрів, випадкові для одного об'єкта, носять стійкий статистичний характер для групи об'єктів, причому статистичну стійкість характеризує явно виражена тенденція монотонності і плавності, що служить однією з вирішальних передумов для здійснення прогнозування.

При прогнозуванні методом класифікації необхідно вирішувати дві задачі: по-перше, побудувати безліч класів; по-друге, необхідно оцінити ознаки і за результатами оцінки віднести об'єкт прогнозування до того чи іншого класу. Вирішення першої задачі вимагає обробки великого обсягу статистичних даних, що одержані в період експлуатації і використання технічних об'єктів або виконання спеціальних експериментів. Можливість формування класів багато в чому залежить від вдалого вибору діагностичних ознак. Ці ознаки повинні досить повно характеризувати перебіг процесів, що призводять до втрати працездатності об'єкта, і їх оцінка з необхідною точністю не повинна представляти великих труднощів. Успіх у вирішенні другої задачі багато в чому визначається точністю віднесення об'єкта за результатами оцінки до відомого класу, що характеризується певною тенденцією зміни стану об'єкта з плином часу.

Класифікація кривих зворотної напруги дозволить визначати різні стадії стану ізоляції при діагностуванні. Для визначення станів якості ізоляції в дослідженні було застосовано кластерний аналіз. Процедура кластеризації дозволила виявити

стійкі групи станів ізоляції. Як об'єкт кластеризації були взяті криві зворотної напруги корпусної ізоляції для ТЕД НБ-406 за якими велося спостереження.

Для визначення станів корпусної ізоляції (стан – якість ізоляції відносно потреби її відновлення) було взято для дослідження 24 котушки корпусної ізоляції. Для кожної котушки проведено виміри зворотної напруги за якими побудували відповідні криві. Якість ізоляції в дослідженні характеризувалося парою показників (J_{01}, t_C) , де J_{01} - інтегральна оцінка кривої зворотної напруги, що обчислюється відповідно до виразу (4.4), t_C - час оцінювання кривої зворотної напруги.

Нехай $P1(J_{01}^1, t_C^1)$, $P2(J_{01}^2, t_C^2)$, ..., $P24(J_{01}^{24}, t_C^{24})$ – позначення об'єктів кластеризації (ідентифікатор кривої зворотної напруги).

Розподіл на кластери здійснювалося за допомогою методу куль [171]. Використовувалося ізотоничне та ізоморфне розбиття на кластери. Для проведення автоматизованої процедури класифікації об'єктів (стани котушок корпусної ізоляції) було складено програмне забезпечення за призначеннями: «Кластерний аналіз», «Дискримінантний аналіз» (додатки А та Б), що працює в обчислювальній оболонці Excel. В якості методу кластеризації було використано метод куль.

Програма розпізнавання виводить матрицю відстаней між об'єктами класифікації, формує первинні ланцюжки і визначає відстані між ланцюжками (в дужках вказано між якими об'єктами) відповідно до методу куль. Побудова графа і кластерів виконується вручну. Розглянемо, як виконується цей процес.

Для розбиття на кластери за методом куль необхідно порівнювати відстань між об'єктами з критичним. Розрахована критична відстань для проведення процедури кластеризації склала значення $r_{кр} = 0.25$. Об'єкти, відстань між якими менше (строго менше!) критичного, об'єднують в один кластер. Якщо взяти зазначені в ній мінімальні значення (не враховуючи значення на головній діагоналі, які завжди дорівнюють нулю) по кожній колонці і вибрати з них максимальне, то це і буде критичне значення.

Можна також визначити форму сліду в просторі, використовуючи в якості початкових елементів не кластери, а вихідні об'єкти. Формуються пари найближчих

об'єктів з урахуванням відстані між ними.

Безліч ланцюжків (див. метод куль), що отримані в результаті розрахунків за програмою, розпадається на 5 кластерів:

- в перший кластер входять об'єкти: P10, P4, P5, P18;
- в другий кластер – P1, P12, P9, P2, P6, P3, P11, P19, P16;
- в третій кластер – P13, P7, P8, P24, P15, P21, P23, P14, P17;
- в четвертий кластер – P22;
- в п'ятий кластер – P20

Кожен з P22 і P20 утворює окремих кластер, оскільки всі інші елементи знаходяться від них на відстані, що перевищує або відповідає критичному.

На рисунках А.1 – А.4 зображено зв'язки між елементами кожного кластеру в вигляді графів, цифри біля дуг графа – нормовані відстані між об'єктами.

В процесі проведення процедури кластеризації визначимо три стани корпусної ізоляції: відповідні графи кластерів рис. 4.6 – 4.9. В отримані кластери не ввійшло 2 криві, які утворили 2 кластери по одному елементу: графи кластерів рис. 4.9. Отримані результати кластеризації кривих за параметрами зворотної напруги надано в табл. 4.1.

Таблиця 4.1

Кластери кривих зворотної напруги

Кластер	K ₁	K ₂	K ₃	K ₄	K ₅
Об'єкт в кластері	P10, P4, P5, P18	P1, P12, P9, P2, P6, P3, P11, P19, P16	P13, P7, P8, P24, P15, P21, P23, P14, P17	P22	P20
Стан	«задовільний стан»	«ремонтний стан»	«стан підвищеного ризику»	Неінформативний	Неінформативний

Криві зворотної напруги будувались для корпусної ізоляції з різними степенями зношування. В статистику входили також об'єкти відновленої корпусної ізоляції обмоток головних полюсів.

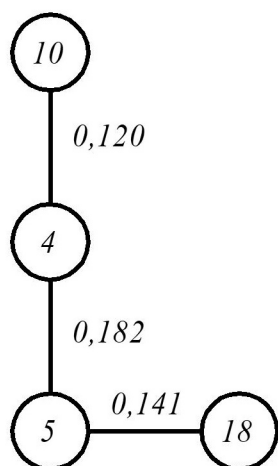


Рисунок 4.6 – Граф зв'язків елементів кластеру 1 – «задовільний стан»

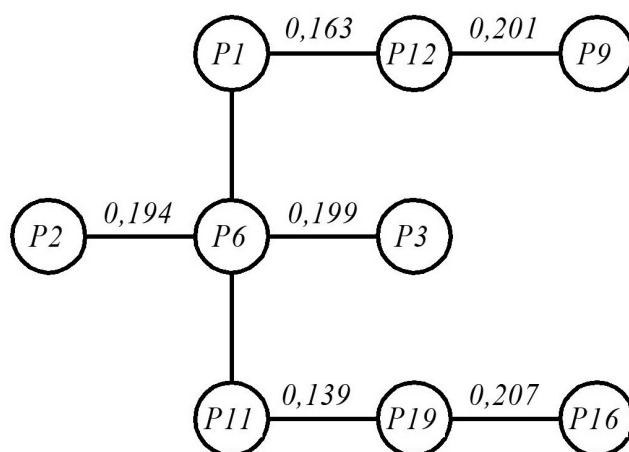


Рисунок 4.7 – Граф зв'язків елементів кластеру 2 – ремонтний стан»

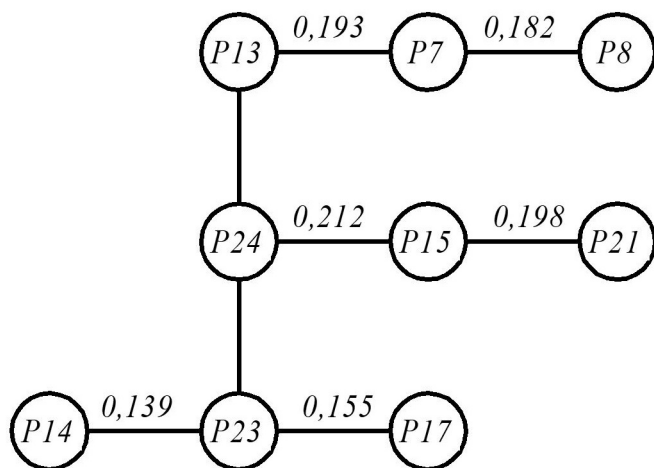


Рисунок 4.8 – Граф зв'язків елементів кластеру 3 – «стан підвищеного ризику»



Рисунок 4.9 – Граф зв'язків елементів кластерів 4 та 5 – неінформативні кластери

4.8 Результати класифікації станів

Відповідно до отриманих в процедурі розбиття на кластери, введемо наступні стадії стану корпусної ізоляції: 1-а стадія (кластер K_1) – «задовільний стан»; 2-а стадія (кластер K_2) – «ремонтний стан»; 3-я стадія (кластер K_3) – «стан підвищеного ризику». Введені стадії стану умовні і їх можна інтерпретувати наступним чином. Перша стадія відповідає стану новій ізоляції або ізоляції яка знаходиться в експлуатації незначний термін або її стан можна віднести до стану «нової». Така ізоляція, як правило, не потребує значних профілактичних заходів під

час технічного огляду. Друга стадія відповідає стану ізоляції яка характеризується зносом приблизно половині напрацювання до першої відмови. Ця стадія потребує планування поточного відновлення ізоляції. Третя стадія характеризується підвищеним ризиком виникнення відмов ізоляції (від підвищеної інтенсивності часткових розрядів до пробою ізоляції). На цій стадії планують або останнє відновлення, або повне відновлення ізоляції (заміна корпусної ізоляції). В даній роботі не розглядається момент повного зносу. Вважаємо, що при досягненні зворотної напруги значення 40-50 вольт на 25-й секунді вимірювань, ізоляція не відновлюється і замінюється на нову. Подальша експлуатація такої корпусної ізоляції може привести до її відмови, коли локомотив знаходиться в поїздній роботі. Відповідно до введених стадій стану ізоляції сімейства кривих зворотної напруги, які можливо віднести до них, будемо називати відповідно кривими: 1-а група кривих, 2-а група кривих, 3-я група кривих. На рис. 4.10 надані приклади кривих зворотної напруги: з максимальною U_{\max} напругою (перша група кривих), з мінімальною U_{\max} напругою (третя група кривих), крива з другої групи кривих – середня на рисунку.

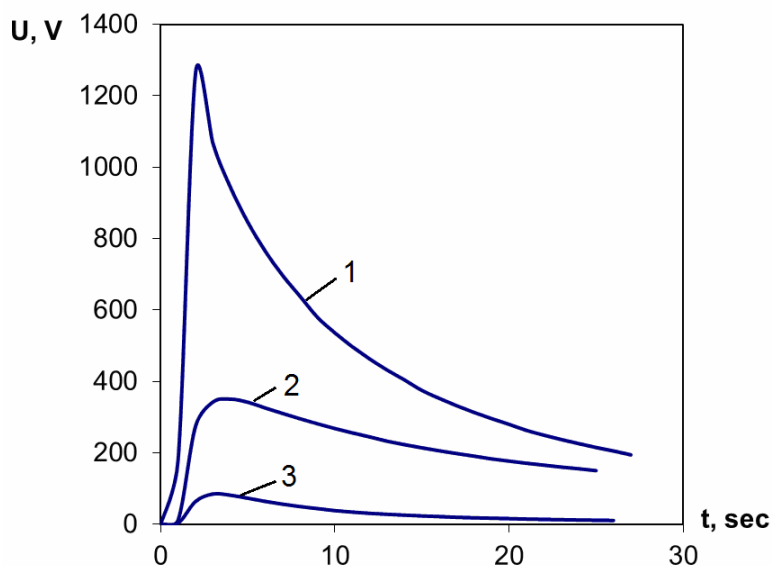


Рисунок 4.10 – Приклад кривих зворотної напруги різних стадій стану корпусної ізоляції ТЕД НБ-406:

1- крива відповідає 1-й стадії – «задовільний стан»; 2- крива відповідає 2-й стадії – «ремонтний стан»; 3- крива відповідає 3-й стадії – «стан підвищеного ризику»

Примітка 1. При використанні інших методів кластеризації можливо отримання іншої кількості кластерів (станів ізоляції). В дослідженні використовувались також інтегральні оцінки (4.5), (4.6) в якості показника, що відрізнялись від вказаного (4.4), але в цьому випадку розбиття кривих на кластери не відповідало експериментальним спостереженням.

Обчислення значень критичних радіусів R_i для визначення кластера, до якого належить новий об'єкт (крива зворотної напруги корпусної ізоляції що діагностується), виконувалася відповідно до методу куль.

Для побудованих кластерів усереднюються значення показників класифікації $\bar{J}_i = \bar{J}_{01}$, $\tilde{J}_{01} \in K_i$ та $\bar{t}_i = \bar{t}_C$, $\tilde{t}_C \in K_i$. Величини \tilde{J}_{01} і \tilde{t}_C – відповідно нормовані значення інтегральної оцінки J_{01} та часу t_C , аналогічно (4.1)-(4.2). Також усереднюються напрацювання котушок корпусної ізоляції, що входить у розглянутий кластер кривих K_i , $i = \overline{1,3}$.

Перевірка нормального закону розподілу величин напрацювання корпусної ізоляції для побудованих кластерів проводилась в два етапи. На першому етапі, без обчислення абсолютного відхилення, перевірялося виконання наступних умов [172]:

- всі відхилення від середнього менше 3σ ;
- $2/3$ відхилень менше ніж σ ;
- половина відхилень менше ніж $0,625\sigma$.

На другому етапі величини напрацювання, що відповідають елементам кластера, випробовувалися на нормальний закон розподілу за критерієм Колмогорова-Смірнова [173]. Критерій нормальності Колмогорова-Смірнова володіє достатньою чутливістю навіть при малій кількості експериментальних даних. Його можна застосовувати для перевірки відповідності будь-якому розподілу (наприклад, рівномірному).

Перевірка закону розподілу показала, що величини напрацювання має нормальний закон розподілу з рівнем значущості $\alpha = 0,05$. Для усереднених значень напрацювань \bar{T}_i визначили довірчі інтервали $(\bar{T}_i - \Delta T_i, \bar{T}_i + \Delta T_i)$, $i = \overline{1,3}$. Величину \bar{T}_i можна інтерпретувати як середнє напрацювання, при якій корпусна ізоляція досягає

i -го стану. Параметри кластерів і довірчі інтервали напрацювання ізоляції для кожного кластера представлені в табл. 4.2.

Таблиця 4.2

Характеристика кластерів класифікації станів якості ізоляції

Стан	$\bar{J}_i = \bar{J}_{01}$	$\bar{t}_i = \bar{t}$	R_i	$(\bar{T}_i - \Delta T_i, \bar{T}_i + \Delta T_i)$ тис. км	Момент відновл за правилами ремонту, тис.км
1-а стадія «задовільни й стан»	0,87	0,43	0,15	(165 , 405)	350
2-а стадія «ремонтний стан»	0,71	0,74	0,26	(580 , 940)	700
3-а стадія «стан підвищеног о ризику»	0,13	0,54	0,17	(865, 1175)	1050

Стан якості ізоляції що діагностується (нового об'єкта діагностування) з показниками кривої зворотної напруги (\tilde{J}, \tilde{t}_c) визначається з виконання умови

$$(\tilde{J} - \bar{J}_i)^2 + (\tilde{t}_c - \bar{t}_i)^2 < R_i^2, \quad i = \overline{1,3}. \quad (4.7)$$

Якщо виконання нерівності виду (4.7) не єдине, то приналежність об'єкта до кластеру визначається меншою оцінкою

$$\Delta_i = \left| (\tilde{J} - \bar{J}_i)^2 + (\tilde{t}_c - \bar{t}_i)^2 - R_i^2 \right|, \quad i = \overline{1,3}. \quad (4.8)$$

Нормалізація показників (J, t_c) нового об'єкта тестування здійснюється на всій безлічі показників $\{J_i\}_{i=1, \overline{N}}$ і $\{t_{Ci}\}_{i=1, \overline{N}}$ відповідно, N - кількість показників - сума елементів (J, t_c) , що входять до кластерів $K_i, i = \overline{1,3}$. Нормалізація (4.1)-(4.2) виконується, якщо тільки одночасно справедливі нерівності

$$J \leq J_{\max} \quad \text{и} \quad t_c \leq t_{c\max}. \quad (4.9)$$

Після закінчення тестування нового об'єкта необхідно новий об'єкт додати в кластер, якому належить об'єкт що тестується і перерахувати необхідні статистичні характеристики модифікованого кластера. Якщо хоча б одна з нерівностей (4.9) порушена, то необхідно класифікацію виконати знову вже з урахуванням нового об'єкта тестування корпусної ізоляції з подальшим визначенням її ресурсу.

Залежно від приналежності об'єкта, що діагностується до якого-небудь кластеру, стан ізоляції будемо характеризувати величиною напрацювання до поточного відновлення (в тому числі і заміною ізоляції на нову). Оцінку величини напрацювання до першого відновлення визначимо виразом

$$\tau_1 = \bar{T}_1 + \Delta T_1 - T, \quad T < \bar{T}_1 + \Delta T_1, \quad (4.10)$$

де T – поточне напрацювання ізоляції що діагностується.

Оцінка величини напрацювання до другого відновлення τ_2

$$\tau_2 = \bar{T}_2 + \Delta T_2 - T, \quad \bar{T}_1 + \Delta T_1 < T < \bar{T}_2 + \Delta T_2; \quad (4.11)$$

оцінка величини напрацювання до заміни ізоляції на нову або капітального ремонту τ_3

$$\tau_3 = \bar{T}_3 + \Delta T_3 - T, \quad \bar{T}_2 + \Delta T_2 < T < \bar{T}_3 + \Delta T_3. \quad (4.12)$$

Якщо нерівність (4.7) не виконується ні для якого кластера, тоді можна оцінити стан якості ізоляції напрацюванням до моменту відновлення згідно з правилами ремонту і визначається однією з величин

$$\tau_1 = 350 - T, \quad T < 350; \quad (4.13)$$

$$\tau_2 = 700 - T, \quad 350 < T < 700; \quad (4.14)$$

$$\tau_3 = 1050 - T, \quad 700 < T. \quad (4.15)$$

Належність досліджуваної кривої зворотної напруги до того чи іншого кластеру можна визначити і за допомогою дискримінантного аналізу. В цьому випадку необхідно мати в наявності навчальні вибірки станів якості ізоляції

(кластери поповнюються об'єктами тестування в процесі технічного обслуговування). При проведенні даного дослідження було розроблено програмне забезпечення для здійснення дискримінантного аналізу. На початковому етапі, коли статистика стану корпусної ізоляції незначна, аналіз стану ізоляції і прогнозування її залишкового ресурсу виконується відповідно за виразами (4.7)-(4.15). Граничні значення параметрів прогнозування залишкового ресурсу корпусної ізоляції визначаються зі статистичних властивостей побудованих кластерів станів ізоляції. Визначення приналежності корпусної ізоляції що тестується до кластеру за умовою (4.7)-(4.8) слід застосовувати на початковому етапі. Коли кластери будуть містити достатню кількість елементів, тоді правильніше здійснити дискримінантний аналіз.

Примітка 2. Даний спосіб визначення станів якості корпусної ізоляції прийнятний в межах одного депо, локомотиви якого зазвичай експлуатуються в однакових умовах.

Висновки до розділу 4

Ступінь неоднорідності внутрішнього поля можна оцінювати коефіцієнтом абсорбції для об'єктів малої ємності. У цих випадках опір ізоляції має значну величину. В такому випадку в якості показника електричної міцності ізоляції може бути прийнята величина $S_{міцн}^{(1)}$.

У випадку ізоляційних конструкцій великої ємності (наприклад, при оцінці стану ізоляції електричних машин) користуватися коефіцієнтом абсорбції неефективно. Величина $S_{міцн}^{(1)}$ характеризує тільки зміну макростану ізоляції в середньому. Зміна опору ізоляції, наприклад за рахунок зволоження, виявляється мало помітною на величині k_a .

Зміни макроабсорбції та опору ізоляції можливо врахувати виміром t_n (часу, протягом якого зворотна напруга досягає максимального значення). Зміну опору ізоляції в процесі експлуатації (зниження електричної міцності) слід оцінювати показником ...

Зміну неоднорідності ізоляції та її опору можливо відслідковувати за

показником $S_{міцн}^{(3)}$, який залежить від часу саморозрядження $0,5 \cdot U_{звор.}^{\max}$, але цей показник еквівалентний показнику $S_{міцн}^{(2)}$.

Оцінювання стану ізоляції за відношенням R_1 / R_2 – (де R_1 – опір ізоляції при першому випробуванні, а R_2 – при наступному вимірі) не є ефективним. Величина опору ізоляції сильно залежить від неоднорідності внутрішнього та зовнішнього полів електроізоляційної конструкції.

Як інтегральний показник оцінки міцності ізоляції, який найбільш повно характеризує поточний стан ізоляції, є площа яку обмежує крива зворотної напруги .

Класифікація кривих зворотної напруги дозволяє визначити стани якості корпусної ізоляції.

Встановлено еквівалентність величини максимального значення зворотної напруги та величини інтегральної оцінки якості за кривою зворотної напруги, що важливо для проведення процедури класифікації станів ізоляції.

Признаками кластеризації є: $J = J_{01}$ - інтегральна оцінка кривої зворотної напруги, що визначається з виразу (4.4), t_c - час оцінювання кривої зворотної напруги.

Розбиття кривих зворотної напруги корпусної ізоляції на кластери дозволило виділити 3 стадії стану якості ізоляції, що позначені як: «задовільний стан», «ремонтний стан», «стан підвищеного ризику».

Розроблено програмне забезпечення класифікації станів якості ізоляції та дискримінантного аналізу для визначення стану ізоляції.

РОЗДІЛ 5

ПРОГНОЗУВАННЯ ЗАЛИШКОВОГО РЕСУРСУ КОРПУСНОЇ ІЗОЛЯЦІЇ
ТЯГОВИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ ДВИГУНІВ ЛОКОМОТИВІВ

5.1 Метод дослідження

Для визначення якості стану ізоляційної конструкції ТЕД ЕД-118А, використовувались данні замірів значень зворотної напруги U_{ret}^{\max} – максимальне значення зворотної напруги в поточній процедурі вимірювання в залежності від пробігу локомотиву l

$$U_{ret}^{\max}(l) = \max_t U_{ret}(t), t \in [0, t_{eval}], \quad (5.1)$$

та інтегрального показника [1]

$$A(l) = \int_0^{t_{eval}} U_{ret}(x) dx, t_{eval} = t_r + t_{midl}, \quad (5.2)$$

де l – пробіг локомотива при якому виконується діагностування ТЕД;
 t_{eval} – час оцінювання зворотної напруги,

$$U_{ret}(t_{eval}) = 0.5 \cdot U_{ret}^{\max}(l), \quad (5.3)$$

Де t_r – час наростання зворотної напруги до величини $U_{ret}^{\max}(l)$;

t_{midl} – значення часу саморозрядження від часу t_r до величини зворотної напруги $0.5 \cdot U_{ret}^{\max}(l)$.

Заміри величин зворотної напруги $U_{ret}(t)$, інтегральної оцінки (5.22) виконувались приладом опис якого надано в [1]. Спостереження проводились для групи ТЕД, що встановлені на тепловозах серії 2ТЕ-116 депо «М» РФ Придніпровська залізниця для різних величин пробігу l (напрацювання).

Заміри показників якості корпусної ізоляції (далі ізоляція) $U_{ret}(t)$ та

відповідної величини інтегральної оцінки (5.2) проводилися для ТЕД, що проходили капітальний ремонт КР-1 за «технологією відновлення 1», «технологією відновлення 2», «технологією відновлення 3».

Якщо величину зворотної напруги $U_{ret}^{\max}(l)$ та інтегральну оцінку $A(l)$ розглядати як характеристики процесу старіння корпусної ізоляції (або показники поступової відмови), то їх можна описати співвідношеннями аналогічно [174]

$$U_{ret}^{\max}(l) = U_{ret}^{\max}(0) \cdot e^{-a \cdot l}. \quad (5.4)$$

$$A(l) = A(0) \cdot e^{-b \cdot l}. \quad (5.4')$$

Відновлення якості ізоляції можливе в умовах локомотивного депо під час виконання поточного ремонту ПР-3 та в умовах локомотиворемонтного заводу при проведенні капітального ремонту КР-1, та капітального ремонту КР-2.

Якщо відновлення властивостей ізоляції буде здійснюватися після КР-2 (або коли ізоляція нова) під час виконання ПР-3 з періодом напрацювання τ , то інтегральну оцінку $A(l)$ можна описати функціональною залежністю в вигляді [47]

$$A(l) = A(0) \cdot e^{-b \cdot \left(l - \gamma \cdot \tau \cdot \left[\frac{l}{\tau} \right] \right)}, \quad (5.5)$$

де $\left[\frac{l}{\tau} \right]$ – ціла частина від $\left(\frac{l}{\tau} \right)$;

γ – коефіцієнт (число), що характеризує рівень відновлення ізоляції під час виконання ПР-3.

В подальшому вважаємо, що відлік напрацювання l починається від ремонту КР-2.

Параметри залежності інтегральної оцінки A зворотної напруги U_{ret} з урахуванням початкової якості ізоляції (або якості ремонту ТЕД ЕД-118А локомотиворемонтними заводами) наведено в табл. 5.1. Параметр b і значення величини $A(0)$ в табл. 1 визначались з розв'язання задачі апроксимації за даними

спостережень величин інтегральних оцінок A методом найменших квадратів. В звичайній ситуації і в проведених тут експериментах справжнє значення величин $A(0)$ після відновлення КР-2 для ТЕД невідомо.

Таблиця 5.1

Параметри залежності інтегральної оцінки $A(l)$

Технологія відновлення	U_{ret}^{max} [В]	$A(0)$ [В·с]	γ	b	g	$C_{ПР3}$ [грн]	$C_{КР1}$ [грн]
3	955	20540	0,40	0,00000900	0,71	6520	12648
1	1100	20900	0,55	0,00000947	0,78	6520	14055
2	1270	21180	0,49	0,00001015	0,75	6520	16970

В табл. 5.1: $C_{ПР3}$ – витрати коштів на одне відновлення при ПР-3; $C_{КР1}$ – витрати коштів на відновлення при КР-1; g – коефіцієнт, що характеризує рівень відновлення ізоляції під час виконання КР-1.

Первинно величина напрацювання до КР-1 L_{ren1}^* визначається з розв'язання рівняння

$$A(0) \cdot e^{-b \cdot \left(L_{ren1}^* - \gamma \cdot \tau \cdot \left[\frac{L_{ren1}^*}{\tau} \right] \right)} = A_{min2} \quad (5.6)$$

відносно L_{ren1}^* . В рівнянні (5.6) величина A_{min2} є значення інтегральної оцінки A , що відповідає обмеженню знизу для значень зворотної напруги U_{ret}^{max} . Остаточна величина напрацювання до КР-1 L_{ren1} визначається експертом як

$$L_{ren1} = \begin{cases} L_{ren1}^* \\ (n+1) \cdot \tau \end{cases}, \quad (5.7)$$

де n – кількість відновлень до КР-1.

Моделювання процесу відновлення до КР-2 відбувається з урахуванням отриманих результатів моделювання відновлення до КР-1. Первина величина

напрацювання до КР2 L_{ren2}^* визначається з розв'язання рівняння

$$A(0) \cdot e^{-b \cdot (L_{ren2}^* - L_{ren1} + \Delta l - \tau \cdot g \cdot m)} = A_{\min 2}, \quad (5.8)$$

відносно L_{ren2}^* . В рівнянні (8) m – кількість відновлень до КР-2; Δl – прирощення по пробігу відповідно до рівня відновлення при виконанні КР-1 (залежить від коефіцієнту відновлення ізоляції g). Величина Δl визначається з розв'язання рівняння

$$A(0) \cdot e^{-b \cdot \Delta l} = g \cdot A(0) \quad (5.9)$$

відносно Δl . Остаточна величина напрацювання до КР-2 L_{ren2} визначається експертом як

$$L_{ren2} = \begin{cases} L_{ren2}^* \\ L_{ren1} + (m+1) \cdot \tau \end{cases}, \quad (5.10)$$

Моделювання процесів відновлень до КР-1 та до КР-2 виконувалось в середовищі математичної оболонки *MAPLE*.

5.2 Результати прогнозування

При фіксованій періодичності, коли $\tau=180\,000$ км, [175], значення можливого пробігу L_{ren2} (напрацювання до КР-2) за «технологіями відновлення» складо, табл. 5.2.

При моделюванні процесу відновлення, табл.5. 2, вводиться обмеження знизу в вигляді зони ($A_{\min 1}, A_{\min 2}$), що є обмеженням значень інтегрального показника якості ізоляції в розрахунках. Величина $A_{\min 1} = 950[B \cdot c]$ відповідає величині зворотної напруги в 30 вольт, а величина $A_{\min 2} = 750[B \cdot c]$ – величині в 25 вольт. Величини $A_{\min 1}, A_{\min 2}$ обирались виходячи з досвіду експлуатації та точки зору безпеки руху.

Значення напрацювання відновлення до КР-2 при періодичності відновлення $\tau=180$
000 км за Правилами [180] в залежності від «технологій відновлення»

«Технологія відновлення» ізоляції	Напрацювання до КР-2, L_{ren2} [км]	Витрати коштів $C_{ПРЗ} + C_{КР1}$ [грн]	Питомі витрати [коп/км]
3	988164	38728	3,91
1	1080000	40115	3,71
2	1052015	43050	4,09

Як слідує з табл. 5.2 розрахунків при однакових представлених періодах відновлення τ і кількості відновлень на якість ізоляції впливає і прийнята технологія відновлення. Перед замовником (депо) виникає задача про прийняття рішення стосовно вибору виконавця для проведення процедури відновлювання ізоляції.

На рис. 5.1-5.3 надано процеси відновлення, що відповідають табл. 5.2.

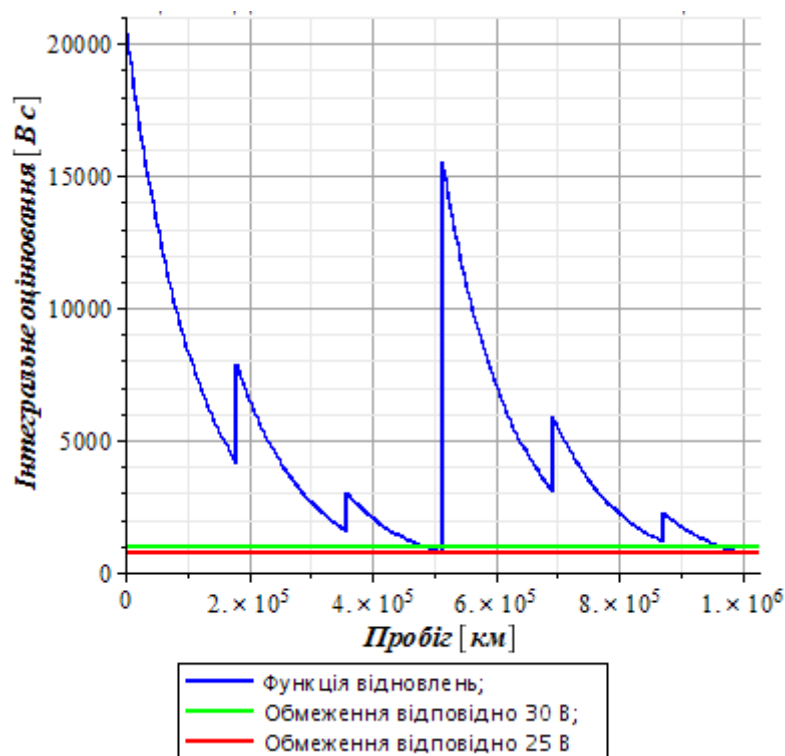


Рисунок 5.1 – Процес відновлення до КР-2 за Правилами [180], періодичність $\tau=180000$ км, «технологія відновлення 3»

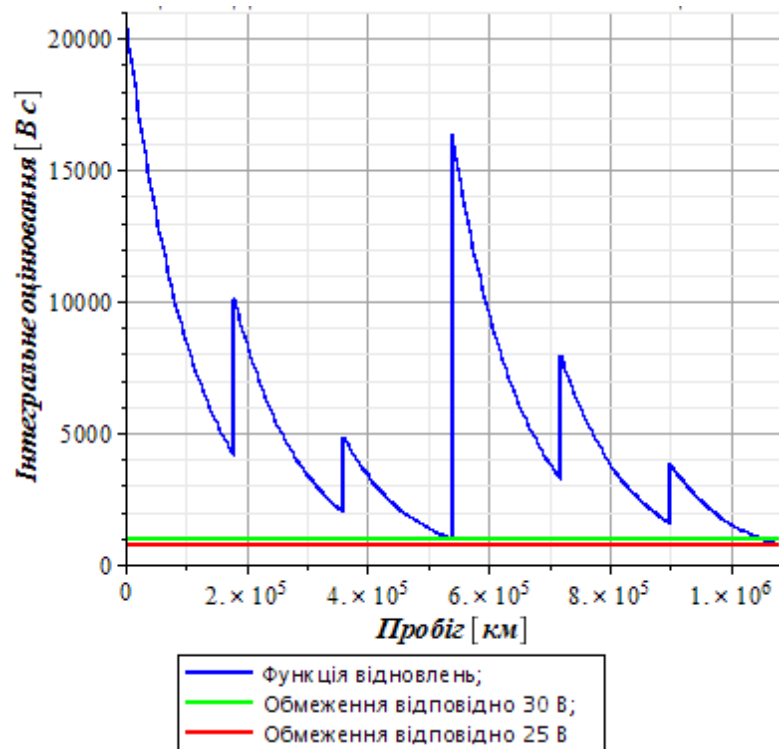


Рисунок 5.2 – Процес відновлення до КР-2 за Правилами [180], періодичність $\tau=180000$ км, «технологія відновлення 1»

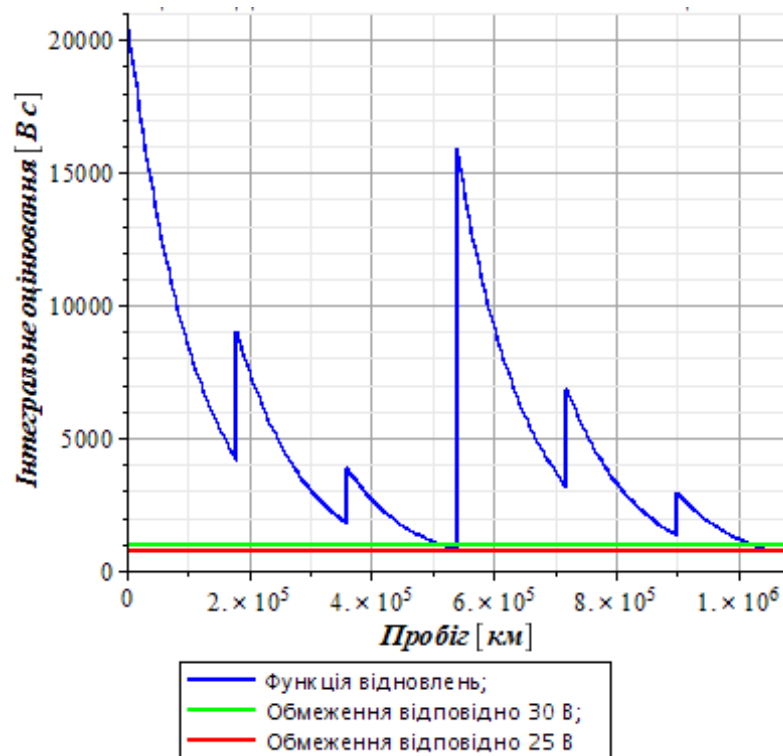


Рисунок 5.3 – Процес відновлення до КР-2 за Правилами [180], періодичність $\tau=180000$ км, «технологія відновлення 2»

Рішення стосовно вибору процесу відновлення ізоляції приймемо з розв'язання наступних задач оптимізації.

В першій задачі для технологій відновлення виберемо той варіант процесу відновлення ізоляції, який забезпечує максимальне напрацювання ізоляції до КР-2 – сформулюємо задачу. Нехай τ – період відновлення ізоляції, n – кількість відновлень до КР-1, m – кількість відновлень від КР-1 до КР-2, тоді

$$\max_{\tau, n, m} L_{ren2}(\tau, n, m), \tau > 0, \tau \in T; \quad n, m \in M, \quad (5.11)$$

при обмеженні

$$L_{ren2}(\tau, n, m) \geq L_{\min}, \quad (5.11')$$

де M – обмежена безліч натуральних чисел;

T – безліч періодів відновлення ізоляції;

$L_{ren2}(\tau, n, m)$ – напрацювання ізоляції до КР2;

L_{\min} – мінімально допустимий пробіг (напрацювання) ТЕД, приймається відповідно [180] величиною 990000 км.

В другій задачі для технологій відновлення визначаються варіанти процесу відновлення які мінімізують питомі витрати на відновлення при ПР-3 та КР-1 в процесі експлуатації – сформулюємо задачу

$$\min_{\tau, n, m} \frac{C(\tau, n, m)}{L_{ren2}(\tau, n, m)}, \tau \in T, \quad n, m \in M, \quad (5.12)$$

при обмеженні (5.11'), де $C(\tau, n, m)$ – кошти на виконання процесу відновлення з врахуванням всіх відновлень ПР-3 і відновлення КР-1.

В першій і другій задачі $M = \{1, 2, 3, 4, 5\}$; $T = \{\tau_i\}, i = \overline{1, K}$, τ_i – періоди відновлення ізоляції, що задаються експертом при розв'язанні задачі.

Розв'язання першої і другої задачі значно спрощується тим, що оптимізація виконується на рахункових, обмежених безлічах T і M . Значення періодів

відновлення τ задаються за вказівкою експерта за «технологіями відновлення» що розглядаються.

Оптимізація варіантів відновлень ізоляції проводилась для отриманих розрахунків процесів відновлень за «технологіями відновлення» виконання ПР-3, КР-1 і КР-2, табл. 5.3-5.5. В таблицях 5.3-5.5 символом (^), стовпчик «Напрацювання до КР-2», позначено варіанти відновлення, які не задовольняють Правилам [4] – пробіг локомотива до КР-2 менше мінімально допустимого пробігу 990000 км. Символом (*), стовпчик «Напрацювання...», позначено варіант відновлення ізоляції що відповідає найбільшому напрацюванню. Символом (#), стовпчик «Питомі витрати», позначено варіант відновлення ізоляції що відповідає найменшим питомим витратам на відновлення.

Таблиця 5.3

Аналіз процесів відновлення ізоляції ТЕД, ремонтна база – ЛЛРЗ

Періодичність відновлення, τ [км]	Кількість відновлень $n+m$	Напрацювання до КР-2, L_{ren2} [км]	Витрати на відновлення, C [грн]	Питомі витрати [коп/км]
180000	2+2	988164	38728	3,91
150000	3+2	^999715	45248	4,53
150000	2+2	^900000	38728	4,30
120000	3+3	^960000	51768	5,39
120000	4+3	*1041715	58288	5,60
250000	1+1	^906430	25688	2,83
300000	1+1	^926430	25688	2,77
320000	1+1	^954430	25688	2,69
350000	1+1	^974430	25688	2,64
360000	1+1	990430	25688	#2,59

Таблиця 5.4

Аналіз процесів відновлення ізоляції ТЕД, ремонтна база – ЗЕРЗ

Періодичність відновлення, τ [км]	Кількість відновлень $n+m$	Напрацювання до КР-2, L_{ren2} [км]	Витрати на відновлення, C [коп.]	Питомі витрати [коп./км]
1	2	3	4	5
180000	2+2	1080000	40115	3,71
180000	3+3	1306430	51768	3,96
180000	3+2	1206715	45248	3,75

1	2	3	4	5
250000	1+1	1000000	25688	2,57
250000	2+1	1124930	32208	2,86
350000	1+1	1097430	25688	2,34
150000	3+3	1200000	51768	4,31
150000	3+2	1040000	45248	4,35
150000	4+3	*1300000	58288	4,48
120000	4+3	1080000	58288	5,39
120000	4+4	1200000	64808	5,40
120000	5+4	*1300000	71328	5,49
300000	1+1	1042430	25688	2,46
360000	1+1	1108430	25688	#2,32
240000	1+1	^960000	25688	2,68
240000	1+2	1086715	32208	2,96
240000	2+1	1103715	32208	2,92
240000	2+2	1240430	38728	3,12

Таблиця 5.5

Аналіз процесів відновлення ізоляції ТЕД, ремонтна база – СЕМРЗ

Періодичність відновлення, τ [км]	Кількість відновлень $n+m$	Напрацювання до КР-2, L_{ren2} [км]	Витрати на відновлення, C [грн]	Питомі витрати [коп/км]
180000	2+2	1052015	43050	4,09
150000	2+2	^900000	38728	4,30
150000	3+3	1140930	51768	4,54
150000	3+2	1009450	45248	4,48
120000	3+3	960000^	51768	5,39
120000	4+3	1080000	58288	5,40
120000	4+4	*1169615	64808	5,54
250000	1+1	^948930	25688	2,71
240000	1+1	^934415	25688	2,75
240000	2+1	1054530	32208	3,05
300000	1+1	^972930	25688	2,64
320000	1+1	1006530	25688	2,55
350000	1+1	1030530	25688	2,50
360000	1+1	1049730	25688	#2,45

Варіанти оптимальних відновлень ізоляції, для поставлених задач оптимізації, зведемо в загальну таблицю для подальшого аналізу, доповнивши варіантами

відновлень з періодом $\tau = 180\,000$ км, табл. 5.6.

Таблиця 5.6

Зведена таблиця аналізу оптимальних варіантів технологій відновлення корпусної ізоляції по ремонтних базах

«Технологія відновлення» КР-1, КР-2	Періодичність відновлення, τ [км]	Кількість відновлень $n+m$	Напрацювання до КР-2, L_{ren2} [км]	Питомі витрати [коп/км]
3	120000	4+3	*1041715	5,60
3	360000	1+1	990430	#2,59
1	180000	3+3	*1306430	3,96
1	360000	1+1	1108430	#2,32
2	120000	4+4	*1169615	5,54
2	360000	1+1	1049730	#2,45

Користуючись результатами досліджень, що відображені в табл. 5.6, запропоновано (експертом) наступні періодичності виконання ПР-3 «технологіями відновлення» властивостей ізоляції, табл. 5.7

Таблиця 5.7

Запропоновані періодичності відновлення властивостей ізоляції за «технологіями відновлення»

«Технологія відновлення» КР-1, КР-2	Періодичність відновлення, τ [км]	Кількість відновлень $n+m$	Напрацювання до КР-2, L_{ren2} [км]	Питомі витрати [коп/км]
3	360000	1+1	990430	#2,59
1	180000	3+3	*1306430	3,96
2	360000	1+1	1049730	#2,45

Порівнюючи, відповідно до поставлених задач оптимізації, для величин напрацювання ізоляції і питомих витрат на відновлення можна углядіти наступну тенденцію. На величини напрацювання і питомі витрати впливає «технологія відновлення», що прийнята, а саме:

- для найкращих напрацювань маємо порівняння:

$$1041715 (\text{«технол.» } 3) < 1169615 (\text{«технол.» } 2) < 1306430 (\text{«технол.» } 1); \quad (5.13)$$

– для найкращих питомих витрат відповідним співвідношенням буде

$$2,59(\text{«технол.» } 3) > 2,45(\text{«технол.» } 2) > 2,32(\text{«технол.» } 1). \quad (5.14)$$

Як видно з (5.13)-(5.14) найкращою «технологією відновлення» є «Технологія відновлення 1».

При відборі рекомендованих варіантів з оптимальних, табл. 5.6, керувалися прийнятою вартістю і напрацюванням, досвідом експлуатації та відновлення ТЕД при порівнянні для кожної «технології відновлення». На рис. 5.4-5.5 відображено запропоновані в табл. 5.7 варіанти процесів відновлення ізоляції. Процес відновлення ізоляції з періодичністю $\tau=180000$ км – «технологія відновлення 1»: величина пробігу $L=1306430$ км, ПР-3 – 6 відновлень, представлено на рис. 5.4.

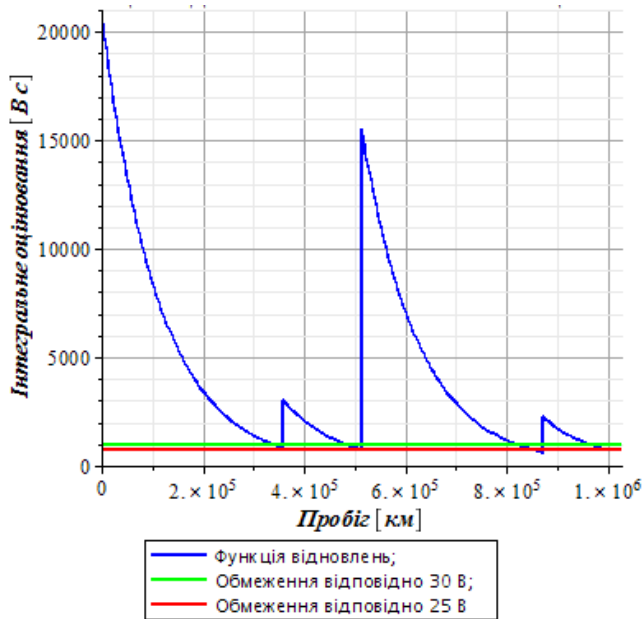


Рисунок 5.4 – Періодичність відновлення $\tau=360000$ км, «технологія відновлення 3»: величина пробігу $L=990430$ км, ПР-3 – 2 відновлення

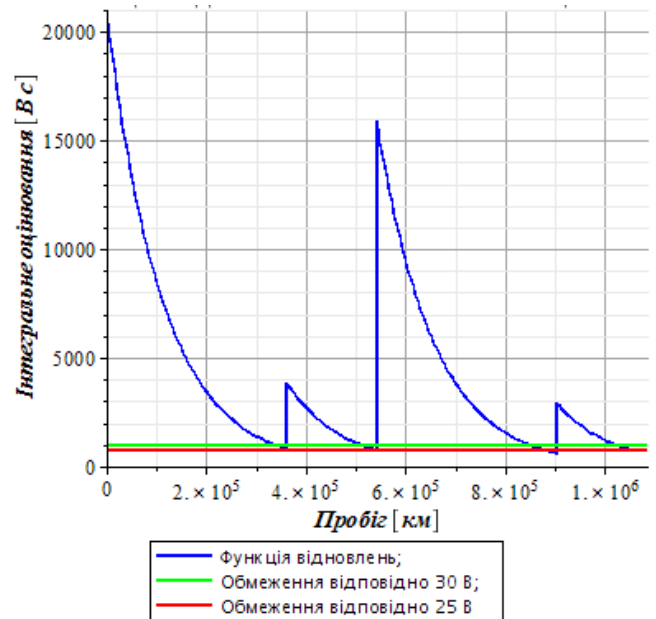


Рисунок 5.5 – Періодичність відновлення $\tau=360000$ км, «технологія відновлення 2»: величина пробігу $L=1049730$ км, ПР-3 – 2 відновлення

Наведені результати розрахунків придатні для локомотивного депо «М» РФ Придніпровська залізниця, для якого була зібрана статистична інформація. Для інших локомотивних депо обчислення необхідно виконати відповідно до зібраної

статистичної інформації.

Висновки до розділу 5

Виміри інтегрального показника якості $A(l)$ корпусної ізоляції ТЕД можуть бути використані для моделювання процесу відновлення ізоляції рівно як і виміри зворотної напруги $U_{ret}^{\max}(l)$, що отримують при діагностуванні.

Інтегральний показник якості більш інформативно відображає зміну форми кривої зворотної напруги в порівнянні з величиною $U_{ret}^{\max}(l)$.

Запропонована методика визначення періоду відновлення ПР-3 корпусної ізоляції тягових електричних машин локомотивів, з урахуванням початкової її якості та питомих витрат на відновлення, дає можливість замовнику (локомотивному депо) вибрати відповідно «технологію відновлення» (локомотиворемонтний завод) для проведення відновлювальних робіт.

ВИСНОВКИ

Використання результатів дисертаційної роботи дає можливість вирішити проблему вибору раціональної системи утримування для кожного типу тягового електродвигуна певної серії локомотива на основі звітної статистичної інформації про надійність локомотивів та використанням засобів технічної діагностики.

Раціональна система утримування стане попереджуючим фактором появи аварійних відновлень, які відволікають значні грошові та трудові ресурси на їх усунення, а також призведе до збільшення часу корисної роботи локомотивного парку та зниження експлуатаційних витрат, в тому числі, витрат на утримування локомотивів.

За результатами виконаної роботи можна зробити наступні висновки.

1) Сучасні наукові і практичні дослідження з визначення стану ТЕД і якості ізоляції відносяться до розробок питань технічного діагностування, заснованих на реалізації ряду фізичних методів. Для оцінки стану ізоляції розроблені кілька методів діелектричного діагностування: вимірювання струму поляризації і деполіризації, спектроскопія в частотній області, вимір зворотної напруги. Авторами досліджень зазначено, що методом для отримання більш повної інформації про стан ізоляції є вимір зворотної напруги.

2) Моделі, що стосуються прогнозування ресурсу ізоляції ТЕД, дослідниками однозначно не визначаються. Ресурс моделюється як напрацювання (час) між сусідніми неусувними відмовами. Вихідними даними є інформація про відмови протягом деякого часу експлуатації. Моделі відновлення ізоляційних систем ТЕД, що зустрічаються в сучасних публікаціях, базуються на випадкових потоках відмов (пробій ізоляції) і не враховують поточний стан ізоляції та технологію відновлення.

3) Основною причиною несправності ТЕД є пробій ізоляції і міжвиткове замикання обмотки якоря, на долю яких припадає близько 20% і 24% від загального числа відмов для електровозів і тепловозів відповідно. Кількість відмов ТЕД від загальної кількості відмов локомотивів по депо Нижньодніпровськ-Вузол складає 12%, третя частина відмов ТЕД приходить на ізоляцію обмоток збудження ТЕД. Для отримання інформативного діагностичного параметра, за яким можна було б судити про стан ізоляції і передбачити зміни її стану необхідно розробляти нові

методи та технології.

4) Визначено ознаки що відображають процес старіння корпусної ізоляції і дозволяють прогнозувати зміну її технічного стану в умовах експлуатації. Як інтегральний показник оцінки міцності ізоляції, який найбільш повно характеризує поточний стан ізоляції, є площа яку обмежує крива зворотної напруги.

5) Досліджено залежності зворотної напруги від введеної інтегральної оцінки стану якості корпусної ізоляції. Залежність середнього значення інтегральної оцінки якості корпусної ізоляції від максимального значення зворотної напруги по всім ТЕД для одного локомотива є еквівалентними (лінійна залежність) в межах одного локомотивного депо. Це спрощує задачу вибору показників для вирішення задачі класифікації станів якості корпусної ізоляції.

6) Розроблено програмне забезпечення класифікації станів якості ізоляції та дискримінантного аналізу для визначення стану ізоляції. Розбиття кривих зворотної напруги корпусної ізоляції на кластери дозволило виділити 3 стадії стану якості ізоляції, що позначені як: «задовільний стан», «ремонтний стан», «стан підвищеного ризику».

7) Розроблено математичну модель побудови процесу відновлення корпусної ізоляції ТЕД ЕД-118А з урахуванням ступеня відновлення. Математична модель дозволяє прогнозувати залишковий ресурс корпусної ізоляції ТЕД та моменти відновлення ПР-3, КР-1, КР-2.

8) Оптимальними за питомими витратами моментами відновлень ТЕД ЕД-118А до КР-2 є, км: 360000 – ПР-3; 567715 – КР-1; 927715 – ПР-3; 1108430 – КР-2. Періодичність відновлення ПР-3 складає $\tau=360000$ км. Результат досягається завдяки використанню «технології відновлення 1».

Оптимальними за пробігом моментами відновлень до ТЕД ЕД-118А КР-2 є, 180000 км, 360000 км, 540000 км – ПР-3; 666715 км – КР-1; 846715 км, 1026715 км, 1206715 км – ПР-3; 1306430 км – КР-2. Періодичність відновлення ПР-3 складає, $\tau=180000$ км. Результат досягається за використанням «технологія відновлення 1».

Періоди відновлення корпусної ізоляції необхідні для побудови раціональної системи утримання ТЕД.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Kapitsa, M., Laguta, V., Kozik, Y. Selecting the parameters of the diagnosis of frame insulation condition in electrical machines of locomotives (2018) International Journal of Engineering and Technology(UAE), 7 (4), pp. 110-114. DOI: 10.14419/ijet.v7i4.3.19718. [Електрон. ресурс] / – Режим доступа: <https://www.sciencepubco.com/index.php/ijet/issue/view/394>.
2. Козік Ю. Г. Оптимальне за питомими витратами прогнозування ресурсу корпусної ізоляції тягових електричних двигунів локомотивів. Зб. наук. пр. Держ. ун-ту інфраструктури та технологій. Серія: Трансп. системи і технології. Київ, 2019. Вип. 34. С. 30-47. DOI: <https://doi.org/10.32703/2617-9040-2019-34-1-3>.
3. Лагута, В. В., Козік, Ю. Г. Визначення періодів відновлення корпусної ізоляції тягового електродвигуна ЕД-118А за спостереженнями зворотної напруги. Наука та прогрес транспорту. 2020. № 3 (87). С. 163-173. DOI: 10.15802/stp2020/208270.
4. Kapitsa, M. Classification of Quality Conditions of a Traction Motor Frame Insulation of Locomotives [Electronic resource] / Michail Kapitsa, Vasiliy Laguta, Yuriy Kozik // MATEC Web of Conferences. – 2019. – Vol. 294 : 2nd International Scientific and Practical Conference “Energy-Optimal Technologies, Logistic and Safety on Transport” (EOT-2019). – P. 1-7. – Access Mode: https://www.matec-conferences.org/articles/matecconf/pdf/2019/43/matecconf_eot18_03002.pdf (21.10.2019). – DOI: 10.1051/matecconf/201929403002.
5. Козік Ю. Г. Вибір параметрів контролю стану корпусної ізоляції електричних машин локомотивів [Текст] / Козік Ю. Г., Лагута В. В. // Сучасні інформаційні та комунікаційні технології на транспорті, в промисловості і освіті: Тези XI Міжнародної науково-практичної конференції (Дніпро, 13-14 грудня 2017 р.). –Д.: ДІТ, 2017. – С. 38.
6. Капіца М. І. Застосування енергозощаджуючих технологій під час випробувань ізоляційних конструкцій тягових електричних машин локомотивів [Текст] / М. И. Капіца, В. В. Лагута, Козік Ю. Г. // Матеріали

- Міжнародної науково-практичної конференції «Енергооптимальні технології, логістика та безпека на транспорті» (м.Львів 18-19 червня 2018 р.) –Дніпро.: ДНУЗТ, 2018. –С. 46-47.
7. Лагута В.В, Козік Ю. Г. Обґрунтування методу контролю стану корпусної ізоляції тягових електричних машин локомотивів [Текст] / Лагута В. В., Козік Ю. Г. // Тези 78 Міжнародної науково-практичної конференції Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту (Дніпро, 17-18 травня 2018 р.). –Д .: ДІТ, 2018.
 8. Капица М.И., Козик Ю.Г., Лагута В.В. Оценка остаточного ресурса корпусной изоляции ТЭД методом классификации ее состояний [Текст] / Капица М.И., Козик Ю.Г., Лагута В.В.// ІКСЗТ, 2018 №4 (додаток): Тези 31-ї міжнародної практичної конференції «Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті» – Харків: Вид-во УкрДУЗТ, 2018. – С. 11 – 12 .
 9. Козик Ю.Г., Лагута В.В. Прогнозування ресурсу корпусної ізоляції тягових електричних двигунів локомотивів за питомими витратами [Текст] / Козик Ю.Г., Лагута В.В.// Тези 79-ї Міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту» 16-17 травня 2019 р. – Дніпро: Вид-во ДНУЗТ, 2019. – С. 29 – 30.
 10. Michail Kapitsa, Vasiliy Laguta, and Yuriy Kozik. Classification of quality conditions of a traction motor frame insulation of locomotives. EOT-2019. MATEC Web of Conferences. P. 71-72.
 11. Капица М. И. Основные пути развития диагностики локомотивов / М. И. Капица, Б. Е. Боднар, Я. Е. Савич // Вісн. Східноукр. нац. ун-ту. ім. В. Даля. – Луганськ, 2003. – № 9(67). – С. 96-100.
 12. Капица М. И. Выбор обобщенного диагностического параметра дизеля / М. И. Капица // Міжвуз. зб. наук. пр. – Д.: Січ, 1997. – С. 63-65.
 13. Капица М. И. Исследование влияния диагностирования на надежность технического объекта / М. И. Капица, В. А. Крячко, В. И. Чабанюк // Вісн. Східноукр. держ. ун-ту. – 2001. – № 7(41). – С. 6-10.
 14. Капица М. И. Прогнозирование ресурса локомотивов по результатам

диагностирования / М. И. Капица // Наука и транспорт: вестн. БелГУТа. – 2002. – № 2(5). – С. 8-11.

15. Ридель Э. Э. Применение диагностики – залог эффективной работы электровозов / Э. Э. Ридель // Железнодорожный транспорт. – 1980. – № 5. – С. 36-40.
16. Ридель Э. Э. Техническая диагностика – крупный резерв повышения эффективности работы / Э. Э. Ригель, Е. К. Рыбников, В. П. Феоктистов // Железнодорожный транспорт. – 1981. – № 7. – С. 42-47.
17. Пахомов Э. А. Планово-предупредительная система технического обслуживания и ремонта локомотивов и проблемы диагностики / Э. А. Пахомов, Р. Г. Черепашенец, В. Н. Сафонов // Бюл. ОСЖД. – 1981. – № 4. – С. 3-7.
18. Йошікава Т., Шакаяма Ш. Нова система управління вартістю утримання рухомого складу / Т. Йошікава, Ш. Шакаяма // (International Railway Journal, №12, 2001). – Залізничний транспорт України. – 2002. – № 5. – С. 68-69.
19. Осяев А.Т. Концепция комплексной системы диагностирования тягового подвижного состава на железных дорогах России / А.Т. Осяев // Вісник СНУ ім. В. Даля. – Луганськ: СНУ ім Даля, 2003, №9 (67), Ч.2. – С. 88-92.
20. Проблемы построения информационно-логических измерительных комплексов для наземной технической диагностики в динамическом режиме БСУ полетами самолетов ГА / В. А. Игнатов, А. А. Ефимов, С. М. Паук и др. // Сб. тр. Киев. Ин-та инженеров гражд. Авиации. – 1972. – Вып. 8: Вопросы авиационной радиотехники. – С. 14-17.
21. Автоматизация испытаний и контроля ГДТ / под ред. Г. П. Шибанова. – М.: Машиностроение, 1977. – 278 с.
22. Селезнев А. В. Проектирование автоматизированных систем контроля бортового оборудования летательных аппаратов / А. В. Селезнев, Б. Т. Добрица, Р. Р. Убар. – М.: Машиностроение, 1983. – 224 с.
23. Мозгалеvский А. В. Техническая диагностика (непрерывные объекты): учебное пособие для вузов / А. В. Мозгалеvский, Д. В. Гаскаров. – М.: Высш.

- шк., 1975. – 207 с.
24. Основы технической диагностики // Модели объектов, методы и алгоритмы диагноза: в 2 кн. / под ред. П. П. Пархоменко. – М.: Энергия, 1976. – Кн. 1. – 464 с.
25. Пархоменко П. П. Основы технической диагностики: Оптимизация алгоритмов диагностирования, аппаратные средства / П. П. Пархоменко, Е. С. Согомонян. – М.: Энергия, 1981. – 320 с.
26. Хомич А. З. Техническая диагностика и надежность тепловозов / А. З. Хомич, С. Г. Жалкин, Э. Д. Тартаковский // Железнодорожный транспорт. – 1974. – № 11. – С. 45-48.
27. Даминов В. З. Эффективный контроль качества работы тепловозов / В. З. Даминов, В. А. Четвергов, А. И. Володин // Железнодорожный транспорт. – 1982. – № 8. – С. 47-49.
28. Тартаковский Э. Д. Научные основы и разработка поточной технологии диагностирования и технического обслуживания тепловозов: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.22.07 / Э. Д. Тартаковский. – М.: Моск. ин-т инженеров ж.-д. трансп., 1984. – 36 с.
29. Пахомов Э. А. Планово-предупредительная система технического обслуживания и ремонта, проблемы диагностики / Э. А. Пахомов // Развитие локомотивной тяги / под ред. Н. А. Фуфрянского, Л. Н. Бевзенко. – М.: Транспорт, 1982. – С. 221-255.
30. Стрекопытов В. В. Перспективы автоматизации контроля и управления тепловозов на базе микро-ЭВМ / В. В. Стрекопытов, И. Ф. Пушкарев, Ю. М. Русаков // Сб. тр. Всесоюз. научно-исслед. тепловоз. ин-та. – 1983. – Вып. 57: Проблемы развития тепловозостроения. – С. 121-123.
31. Лянда А. Ю. Автоматизированный комплекс технической диагностики тепловозов / А. Ю. Лянда, В. О. Гавриков // Методы и средства диагностирования технических средств железнодорожного транспорта: тез. докл. Всесоюз. научно-техн. конф. – Омск, 1989. – С. 76.
32. Тартаковский Э. Д. Маршрутная технология технического обслуживания

- локомотивов с применением диагностики / Э. Д. Тартаковский // Совершенствование оборудования подвижного состава. – М.: МИИТ, 1992. – Вып. 703. – С. 30-33.
33. Концепція розвитку системи діагностування у локомотивному господарстві залізниць України: затв. 15.02.1999 р. – К.: Мінтранс України. Державна адміністрація залізничного транспорту, 1999. – 10 с.
34. Серебряков А.С. Оценка состояния корпусной изоляции тяговых двигателей. / Серебряков А.С. / Железнодорожный транспорт. -№12, 1999. – С. 25-27.
35. Бажанов С.А. Профилактические испытания изоляции оборудования высокого напряжения. / Бажанов С.А., Воскресенский В.Ф. / –М.: Энергия –1977.
36. Баженов С.А. Выбор аппаратуры для испытаний электрооборудования / С.А. Баженов. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 128 с.
37. Експлуатація систем електропостачання військових об'єктів. / Б.Т. Кононов, О.Б. Котов, Г.І. Лагутін, О.М. Малиш. – Х.: ХУПС, 2014. – 432 с.
38. Техника высоких напряжений: учебник для Вузов / [под ред. Г. С. Кучинского]. – СПб: Энергоатомиздат. Санкт-Петербургское отделение, 2003. – 608 с.
39. Исаев И.П. Ускоренные испытания и прогнозирование надежности электрооборудования локомотивов. / Исаев И.П., Матвеевич А.П., Козлов Л.Г. – М.: Транспорт, 1984. – 248с.
40. Капіца, М. І. Розвиток наукових основ удосконалення систем утримування тягового рухомого складу [Текст]: Дис. д-ра техн. наук : 05.22.07 / М. І. Капіца // Дніпропетровський нац. ун-т залізничного транспорту ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ : Дніпропетр. нац. ун-т залізнич. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, 2010. – 349 с.
41. Привалов Е.Е. Диагностика внешней изоляции электрического оборудования: уч. Пособие. –М. – Берлин: Директ-Медиа, 2015. –72 с.
42. Лачин В.И. Влияние токов абсорбции на измерение сопротивления изоляции/ В.И. Лачин В.И., К.Ю. Соломенцев, Нгуен Куок Уи // Микропроцессорные, аналоговые и цифровые системы: проектирование и схемотехника, теория и

- вопросы применения : материалы XIII Междунар. науч.-практ. конф., г. Новочеркасск, 23 апр. 2013 г. / Юж.-Рос. гос. техн. ун-т (НПИ). – Новочеркасск: ЮРГТУ (НПИ), 2013. – С. 31-33
- 43.Лачин В.И. Сравнительный анализ математических моделей аппроксимации тока абсорбции/ Лачин В.И., Соломенцев К.Ю., Нгуен Куок Уи и др. // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Техн. науки. – 2015. – №2.
- 44.Капица М. И. Применение математического моделирования при оценке остаточного ресурса изоляции электрических машин / М. И. Капица, В. В. Лагута // Машиностроение и техносфера XXI века: сб. тр. междунар. научно-техн. конф., г. Севастополь, 8–14 сентября 2003 г.: в 4 т. – Донецк: ДонНТУ, 2003. – Т. 3. – С. 279-283.
- 45.Лачин В.И. Алгоритм работы устройства ускоренного измерения сопротивления с учетом токов абсорбции/ В.И. Лачин В.И., К.Ю. Соломенцев, Нгуен Куок Уи и др.// Компьютерные технологии в науке, производстве, социальных и экономических процессах: материалы 15-ой Междунар. науч.-практ. конф., г.Новочеркасск, 12 дек. 2014г./ Юж.-Рос. гос. НПИ-Новочеркасск: ЮРГПУ, 2015. – С. 126.
- 46.Лачин В.И. Влияние тока абсорбции на процесс измерения сопротивления изоляции/ Лачин В.И., Соломенцев К.Ю., Нгуен Куок Уи // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Техн. науки. - 2013. - № 6. - С. 32-35.
- 47.Босов, А. А. Теоретические основы рационального содержания подвижного состава железных дорог [Текст]: Монография /А. А. Босов, П. А. Лоза. – Днепропетровск: Дриант, 2015. – 252 с. ISBN 978-966-2394-15-3.
- 48.Шавкун, В. М. Вплив періодичності діагностування на показники надійності тягових електродвигунів рухомого складу електротранспорту [Текст] / В. М. Шавкун, С. П. Шацький // комунальне господарство міст: наук.-техн. зб. – ХНАМГ.: технічні науки і архітектура, 2011. – Вип. 101. – С. 265-269.
- 49.Бабанин, А. Б. Научные основы совершенствования технологии контроля, диагностирования и материально-технического обеспечения при техническом обслуживании локомотивов [Текст]: Дис. д-ра техн. наук: 05.22.07 /

- А. Б. Бабанин. – Х: УкрДУЗТ, 2001. – 376 с.
50. Капица, М. И. Определение системы диагностирования ТЭД с учетом выбора предпочтительных элементов с изменяющейся интенсивностью отказов [Текст] / М. И. Капица, В. В. Лагута, Т. Н. Сердюк // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2017. – № 4. – Харьков: Вид-во УкрДУЗТ, 2017. – С. 9-15.
51. Лагута, В. В. Моделирование эффективной системы диагностирования тягового электродвигателя с учетом выбора вариантов комплектации его элементов [Текст] / В. В. Лагута, Т. Н. Сердюк // Збірник наукових праць ДНУЗТ ім. акад. В. Лазаряна «Транспортні системи та технології перевезень». – 2017. – Вип. 13. – С. 52-58.
52. Худоногов, А. М. Инновационная технология повышения и продления ресурса тягового подвижного состава [Текст] / А. М. Худоногов, Е. М. Лыткина, Е. Ю. Дульский // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование / Иркутский гос. ун-т путей сообщения. – Иркутск, 2012. – № 4 (36). – С. 102-108.
53. Дубинин, А. Е. Устройство телеметрического контроля тягового электродвигателя [Текст] / А. Е. Дубинин, А. А. Дубинин, Н. Н. Цаплин // I Международная научно-практическая конференция «Инновации в системах обеспечения движения поездов» Тезисы, 2016. – Самара: СамГУПС, 2016. – 64 с.
54. Jian ZHANG, Ji-en MA, Xiao-yan HUANG, et al., 2015. Optimal condition-based maintenance strategy under periodic inspections for traction motor insulations. Journal of Zhejiang University-SCIENCE A (Applied Physics & Engineering), 16(8). – p. 597-606. [doi:10.1631/jzus.A1400311]
55. Tang, D.Y., Makis, V., Jafari, L., et al., 2015. Optimal maintenance policy and residual life estimation for a slowly degrading system subject to condition monitoring. Reliability Engineering & System Safety, 134. – p. 198-207. [doi:10.1016/j.ress.2014.10.015]
56. Яцун, М. А. Експлуатація та діагностування електричних машин і апаратів

- [Текст] / М. А. Яцун, А. М. Яцун. – Львів.: «Львівська політехніка», 2010. – 228 с.
57. Ященко, С. А. Модернизация и исследование системы электрической изоляции класса нагревостойкости Н тяговых электродвигателей, эксплуатируемых в экстремальных условиях [Текст]: Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук: 05.22.07 / С. А. Ященко. – М.: МЭИ(ТУ), 2009. – 20 с.
58. Серебряков, А.С. Новый способ измерения установившегося значения сопротивления изоляции тяговых двигателей [Текст] / А. С. Серебряков // Наука и техника транспорта. – 2003. – №1. – с. 61-67.
59. Серебряков, А.С. Способ измерения установившегося значения сопротивления изоляции / А. С.Серебряков // Электричество. - 1999. – №5. – С. 40-43.
60. Ваксер, Н. М. Изоляция электрических машин [Текст]: Учебное пособие / Н. М. Ваксер // Ленинградский политехн. ин-т. – Л., 1985. – 162 с.
61. Привалов, Е.Е. Диагностика внешней изоляции электрического оборудования: уч. Пособие. / Привалов Е. Е. // –М. –Берлин: Директ-Медиа, 2015. – 72 с.
62. Гиоев, З. Г. Техническое обслуживание и ремонт тяговых электрических машин и трансформаторов электроподвижного состава: учебник для студентов вузов, обучающихся по техническим специальностям / З. Г. Гиоев, А. В. Зубарев// ФГБОУ ВПО РГУПС (Филиал в г. Краснодаре). – Краснодар: Издательский Дом – Юг, 2013. – 288 с.
63. Глущенко М.Д. Проблемы эксплуатационной диагностики тяговых электродвигателей подвижного состава и пути их решения: Дис. на соискание ученой степени д-ра техн. наук. М.: МИИТ, 1999. – 329 с.
64. Дурандин М.Г. Информативность процессов ионизации в диагностических обследованиях изоляции тяговых двигателей локомотивов: Дис. на соискание ученой степени канд. техн. наук. Екатеринбург, 1994. – 325 с.
65. Попов В.Н. Совершенствование методов прогнозирования состояния изоляции электрических машин подвижного состава: Дис. на соискание ученой степени канд. техн. наук. СПб, 1993. – 207 с.

66. Серебряков А.С. Методы и средства для диагностики изоляции электрических машин и аппаратов ее защиты: Дис. на соискание ученой степени д-ра техн. наук. М.: МИИТ, 2000. – 438 с.
67. Гроев З.Г. Основы виброакустической диагностики тяговых приводов локомотивов: Дис. на соискание ученой степени д-ра техн. наук. Ростов-на-Дону: РГУПС, 1998. – 735 с.
68. Catalin Rusu-Zagar, Petru V. Notingher, Cristina Stancu . “Ageing and degradation of electrical machines insulation” . Journal of International Scientific Publications: Materials, Methods and Technologies Volume 8, 2014. P. 526-546. ISSN 1314-7269 (Online), Published at: <http://www.scientific-publications.net>
69. Rusu-Zagar, C, Notingher, PV, Navrapescu, V, Mares, G, Rusu-Zagar, G, Setnescu, T & Setnescu, R 2013, “Method for Estimating the Duration of Life Insulation of Electric Motors, Proceedings of 8th International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering, Bucharest, Paper MATEL P3, pp. 1-6.
70. IEC 60505, ed4.0, 2011-07-11, Evaluation and qualification of electrical insulation systems. – 29.080.30 - Insulation systems. Access Mode: <https://webstore.iec.ch/publication/2276>
71. Привалов Е.Е. Диагностика внешней изоляции электрического оборудования: уч. Пособие. – М. – Берлин: Директ-Медиа, 2015. – 72с.
72. Шавкун, В. М. Методи моніторингу параметрів тягових електричних двигунів в процесі експлуатації рухомого складу міського електротранспорту [Текст] / В. М. Шавкун, В. М. Бушма // Комунальне господарство міст: наук.-техн. зб. – ХНАМГ.: технічні науки і архітектура, 2011. – Вип. 97. – С. 272-278.
73. Оленцевич, Д. А. Совершенствование системы технического содержания изоляции тяговых двигателей электровозов [Текст]: Дис. канд. техн. наук: 05.22.07/ Д. А. Оленцевич // ИрГУПС, 2010. – 192 с.
74. Jian ZHANG, Ji-en MA, Xiao-yan HUANG, et al., 2015. Optimal condition-based maintenance strategy under periodic inspections for traction motor insulations. Journal of Zhejiang University-SCIENCE A (Applied Physics & Engineering), 16(8):597-606. [doi:10.1631/jzus.A1400311]

- 75.Шавкун, В. М. До питання підвищення надійності тягових електричних двигунів та ресурсозбереження на рухомому складі міського електричного транспорту [Текст] : Наук.-техн. зб./ В. М. Шавкун // Комунальне господарство міст:, серія: технічні науки і архітектура. ХНАМГ. – 2010. – Вип. 97. – С. 272-278.
- 76.Бабанин, А. Б. Научные основы совершенствования технологии контроля, диагностирования и материально-технического обеспечения при техническом обслуживании локомотивов [Текст]: Дис. д-ра техн. наук: 05.22.07 / А. Б. Бабанин. – Х: УкрДУЗТ, 2001. – 376 с.
- 77.Notingher, PV & Ploeanu, M 2009, “Accelerated Development of Electrical Trees. Part I: Initiation of Trees”, *EEA - Electrical Engineering, Electronics, Automatics*, Vol. 57, No. 4, pp. 11-19.
- 78.Crine, J-P & Vjih, AK 1985, “Molecular Approach to the Physico-Chemical Factors in the Electric Breakdown of Polymers”, *Applied Physics Communications*, Vol 5, No. 3, pp. 139-63.
- 79.Lewis, TJ 2001, Ageing - A Perspective, *IEEE Electrical Insulation Magazine*, Vol. 17, No. 4, pp. 6-16.
- 80.Junhao Li, Yanming Li, Influencing Factors Investigation of Polarization and Depolarization Current Measurements on Assessment Aging Condition of Power Transformer, *International Review of Electrical Engineering (IREE)*, vol. 5 n. 6, December 2010, pp. 2637-2643.
- 81.A. A. Shayegani, E. Gockenbach, H. Borsi, H. Mohseni, Investigation on the Transformation of Time Domain Spectroscopy data to frequency domain data for impregnated pressboard to reduce measurement time, *Electrical Engineering*, vol. 89 n. 1, June 2005, pp. 11-20.
- 82.T. K. Saha, M. Darveniza, D. J. T. Hill, T. T. Ie, Electrical and chemical diagnostics of transformer insulation part A: Aged transformer samples, *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol.12, pp. 1547–1554, October 1997.
- 83.U. Gäfvert, G. Frimpong, J. Fuhr, Modeling of dielectric measurements on power transformers, *Proc. Cigre*, 1998, pp. 15-103.

84. Jones, JP, Llewellyn, JP & Lewis, TJ 2005, "The contribution of field-induced morphological change to the electrical aging and breakdown of polyethylene", *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, Vol. 12, No. 5, pp. 951- 966.
85. Lewis, TJ 2002, "Polyethylene under Electrical Stress", *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, Vol. 9, No. 5, pp. 717-29.
86. Rowe, SW 2007, "Electrical Ageing of Composites: An Industrial Perspective", *Proceedings of International Conference on Solid Dielectrics*, Winchester, UK, July 8-13, pp. 401-406.
87. Dissado, LA, Mazzanti, G & Montanari, GC 2001, "Elemental strain and trapped space charge in thermoelectrical aging of insulating materials. Life modelling", *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, Vol. 8, No.6, p 966- 971.
88. Mazzanti, G & Montanari, GC 2005, "Electrical aging and life models: the role of space charge", *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, Vol. 12, No. 5, pp. 876-890.
89. LS. Skrupskaya, A.O. Oliinyk, A.A. Sakhno, 2014, "Model building for current transformer paper-oil insulation state diagnostics", ISSN 2074-272X. *Elektrotexnika i elektromexanika*, No 2, pp. 48-51.
90. Ю.Б. Гук, 1990, "Теория надежности в электроэнергетике": Учеб. пособие для вузов, Leningrad: Энергоатомиздат, pp. 53.
91. Ю.А. Фокин, В.А. Туфанов, 1981, "Оценка надежности систем энергоснабжения", Moscow : Энергоатомиздат, pp. 57.
92. О.А. Sakhno, 2012, "The continuous monitoring and remaining life prediction system for high-voltage current transformers". – Manuscript. The thesis for Ph.D. degree obtaining in the specialty 05.14.02 – Electric Power Stations, Grids and Systems. National University "Lviv Polytechnics", Lviv, pp. 7-14.
93. Cox D.R., 1972, "Regression Models and Life-TablesM", *Journal of the Royal Statistical Society, Series B (Methodological)*, Vol. 34, No 2, pp. 187-220.
94. Asadzadeh, S.M., Azadeh, A., 2014. An integrated systemic model for optimization of condition-based maintenance with human error. *Reliability Engineering & System Safety*, 124:117-131. [doi:10.1016/j.ress.2013.11.008].

95. Lu, X.F., Liu, M., 2014. Hazard rate function in dynamic environment. *Reliability Engineering & System Safety*, 130:50-60. [doi:10.1016/j.ress.2014.04.020].
96. Shi, H., Zeng, J.C., 2014. Preventive maintenance strategy based on life prediction. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 20(5):1133-1140 (in Chinese).
97. Yin, H., Zhang, G.J., Zhu, H.P., et al., 2015. An integrated model of statistical process control and maintenance based on the delayed monitoring. *Reliability Engineering & System Safety*, 33:323-333. [doi:10.1016/j.ress.2014.09.020].
98. Tang, D.Y., Makis, V., Jafari, L., et al., 2015. Optimal maintenance policy and residual life estimation for a slowly degrading system subject to condition monitoring. *Reliability Engineering & System Safety*, 134:198-207. [doi:10.1016/j.ress.2014.10.015].
99. Shi, H., Zeng, J.C., 2014. Preventive maintenance strategy based on life prediction. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 20(5):1133-1140 (in Chinese).
100. Montoro-Cazorla, D., Pérez-Ocón, R., 2014. A reliability system under different types of shock governed by a Markovian process and maintenance policy K. *European Journal of Operational Research*, 235(3):636-642. [doi:10.1016/j.ejor.2014.01.021].
101. Lin, Y.H., Li, Y.F., Zio, E., 2014. Multi-state physics model for the reliability assessment of a component under degradation processes and random shocks. *ESREL*, Amsterdam, the Netherlands, p.1-7.
102. Lin, Y.H., Li, Y.F., Zio, E., 2015. Integrating random shocks into multi-state physics models of degradation processes for component reliability assessment. *IEEE Transactions on Reliability*, 64(1): pp. 154-166. [doi:10.1109/TR.2014.2354874].
103. Caballé, N.C., Castro, I.T., Pérez, C.J., et al., 2015. A condition-based maintenance of a dependent degradation threshold-shock model in a system with multiple degradation processes. *Reliability Engineering & System Safety*, 134: pp. 98-109. doi:10.1016/j.ress.2014.09.024].
104. Castro, I.T., Caballé, N.C., Pérez, N.C., 2015. A condition based maintenance for a system subject to multiple degradation processes and external shocks.

- International Journal of Systems Science, 46(9): pp. 1692-1704. [doi:10.1080/00207721.2013.828796].
105. Nefedov, Roman & Loginova, Elena., 2018. Investigation of wear of insulation of traction engines of locomotives in operation. ITM Web of Conferences. 18. 01006: pp. 605-608. [doi: 10.1051/itmconf/20181801006].
106. Jian ZHANG, Ji-en MA, Xiao-yan HUANG, et al., 2015. Optimal condition-based maintenance strategy under periodic inspections for traction motor insulations. Journal of Zhejiang University-SCIENCE A (Applied Physics & Engineering), 16(8): pp. 597-606. [doi:10.1631/jzus.A1400311]
107. Шавкун, В. М. Исследование влияния эксплуатационных факторов на параметры нагружения силового электрооборудования троллейбусов [Текст] / В. М. Шавкун, А. А. Певная, О. Б. Уваров // Символ науки. – 2015. – № 11. – С. 64-67.
108. Лукьянов, С. И. Разработка и внедрение интеллектуальных систем диагностирования технического состояния электрооборудования [Текст] / С. И. Лукьянов, А. С. Карандаев, А. С. Сарваров и др. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г. И. Носова. – 2014. – № 1 (45). – С. 129-134.
109. Olivier Barré, Bellemain Napame. The Insulation for Machines Having a High Lifespan Expectancy, Design, Tests and Acceptance Criteria Issues. Machines 2017, 5(1), p. 7; <https://doi.org/10.3390/machines5010007>
110. Серебряков А.С. Электротехническое материаловедение. Электроизоляционные материалы: Учебное пособие для вузов ж.д. транспорта. – М.: Маршрут, 2005. – 280 с.
111. Красовская С.Н. и др. Текущий ремонт и обслуживание электровозов постоянного тока / С.Н. Красовская, Э.Э. Ридель, Р.Г. Черепашенец. М.: Транспорт, 1989. – 408 с.
112. Капіца М. І. Як відмовитись від передчасного руйнування ізоляції тягових електричних машин локомотивів під час проведення випробувань / М. І. Капіца, В. М. Ляшук, Д. В. Бобир / Зб. наук. пр. Київ. ун-ту економіки і

- технологій трансп. Сер.: Транспортні системи і технології. – К.: КУЕТТ, 2006. – Вип. 9. – С. 69-77.
113. Ященко С. А. Модернизация и исследование системы электрической изоляции класса нагревостойкости Н тяговых электродвигателей, эксплуатируемых в экстремальных условиях. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. – М.: МЭИ(ТУ), 2009. – 20 с.
114. Яцько С.И., Карпенко В.В., Василенко Д.Ю. Исследования устойчивости систем изоляции тяговых электрических машин к воздействию климатических машин к воздействию климатических факторов. Вісник КДУ імені Михайла Остроградського. Випуск 4/2010 (63). Частина 1. Кременчук: КДУ, 2010. – С. 134-140.
115. Восстановление изоляции обмоток тяговых электродвигателей: Методические указания по курсовому и дипломному проектированию / сост. В.Г. Коршиков. – Новосибирск: НГТУ, 2002. – 48 с.
116. Исмаилов Ш.К., Смирнов В.П., Худоногов А.М. Исследование режимов и процессов сушки увлажненной изоляции обмоток тяговых электрических машин. Известия вузов. № 12. – М.: Машиностроение, 2006. С. 28-36.
117. Серебряков А.С., Автаев М.А. Определение параметров схемы замещения корпусной изоляции тяговых электродвигателей по абсорбционным характеристикам Известия академии инженерных наук им А М Прохорова, юбилейный выпуск, Т 15. М., Н-Новгород: АИН, 2005. – С. 40-43
118. Серебряков А. С., Автаев М. А. Определение параметров схемы замещения корпусной изоляции тяговых электродвигателей метрополитена Современные проблемы совершенствования работы железнодорожного транспорта Межвузовский сборник научных трудов. М.: РГОТУПС, 2004. – С. 286-291.
119. Серебряков А. С., Автаев М.А. Определение параметров схемы замещения корпусной изоляции электрических машин по экспериментальным

- данным Труды 5-й Международной конференции «Электротехнические материалы и компоненты». Крым, Алушта, 2004. – С. 53-55.
120. Капіца М. І. Аналіз технічного стану і розробка пропозицій з раціонального утримання локомотивів / М. І. Капіца. Д., 2003. 114 с. № 32.28.02.03; Держ № 0102U005869.
121. Глинка Г.Я., Якубец М.С. Классификация степени старения изоляции обмоток электрических машин // Электротехника. № 3. М.: МИИТ, 2005. – С. 60-64.
122. Касаткин Г.С., Липатов Н.Н., Федотов В.В. Исследование влияния емкостей изоляции на токи и напряжения в высоковольтных конструкциях: Методические указания к лабораторным работам. М.: МИИТ, 2000. – 24с.
123. Правила ремонту електричних машин електровозів і електропоїздів. № ЦТ – 0063: наказ Міністерства транспорту України від 27.02.2003 р. № 53 – Ц. – К: ТОВ „НВП Поліграфсервіс”, 2003. – 286 с.
124. Боднар Б. Є. Діагностування та прогнозування стану ізоляції обмоток тягових електродвигунів локомотивів / Б. Є. Боднар, М. І. Капіца, В. М. Ляшук // Вісн. Східноукр. нац. ун-ту ім. В. Даля. – Луганськ, 2002. – № 6(52). – С. 21–25.
125. Федоров В.К., Сергеев Н.П., Кондрашин А.А. Контроль и испытания в проектировании и производстве радиоэлектронных средств. М.: Техносфера, 2005. – С. 491-500.
126. Соломенцев К.Ю. Методы и устройства контроля сопротивления изоляции и емкости для систем управления электроэнергетическими объектами: Автореф. дис. на соискание ученой степени кандидата технических наук / К. Ю. Соломенцев. Новочеркасск, 2009. – 20 с.
127. Иванов Е.А., Кузнецов С.Е. Методы контроля изоляции судовых электроэнергетических систем: учеб. пос. /Е.А.Иванов, С.Е.Кузнецов. – СПб.: Элмор, 1999. – 80 с.
128. Сви П.М. Методы и средства диагностики оборудования высокого напряжения/ П.М. Сви. – М.: Энергоатомиздат, 1992. – 240 с.

129. Серебряков А.С. Оценка состояния корпусной изоляции тяговых электродвигателей по абсорбционным характеристикам // Электричество. 2004. № 6. – с. 8-42.
130. Серебряков А. С., Автаев М. А. Оценка состояния корпусной изоляции тяговых электродвигателей по заряду абсорбции // Электротехнические комплексы и системы. Межвузовский научный сборник. Уфимский государственный авиационный технический университет. – Уфа.: УГАТУ, 2005. – С. 131-135.
131. Серебряков, А.С. Определение параметров схемы замещения корпусной изоляции тяговых электродвигателей / А.С. Серебряков // Электротехника. – 2009. – №5. – С. 40- 45.
132. Лачин В.И. Влияние токов абсорбции на измерение сопротивления изоляции/ В.И. Лачин В.И., К.Ю. Соломенцев, Нгуен Куок Уи // Микропроцессорные, аналоговые и цифровые системы: проектирование и схемотехника, теория и вопросы применения: материалы XIII Междунар. науч.-практ. конф., г. Новочеркасск, 23 апр. 2013 г. / Юж.-Рос. гос. техн. ун-т (НПИ). – Новочеркасск: ЮРГТУ (НПИ), 2013. – С. 31-33.
133. Серебряков А. С., Автаев М.А. Диагностика изоляции электрических машин по возвратному напряжению//Транспорт Наука, техника, управление. Сборник обзорной информации. – М.: ВИНТИ РАН, 2002. – №8. – С. 53-54.
134. Серебряков А. С., Автаев М.А. Диагностика изоляции тяговых электрических машин по возвратному напряжению // Труды четвертого международного симпозиума Элмаш-2002: «Перспективы развития электротехнического оборудования для энергетики, транспорта, нефтяной и газовой промышленности». – М.: Элмаш, 2002. – С. 87-89.
135. Серебряков А. С., Автаев М.А. Анализ процессов при измерении сопротивления двухслойной изоляции // Сборник материалов Всероссийской научно-технической конференции «Наука - производство - технологииэкология». Т2. Материалы ЭТФ. – Киров, 2002. – С. 42-44.
136. Лачин В.И. Методы и устройства контроля состояния электро-

- энергетических объектов с дискретно-распределенными параметрами
Монография / В.И Лачин, К.Ю Соломенцев; Юж.-гос. техн. ун-т (НПИ). –
Новочеркасск: ЮРГТУ(НПИ), 2012. – 342 с.
137. Серебряков А.С., Гут В.А. Оценка состояния корпусной изоляции тяговых электродвигателей ДК-117 по заряду абсорбции // Информационно-управляющие системы на железнодорожном транспорте. – Харьков. – 2000. – № 3. – С. 78-80.
138. Ляшук В. Устройство для оценки состояния изоляции обмоток тяговых электродвигателей локомотивов / В. Ляшук, Я. Савич, М. Капица // Зб. наук. пр. Київ. ун-ту економіки і технологій трансп. Сер.: Транспортні системи і технології. К.: КУЕТТ, 2003. – Вип. 1-2. – С. 72-79
139. Капица М. И. Результаты опытной эксплуатации устройства для замеров параметров изоляции обмоток возбуждения тяговых электродвигателей / М. И. Капица, В. М. Ляшук, В. А. Матяш // Зб. наук. пр. УкрДАЗТ. – Х.: УкрДАЗТ, 2003. – Вип. 54. – С. 132-137.
140. Капица М. И. Диагностические испытания изоляции электроподвижного состава / М. И. Капица, Т. Ф. Кузнецов, В. М. Ляшук. // Проблемы и перспективы развития транспортных систем и строительного комплекса: тез. докл. Междунар. научно-прак. конф. Ч. 1 / под общ. ред. В. И. Сенько. – Гомель: БелГУТ, 2003. – С. 25-26.
141. Капіца М. І. Неруйнівні методи контролю стану ізоляції електричних машин та високовольтних силових кабелів / М. І. Капіца, Д. В. Бобир // Зб. наук. пр. ДонІЗТ. – 2007. – Вип. 12. – С. 127-138.
142. Підвищення надійності тягових електричних машин локомотивів: звіт по НДР: № 0118U005059. – Д.: ДНУЗТ, 2019. – 116 с.
143. Впровадження неруйнівної системи діагностування ізоляції тягових електричних машин локомотивів: звіт по НДР № ПР/НТО-06578/НЮ. – Д.: ДНУЗТ, 2006. – 114 с.
144. Долгова А. В., Шкодун П. К. К вопросу о совершенствовании технологии ремонта тяговых электродвигателей локомотивов // Молодой

- ученый. – 2010. – №1-2. Т. 1. – С. 51-54.
145. Правила ремонта электрических машин электроподвижного состава ЦТ-ЦТВР/4782. М.: Транспорт, 1992. – 44 с.
146. Фоменко В.К. Разработка технологии тепловизионного контроля технического состояния якорей тяговых электродвигателей локомотивов / В.К. Фоменко // Автореф. дисс. на соискание ученой степени кандидата техн. наук / Омск, 2009. – с. 4-7.
147. Серебряков А.С., Автаев М.А. Современные методы диагностики корпусной изоляции тяговых электродвигателей Труды третьей международной конференции «Электрическая изоляция-2002» (Proceedings 111 International Conference on Electrical Insulation-2002). – СПб, 2002. – С. 286-287
148. Овчаренко С. М. Повышение эффективности системы диагностирования тепловозов / С.М. Овчаренко // Автореф. дисс. на соискание ученой степени доктора техн. Наук. – Омск: ОмГУПС, 2007. – с. 5-6.
149. Боднар Б. Є. Аналіз технічного стану локомотивів після продовження ресурсу і розробка методики їх раціонального утримання та ремонтів / Б. Є. Боднар. – Д.: ДНУЗТ, 2002. – 125 с. – № 32.00.01.03; Держ. № 0101U006020.
150. Боднар Є. Б. Підвищення експлуатаційної надійності локомотивів шляхом впровадження раціональної системи утримання: автореф. дис. канд. техн. наук / Є. Б. Боднар. – Х., 2004. – 17 с.
151. Аналіз технічного стану та розробка пропозицій з раціонального утримання локомотивів: звіт по НДР № 32.28.02.03, № 0102U005869. – Д.: ДНУЗТ, 2003. – 71 с.
152. Впровадження неруйнівної системи діагностування ізоляції тягових електричних машин локомотивів: звіт по НДР № ПР/НТО-06578/НЮ. – Д.: ДНУЗТ, 2006. – 114 с.
153. Разгонов А.П., Дунаев Д.В. Надійність та діагностування./ Методичні вказівки до практичних занять. – Д.: ДНУЗТ, 2010. – 23 с.
154. Босов А.А. Теоретические основы и методика расчета плановых

- восстановлений локомотивов и вагонов: Дис. ... доктора техн. Наук. – Л., 1986. – 283 с.
155. Босов А. А. Розробка теоретичних основ і методики раціонального утримання рухомого складу з урахуванням його технічного стану / А. А. Босов. – Д., 2003. – 118 с. – № 93.00.00.01; Держ. № 0102U000552
156. Босов А.А. Методические указания по курсу «Теория надежности и планирование эксперимента». –Д.: ДИИТ, 1979. – 49 с.
157. Боднарь Е.Б., Капица М.И., Лагута В.В. Постановка задачи определения продолжительности зон Н–характеристики при расчетах на надежность технических объектов. –Луганск: Восточноукр. нац. ун-т. им.В.Даля, 2003. – №22. – С. 129-131.
158. Капица М.И., Лагута В.В. Метод решения задачи определения продолжительности зон Н–характеристики при расчетах на надежность технических объектов. – Луганск: Восточноукр. нац. ун-т. им.В.Даля, 2003. – №24. – С.120-123.
159. Catalin Rusu-Zagar, Petru V. Notingher, Cristina Stancu . “Ageing and degradation of electrical machines insulation” . Journal of International Scientific Publications: Materials, Methods and Technologies Volume 8, 2014. P. 526-546. ISSN 1314-7269 (Online), Published at: <http://www.scientific-publications.net>
160. Rusu-Zagar, C, Notingher, PV, Navrapescu, V, Mares, G, Rusu-Zagar, G, Setnescu, T & Setnescu, R 2013, “Method for Estimating the Duration of Life Insulation of Electric Motors, Proceedings of 8th International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering, Bucharest, Paper MATEL P3, pp. 1-6.
161. Измерение параметров качества электрической изоляции: [Электрон. ресурс] / – Режим доступа: <http://www.sonel.ru/ru/biblio/article/isolation/>.
162. Прикладная статистика: Классификация и снижение размерности: Справочное издание. / С.А.Айвазян, В.М.Бухштабер, И.С.Енюков, Л.Д.Мешалкин; Под рад. С.А.Айвазяна. – М.: Финансы и статистика, 1989. – 607с.
163. Электронный учебник StatSoft. Кластерный анализ. Режим доступа:

<http://ns.dsmu.donetsk.ua/~statbook/modules/stcluan.html>.

164. Мандель И.Д. Кластерный анализ. – М.: Финансы и статистика, 1988. – 176 с.
165. Ерофеев А.А. Теория автоматического управления. – СПб.: Политехника, 2008. – 302 с.
166. T. K. Saha, M. Darveniza, D. J. T. Hill, T. T. Ie, Electrical and chemical diagnostics of transformer insulation part A: Aged transformer samples, IEEE Transactions on Power Delivery, vol.12, pp. 1547–1554, October 1997.
167. Németh, E.: Zerstückungsfreie Prüfung von Isolatio-nen mit der Methode der Entlade- und Rückspan-nungen. IWK'66, Ilmenau, Germany, (1966), pp. 87-91.
168. Németh, E.: Practical experiences of diagnostic testing of power cable lines by the voltage-response method. IWK'95, Ilmenau, Germany, (1995), pp. 699- 708.
169. Статистические методы для ЭВМ / Под ред. К. Энслейна, Э. Релстона, Г.С. Уилфа; Пер. с англ. / Под ред. М.Б. Малютова. – М.: Наука, 1986. – 464 с.
170. Капіца М. І. Виявлення зв'язку між показниками надійності та фізичними факторами при прогнозуванні надійності електричних машин локомотивів / М. І. Капіца, В. І. Чабанюк // Вісн. Східноукр. нац. ун-ту ім. В. Даля. – Луганськ, 2004. № 8(78). – С. 199-203.
171. Плюта В. «Сравнительный многомерный анализ в экономическом моделировании». – Москва: Финансы и статистика, 1989. – 175 с.
172. Справочник по прикладной статистике. В 2 т. Т. 1. Пер. С англ. / Под ред. Э. Ллойда, У. Ледермана, Ю.Н. Тюрина. – М.: Финансы и статистика, 1989. – 510 с.
173. Поллард Дж. Справочник по вычислительным методам статистики / Пер. с англ. В.С. Занадворова; Под ред. Е.М. Четыркина. – М.: Финансы и статистика, 1982. – 344 с.
174. Меламедов, И. М. Физические основы надежности /И. М. Меламедов – Л.: Энергия , 1970. – С. 132-138.
175. Правила ремонту електричних машин тепловозів. № ЦТ-0064: Наказ Укрзалізниці від 23.02.03 р. № 53-Ц. – К.: ТОВ Видавничий дім „САМ”, –

2003. –148 с.

ДОДАТОК А

Обчислення варіантів відновлення та прогнозування залишкового ресурсу до КР1 та КР1 відповідно до технологій відновлення.

Оболонка обчислення система MAPLE

Варіанти процесів відновлення до КР1 за «Правилами...»,
«технологія відновлення ЛЛРЗ»

***Lkr1* - напрацювання до КР1**

***n* – кількість відновлень; *tau* – період відновлень**

restart;

with(plots) : with(Statistics) : b := 0.000009 :

A0 := 20900.; b := 0.00001015 : b := 0.000009 :

A := (t) → A0·e^{-b·t}; S := (t) → 30.0·t + 50.76; b := 0.000009 :

tau := 180000.; g := 0.40; Amin := 950.; Amin2 := 750.; Lren := (m) → g·tau·m
– $\frac{\ln\left(\frac{Amin}{A0}\right)}{b}$;

1.80000 10⁵

0.40

950.

750.

m → g τ m – $\frac{\ln\left(\frac{Amin}{A0}\right)}{b}$

n := 3; tau := 180000.;

3 1.80000 10⁵

Lkr1 := Lren(n);

5.594491614 10⁵

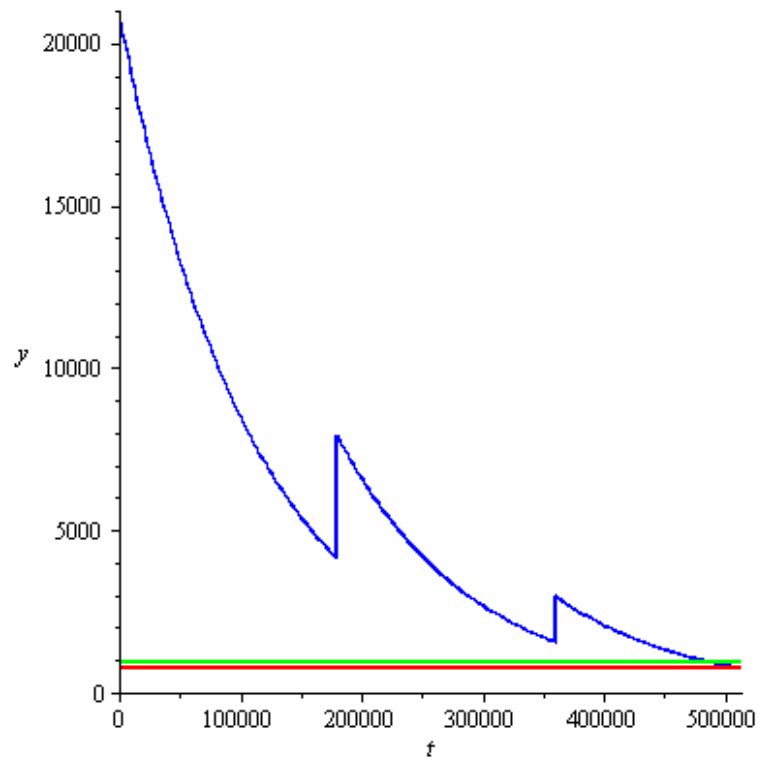
$\text{solve}(A0 \cdot e^{-b \cdot t} = Amin, t);$

3.434491615 10⁵

$Lkr1 := \text{solve}\left(A0 \cdot e^{-b \cdot \left(t - g \cdot \text{tau} \cdot \text{trunc}\left(\frac{t}{\text{tau}}\right)\right)} = Amin, t\right);$ $Lkr1 := \text{solve}\left(A0 \cdot e^{-b \cdot \left(t - g \cdot \text{tau} \cdot \text{trunc}\left(\frac{t}{\text{tau}}\right)\right)} = Amin2, t\right);$

4.874491615 10⁵ 5.137145813 10⁵

$\text{display}\left(\text{plot}\left(A0 \cdot e^{-b \cdot \left(t - \text{tau} \cdot g \cdot \text{trunc}\left(\frac{t}{\text{tau}}\right)\right)}, t=0.0..Lkr1, y=0..21000, \text{color}=\text{blue}\right), \text{plot}(Amin, t=0.0..Lkr1, \text{color}=\text{green}), \text{plot}(Amin2, t=0.0..Lkr1, \text{color}=\text{red})\right);$



$n := 4; \text{tau} := 180000;$

4

1.80000 10⁵

$Lkr1 := Lren(n);$

6.314491614 10⁵

$\text{solve}(A0 \cdot e^{-b \cdot t} = Amin, t);$

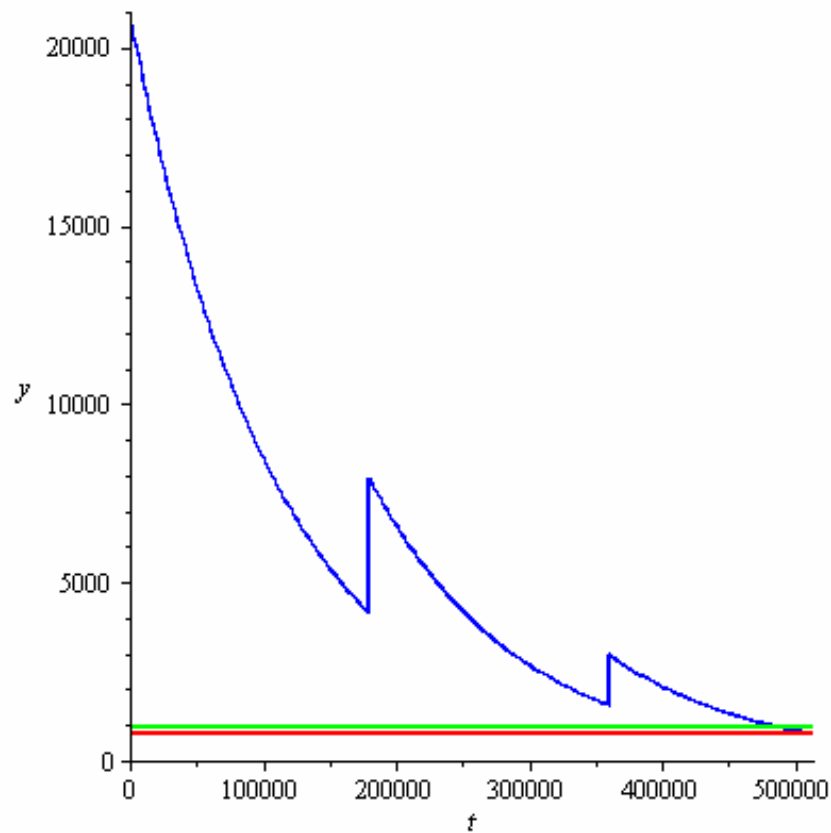
3.434491615 10⁵

$$Lkr1 := \text{solve}\left(A0 \cdot e^{-b \cdot \left(t - g \cdot \text{tau} \cdot \text{trunc}\left(\frac{t}{\text{tau}}\right)\right)} = Amin, t\right); \quad Lkr1 := \text{solve}\left(A0 \cdot e^{-b \cdot \left(t - g \cdot \text{tau} \cdot \text{trunc}\left(\frac{t}{\text{tau}}\right)\right)} = Amin2, t\right);$$

4.874491615 10⁵

5.137145813 10⁵

$$\text{display}\left(\text{plot}\left(A0 \cdot e^{-b \cdot \left(t - \text{tau} \cdot g \cdot \text{trunc}\left(\frac{t}{\text{tau}}\right)\right)}, t=0.0..Lkr1, y=0..21000, \text{color}=\text{blue}\right), \text{plot}(Amin, t=0.0..Lkr1, \text{color}=\text{green}), \text{plot}(Amin2, t=0.0..Lkr1, \text{color}=\text{red})\right);$$



$$n := 2; \text{tau} := 180000;$$

2

1.80000 10⁵

$$Lkr1 := Lren(n);$$

4.874491614 10⁵

$$\text{solve}(A0 \cdot e^{-b \cdot t} = Amin, t);$$

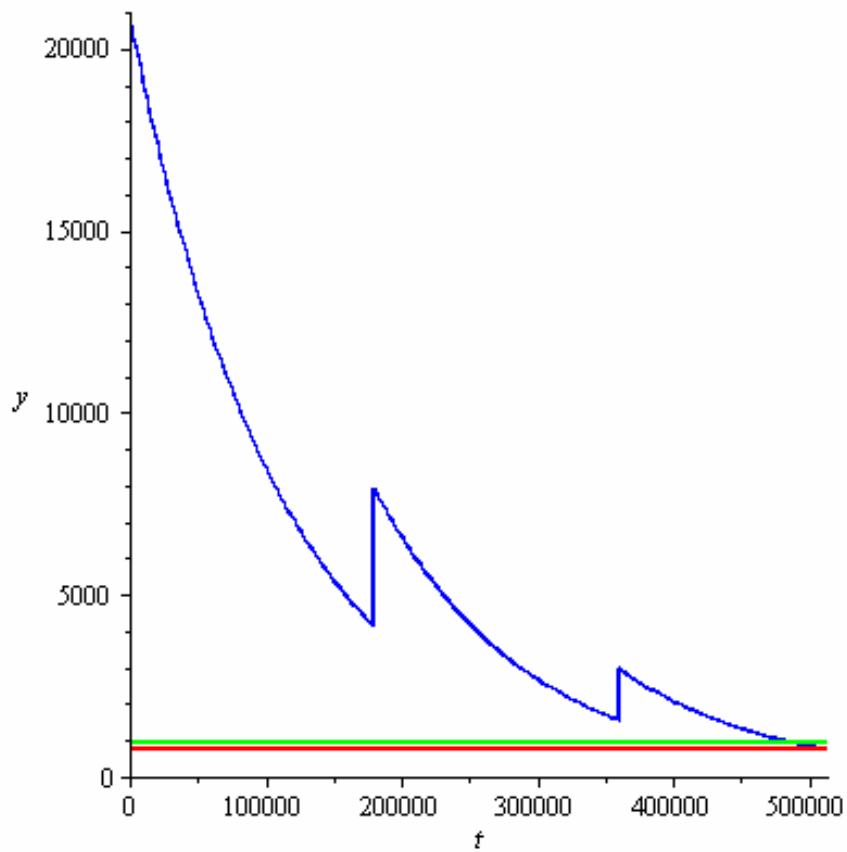
3.434491615 10⁵

$$Lkr1 := \text{solve}\left(A0 \cdot e^{-b \cdot \left(t - g \cdot \text{tau} \cdot \text{trunc}\left(\frac{t}{\text{tau}}\right)\right)} = Amin, t\right); \quad Lkr1 := \text{solve}\left(A0 \cdot e^{-b \cdot \left(t - g \cdot \text{tau} \cdot \text{trunc}\left(\frac{t}{\text{tau}}\right)\right)} = Amin2, t\right);$$

4.874491615 10⁵

5.137145813 10⁵

$$\text{display}\left(\text{plot}\left(A0 \cdot e^{-b \cdot \left(t - \text{tau} \cdot g \cdot \text{trunc}\left(\frac{t}{\text{tau}}\right)\right)}, t=0.0..Lkr1, y=0..21000, \text{color}=\text{blue}\right), \text{plot}(Amin, t=0.0..Lkr1, \text{color}=\text{green}), \text{plot}(Amin2, t=0.0..Lkr1, \text{color}=\text{red})\right);$$



$$n := 3; \text{tau} := 150000;$$

3

1.50000 10⁵

$$Lkr1 := \text{Lren}(n);$$

5.234491614 10⁵

$\text{solve}(A0 \cdot e^{-b \cdot t} = Amin, t);$

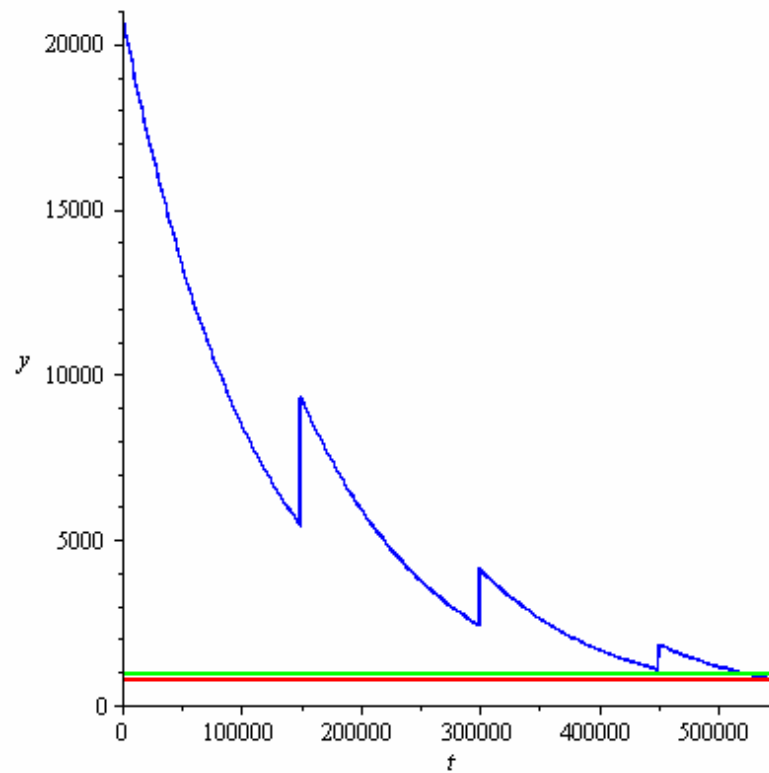
3.434491615 10⁵

$Lkr1 := \text{solve}\left(A0 \cdot e^{-b \cdot \left(t - g \cdot \text{tau} \cdot \text{trunc}\left(\frac{t}{\text{tau}}\right)\right)} = Amin, t\right);$ $Lkr1 := \text{solve}\left(A0 \cdot e^{-b \cdot \left(t - g \cdot \text{tau} \cdot \text{trunc}\left(\frac{t}{\text{tau}}\right)\right)} = Amin2, t\right);$

5.234491615 10⁵

5.497145813 10⁵

$\text{display}\left(\text{plot}\left(A0 \cdot e^{-b \cdot \left(t - \text{tau} \cdot g \cdot \text{trunc}\left(\frac{t}{\text{tau}}\right)\right)}, t=0.0..Lkr1, y=0..21000, \text{color}=\text{blue}\right), \text{plot}(Amin, t=0.0..Lkr1, \text{color}=\text{green}), \text{plot}(Amin2, t=0.0..Lkr1, \text{color}=\text{red})\right);$



$n := 3; \text{tau} := 120000;$

3

1.20000 10⁵

$Lkr1 := \text{Lren}(n);$

4.874491614 10⁵

```
solve(A0·e-b·t = Amin, t);
```

3.434491615 10⁵

```
Lkr1 := solve(A0·e-b·(t-g·tau·trunc( $\frac{t}{\text{tau}}$ )) = Amin, t); Lkr1 := solve(A0
```

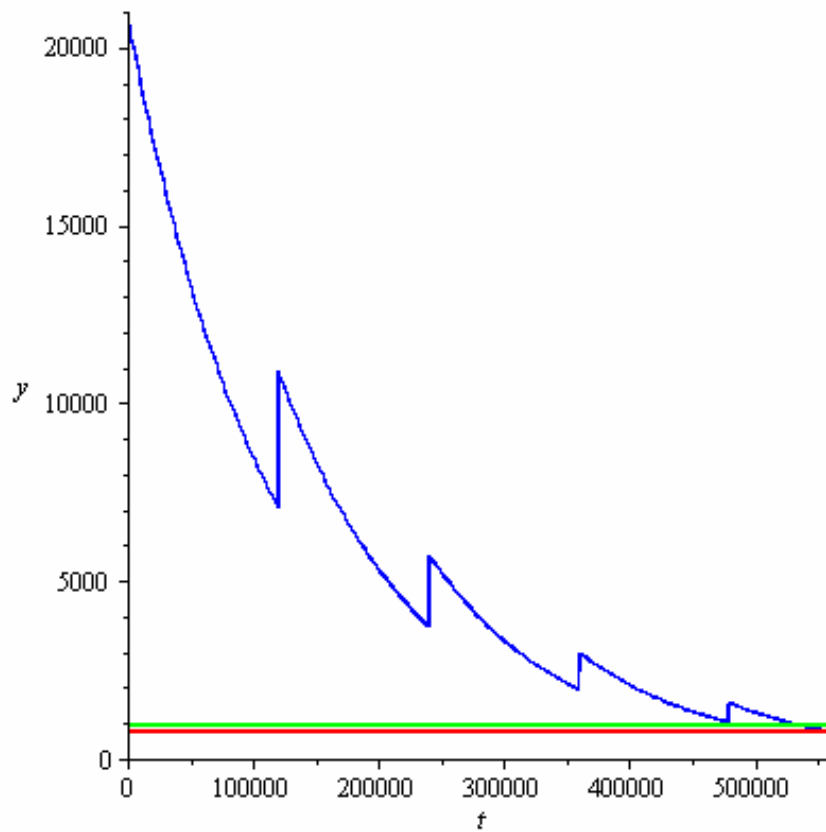
```
·e-b·(t-g·tau·trunc( $\frac{t}{\text{tau}}$ )) = Amin2, t);
```

5.354491615 10⁵

5.617145813 10⁵

```
display(plot(A0·e-b·(t - tau·g·trunc( $\frac{t}{\text{tau}}$ )) , t=0.0..Lkr1, y=0..21000, color=blue),
```

```
plot(Amin, t=0.0..Lkr1, color=green), plot(Amin2, t=0.0..Lkr1, color=red));
```



```
n := 3; tau := 250000.;
```

3

2.50000 10⁵

```
Lkr1 := Lren(n);
```

6.434491614 10⁵

$\text{solve}(A0 \cdot e^{-b \cdot t} = Amin, t);$

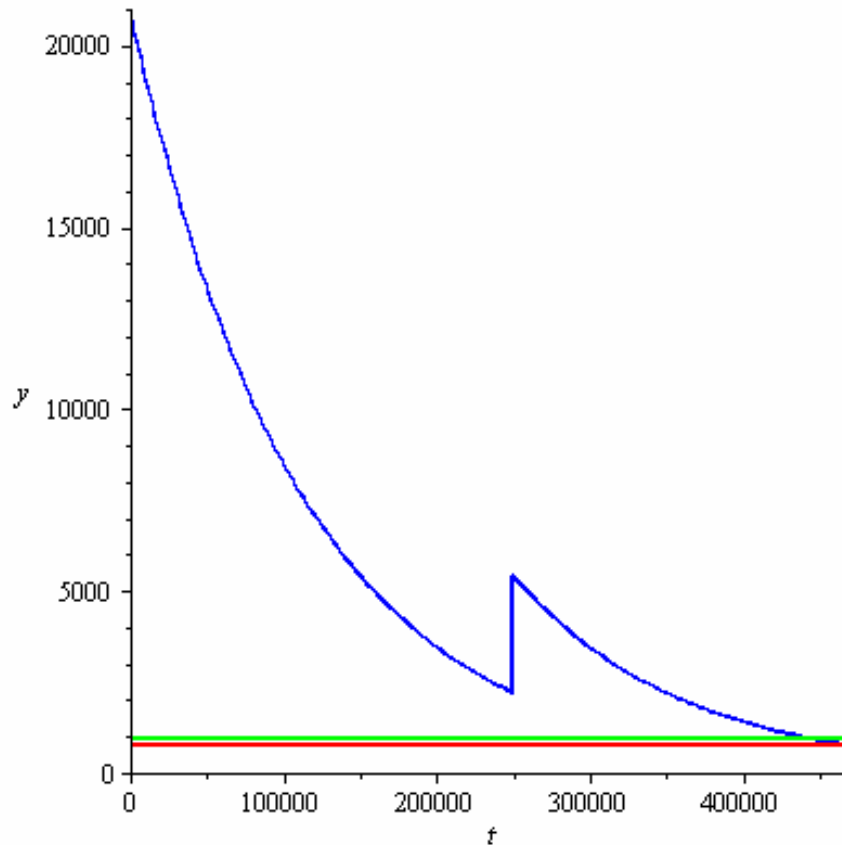
3.434491615 10⁵

$Lkr1 := \text{solve}\left(A0 \cdot e^{-b \cdot \left(t - g \cdot \text{tau} \cdot \text{trunc}\left(\frac{t}{\text{tau}}\right)\right)} = Amin, t\right);$ $Lkr1 := \text{solve}\left(A0 \cdot e^{-b \cdot \left(t - g \cdot \text{tau} \cdot \text{trunc}\left(\frac{t}{\text{tau}}\right)\right)} = Amin2, t\right);$

4.434491615 10⁵

4.697145813 10⁵

$\text{display}\left(\text{plot}\left(A0 \cdot e^{-b \cdot \left(t - \text{tau} \cdot g \cdot \text{trunc}\left(\frac{t}{\text{tau}}\right)\right)}, t=0.0..Lkr1, y=0..21000, \text{color}=\text{blue}\right), \text{plot}(Amin, t=0.0..Lkr1, \text{color}=\text{green}), \text{plot}(Amin2, t=0.0..Lkr1, \text{color}=\text{red})\right);$



$n := 3; \text{tau} := 240000;$

3

2.40000 10⁵

$Lkr1 := Lren(n);$

6.314491614 10⁵

$\text{solve}(A0 \cdot e^{-b \cdot t} = Amin, t);$

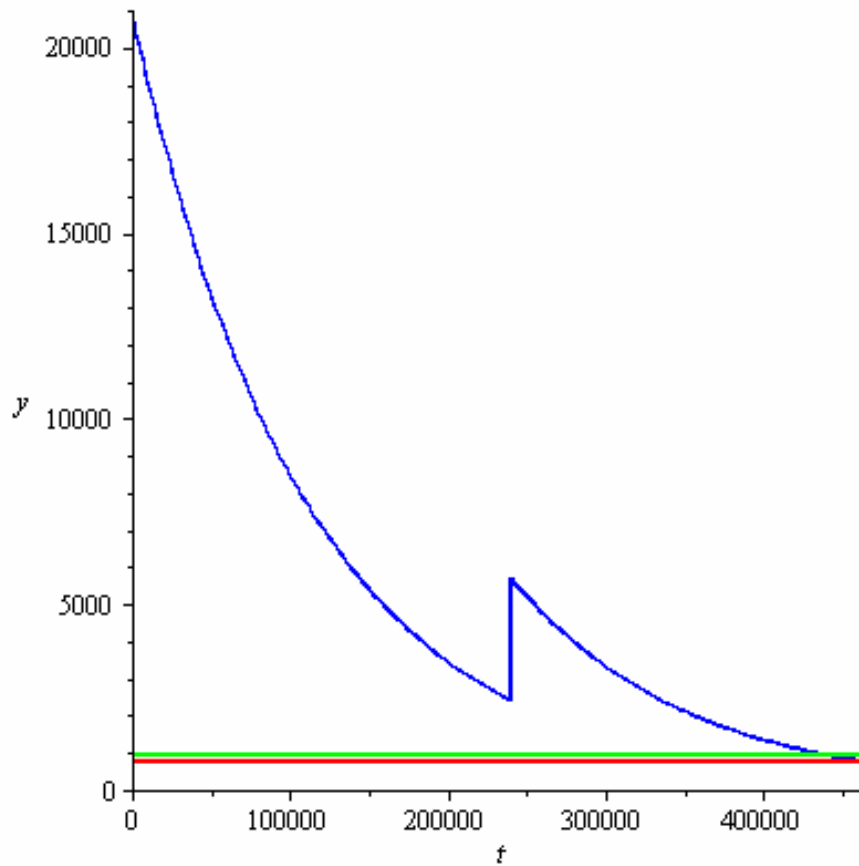
3.434491615 10⁵

$Lkr1 := \text{solve}\left(A0 \cdot e^{-b \cdot \left(t - g \cdot \text{tau} \cdot \text{trunc}\left(\frac{t}{\text{tau}}\right)\right)} = Amin, t\right);$ $Lkr1 := \text{solve}\left(A0 \cdot e^{-b \cdot \left(t - g \cdot \text{tau} \cdot \text{trunc}\left(\frac{t}{\text{tau}}\right)\right)} = Amin2, t\right);$

4.394491615 10⁵

4.657145813 10⁵

$\text{display}\left(\text{plot}\left(A0 \cdot e^{-b \cdot \left(t - \text{tau} \cdot g \cdot \text{trunc}\left(\frac{t}{\text{tau}}\right)\right)}, t=0.0..Lkr1, y=0..21000, \text{color}=\text{blue}\right), \text{plot}(Amin, t=0.0..Lkr1, \text{color}=\text{green}), \text{plot}(Amin2, t=0.0..Lkr1, \text{color}=\text{red})\right);$



$n := 3; \text{tau} := 300000;$

3.00000 10⁵

$Lkr1 := Lren(n);$

7.034491614 10⁵

$solve(A0 \cdot e^{-b \cdot t} = Amin, t);$

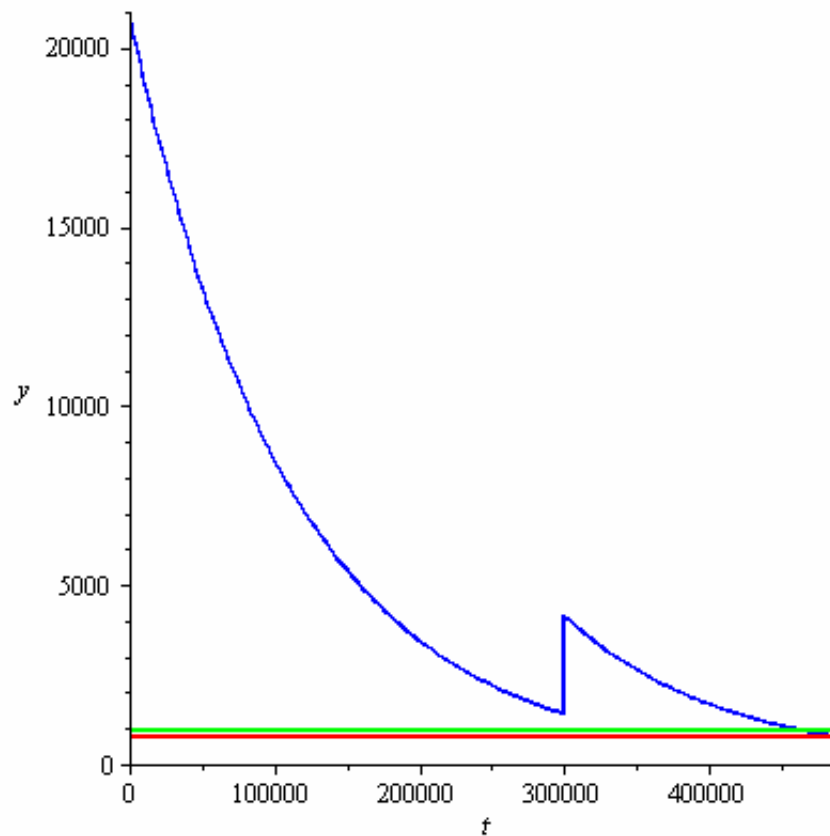
3.434491615 10⁵

$Lkr1 := solve\left(A0 \cdot e^{-b \cdot \left(t - g \cdot \text{tau} \cdot \text{trunc}\left(\frac{t}{\text{tau}}\right)\right)} = Amin, t\right);$ $Lkr1 := solve\left(A0 \cdot e^{-b \cdot \left(t - g \cdot \text{tau} \cdot \text{trunc}\left(\frac{t}{\text{tau}}\right)\right)} = Amin2, t\right);$

4.634491615 10⁵

4.897145813 10⁵

$display\left(\text{plot}\left(A0 \cdot e^{-b \cdot \left(t - \text{tau} \cdot g \cdot \text{trunc}\left(\frac{t}{\text{tau}}\right)\right)}, t=0.0..Lkr1, y=0..21000, color=blue\right), \text{plot}(Amin, t=0.0..Lkr1, color=green), \text{plot}(Amin2, t=0.0..Lkr1, color=red)\right);$



$n := 3; \text{tau} := 320000;$

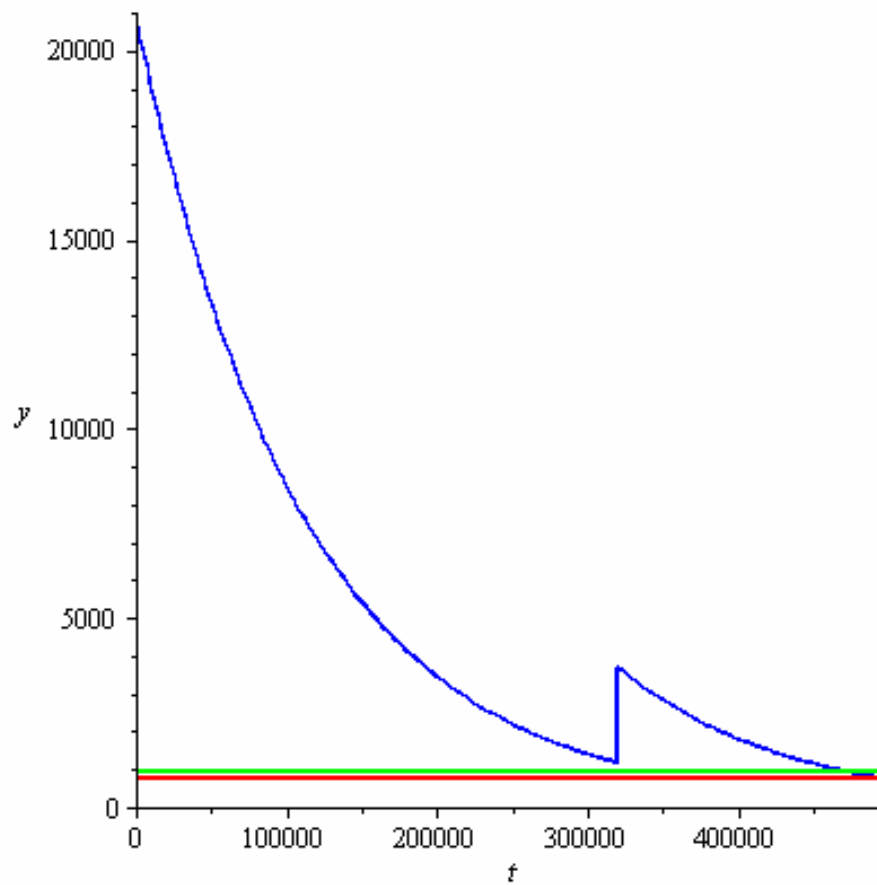
3

3.20000 10⁵

$$Lkr1 := Lren(n);$$
7.274491614 10⁵

$$\text{solve}(A0 \cdot e^{-b \cdot t} = Amin, t);$$
3.434491615 10⁵

$$Lkr1 := \text{solve}\left(A0 \cdot e^{-b \cdot \left(t - g \cdot \text{tau} \cdot \text{trunc}\left(\frac{t}{\text{tau}}\right)\right)} = Amin, t\right); \quad Lkr1 := \text{solve}\left(A0 \cdot e^{-b \cdot \left(t - g \cdot \text{tau} \cdot \text{trunc}\left(\frac{t}{\text{tau}}\right)\right)} = Amin2, t\right);$$
4.714491615 10⁵4.977145813 10⁵

$$\text{display}\left(\text{plot}\left(A0 \cdot e^{-b \cdot \left(t - \text{tau} \cdot g \cdot \text{trunc}\left(\frac{t}{\text{tau}}\right)\right)}, t=0.0..Lkr1, y=0..21000, \text{color}=\text{blue}\right), \text{plot}(Amin, t=0.0..Lkr1, \text{color}=\text{green}), \text{plot}(Amin2, t=0.0..Lkr1, \text{color}=\text{red})\right);$$


$n := 3; \tau := 350000;$

3

$3.50000 \cdot 10^5$

$Lkr1 := Lren(n);$

$7.634491614 \cdot 10^5$

$solve(A0 \cdot e^{-b \cdot t} = Amin, t);$

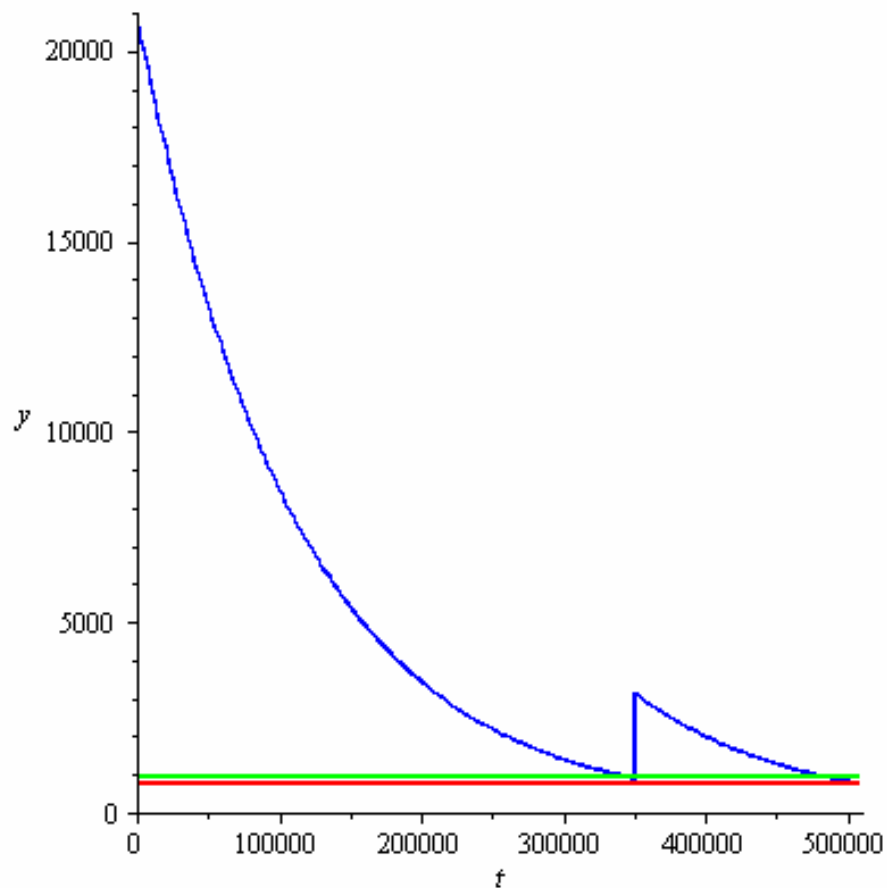
$3.434491615 \cdot 10^5$

$Lkr1 := solve\left(A0 \cdot e^{-b \cdot \left(t - g \cdot \tau \cdot \text{trunc}\left(\frac{t}{\tau}\right)\right)} = Amin, t\right); \quad Lkr1 := solve\left(A0 \cdot e^{-b \cdot \left(t - g \cdot \tau \cdot \text{trunc}\left(\frac{t}{\tau}\right)\right)} = Amin2, t\right);$

$3.434491615 \cdot 10^5$

$5.097145813 \cdot 10^5$

$display\left(\text{plot}\left(A0 \cdot e^{-b \cdot \left(t - \tau \cdot g \cdot \text{trunc}\left(\frac{t}{\tau}\right)\right)}, t=0.0..Lkr1, y=0..21000, color=blue\right), \text{plot}(Amin, t=0.0..Lkr1, color=green), \text{plot}(Amin2, t=0.0..Lkr1, color=red)\right);$



Варіанти процесів відновлення від КР1 до КР2 за «Правилами...»,
«технологія відновлення ЛЛРЗ»

Lkr1 - напрацювання до КР1

Lkr2 - напрацювання до КР2

n – кількість відновлень; tau – період відновлень

restart;

with(plots) : with(Statistics) :

A0 := 20900. : b := 0.000009 :

A := (t) → A0·e^{-b·t} : S := (t) → 30.0·t + 50.76 : solve(A0·e^{-b·t} = A0·0.74, t);

33456.12142

tau := 180000. : g := 0.40 : Amin := 950. : Amin2 := 750. :

gkr := 0.72 : solve(A0·e^{-b·t} = A0·0.74, t);

36500.45189

n := 2 : tau := 180000. : m := 2 :

Lkr1 := Lren(n); Lkr1 := solve(A0·e^{-b·(t - g·tau·trunc($\frac{t}{\tau}$))} = Amin2, t);

4.874491614 10⁵ 5.137145813 10⁵

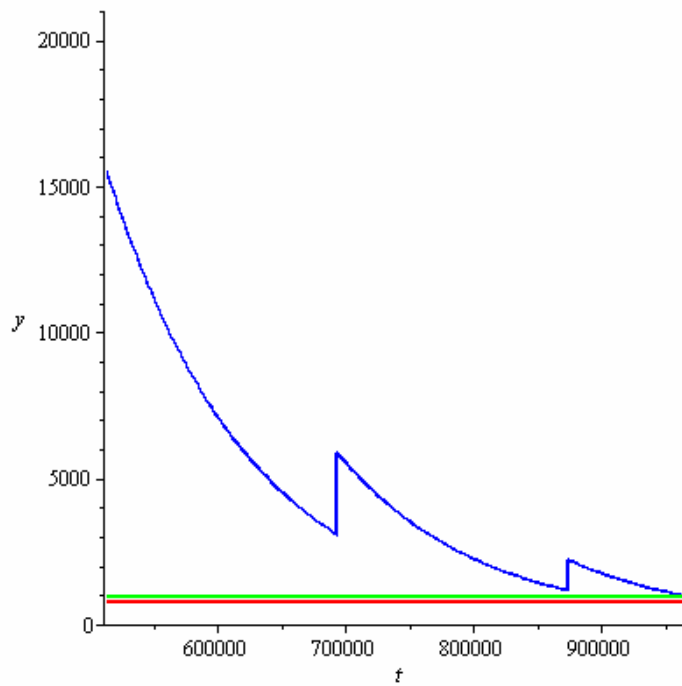
Ln := Lkr1 :

Lkr2 := solve(A0·e^{-b·(t - Ln + 33000. - tau·g·m)} = Amin2, t) :

Ln, Lkr2;

5.137145813 10⁵ 9.681637428 10⁵

display(plot(A0·e^{-b·(t - Ln + 33000. - tau·g·trunc($\frac{t-Ln}{\tau}$))}, t=Ln..Lkr2, y=0..21000, color=blue), plot(Amin, t=Ln..Lkr2, color=green), plot(750, t=Ln..Lkr2, color=red));



$n := 3 : \text{tau} := 150000. :$

$Lkr1 := Lren(n) : Lkr1 := \text{solve}\left(A0 \cdot e^{-b \cdot \left(t - g \cdot \text{tau} \cdot \text{trunc}\left(\frac{t}{\text{tau}}\right)\right)} = Amin2, t\right);$

$5.234491614 \cdot 10^5$

$5.497145813 \cdot 10^5$

$Lkr1; Ln := 450000.;$

$5.497145813 \cdot 10^5$

$4.50000 \cdot 10^5$

;

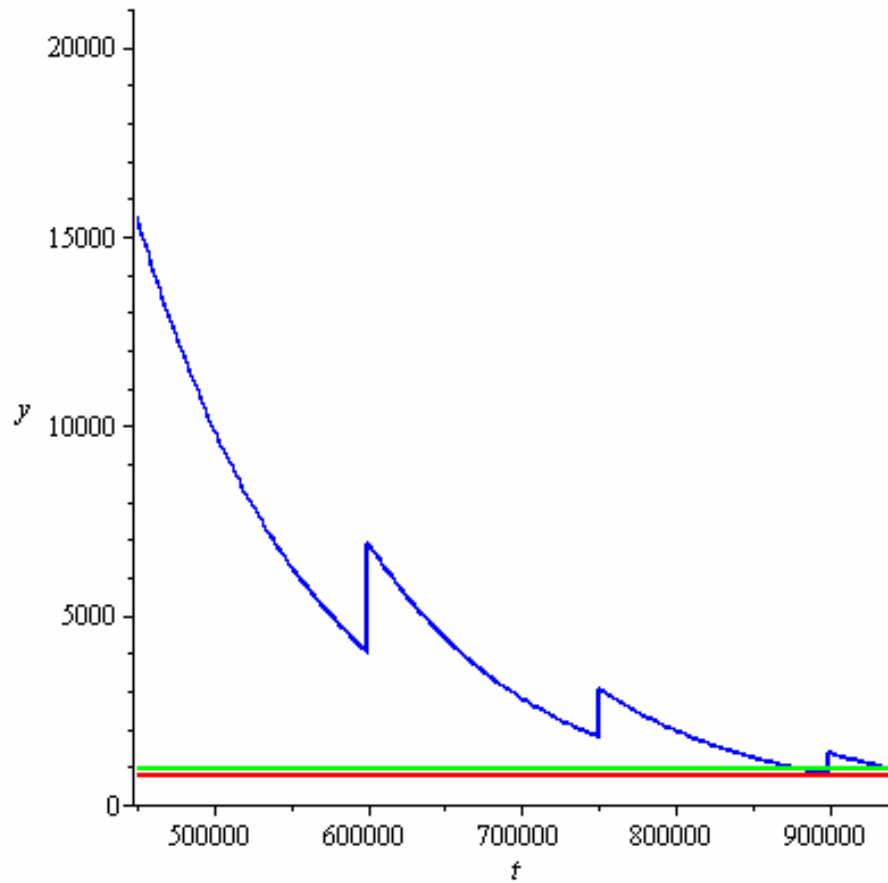
$Lkr2 := \text{solve}\left(A0 \cdot e^{-b \cdot \left(t - Ln + 33000. - \text{tau} \cdot g \cdot n\right)} = Amin, t\right) :$

$Ln; Lkr2;$

$4.50000 \cdot 10^5$

$9.404491615 \cdot 10^5$

$\text{display}\left(\text{plot}\left(A0 \cdot e^{-b \cdot \left(t - Ln + 33000. - \text{tau} \cdot g \cdot \text{trunc}\left(\frac{t - Ln}{\text{tau}}\right)\right)}, t = Ln .. Lkr2, y = 0 .. 21000, \text{color} = \text{blue}\right), \text{plot}\left(Amin, t = Ln .. Lkr2, \text{color} = \text{green}\right), \text{plot}\left(750, t = Ln .. Lkr2, \text{color} = \text{red}\right)\right);$



$n := 3 : \text{tau} := 150000. :$

$Lkr1 := Lren(n) : Lkr1 := \text{solve}\left(A0 \cdot e^{-b \cdot \left(t - g \cdot \text{tau} \cdot \text{trunc}\left(\frac{t}{\text{tau}}\right)\right)} = \text{Amin2}, t\right);$

$5.497145813 \cdot 10^5$

$Ln := Lkr1;$

$5.497145813 \cdot 10^5$

$5.497145813 \cdot 10^5$

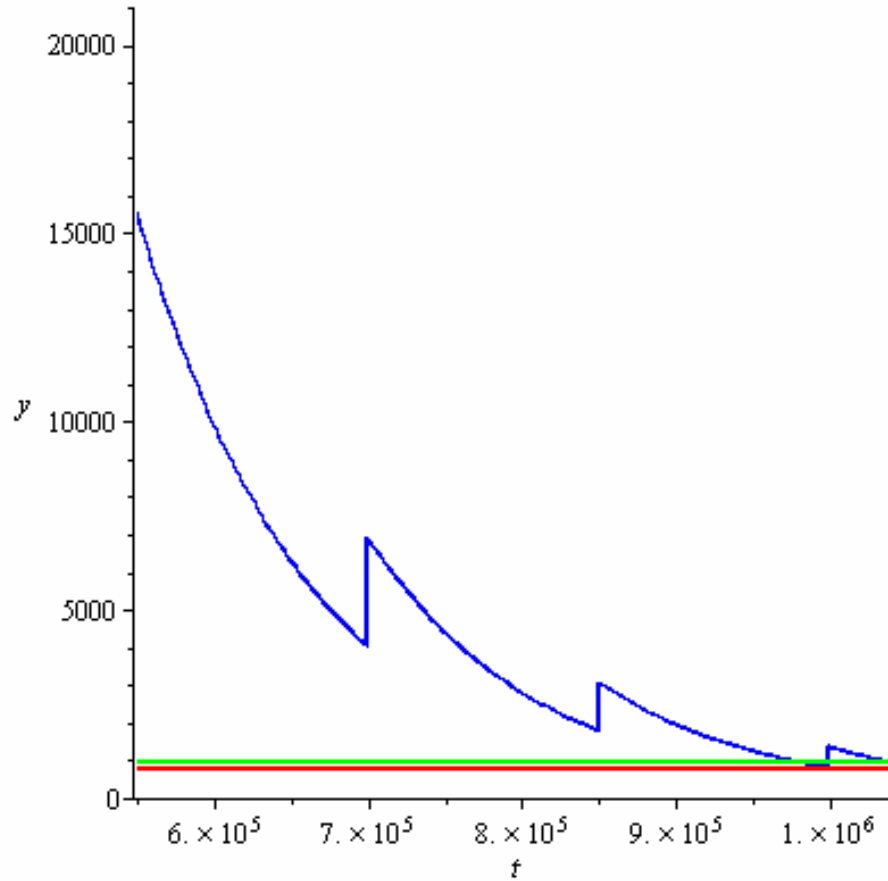
$Lkr2 := \text{solve}\left(A0 \cdot e^{-b \cdot (t - Ln + 33000. - \text{tau} \cdot g \cdot n)} = \text{Amin}, t\right) :$

$Ln, Lkr2;$

$5.497145813 \cdot 10^5$

$1.040163743 \cdot 10^6$

```
display( plot( A0 * e-b * (t - Ln + 33000. - tau * g * trunc( (t - Ln) / tau)) , t = Ln .. Lkr2 , y = 0 .. 21000 , color
= blue ), plot( Amin , t = Ln .. Lkr2 , color = green ), plot( 750 , t = Ln .. Lkr2 , color = red ) );
```



```
n := 3 : tau := 120000. : m := 3 :
```

```
Lkr1 := Lren(n); Ln := 480000.;
```

4.874491614 10^5

4.80000 10^5

```
Lkr2 := solve( A0 * e-b * (t - Ln + 33000. - tau * g * m) = Amin2 , t );
```

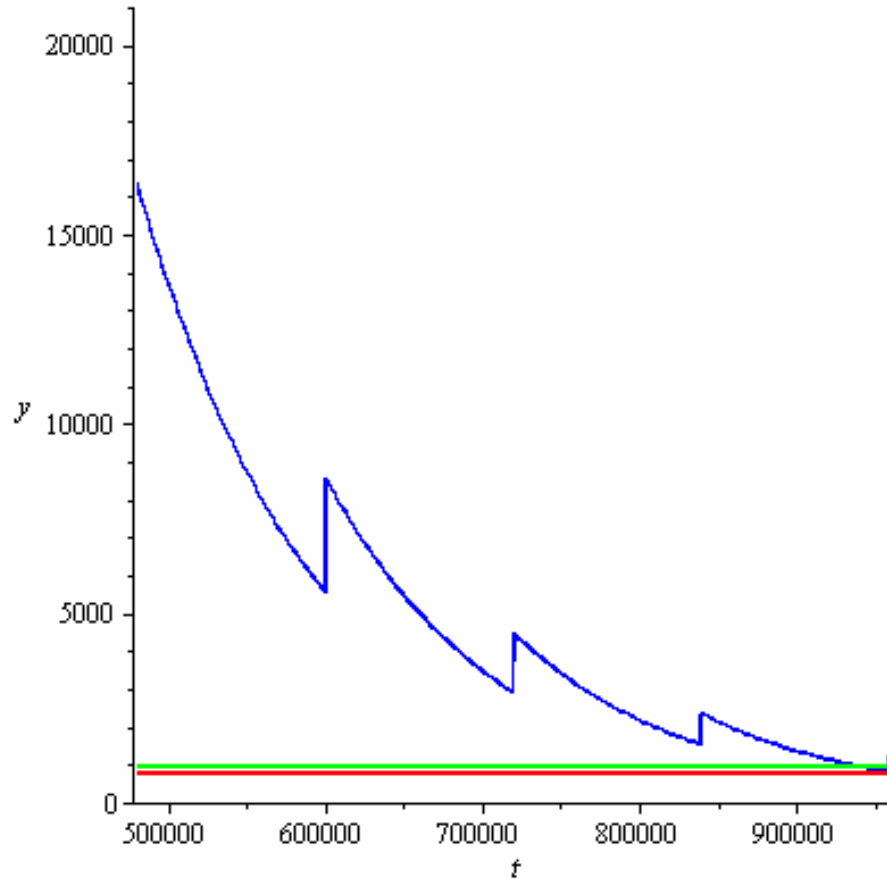
9.607145813 10^5

```
Ln, Lkr2;
```

4.80000 10^5

9.607145813 10^5

```
display(
  plot(
    A0·e-b·(t - Ln + 27000. - tau·g·trunc( $\frac{t-Ln}{tau}$ )), t=Ln..Lkr2, y=0..21000, color=blue),
  plot(Amin, t=Ln..Lkr2, color=green),
  plot(750, t=Ln..Lkr2, color=red)
);
```



```
n := 1 : tau := 250000. : m := 1 :
```

```
Lkr1 := Lren(n);
```

```
4.434491614 105
```

```
;
```

```
Lkr1 := solve(A0·e-b·(t - g·tau·trunc( $\frac{t}{tau}$ )) = Amin2, t);
```

```
4.697145813 105
```

```
Lkr2 := solve(A0·e-b·(t - Ln + 33000. - tau·g·m) = Amin2, t); Ln := Lkr1;
```

```
9.064291626 105
```

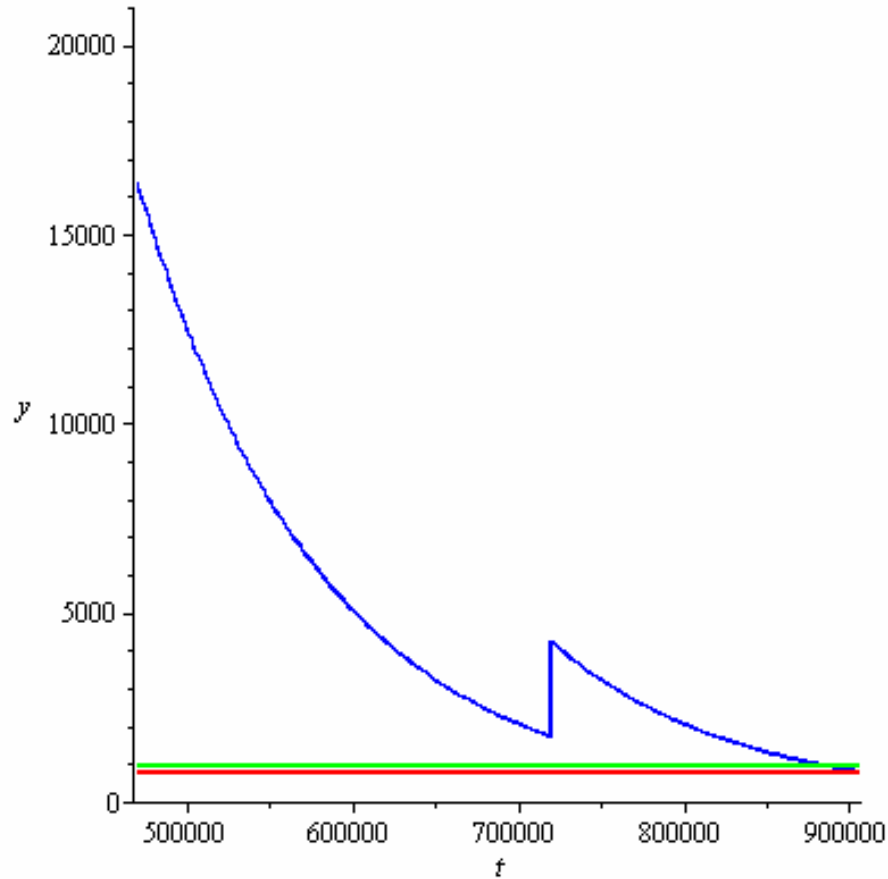
```
4.697145813 105
```

```
Ln, Lkr2;
```

```
4.697145813 105 9.064291626 105
```



```
display( plot( A0·e-b·(t - Ln + 27000. - tau·g·trunc( $\frac{t-Ln}{tau}$ )) , t=Ln..Lkr2 , y=0..21000, color
= blue), plot(Amin, t=Ln..Lkr2, color=green), plot(750, t=Ln.. Lkr2, color=red) );
```



```
n := 1 : tau := 300000. : m := 1 :
```

```
;
```

```
Lkr1 := solve( A0·e-b·(t - g·tau·trunc( $\frac{t}{tau}$ )) = Amin2, t ) :
```

4.897145813 10⁵

```
Lkr2 := solve( A0·e-b·(t - Ln + 33000. - tau·g·m) = Amin2, t ); Ln := Lkr1;
```

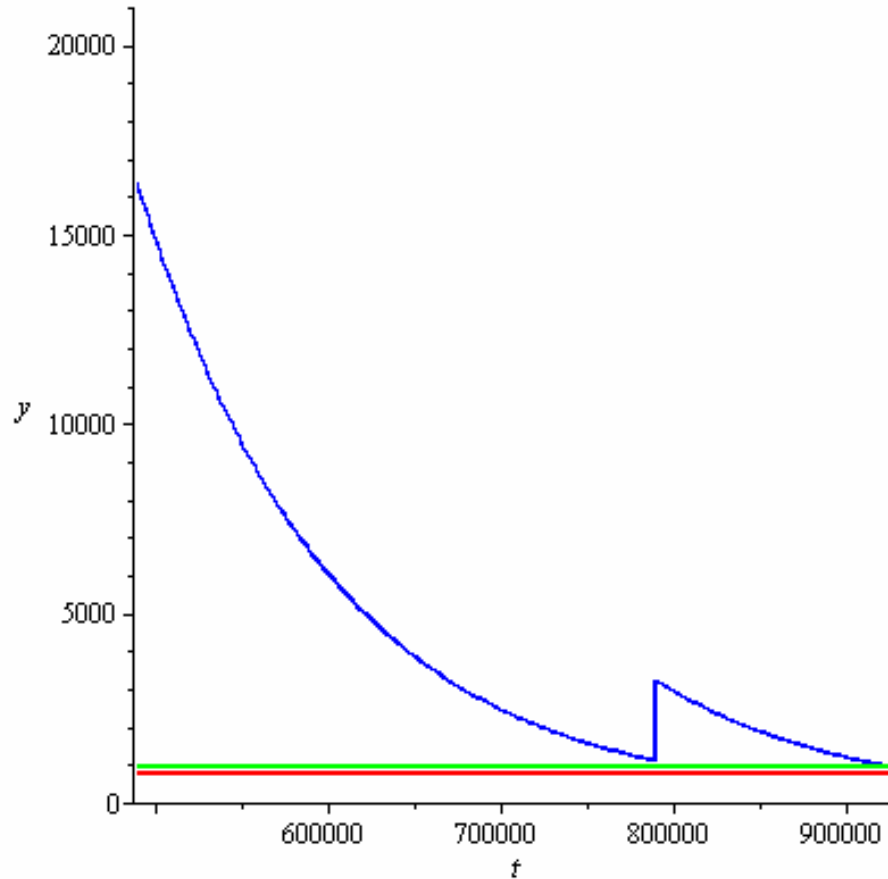
9.264291626 10⁵

4.897145813 10⁵

```
Ln, Lkr2;
```

4.897145813 10⁵ 9.264291626 10⁵

```
display( plot( A0·e-b·(t - Ln + 27000. - tau·g·trunc(  $\frac{t-Ln}{tau}$  )) , t=Ln..Lkr2 , y=0..21000, color
= blue ), plot( Amin, t=Ln..Lkr2, color=green), plot( 750, t=Ln..Lkr2, color=red) );
```



```
n := 1 : tau := 320000. : m := 1 :
```

```
Lkr1 := solve( A0·e-b·(t - g·tau·trunc(  $\frac{t}{tau}$  )) = Amin2, t ) :
```

```
Lkr2 := solve( A0·e-b·(t - Ln + 33000. - tau·g·m) = Amin2, t ); Ln := Lkr1;
```

9.544291626 10⁵

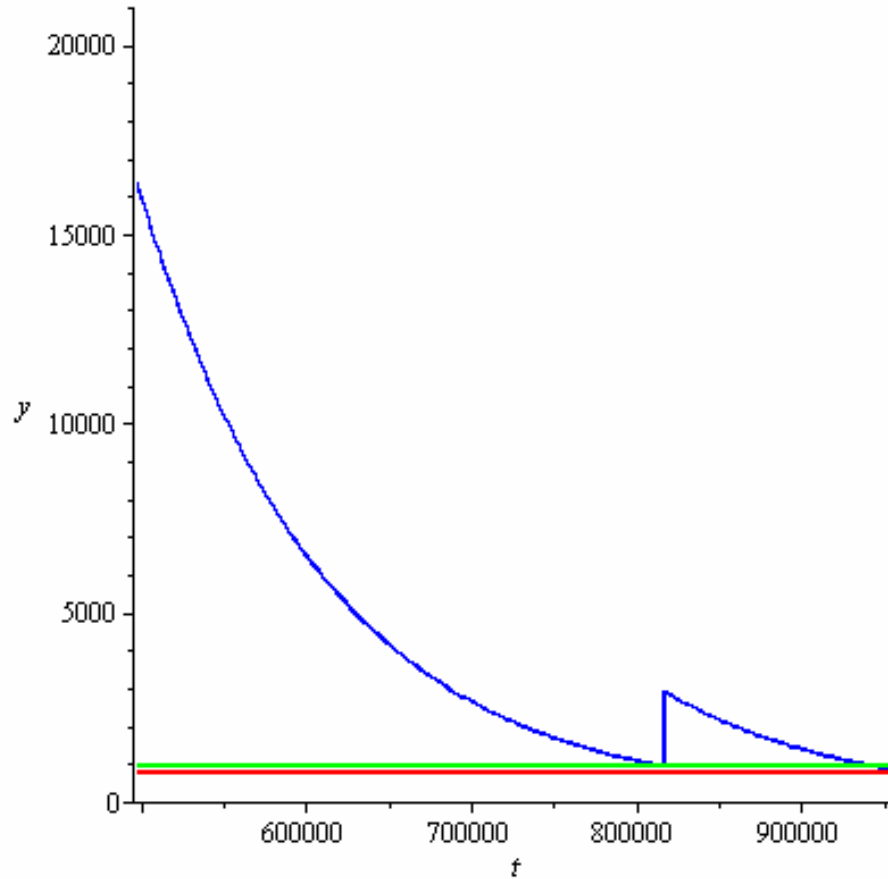
4.977145813 10⁵

```
Ln, Lkr2;
```

4.977145813 10⁵

9.544291626 10⁵

```
display( plot( A0·e-b·(t - Ln + 27000. - tau·g·trunc(  $\frac{t-Ln}{tau}$  )) , t=Ln..Lkr2 , y=0..21000, color
= blue ), plot( Amin, t=Ln..Lkr2, color=green), plot( 750, t=Ln..Lkr2, color=red) );
```



$n := 1 : \text{tau} := 350000. : m := 1 :$

;

$Lkr1 := \text{solve}\left(A0 \cdot e^{-b \cdot \left(t - g \cdot \text{tau} \cdot \text{trunc}\left(\frac{t}{\text{tau}}\right)\right)} = \text{Amin2}, t\right) :$

$Lkr2 := \text{solve}\left(A0 \cdot e^{-b \cdot (t - Ln + 33000. - \text{tau} \cdot g \cdot m)} = \text{Amin2}, t\right); Ln := Lkr1;$

$9.744291626 \cdot 10^5$

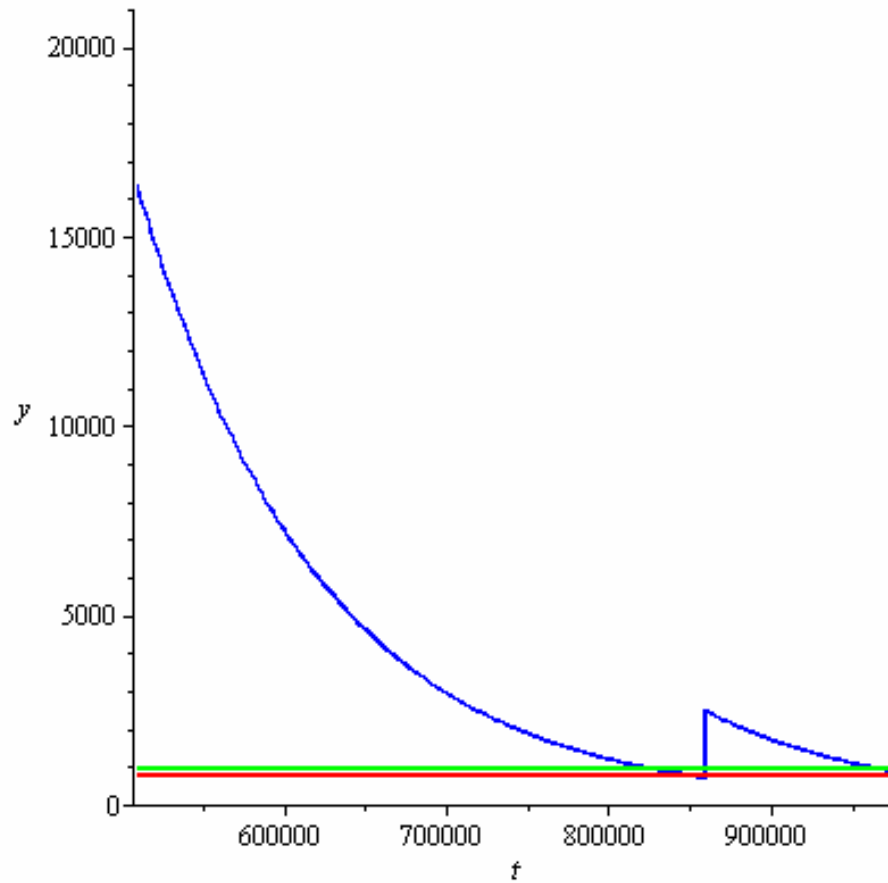
$5.097145813 \cdot 10^5$

$Ln, Lkr2;$

$5.097145813 \cdot 10^5$

$9.744291626 \cdot 10^5$

$\text{display}\left(\text{plot}\left(A0 \cdot e^{-b \cdot \left(t - Ln + 27000. - \text{tau} \cdot g \cdot \text{trunc}\left(\frac{t - Ln}{\text{tau}}\right)\right)}, t = Ln .. Lkr2, y = 0 .. 21000, \text{color} = \text{blue}\right), \text{plot}\left(\text{Amin}, t = Ln .. Lkr2, \text{color} = \text{green}\right), \text{plot}\left(750, t = Ln .. Lkr2, \text{color} = \text{red}\right)\right);$



Варіанти процесів відновлення до КР1 за «Правилами...»,
«технологія відновлення СЕМРЗ»

***Lkr1* - напрацювання до КР1**

***n* – кількість відновлень; *tau* – період відновлень**

restart;

with(plots) : with(Statistics) : b := 0.000009 :

A0 := 20900. : b := 0.00001015 : b := 0.000009 :

A := (t) → A0·e^{-b·t}; S := (t) → 30.0·t + 50.76; b := 0.000009 :

t → A0e^{-b t}

t → 30.0 t + 50.76

$$\text{tau} := 180000.; \quad g := 0.48; \quad \text{Amin} := 950.; \quad \text{Amin2} := 750.; \quad \text{Lren} := (t) \rightarrow g \cdot \text{tau} \cdot t - \frac{\ln\left(\frac{\text{Amin}}{A0}\right)}{b};$$

1.80000 10⁵

0.48

950.

750.

$$t \rightarrow g \tau t - \frac{\ln\left(\frac{\text{Amin}}{A0}\right)}{b}$$

$$n := 3; \text{tau} := 180000.;$$

$$\text{Lkr1} := \text{Lren}(n);$$

6.026491614 10⁵

$$\text{solve}(A0 \cdot e^{-b \cdot t} = \text{Amin2}, t);$$

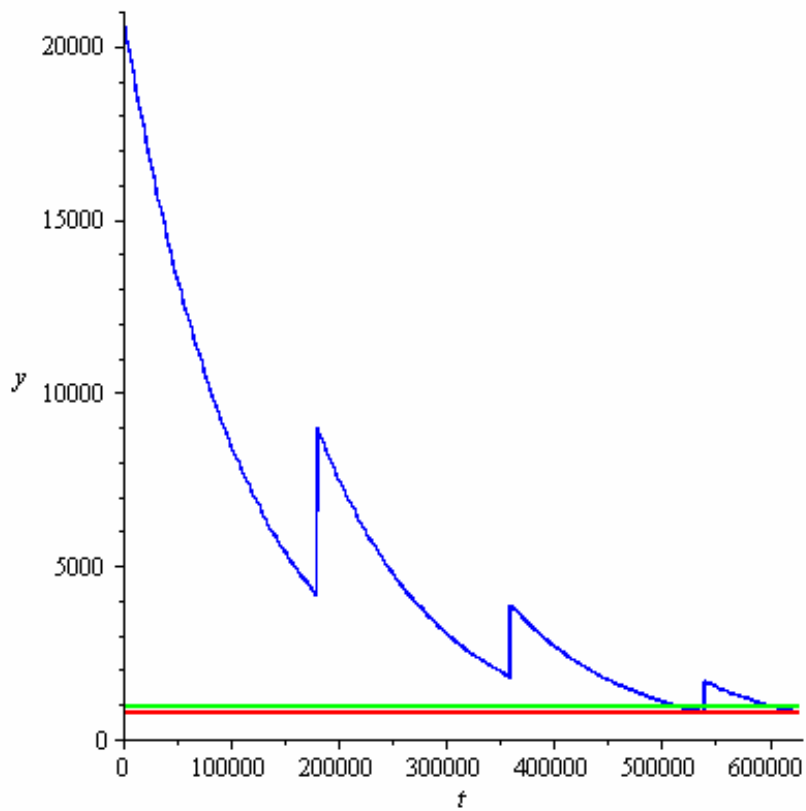
3.697145813 10⁵

$$\text{Lkr1} := \text{solve}\left(A0 \cdot e^{-b \cdot \left(t - g \cdot \text{tau} \cdot \text{trunc}\left(\frac{t}{\text{tau}}\right)\right)} = \text{Amin}, t\right); \quad \text{Lkr1} := \text{solve}\left(A0 \cdot e^{-b \cdot \left(t - g \cdot \text{tau} \cdot \text{trunc}\left(\frac{t}{\text{tau}}\right)\right)} = \text{Amin2}, t\right);$$

5.162491615 10⁵

6.289145813 10⁵

$$\text{display}\left(\text{plot}\left(A0 \cdot e^{-b \cdot \left(t - \text{tau} \cdot g \cdot \text{trunc}\left(\frac{t}{\text{tau}}\right)\right)}, t=0.0.. \text{Lkr1}, y=0..21000, \text{color}=\text{blue}\right), \text{plot}(\text{Amin}, t=0.0.. \text{Lkr1}, \text{color}=\text{green}), \text{plot}(\text{Amin2}, t=0.0.. \text{Lkr1}, \text{color}=\text{red})\right);$$



$n := 4; \text{tau} := 180000;$

4

$1.80000 \cdot 10^5$

$Lkr1 := Lren(n);$

$6.890491614 \cdot 10^5$

$\text{solve}(A0 \cdot e^{-b \cdot t} = Amin2, t);$

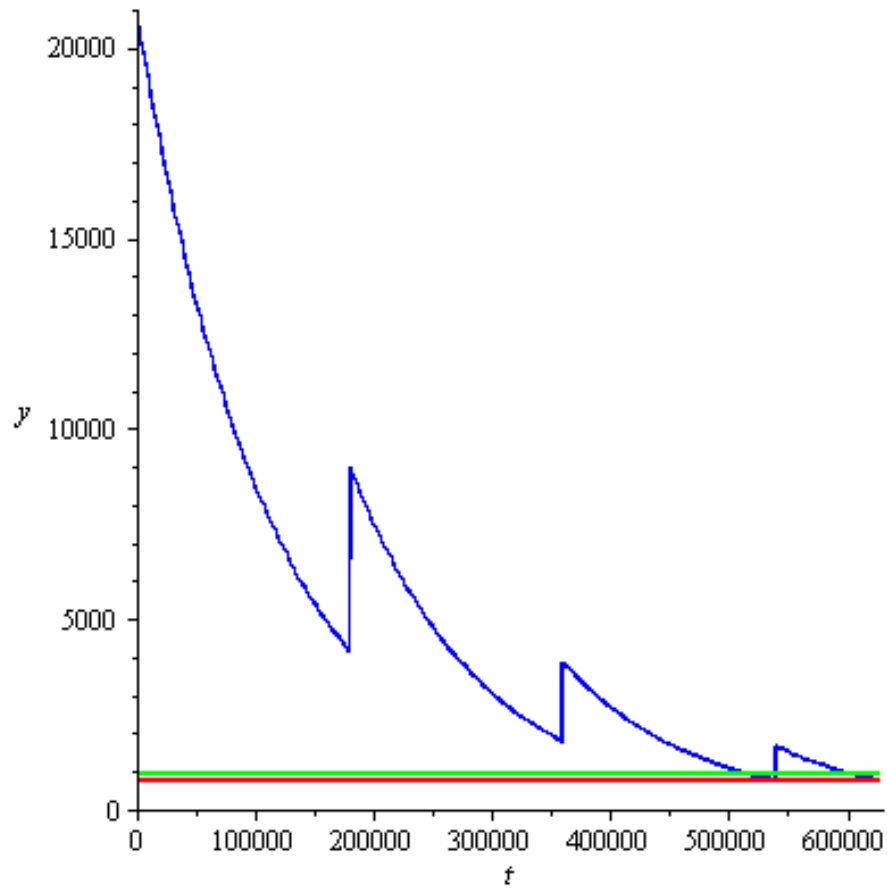
$3.697145813 \cdot 10^5$

$Lkr1 := \text{solve}\left(A0 \cdot e^{-b \cdot \left(t - g \cdot \text{tau} \cdot \text{trunc}\left(\frac{t}{\text{tau}}\right)\right)} = Amin, t\right); \quad Lkr1 := \text{solve}\left(A0 \cdot e^{-b \cdot \left(t - g \cdot \text{tau} \cdot \text{trunc}\left(\frac{t}{\text{tau}}\right)\right)} = Amin2, t\right);$

$5.162491615 \cdot 10^5$

$6.289145813 \cdot 10^5$

$\text{display}\left(\text{plot}\left(A0 \cdot e^{-b \cdot \left(t - \text{tau} \cdot g \cdot \text{trunc}\left(\frac{t}{\text{tau}}\right)\right)}, t=0.0 .. Lkr1, y=0 .. 21000, \text{color}=\text{blue}\right), \text{plot}(Amin, t=0.0 .. Lkr1, \text{color}=\text{green}), \text{plot}(Amin2, t=0.0 .. Lkr1, \text{color}=\text{red})\right);$



$n := 2; \text{tau} := 180000;$

2

$1.80000 \cdot 10^5$

$Lkr1 := Lren(n);$

$5.162491614 \cdot 10^5$

$\text{solve}(A0 \cdot e^{-b \cdot t} = Amin2, t);$

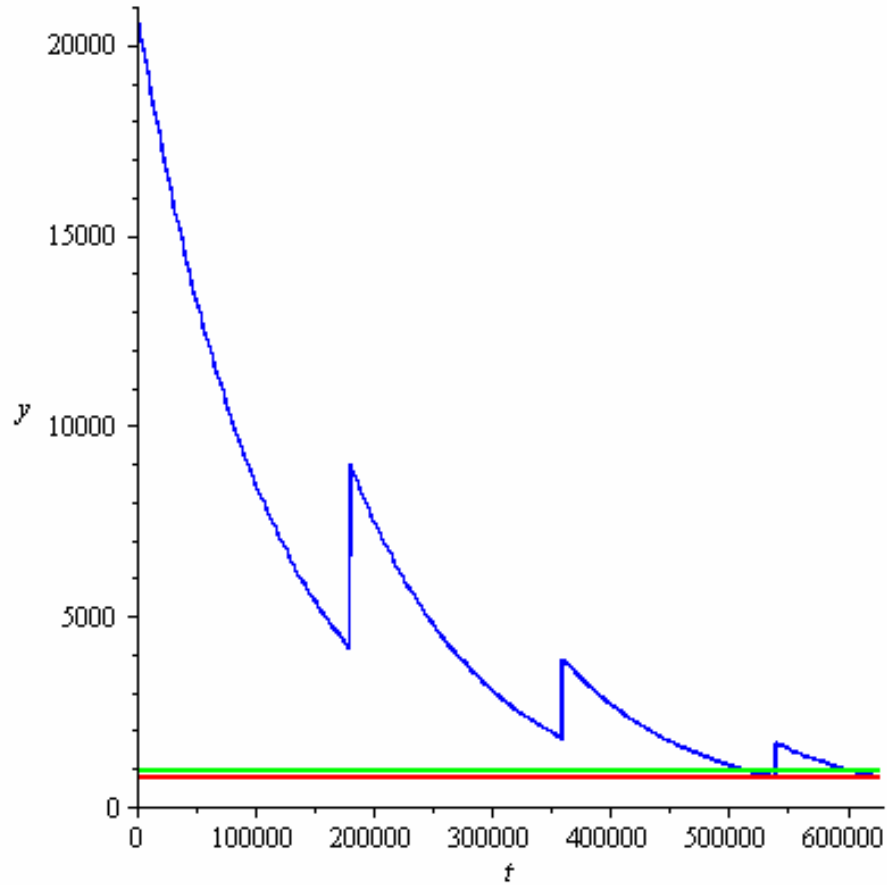
$3.697145813 \cdot 10^5$

$Lkr1 := \text{solve}\left(A0 \cdot e^{-b \cdot \left(t - g \cdot \text{tau} \cdot \text{trunc}\left(\frac{t}{\text{tau}}\right)\right)} = Amin, t\right); \quad Lkr1 := \text{solve}\left(A0 \cdot e^{-b \cdot \left(t - g \cdot \text{tau} \cdot \text{trunc}\left(\frac{t}{\text{tau}}\right)\right)} = Amin2, t\right);$

$5.162491615 \cdot 10^5$

$6.289145813 \cdot 10^5$

```
display(
  plot(A0·e-b·(t - tau·g·trunc( $\frac{t}{\text{tau}}$ )), t=0.0..Lkr1, y=0..21000, color=blue),
  plot(Amin, t=0.0..Lkr1, color=green), plot(Amin2, t=0.0..Lkr1, color=red)
);
```



```
n := 3; tau := 150000.;
```

```
3
```

```
1.50000 105
```

```
Lkr1 := Lren(n);
```

```
5.594491614 105
```

```
solve(A0·e-b·t = Amin2, t);
```

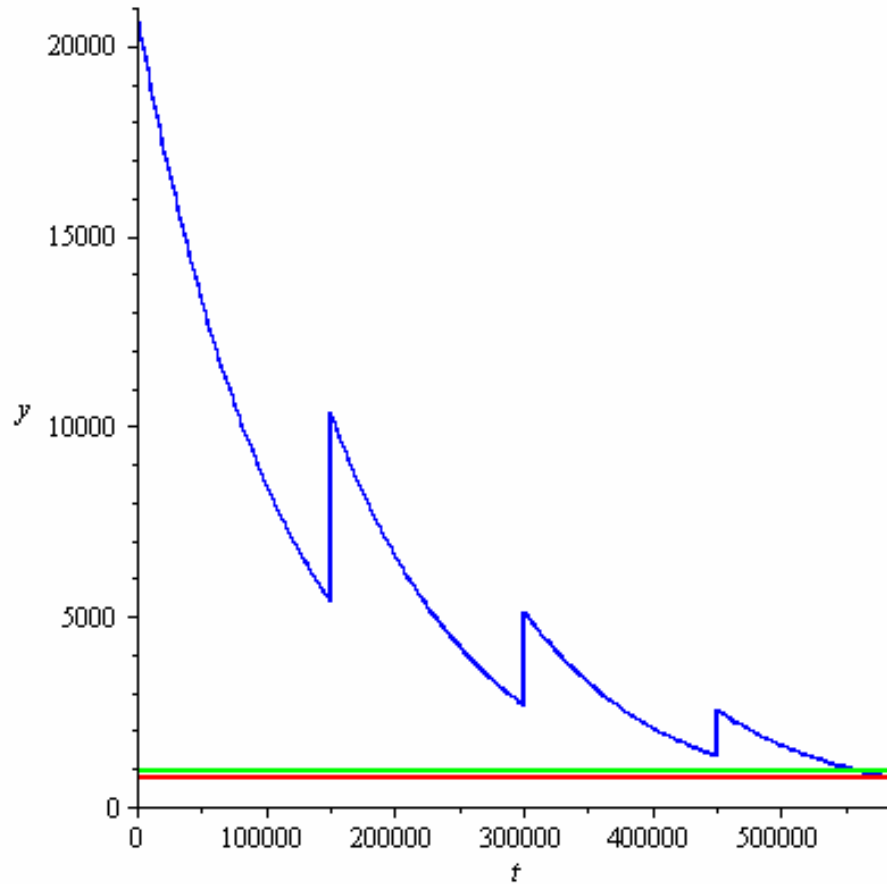
```
3.697145813 105
```

```
Lkr1 := solve(A0·e-b·(t - g·tau·trunc( $\frac{t}{\text{tau}}$ )) = Amin, t); Lkr1 := solve(A0
·e-b·(t - g·tau·trunc( $\frac{t}{\text{tau}}$ )) = Amin2, t);
```

```
5.594491615 105
```


5.857145813 10⁵

```
display(
  plot(A0·e-b·(t - tau·g·trunc(t/tau)), t=0.0..Lkr1, y=0..21000, color=blue),
  plot(Amin, t=0.0..Lkr1, color=green), plot(Amin2, t=0.0..Lkr1, color=red)
);
```



$n := 3; \text{tau} := 120000;$

3

1.20000 10⁵

$Lkr1 := Lren(n);$

5.162491614 10⁵

$solve(A0 \cdot e^{-b \cdot t} = Amin2, t);$

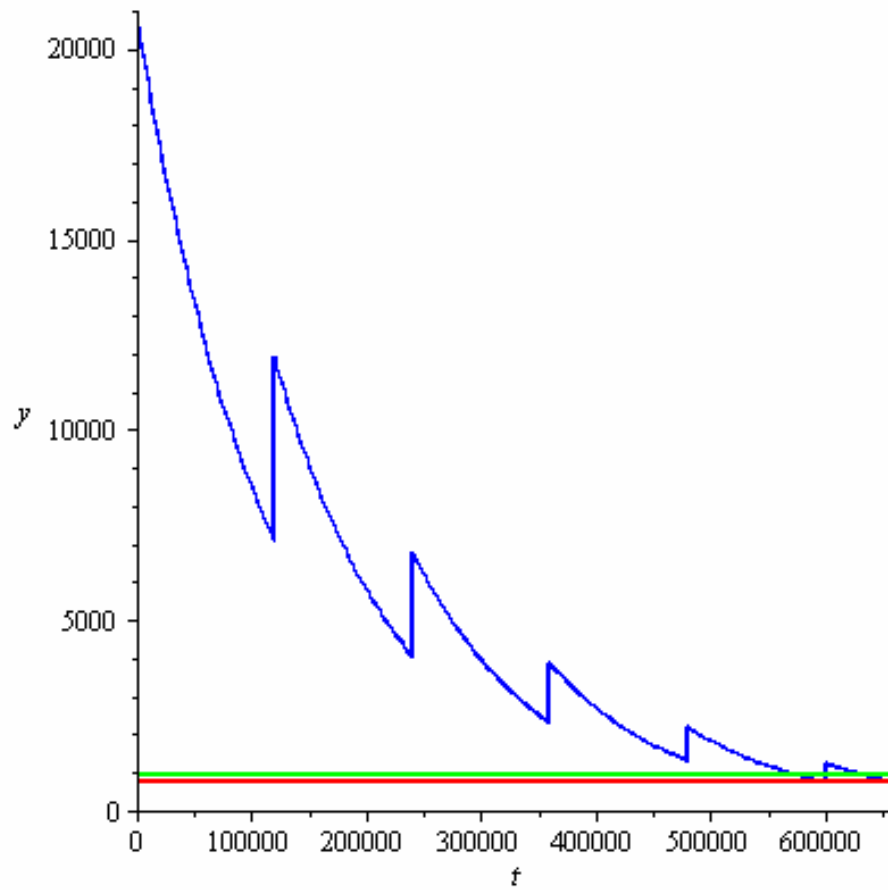
3.697145813 10⁵

```
Lkr1 := solve(A0·e-b·(t - g·tau·trunc(t/tau)) = Amin, t);  Lkr1 := solve(A0
·e-b·(t - g·tau·trunc(t/tau)) = Amin2, t);
```

5.738491615 10⁵

6.577145813 10⁵

```
display( plot( A0 * e-b * (t - tau * g * trunc(t/tau)), t=0.0..Lkr1, y=0..21000, color=blue),
  plot(Amin, t=0.0..Lkr1, color=green), plot(Amin2, t=0.0..Lkr1, color=red) );
```



$n := 3; \text{tau} := 250000;$

3

2.50000 10⁵

$Lkr1 := Lren(n);$

7.034491614 10⁵

$\text{solve}(A0 \cdot e^{-b \cdot t} = Amin2, t);$

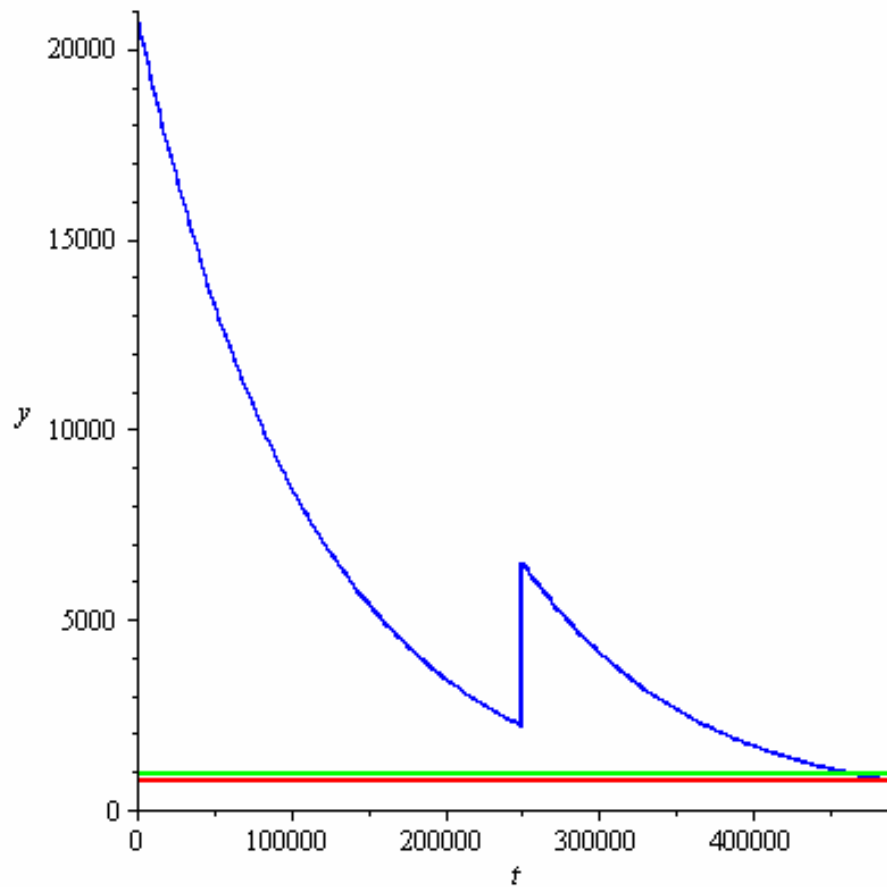
3.697145813 10⁵

$$Lkr1 := \text{solve}\left(A0 \cdot e^{-b \cdot \left(t - g \cdot \text{tau} \cdot \text{trunc}\left(\frac{t}{\text{tau}}\right)\right)} = Amin, t\right); \quad Lkr1 := \text{solve}\left(A0 \cdot e^{-b \cdot \left(t - g \cdot \text{tau} \cdot \text{trunc}\left(\frac{t}{\text{tau}}\right)\right)} = Amin2, t\right);$$

4.634491615 10⁵

4.897145813 10⁵

$$\text{display}\left(\text{plot}\left(A0 \cdot e^{-b \cdot \left(t - \text{tau} \cdot g \cdot \text{trunc}\left(\frac{t}{\text{tau}}\right)\right)}, t=0.0..Lkr1, y=0..21000, \text{color}=\text{blue}\right), \text{plot}(Amin, t=0.0..Lkr1, \text{color}=\text{green}), \text{plot}(Amin2, t=0.0..Lkr1, \text{color}=\text{red})\right);$$



$$n := 3; \text{tau} := 240000.;$$

3

2.40000 10⁵

$$Lkr1 := \text{Lren}(n);$$

6.890491614 10⁵

$$\text{solve}(A0 \cdot e^{-b \cdot t} = Amin, t);$$

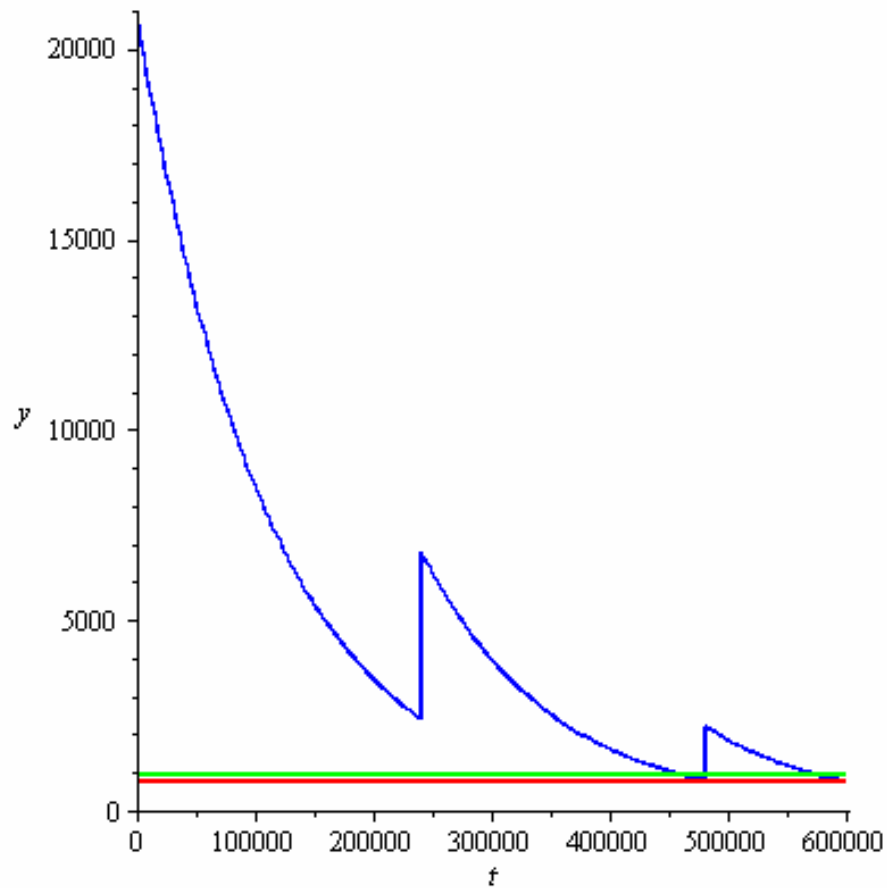
3.434491615 10⁵

$$Lkr1 := \text{solve}\left(A0 \cdot e^{-b \cdot \left(t - g \cdot \text{tau} \cdot \text{trunc}\left(\frac{t}{\text{tau}}\right)\right)} = Amin, t\right); \quad Lkr1 := \text{solve}\left(A0 \cdot e^{-b \cdot \left(t - g \cdot \text{tau} \cdot \text{trunc}\left(\frac{t}{\text{tau}}\right)\right)} = Amin2, t\right);$$

4.586491615 10⁵

6.001145813 10⁵

$$\text{display}\left(\text{plot}\left(A0 \cdot e^{-b \cdot \left(t - \text{tau} \cdot g \cdot \text{trunc}\left(\frac{t}{\text{tau}}\right)\right)}, t=0.0..Lkr1, y=0..21000, \text{color}=\text{blue}\right), \text{plot}(Amin, t=0.0..Lkr1, \text{color}=\text{green}), \text{plot}(Amin2, t=0.0..Lkr1, \text{color}=\text{red})\right);$$



$$n := 3; \text{tau} := 300000.;$$

3

3.00000 10⁵

$$Lkr1 := Lren(n);$$

7.754491614 10⁵

$\text{solve}(A0 \cdot e^{-b \cdot t} = Amin, t);$

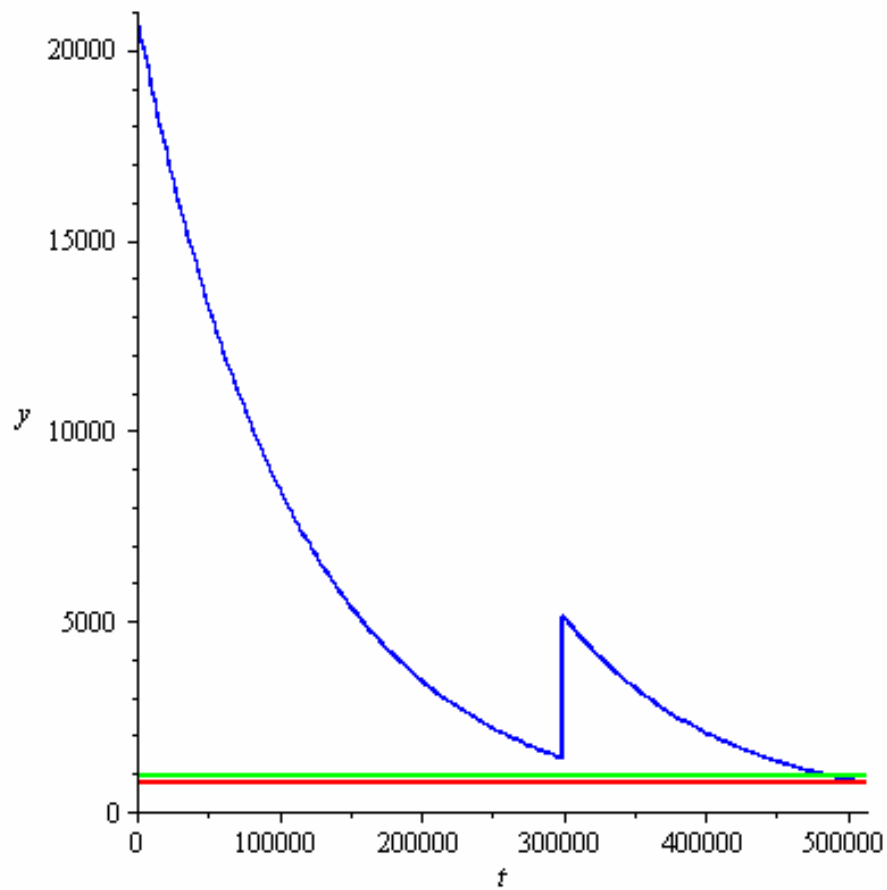
3.434491615 10⁵

$Lkr1 := \text{solve}\left(A0 \cdot e^{-b \cdot \left(t - g \cdot \text{tau} \cdot \text{trunc}\left(\frac{t}{\text{tau}}\right)\right)} = Amin, t\right);$ $Lkr1 := \text{solve}\left(A0 \cdot e^{-b \cdot \left(t - g \cdot \text{tau} \cdot \text{trunc}\left(\frac{t}{\text{tau}}\right)\right)} = Amin2, t\right);$

4.874491615 10⁵

5.137145813 10⁵

$\text{display}\left(\text{plot}\left(A0 \cdot e^{-b \cdot \left(t - \text{tau} \cdot g \cdot \text{trunc}\left(\frac{t}{\text{tau}}\right)\right)}, t=0.0..Lkr1, y=0..21000, \text{color}=\text{blue}\right), \text{plot}(Amin, t=0.0..Lkr1, \text{color}=\text{green}), \text{plot}(Amin2, t=0.0..Lkr1, \text{color}=\text{red})\right);$



$n := 3; \text{tau} := 320000.;$

3

3.20000 10⁵

$Lkr1 := \text{Lren}(n);$

8.042491614 10⁵

$\text{solve}(A0 \cdot e^{-b \cdot t} = Amin, t);$

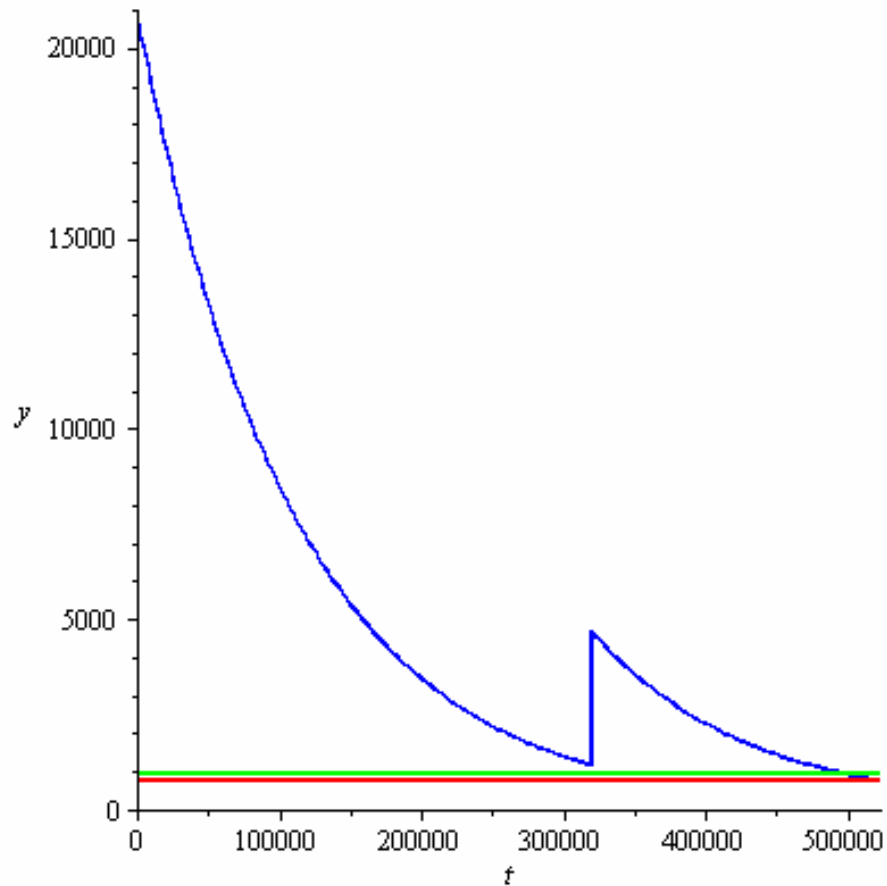
3.434491615 10⁵

$Lkr1 := \text{solve}\left(A0 \cdot e^{-b \cdot \left(t - g \cdot \text{tau} \cdot \text{trunc}\left(\frac{t}{\text{tau}}\right)\right)} = Amin, t\right);$ $Lkr1 := \text{solve}\left(A0 \cdot e^{-b \cdot \left(t - g \cdot \text{tau} \cdot \text{trunc}\left(\frac{t}{\text{tau}}\right)\right)} = Amin2, t\right);$

4.970491615 10⁵

5.233145813 10⁵

$\text{display}\left(\text{plot}\left(A0 \cdot e^{-b \cdot \left(t - \text{tau} \cdot g \cdot \text{trunc}\left(\frac{t}{\text{tau}}\right)\right)}, t=0.0..Lkr1, y=0..21000, \text{color}=\text{blue}\right), \text{plot}(Amin, t=0.0..Lkr1, \text{color}=\text{green}), \text{plot}(Amin2, t=0.0..Lkr1, \text{color}=\text{red})\right);$



$n := 3; \text{tau} := 350000;$

3

3.50000 10⁵

$Lkr1 := Lren(n);$

8.474491614 10⁵

$solve(A0 \cdot e^{-b \cdot t} = Amin, t);$

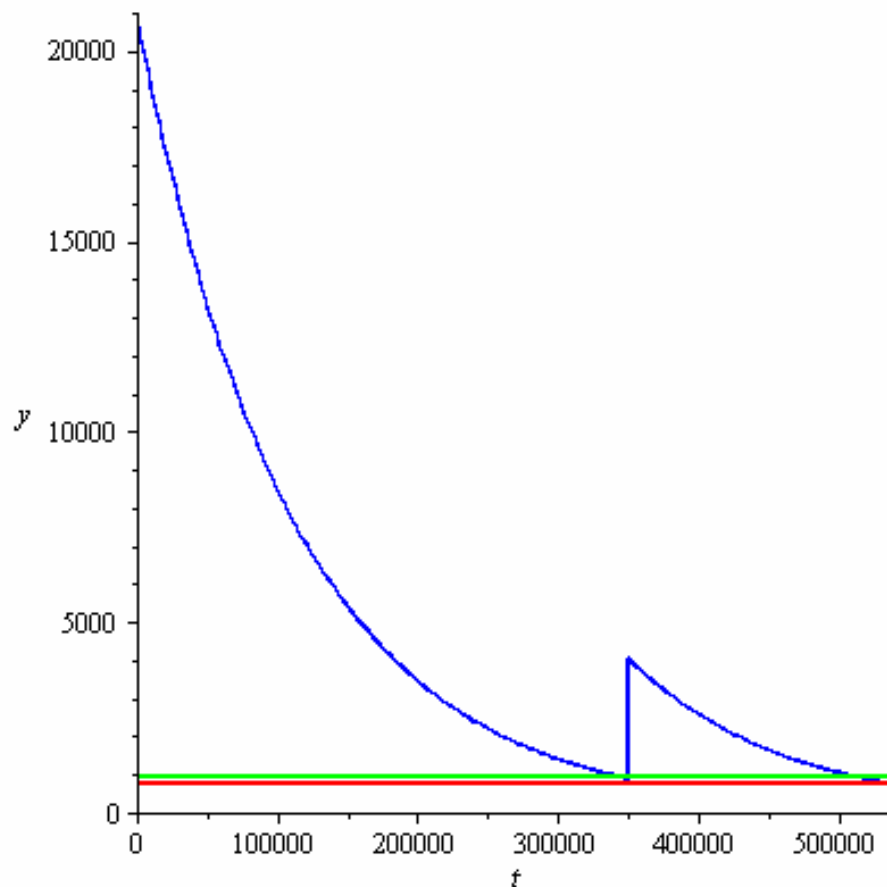
3.434491615 10⁵

$Lkr1 := solve\left(A0 \cdot e^{-b \cdot \left(t - g \cdot \text{tau} \cdot \text{trunc}\left(\frac{t}{\text{tau}}\right)\right)} = Amin, t\right); \quad Lkr1 := solve\left(A0 \cdot e^{-b \cdot \left(t - g \cdot \text{tau} \cdot \text{trunc}\left(\frac{t}{\text{tau}}\right)\right)} = Amin2, t\right);$

3.434491615 10⁵

5.377145813 10⁵

$display\left(\text{plot}\left(A0 \cdot e^{-b \cdot \left(t - \text{tau} \cdot g \cdot \text{trunc}\left(\frac{t}{\text{tau}}\right)\right)}, t=0.0..Lkr1, y=0..21000, color=blue\right), \text{plot}(Amin, t=0.0..Lkr1, color=green), \text{plot}(Amin2, t=0.0..Lkr1, color=red)\right);$



Варіанти процесів відновлення від КР1 до КР2 за «Правилами...»,
«технологія відновлення СЕМРЗ»

Lkr1 - напрацювання до КР1

Lkr2 - напрацювання до КР2

***n* – кількість відновлень; *tau* – період відновлень**

restart;

with(plots) : with(Statistics) :

A0 := 20900. : b := 0.000009 :

A := (t) → A0·e^{-b·t} : S := (t) → 30.0·t + 50.76 : solve(A0·e^{-b·t} = A0·0.76, t);

30492.98286

tau := 180000. : g := 0.48 : Amin := 950. : Amin2 := 750. :

gkr := 0.76 : solve(A0·e^{-b·t} = A0·0.76, t);

30492.98286

n := 2 : tau := 180000. : m := 2 :

Lkr1 := solve(A0·e^{-b·(t - g·tau·trunc($\frac{t}{\tau}$))} = Amin2, t);

6.289145813 10⁵

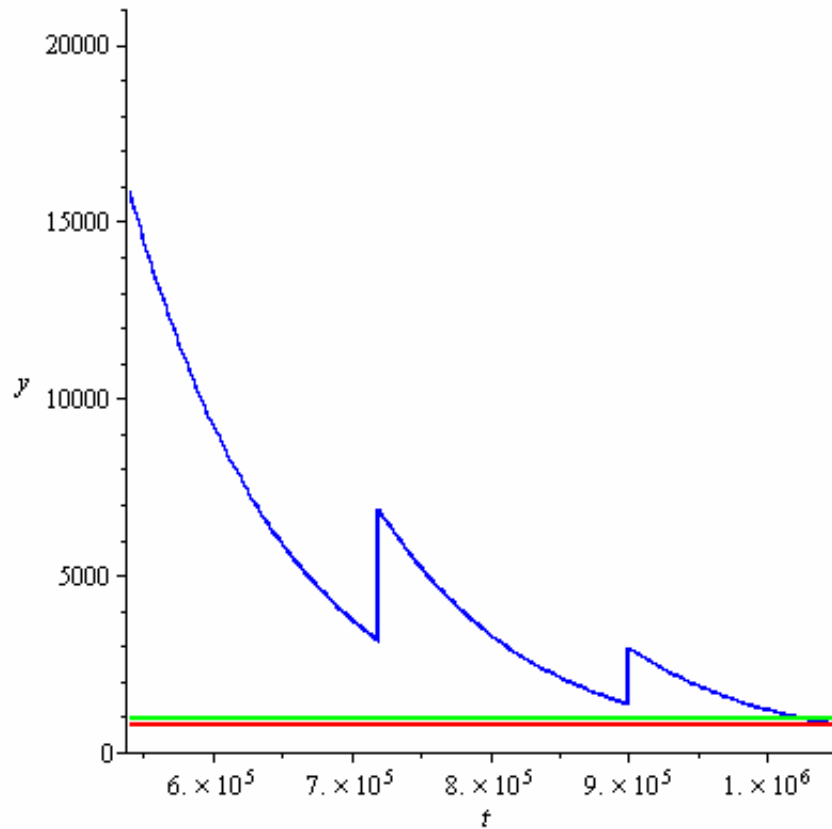
Ln := 540000.0 :

Lkr2 := solve(A0·e^{-b·(t - Ln + 30500. - tau·g·m)} = Amin2, t) :

Ln, Lkr2;

5.400000 10⁵ 1.052014581 10⁶

display(plot(A0·e^{-b·(t - Ln + 30500. - tau·g·trunc($\frac{t-Ln}{\tau}$))}, t=Ln..Lkr2, y=0..21000, color=blue), plot(Amin, t=Ln..Lkr2, color=green), plot(750, t=Ln..Lkr2, color=red));



$n := 3 : \text{tau} := 150000. : m := 3 :$

$Lkr1 := \text{solve}\left(A0 \cdot e^{-b \cdot \left(t - g \cdot \text{tau} \cdot \text{trunc}\left(\frac{t}{\text{tau}}\right)\right)} = \text{Amin2}, t\right) :$

$Lkr1; Ln := 450000.;$

;

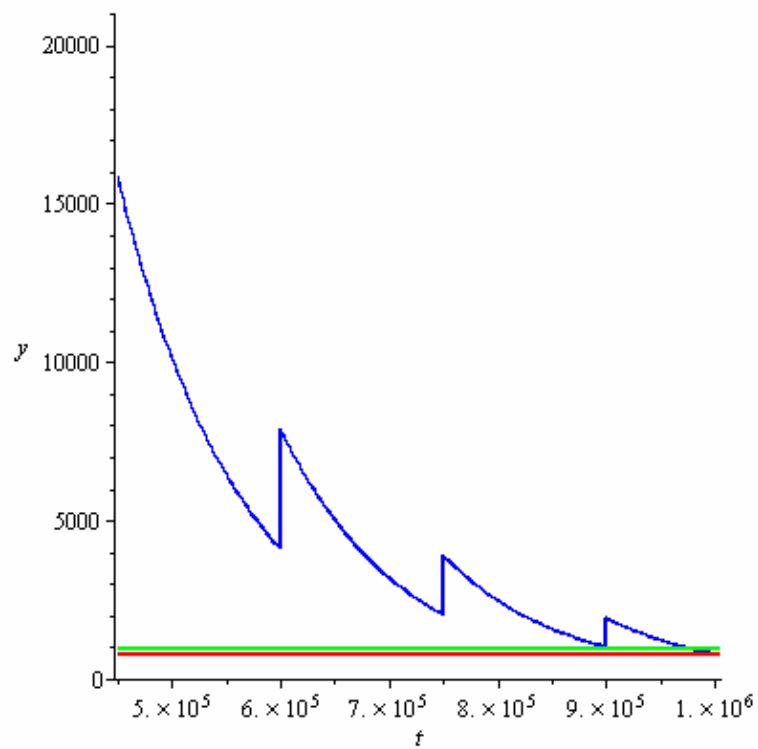
$Lkr2 := \text{solve}\left(A0 \cdot e^{-b \cdot \left(t - Ln + 30500. - \text{tau} \cdot g \cdot m\right)} = \text{Amin2}, t\right) :$

$Ln; Lkr2;$

$4.50000 \cdot 10^5 \quad 1.005214581 \cdot 10^6$

;

$\text{display}\left(\text{plot}\left(A0 \cdot e^{-b \cdot \left(t - Ln + 30500. - \text{tau} \cdot g \cdot \text{trunc}\left(\frac{t - Ln}{\text{tau}}\right)\right)}, t = Ln .. Lkr2, y = 0 .. 21000, \text{color} = \text{blue}\right), \text{plot}\left(\text{Amin2}, t = Ln .. Lkr2, \text{color} = \text{green}\right), \text{plot}\left(750, t = Ln .. Lkr2, \text{color} = \text{red}\right)\right);$



$n := 3$: $\tau := 150000.$: $m := 3$:

$Lkr1 := \text{solve}\left(A0 \cdot e^{-b \cdot \left(t - g \cdot \tau \cdot \text{trunc}\left(\frac{t}{\tau}\right)\right)} = Amin2, t\right) :$

$Ln := Lkr1 :$

;

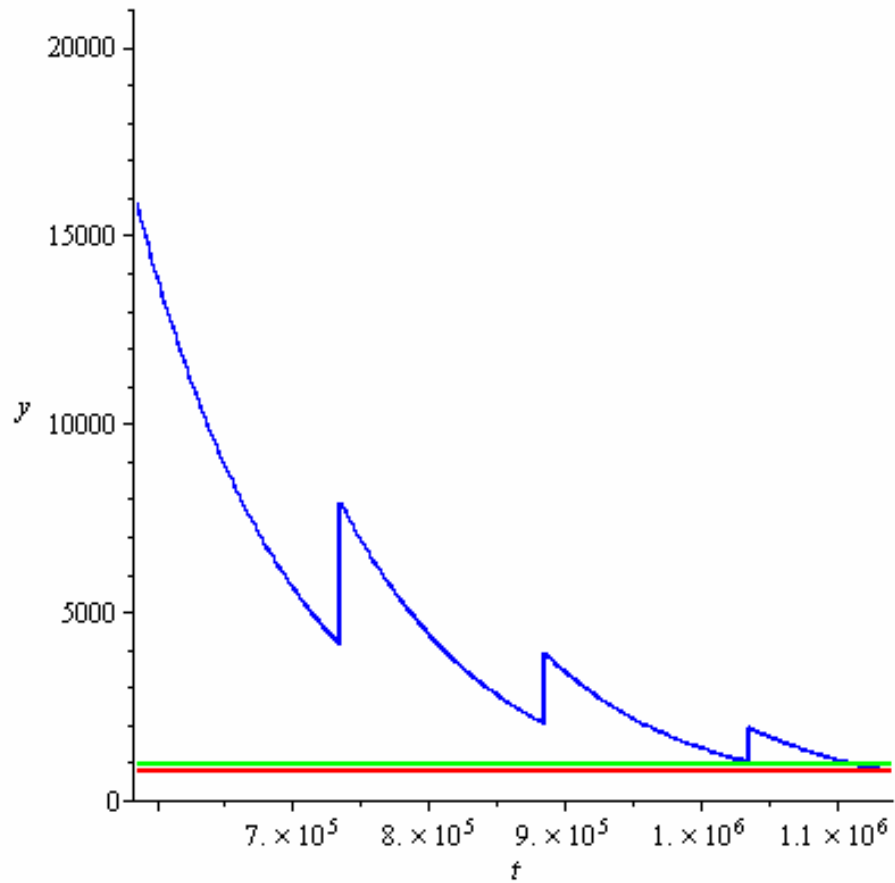
$Lkr2 := \text{solve}\left(A0 \cdot e^{-b \cdot (t - Ln + 30500. - \tau \cdot g \cdot m)} = Amin2, t\right) :$

$Ln, Lkr2;$

$5.857145813 \cdot 10^5$ $1.140929163 \cdot 10^6$

;

$\text{display}\left(\text{plot}\left(A0 \cdot e^{-b \cdot \left(t - Ln + 30500. - \tau \cdot g \cdot \text{trunc}\left(\frac{t - Ln}{\tau}\right)\right)}\right), t = Ln .. Lkr2, y = 0 .. 21000, \text{color} = \text{blue}\right), \text{plot}(Amin, t = Ln .. Lkr2, \text{color} = \text{green}), \text{plot}(750, t = Ln .. Lkr2, \text{color} = \text{red})$;



$n := 3 : \tau := 120000. : m := 4 :$

$L_n := 480000. :$

;

$L_{kr2} := \text{solve}(A_0 \cdot e^{-b \cdot (t - L_n + 30500. - \tau \cdot g \cdot \text{trunc}(\frac{t - L_n}{\tau}))} = A_{min2}, t);$

$1.049614581 \cdot 10^6$

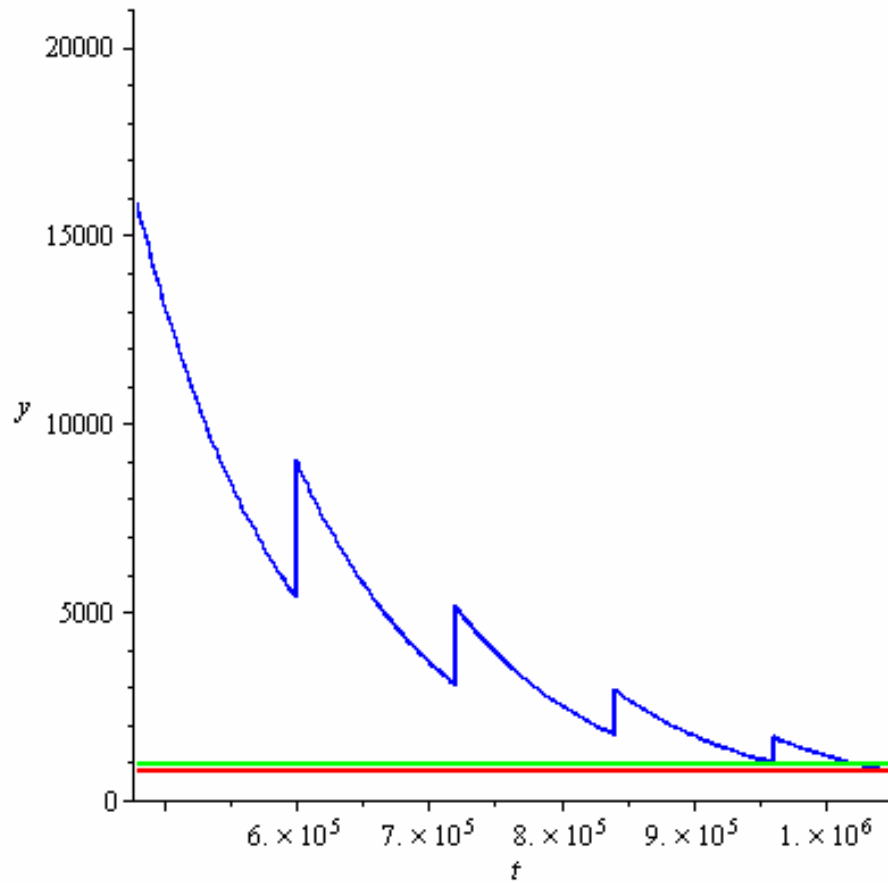
$L_n, L_{kr2};$

$4.80000 \cdot 10^5$

$1.049614581 \cdot 10^6$

;

$\text{display}\left(\text{plot}\left(A_0 \cdot e^{-b \cdot \left(t - L_n + 30500. - \tau \cdot g \cdot \text{trunc}\left(\frac{t - L_n}{\tau}\right)\right)}, t = L_n .. L_{kr2}, y = 0 .. 21000, \text{color} = \text{blue}\right), \text{plot}(A_{min2}, t = L_n .. L_{kr2}, \text{color} = \text{green}), \text{plot}(750, t = L_n .. L_{kr2}, \text{color} = \text{red})\right);$



$n := 3 : \tau := 120000. : m := 4 :$

$L_n := 600000. :$

;

$L_{kr2} := \text{solve}(A_0 \cdot e^{-b \cdot (t - L_n + 30500. - \tau \cdot g \cdot m)} = A_{min2}, t);$

$1.169614581 \cdot 10^6$

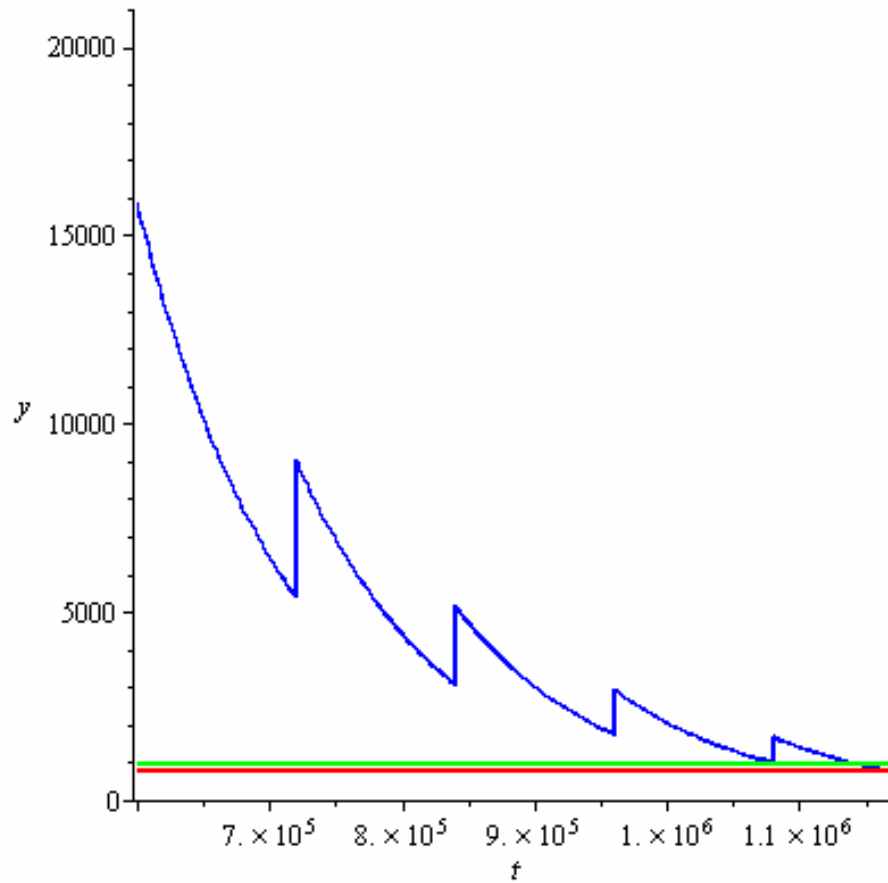
$L_n, L_{kr2};$

$6.00000 \cdot 10^5$

$1.169614581 \cdot 10^6$

;

$\text{display}\left(\text{plot}\left(A_0 \cdot e^{-b \cdot \left(t - L_n + 30500. - \tau \cdot g \cdot \text{trunc}\left(\frac{t - L_n}{\tau}\right)}\right)}, t = L_n .. L_{kr2}, y = 0 .. 21000, \text{color} = \text{blue}\right), \text{plot}(A_{min2}, t = L_n .. L_{kr2}, \text{color} = \text{green}), \text{plot}(750, t = L_n .. L_{kr2}, \text{color} = \text{red})\right);$



$n := 1 : \text{tau} := 250000. : m := 1 :$

;

$Lkr1 := \text{solve}\left(A0 \cdot e^{-b \cdot \left(t - g \cdot \text{tau} \cdot \text{trunc}\left(\frac{t}{\text{tau}}\right)\right)} = \text{Amin2}, t\right) :$

$Lkr2 := \text{solve}\left(A0 \cdot e^{-b \cdot (t - Ln + 30500. - \text{tau} \cdot g \cdot m)} = \text{Amin2}, t\right) : Ln := Lkr1 :$

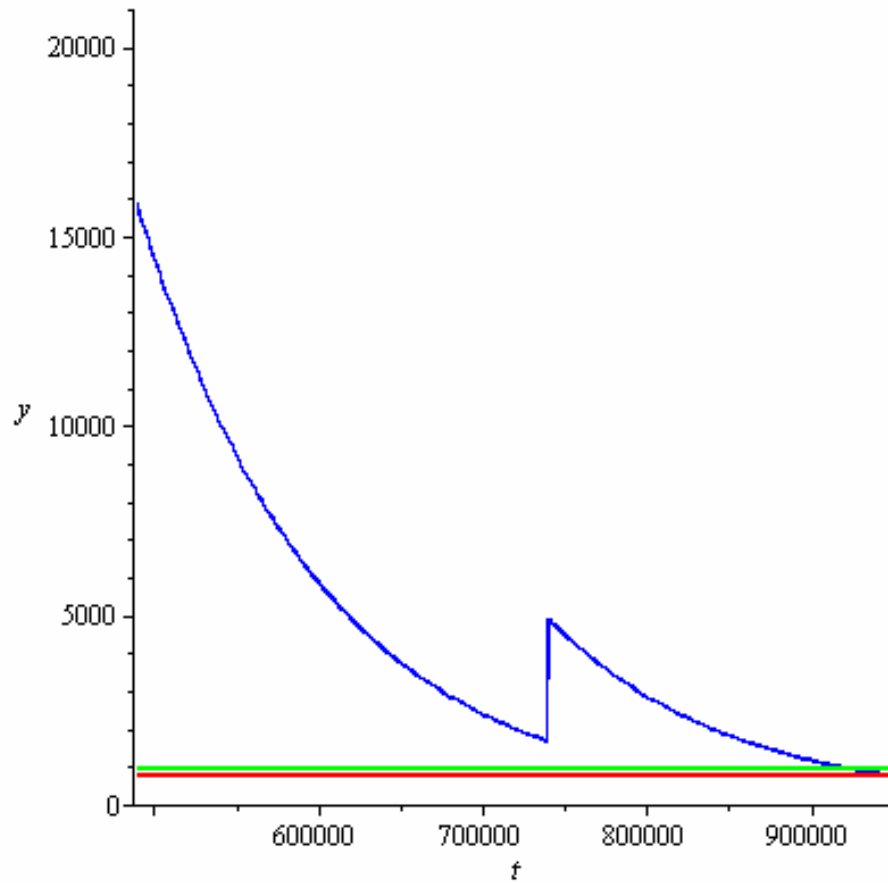
$Ln, Lkr2;$

$4.897145813 \cdot 10^5$

$9.489291626 \cdot 10^5$

;

$\text{display}\left(\text{plot}\left(A0 \cdot e^{-b \cdot \left(t - Ln + 30500. - \text{tau} \cdot g \cdot \text{trunc}\left(\frac{t - Ln}{\text{tau}}\right)\right)}, t = Ln .. Lkr2, y = 0 .. 21000, \text{color} = \text{blue}\right), \text{plot}\left(\text{Amin}, t = Ln .. Lkr2, \text{color} = \text{green}\right), \text{plot}\left(750, t = Ln .. Lkr2, \text{color} = \text{red}\right)\right);$



$n := 1 : \text{tau} := 300000. : m := 1 :$

;

$Lkr1 := \text{solve}\left(A0 \cdot e^{-b \cdot \left(t - g \cdot \text{tau} \cdot \text{trunc}\left(\frac{t}{\text{tau}}\right)\right)} = \text{Amin2}, t\right) :$

$Lkr2 := \text{solve}\left(A0 \cdot e^{-b \cdot (t - Ln + 30500. - \text{tau} \cdot g \cdot m)} = \text{Amin2}, t\right) : Ln := Lkr1 :$

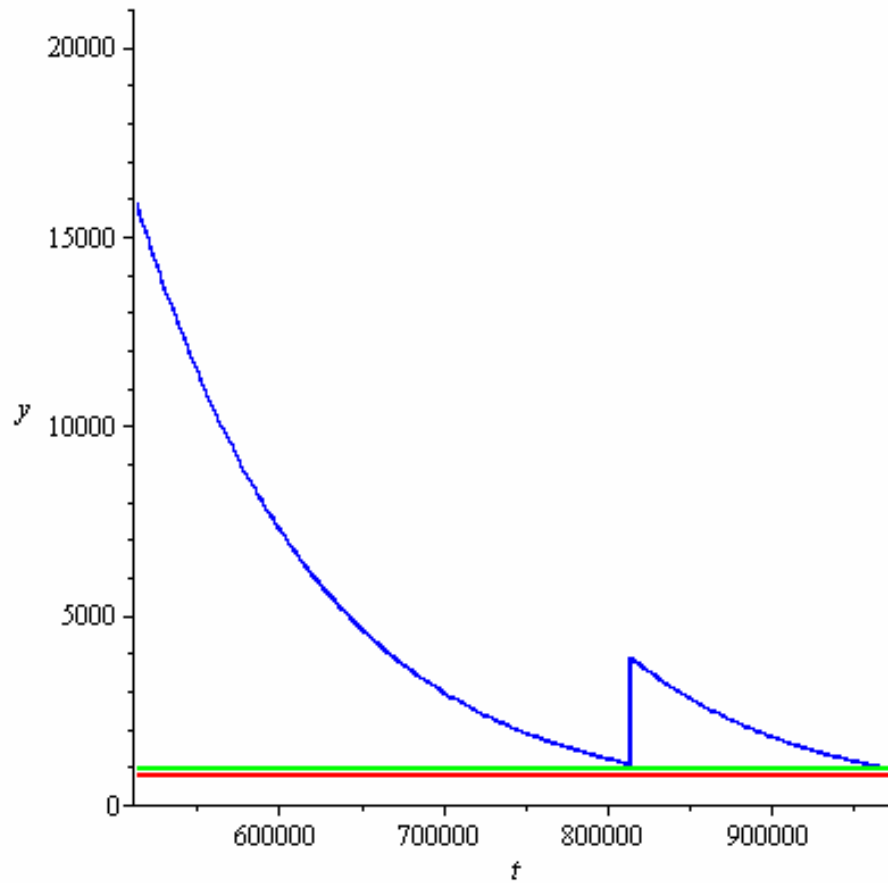
$Ln, Lkr2;$

$5.137145813 \cdot 10^5$

$9.729291626 \cdot 10^5$

;

$\text{display}\left(\text{plot}\left(A0 \cdot e^{-b \cdot \left(t - Ln + 30500. - \text{tau} \cdot g \cdot \text{trunc}\left(\frac{t - Ln}{\text{tau}}\right)\right)}\right), t = Ln .. Lkr2, y = 0 .. 21000, \text{color} = \text{blue}\right), \text{plot}(\text{Amin}, t = Ln .. Lkr2, \text{color} = \text{green}), \text{plot}(750, t = Ln .. Lkr2, \text{color} = \text{red})\right);$



$n := 1 : \text{tau} := 320000. : m := 1 :$

;

$Lkr1 := \text{solve}\left(A0 \cdot e^{-b \cdot \left(t - g \cdot \text{tau} \cdot \text{trunc}\left(\frac{t}{\text{tau}}\right)\right)} = \text{Amin2}, t\right) :$

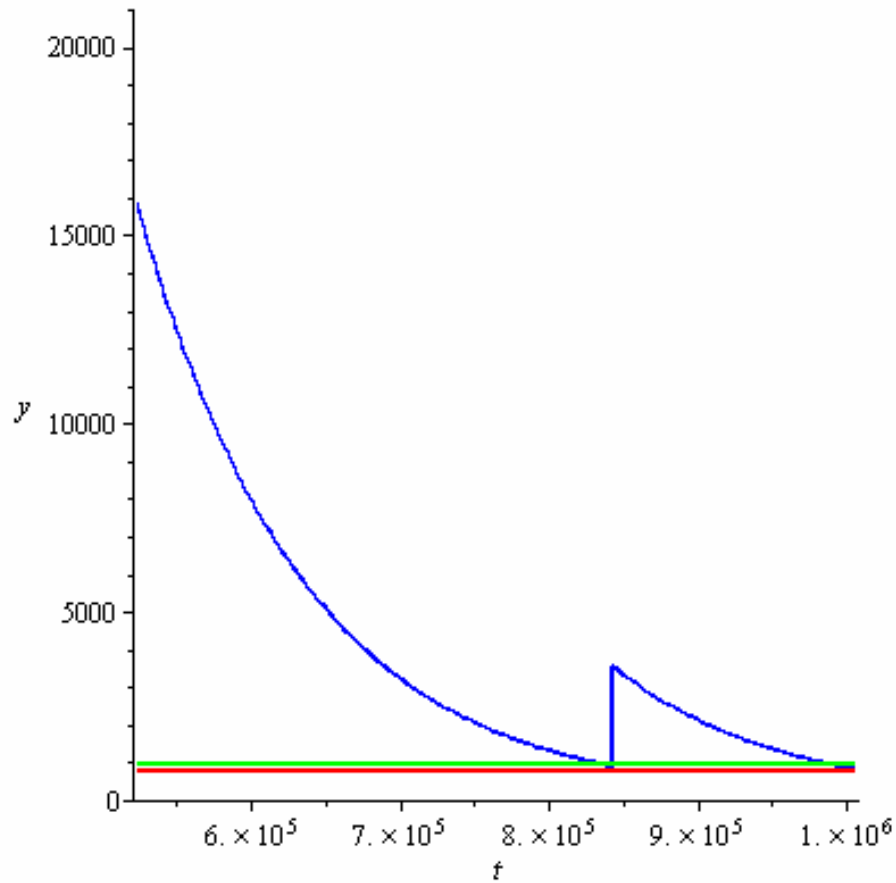
$Lkr2 := \text{solve}\left(A0 \cdot e^{-b \cdot (t - Ln + 30500. - \text{tau} \cdot g \cdot m)} = \text{Amin2}, t\right) : Ln := Lkr1 :$

$Ln, Lkr2;$

$5.233145813 \cdot 10^5 \quad 1.006529163 \cdot 10^6$

;

$\text{display}\left(\text{plot}\left(A0 \cdot e^{-b \cdot \left(t - Ln + 30500. - \text{tau} \cdot g \cdot \text{trunc}\left(\frac{t - Ln}{\text{tau}}\right)\right)}, t = Ln .. Lkr2, y = 0 .. 21000, \text{color} = \text{blue}\right), \text{plot}\left(\text{Amin}, t = Ln .. Lkr2, \text{color} = \text{green}\right), \text{plot}\left(750, t = Ln .. Lkr2, \text{color} = \text{red}\right)\right);$



$n := 1 : \text{tau} := 350000. : m := 1 :$

;

$Lkr1 := \text{solve}\left(A0 \cdot e^{-b \cdot \left(t - g \cdot \text{tau} \cdot \text{trunc}\left(\frac{t}{\text{tau}}\right)\right)} = \text{Amin2}, t\right) :$

$Lkr2 := \text{solve}\left(A0 \cdot e^{-b \cdot (t - Ln + 30500. - \text{tau} \cdot g \cdot m)} = \text{Amin2}, t\right) : Ln := Lkr1 :$

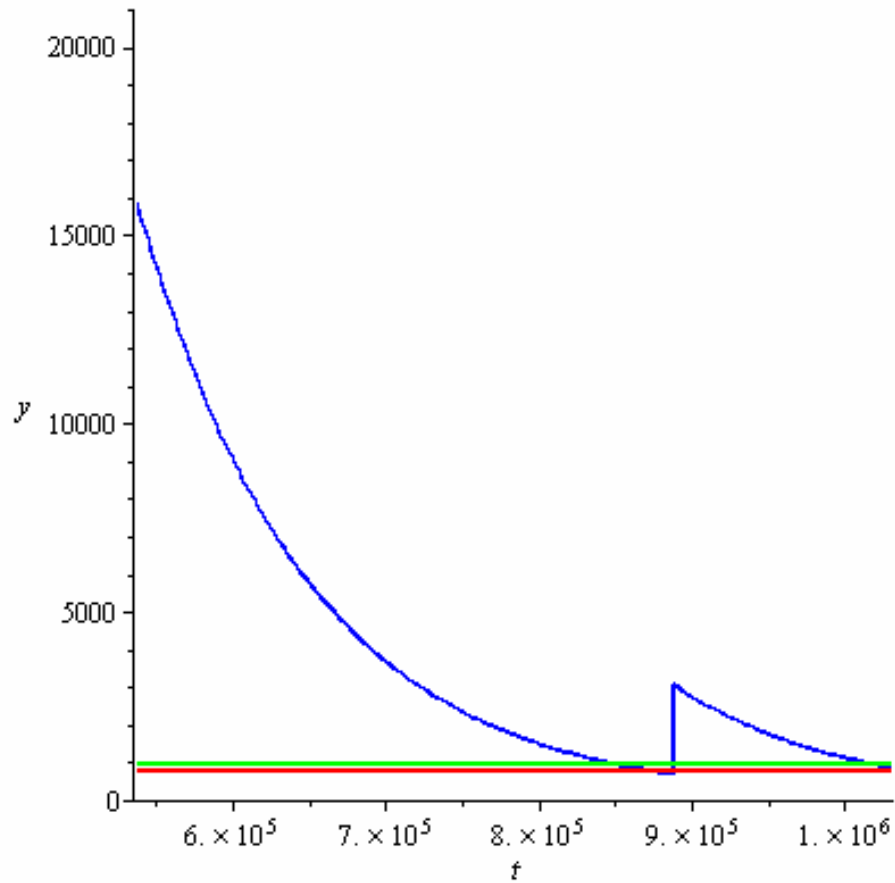
$Ln, Lkr2;$

$5.377145813 \cdot 10^5$

$1.030529163 \cdot 10^6$

;

$\text{display}\left(\text{plot}\left(A0 \cdot e^{-b \cdot \left(t - Ln + 30500. - \text{tau} \cdot g \cdot \text{trunc}\left(\frac{t - Ln}{\text{tau}}\right)\right)}, t = Ln .. Lkr2, y = 0 .. 21000, \text{color} = \text{blue}\right), \text{plot}\left(\text{Amin}, t = Ln .. Lkr2, \text{color} = \text{green}\right), \text{plot}\left(750, t = Ln .. Lkr2, \text{color} = \text{red}\right)\right);$



$n := 1 : \text{tau} := 360000. : m := 1 :$

;

$Lkr1 := \text{solve}\left(A0 \cdot e^{-b \cdot \left(t - g \cdot \text{tau} \cdot \text{trunc}\left(\frac{t}{\text{tau}}\right)\right)} = \text{Amin2}, t\right) :$

$Lkr2 := \text{solve}\left(A0 \cdot e^{-b \cdot (t - Ln + 30500. - \text{tau} \cdot g \cdot m)} = \text{Amin2}, t\right); Ln := Lkr1;$

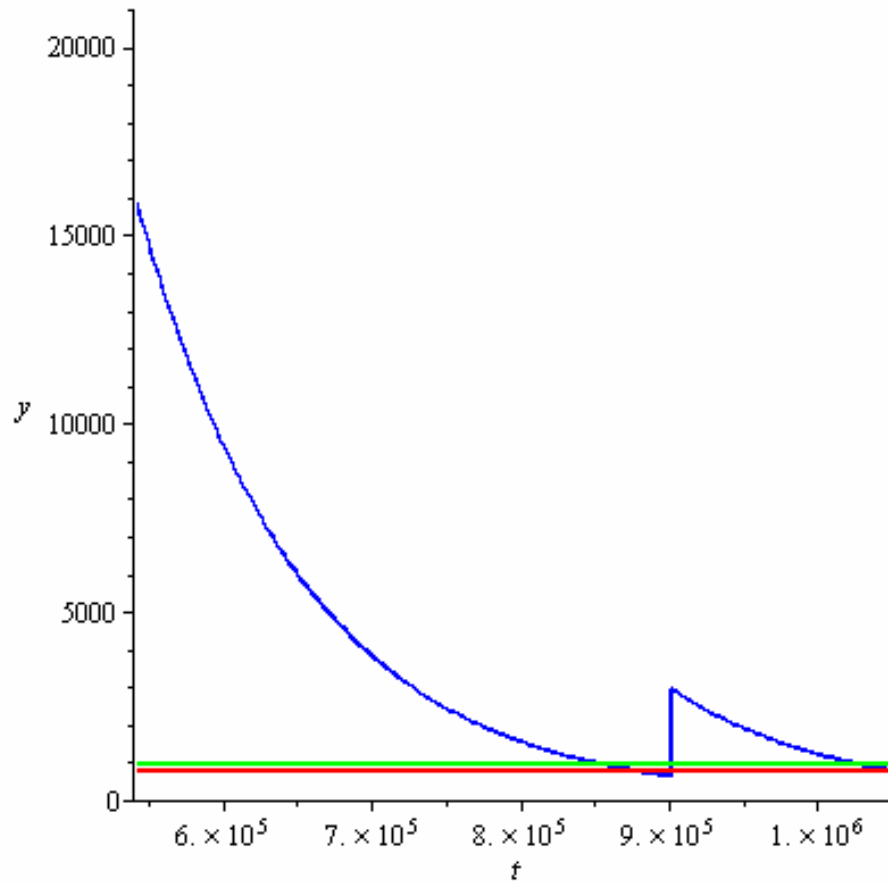
$Ln, Lkr2;$

$5.425145813 \cdot 10^5$

$1.049729163 \cdot 10^6$

;

$\text{display}\left(\text{plot}\left(A0 \cdot e^{-b \cdot \left(t - Ln + 30500. - \text{tau} \cdot g \cdot \text{trunc}\left(\frac{t - Ln}{\text{tau}}\right)\right)}, t = Ln .. Lkr2, y = 0 .. 21000, \text{color} = \text{blue}\right), \text{plot}\left(\text{Amin}, t = Ln .. Lkr2, \text{color} = \text{green}\right), \text{plot}\left(750, t = Ln .. Lkr2, \text{color} = \text{red}\right)\right);$



$n := 1 : \text{tau} := 240000. : m := 1 :$

;

$Lkr1 := \text{solve}\left(A0 \cdot e^{-b \cdot \left(t - g \cdot \text{tau} \cdot \text{trunc}\left(\frac{t}{\text{tau}}\right)\right)} = Amin2, t\right) :$

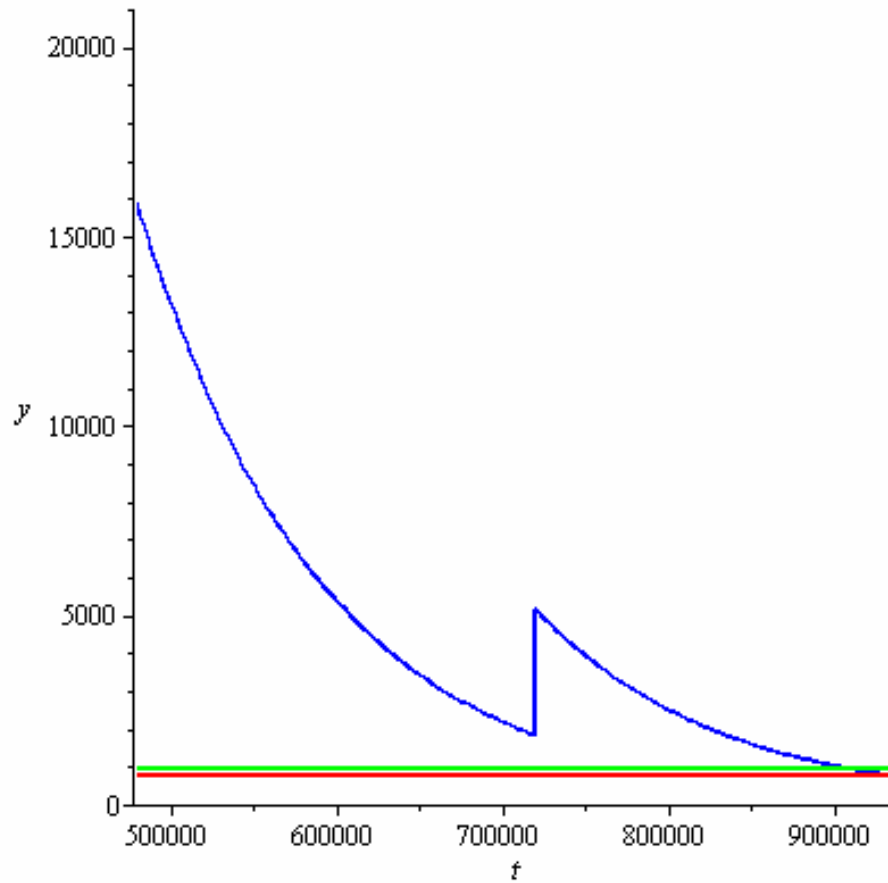
$Lkr2 := \text{solve}\left(A0 \cdot e^{-b \cdot (t - Ln + 30500. - \text{tau} \cdot g \cdot m)} = Amin2, t\right) : Ln := Lkr1 : Ln := 480000. :$

$Ln, Lkr2;$

4.80000 10⁵

9.344145813 10⁵

$\text{display}\left(\text{plot}\left(A0 \cdot e^{-b \cdot \left(t - Ln + 30500. - \text{tau} \cdot g \cdot \text{trunc}\left(\frac{t - Ln}{\text{tau}}\right)\right)}, t = Ln .. Lkr2, y = 0 .. 21000, \text{color} = \text{blue}\right), \text{plot}(Amin, t = Ln .. Lkr2, \text{color} = \text{green}), \text{plot}(750, t = Ln .. Lkr2, \text{color} = \text{red})\right);$



$n := 1 : \text{tau} := 240000. : m := 1 :$

$Lkr1 := \text{solve}\left(A0 \cdot e^{-b \cdot \left(t - g \cdot \text{tau} \cdot \text{trunc}\left(\frac{t}{\text{tau}}\right)\right)} = \text{Amin2}, t\right) :$

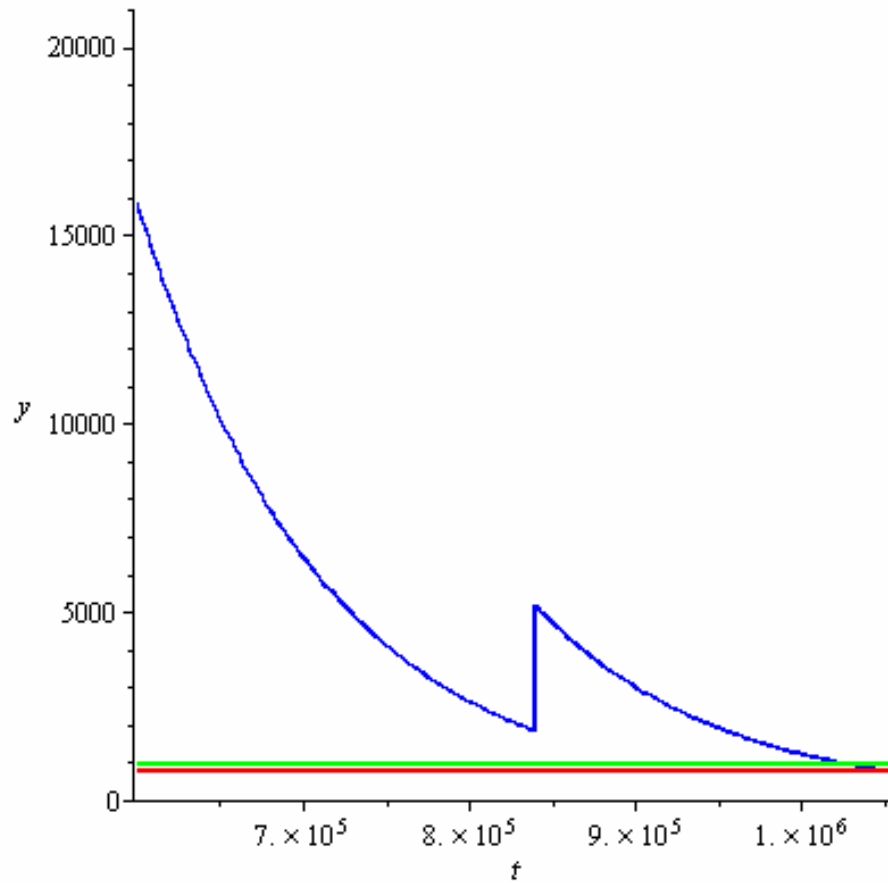
$Lkr2 := \text{solve}\left(A0 \cdot e^{-b \cdot (t - Ln + 30500. - \text{tau} \cdot g \cdot m)} = \text{Amin2}, t\right) : Ln := Lkr1 :$

$Ln, Lkr2;$

$6.001145813 \cdot 10^5$

$1.054529163 \cdot 10^6$

$\text{display}\left(\text{plot}\left(A0 \cdot e^{-b \cdot \left(t - Ln + 30500. - \text{tau} \cdot g \cdot \text{trunc}\left(\frac{t - Ln}{\text{tau}}\right)\right)}, t = Ln .. Lkr2, y = 0 .. 21000, \text{color} = \text{blue}\right), \text{plot}\left(\text{Amin}, t = Ln .. Lkr2, \text{color} = \text{green}\right), \text{plot}\left(750, t = Ln .. Lkr2, \text{color} = \text{red}\right)\right);$



Варіанти процесів відновлення до КР1 за «Правилами...»,
«технологія відновлення ЗЕРЗ»

***Lkr1* - напрацювання до КР1**

***n* – кількість відновлень; *tau* – період відновлень**

restart; with(plots) : with(Statistics) :

A0 := 20900. : b := 0.00001015 : b := 0.000009 : A := (t) → A0·e^{-b·t} :

g := 0.55 : Amin := 950. : Amin2 := 750. : Lren := (t) → g·tau·t - $\frac{\ln\left(\frac{Amin}{A0}\right)}{b}$:

S := (t) → 30.0·t + 50.76 : solve(A0·e^{-b·t} = Amin2, t); solve(A0·e^{-b·t} = Amin, t);

3.697145813 10⁵

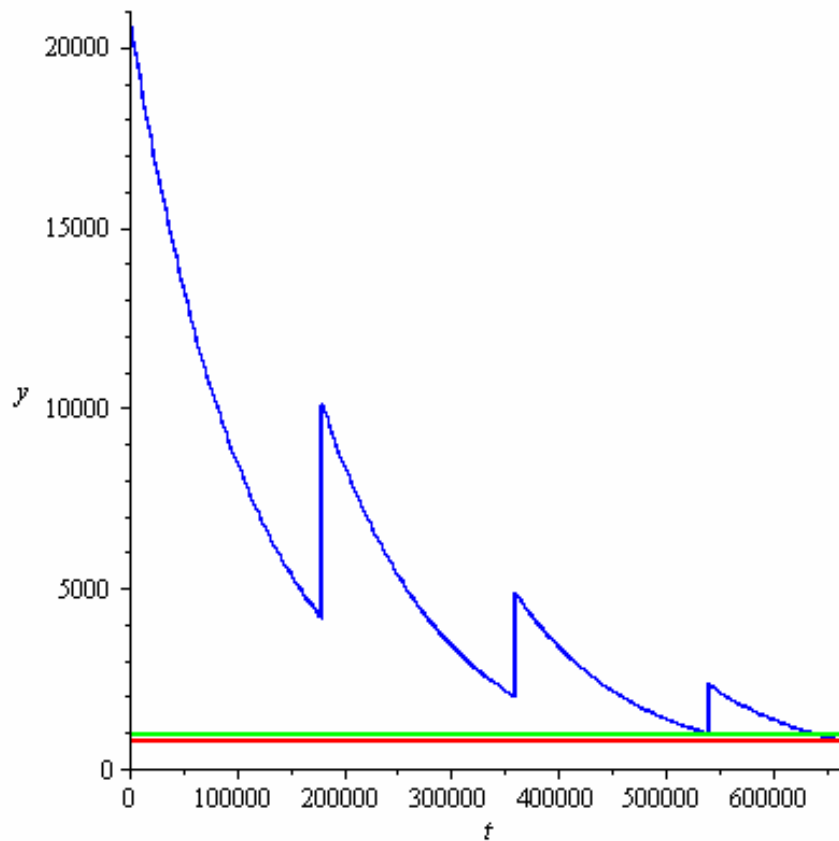
3.434491615 10⁵

```
n := 3 : tau := 180000. : Lkr1 := Lren(n); Lkr1 := solve(A0·e-b·(t-g·tau·trunc( $\frac{t}{\text{tau}}$ ))
= Amin2, t);
```

6.404491614 10⁵

6.667145813 10⁵

```
display(plot(A0·e-b·(t - tau·g·trunc( $\frac{t}{\text{tau}}$ )), t=0.0..Lkr1, y=0..21000, color=blue),
plot(Amin, t=0.0..Lkr1, color=green), plot(Amin2, t=0.0..Lkr1, color=red));
```



```
n := 2 : tau := 180000. :
```

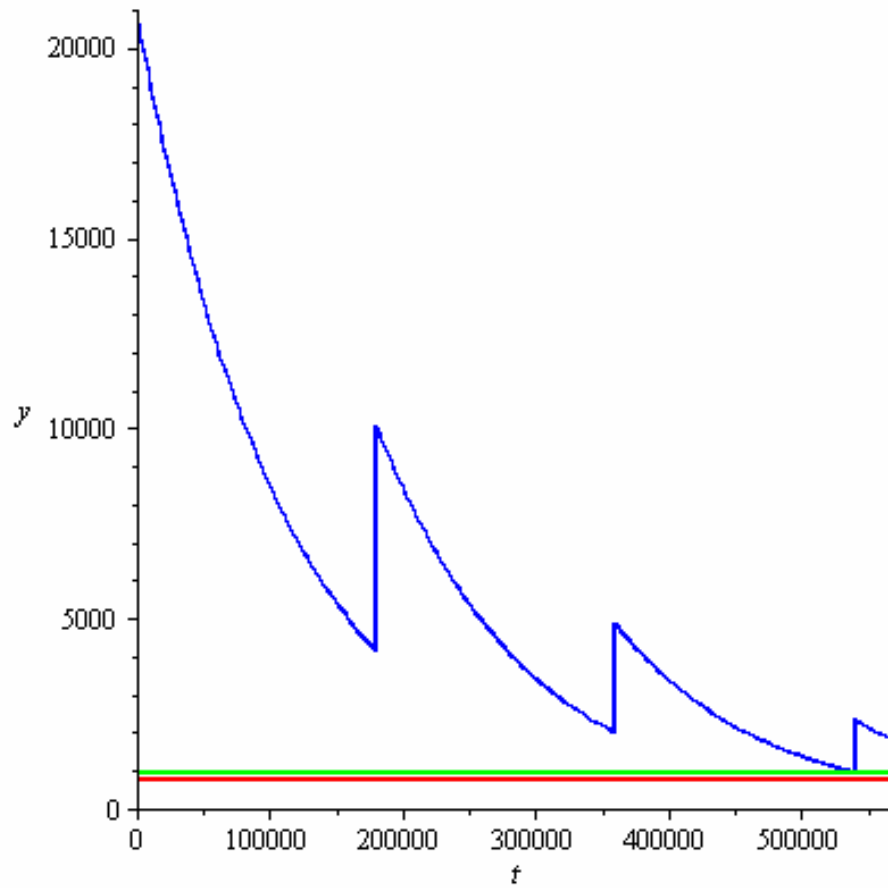
```
Lkr1 := Lren(n); Lkr1 := solve(A0·e-b·(t-g·tau·n) = Amin2, t);
```

5.414491614 10⁵

5.677145813 10⁵

;

```
display(plot(A0·e-b·(t - tau·g·trunc( $\frac{t}{\text{tau}}$ )), t=0.0..Lkr1, y=0..21000, color=blue),
plot(Amin, t=0.0..Lkr1, color=green), plot(Amin2, t=0.0..Lkr1, color=red));
```



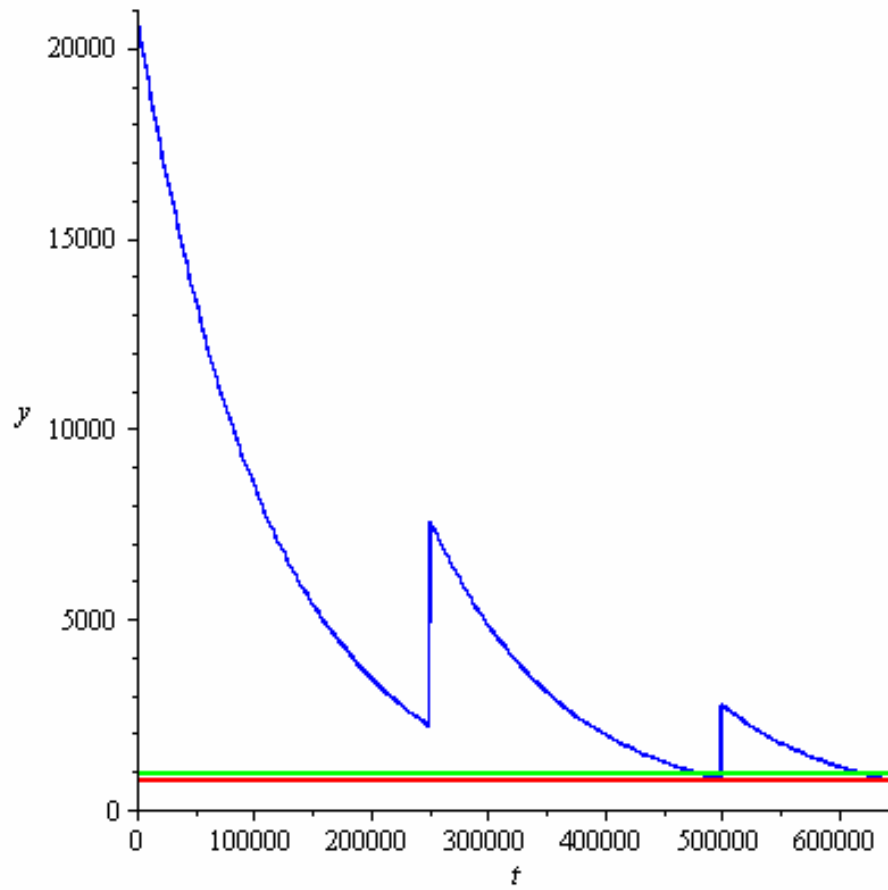
$n := 2 : \text{tau} := 250000. : \text{Lkr1} := \text{Lren}(n); \text{Lkr1} := \text{solve}(A0 \cdot e^{-b \cdot (t - g \cdot \text{tau} \cdot n)} = \text{Amin2}, t);$

$6.184491614 \cdot 10^5$

$6.447145813 \cdot 10^5$

$$\text{display} \left(\text{plot} \left(A0 \cdot e^{-b \cdot \left(t - \text{tau} \cdot g \cdot \text{trunc} \left(\frac{t}{\text{tau}} \right) \right)}, t=0.0.. \text{Lkr1}, y=0..21000, \text{color}=\text{blue} \right), \right.$$

$$\left. \text{plot}(\text{Amin}, t=0.0.. \text{Lkr1}, \text{color}=\text{green}), \text{plot}(\text{Amin2}, t=0.0.. \text{Lkr1}, \text{color}=\text{red}) \right);$$

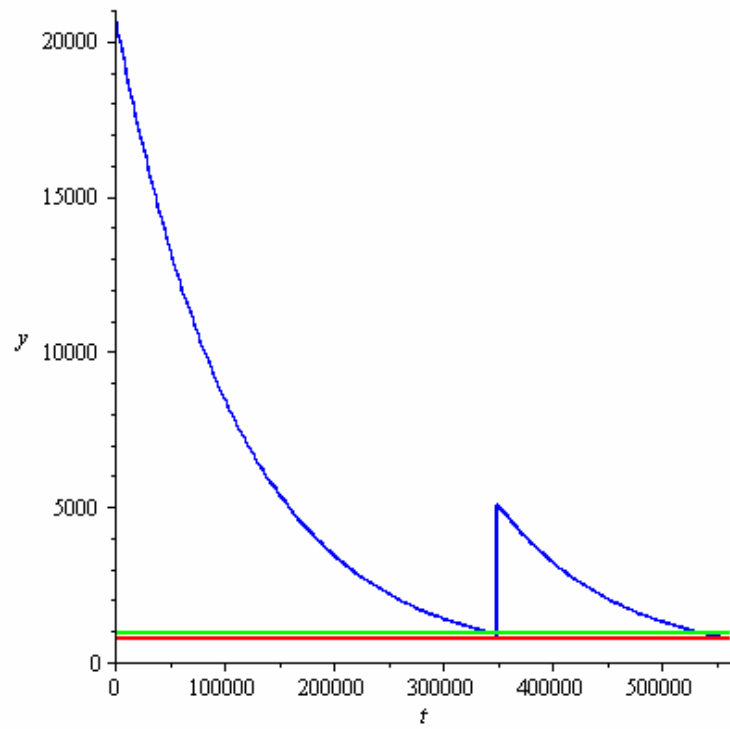


```
n := 1 : tau := 350000. : Lkr1 := Lren(n); Lkr1 := solve(A0·e-b·(t-g·tau·n) = Amin2,
t);
```

5.359491614 10⁵

5.622145813 10⁵

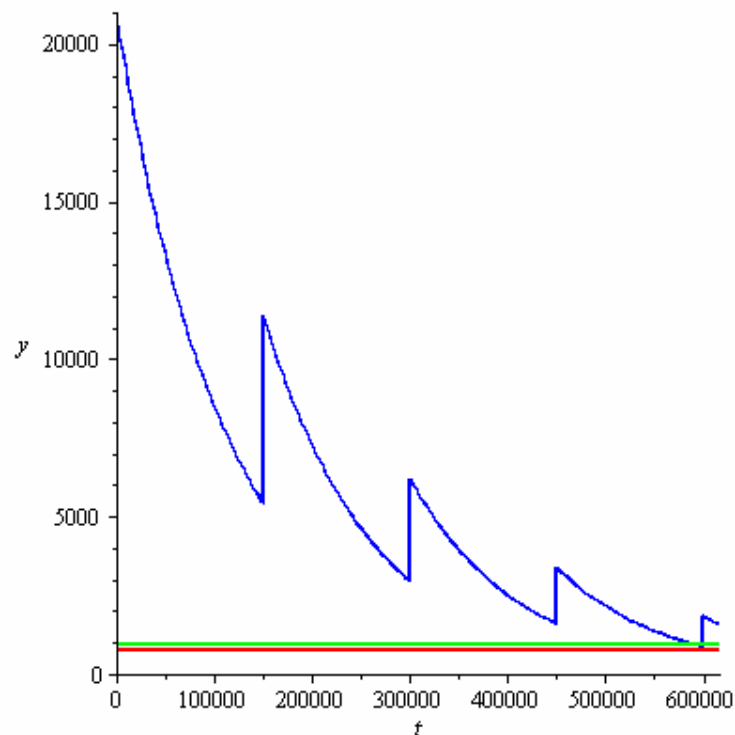
```
display( plot(A0·e-b·(t - tau·g·trunc(t/tau)), t=0.0..Lkr1, y=0..21000, color=blue),
plot(Amin, t=0.0..Lkr1, color=green), plot(Amin2, t=0.0..Lkr1, color=red) );
```



$n := 3 : \text{tau} := 150000. : \text{Lkr1} := \text{Lren}(n); \text{Lkr1} := \text{solve}(A0 \cdot e^{-b \cdot (t - g \cdot \text{tau} \cdot n)} = \text{Amin2}, t);$

$5.909491614 \cdot 10^5 \quad 6.172145813 \cdot 10^5$

$\text{display}\left(\text{plot}\left(A0 \cdot e^{-b \cdot \left(t - \text{tau} \cdot g \cdot \text{trunc}\left(\frac{t}{\text{tau}}\right)\right)}, t=0.0.. \text{Lkr1}, y=0..21000, \text{color}=\text{blue}\right), \right.$
 $\left. \text{plot}(\text{Amin}, t=0.0.. \text{Lkr1}, \text{color}=\text{green}), \text{plot}(\text{Amin2}, t=0.0.. \text{Lkr1}, \text{color}=\text{red})\right);$



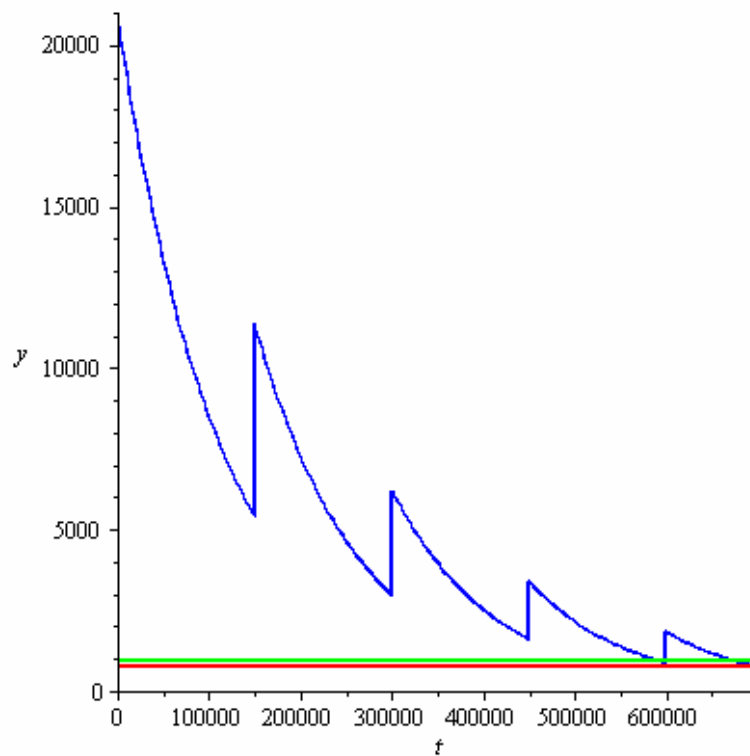
$n := 4 : \tau := 150000. : Lkr1 := Lren(n);$

6.734491614 10^5

$Lkr1 := solve(A0 \cdot e^{-b \cdot (t - g \cdot \tau \cdot n)} = Amin2, t);$

6.997145813 10^5

$display\left(plot\left(A0 \cdot e^{-b \cdot \left(t - \tau \cdot g \cdot \text{trunc}\left(\frac{t}{\tau} \right) \right)}, t=0.0..Lkr1, y=0..21000, color=blue \right), \right.$
 $plot(Amin, t=0.0..Lkr1, color=green), plot(Amin2, t=0.0..Lkr1, color=red) \left. \right);$



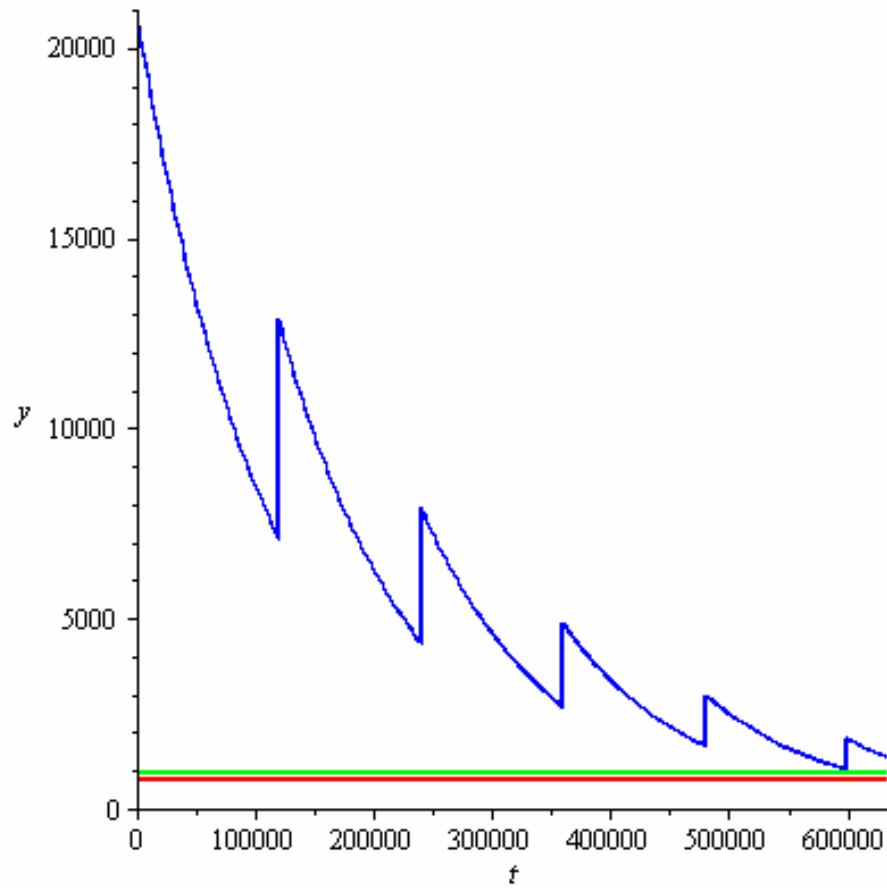
$n := 4 : \tau := 120000. : Lkr1 := Lren(n);$

6.074491614 10^5

$Lkr1 := solve(A0 \cdot e^{-b \cdot (t - g \cdot \tau \cdot n)} = Amin2, t);$

6.337145813 10^5

$display\left(plot\left(A0 \cdot e^{-b \cdot \left(t - \tau \cdot g \cdot \text{trunc}\left(\frac{t}{\tau} \right) \right)}, t=0.0..Lkr1, y=0..21000, color=blue \right), \right.$
 $plot(Amin, t=0.0..Lkr1, color=green), plot(Amin2, t=0.0..Lkr1, color=red) \left. \right);$



```
n := 5 : tau := 120000. : Lkr1 := Lren(n);
```

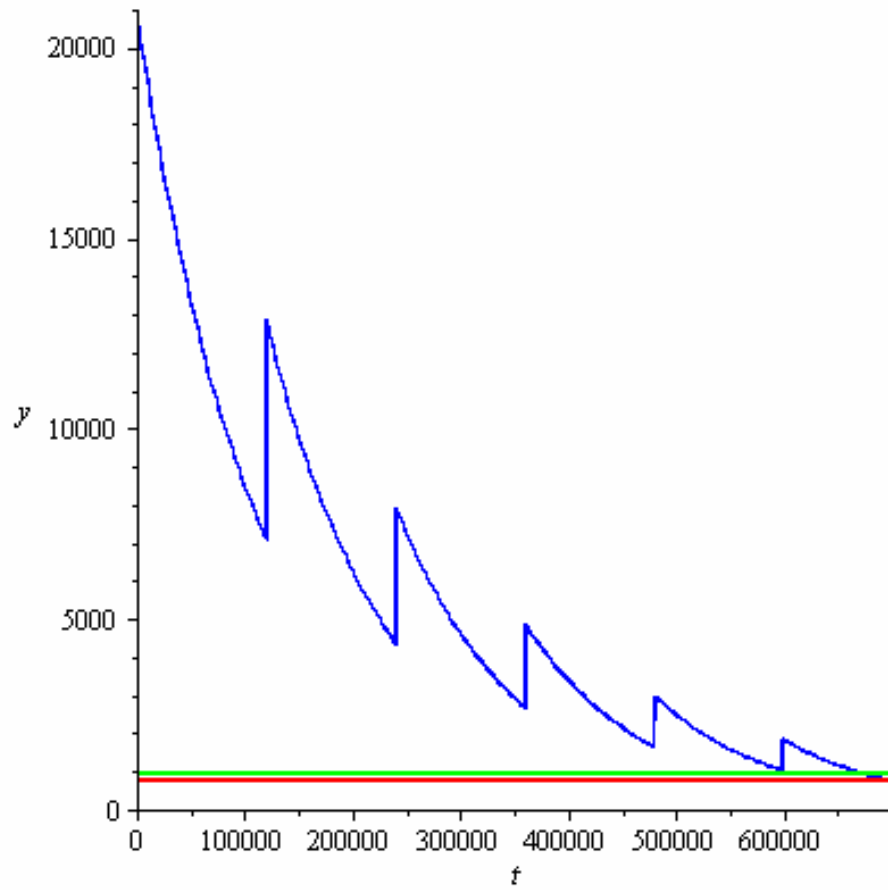
```
6.734491614 105
```

```
;
```

```
Lkr1 := solve(A0·e-b·(t-g·tau·n) = Amin2, t);
```

```
6.997145813 105
```

```
display(
  plot(A0·e-b·(t - tau·g·trunc(t/tau)), t=0.0..Lkr1, y=0..21000, color=blue),
  plot(Amin, t=0.0..Lkr1, color=green), plot(Amin2, t=0.0..Lkr1, color=red)
);
```

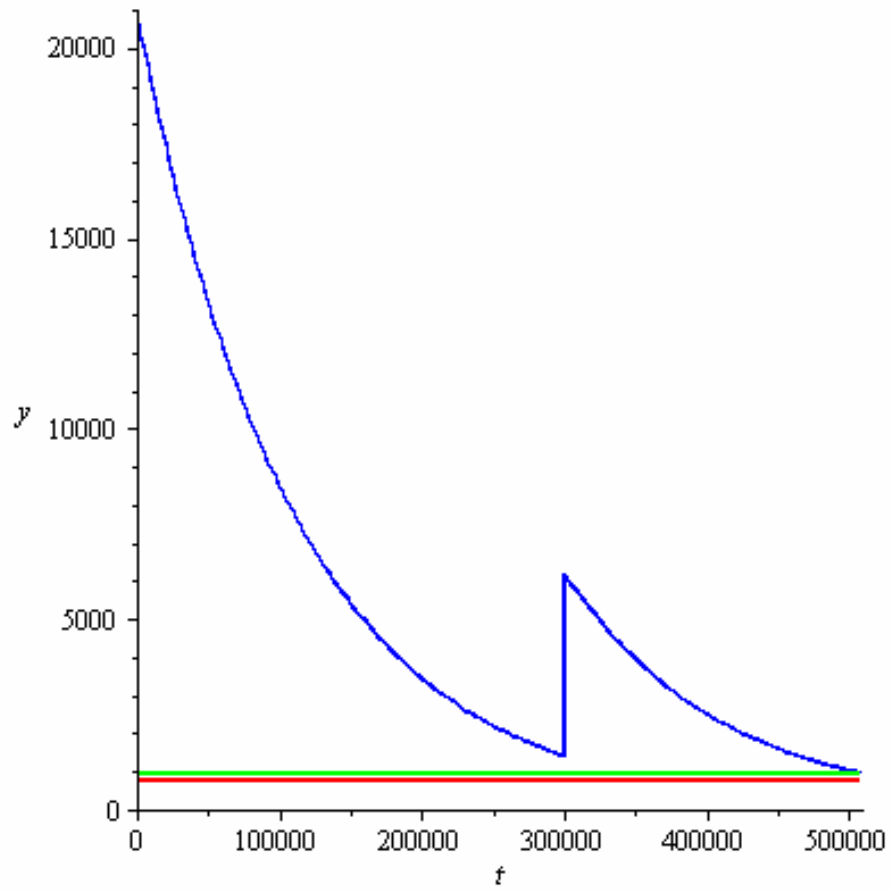


```
n := 1 : tau := 300000. : Lkr1 := Lren(n); Lkr1 := solve(A0·e-b·(t-g·tau·n) = Amin2, t);
```

7.394491614 10⁵

7.394491615 10⁵

```
display( plot( A0·e-b·(t - tau·g·trunc(t/tau)), t=0.0..Lkr1, y=0..21000, color=blue ),
  plot(Amin, t=0.0..Lkr1, color=green), plot(Amin2, t=0.0..Lkr1, color=red) );
```



$n := 1 : \text{tau} := 360000. :$

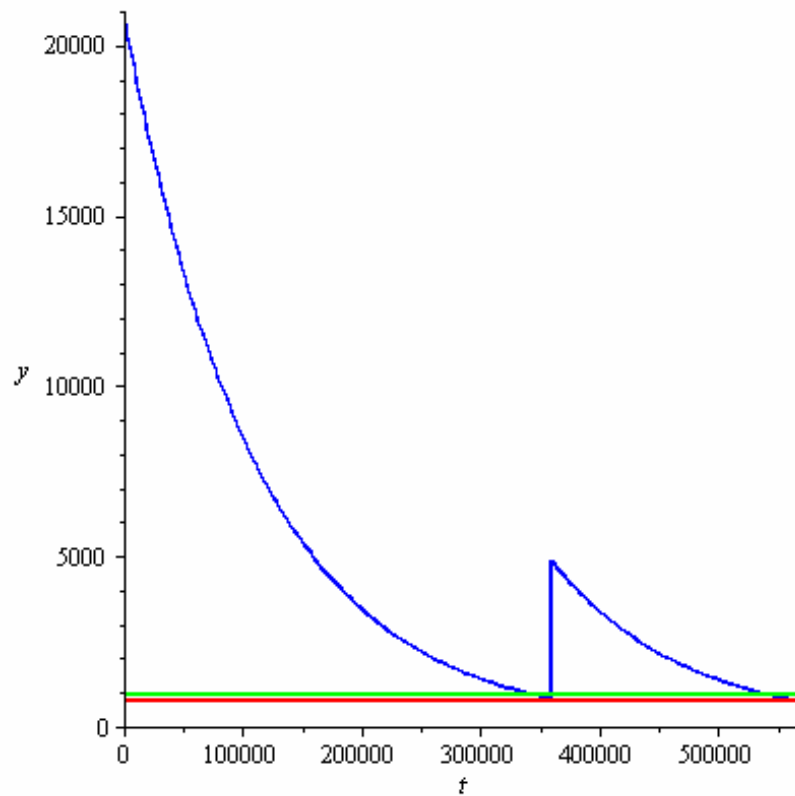
$Lkr1 := Lren(n); \quad Lkr1 := \text{solve}(A0 \cdot e^{-b \cdot (t - g \cdot \text{tau} \cdot n)} = Amin2, t);$

$5.414491614 \cdot 10^5$

$5.677145813 \cdot 10^5$

$$\text{display}\left(\text{plot}\left(A0 \cdot e^{-b \cdot \left(t - \text{tau} \cdot g \cdot \text{trunc}\left(\frac{t}{\text{tau}}\right)\right)}, t=0.0..Lkr1, y=0..21000, \text{color}=\text{blue}\right),\right.$$

$$\left.\text{plot}(Amin, t=0.0..Lkr1, \text{color}=\text{green}), \text{plot}(Amin2, t=0.0..Lkr1, \text{color}=\text{red})\right);$$



Варіанти процесів відновлення від КР1 до КР2 за «Правилами...»,
«технологія відновлення ЛЛРЗ»

Lkr1 - напрацювання до КР1

Lkr2 - напрацювання до КР2

n – кількість відновлень; ***tau*** – період відновлень

restart;

with(plots) : with(Statistics) :

A0 := 20900. : b := 0.000009 : gkr := 0.8 :

A := (t) → A0·e^{-b·t} : S := (t) → 30.0·t + 50.76 : solve(A0·e^{-b·t} = A0·0.84, t);

19372.59857

tau := 180000. : g := 0.55 : Amin := 950. : Amin2 := 750. : Lren := (t) → g·tau·t

$$- \frac{\ln\left(\frac{Amin}{A0}\right)}{b} :$$

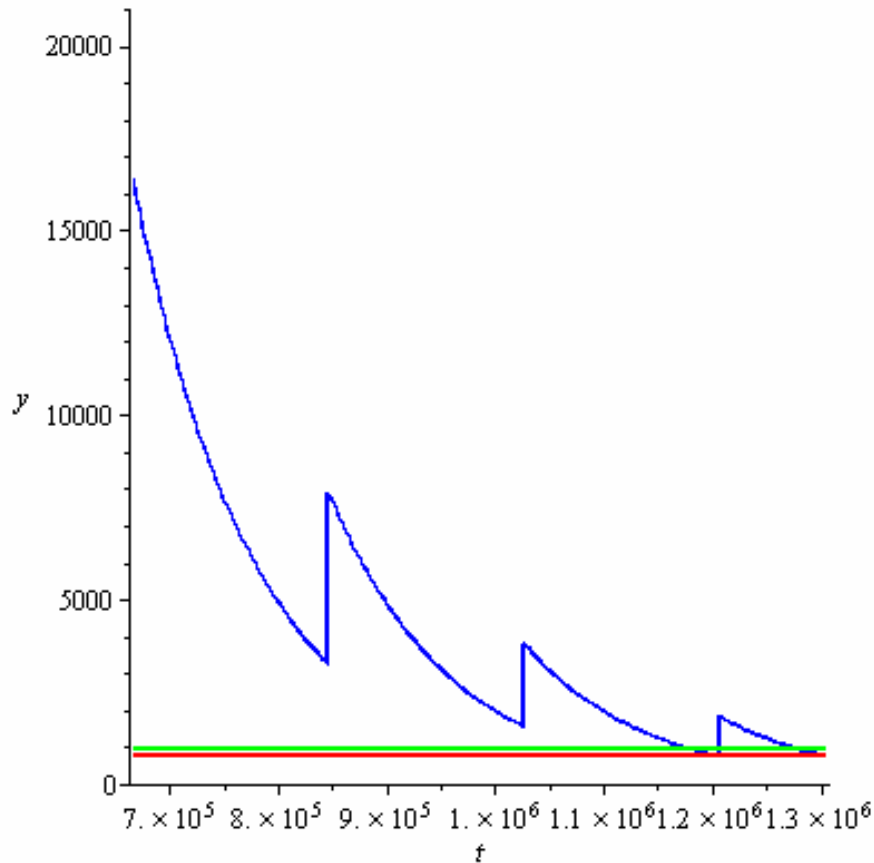
n := 3 : tau := 180000. : m := 3 :

$Lkr1 := Lren(n); Lkr1 := solve\left(A0 \cdot e^{-b \cdot \left(t - g \cdot \text{tau} \cdot \text{trunc}\left(\frac{t}{\text{tau}}\right)\right)} = Amin2, t\right); Ln := Lkr1;$

6.404491614 10⁵ 6.667145813 10⁵

$Lkr2 := solve\left(A0 \cdot e^{-b \cdot (t - Ln + 27000. - \text{tau} \cdot g \cdot m)} = Amin2, t\right); 1.306429163 10^6$

$display\left(\text{plot}\left(A0 \cdot e^{-b \cdot \left(t - Ln + 27000. - \text{tau} \cdot g \cdot \text{trunc}\left(\frac{t - Ln}{\text{tau}}\right)\right)}, t = Ln .. Lkr2, y = 0 .. 21000, color = blue\right), \text{plot}\left(Amin, t = Ln .. Lkr2, color = green\right), \text{plot}\left(750, t = Ln .. Lkr2, color = red\right)\right);$



$n := 2; \text{tau} := 180000.; m := 2;$

$Lkr1 := Lren(n);$

5.414491614 10⁵

$Lkr1 := solve\left(A0 \cdot e^{-b \cdot \left(t - g \cdot \text{tau} \cdot \text{trunc}\left(\frac{t}{\text{tau}}\right)\right)} = Amin2, t\right); Ln := Lkr1;$

6.667145813 10⁵

;

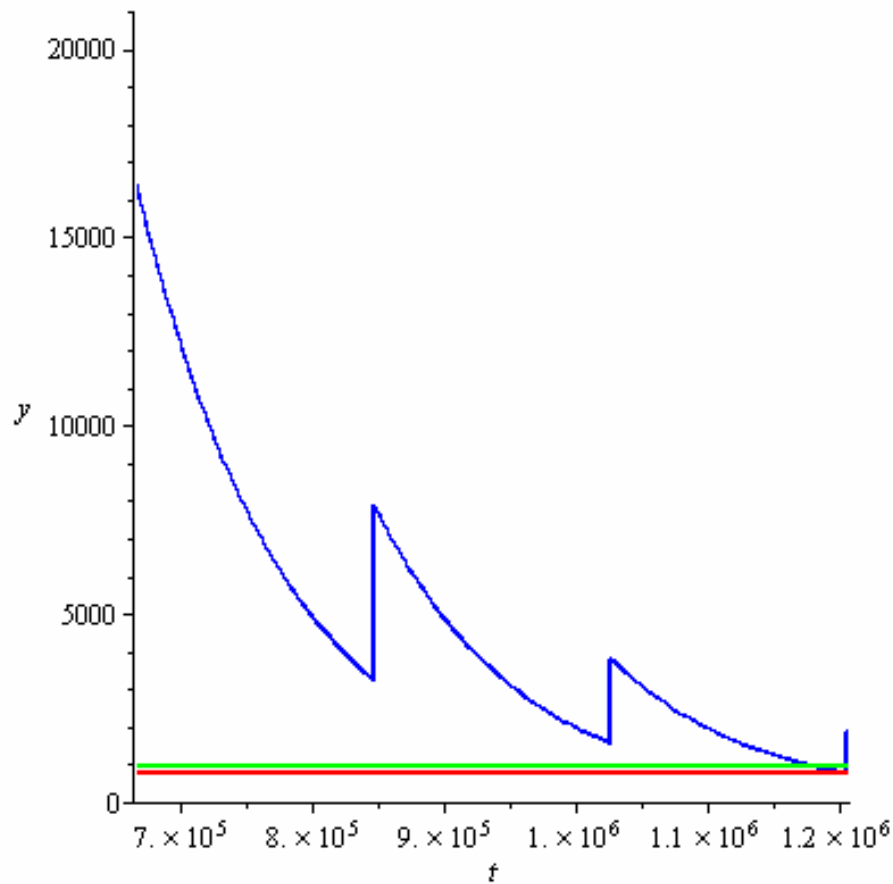
$Lkr2 := solve\left(A0 \cdot e^{-b \cdot (t - Ln + 27000. - \text{tau} \cdot g \cdot m)} = Amin2, t\right); Ln; Lkr2;$

6.667145813 10⁵

1.207429163 10⁶

;

display(plot(A0·e^{-b·(t - Ln + 27000. - tau·g·trunc($\frac{t-Ln}{tau}$))} , t=Ln..Lkr2 , y=0..21000, color=blue), plot(Amin, t=Ln..Lkr2, color=green), plot(750, t=Ln..Lkr2, color=red));



n := 3 : tau := 180000. : m := 1 :

Lkr1 := Lren(n);

6.404491614 10⁵

Lkr1 := solve(A0·e^{-b·(t - g·tau·trunc($\frac{t}{tau}$))} = Amin2, t) : Ln := Lkr1;

6.667145813 10⁵

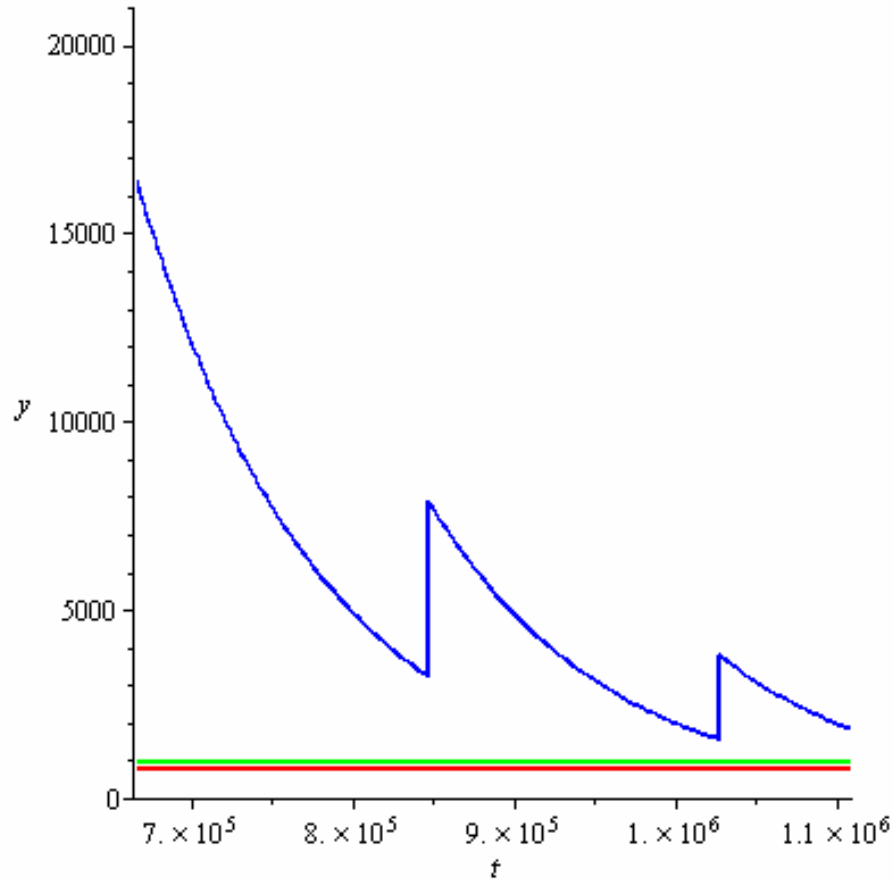
;

Lkr2 := solve(A0·e^{-b·(t - Ln + 27000. - tau·g·m)} = Amin2, t) : Ln; Lkr2;

6.667145813 10⁵

1.108429163 10⁶

```
display( plot( A0·e-b·(t - Ln + 27000. - tau·g·trunc( (t-Ln)/tau) ), t=Ln..Lkr2 , y=0..21000, color
= blue ), plot( Amin, t=Ln..Lkr2, color=green ), plot( 750, t=Ln..Lkr2, color=red ) );
```



```
n := 2 : tau := 250000. : m := 2 :
```

```
Lkr1 := Lren(n); Ln := Lkr1 :
```

6.184491614 10⁵

```
;
```

```
Lkr1 := solve( A0·e-b·(t - g·tau·trunc( (t)/tau) ) = Amin2, t ) : Ln := Lkr1 :
```

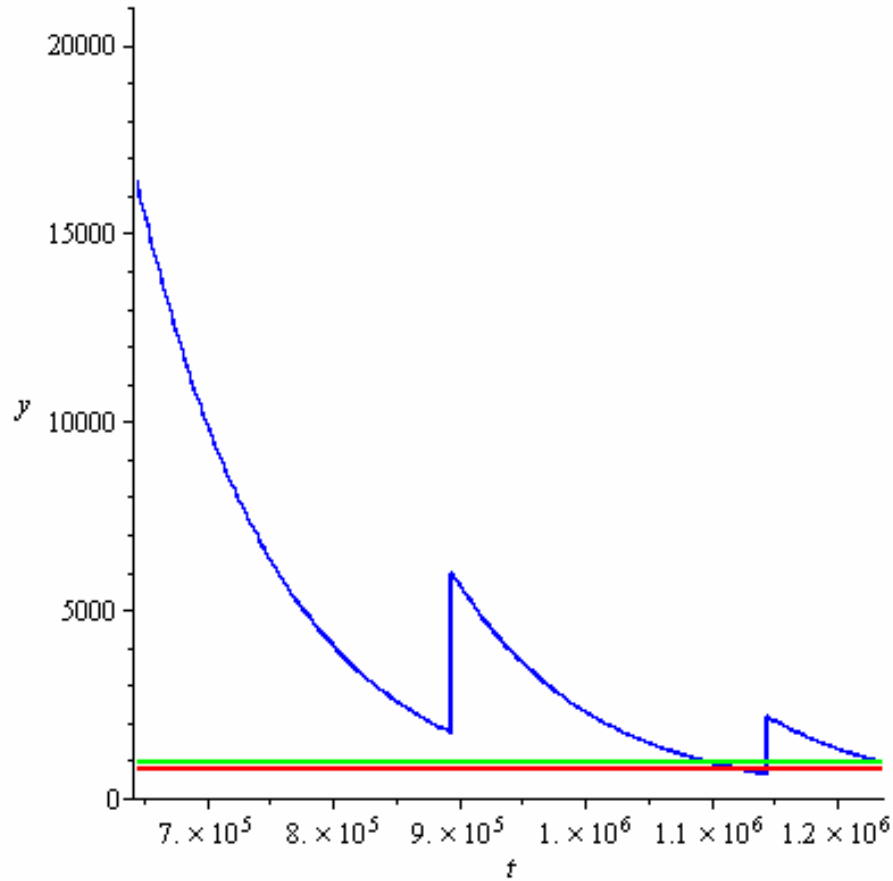
```
Lkr2 := solve( A0·e-b·(t - Ln + 27000. - tau·g·m) = Amin2, t ); Ln; Lkr2;
```

1.236163743 10⁶

6.447145813 10⁵

1.236163743 10⁶


```
display(
  plot(
    A0 * e^(-b * (t - Ln + 27000. - tau * g * trunc(t/tau))) , t = Ln .. Lkr2 , y = 0 .. 21000 , color = blue
  ),
  plot(Amin, t = Ln .. Lkr2, color = green),
  plot(750, t = Ln .. Lkr2, color = red)
);
```



```
n := 2 : tau := 250000. : m := 1 :
```

```
Lkr1 := Lren(n);
```

6.184491614 10⁵

```
;
```

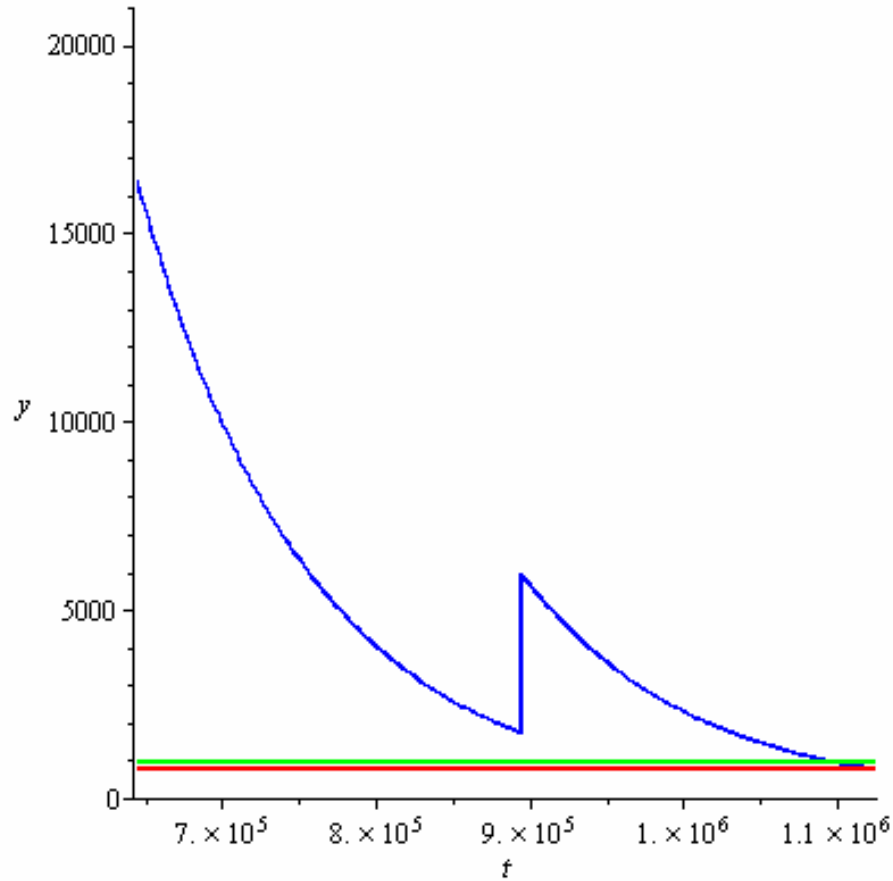
```
Lkr1 := solve(A0 * e^(-b * (t - g * tau * trunc(t/tau))) = Amin2, t) : Ln := Lkr1 :
```

```
Lkr2 := solve(A0 * e^(-b * (t - Ln + 27000. - tau * g * m)) = Amin2, t) : Ln; Lkr2;
```

6.447145813 10⁵

1.124929163 10⁶

```
display(
  plot(
    A0 * e^(-b * (t - Ln + 27000. - tau * g * trunc(t/tau)))
    , t = Ln .. Lkr2 , y = 0 .. 21000 , color
    = blue
  )
  , plot(Amin, t = Ln .. Lkr2, color = green)
  , plot(750, t = Ln .. Lkr2, color = red)
);
```



```
n := 1 : tau := 350000. : m := 1 :
```

```
Lkr1 := Lren(n);
```

5.359491614 10⁵

```
;
```

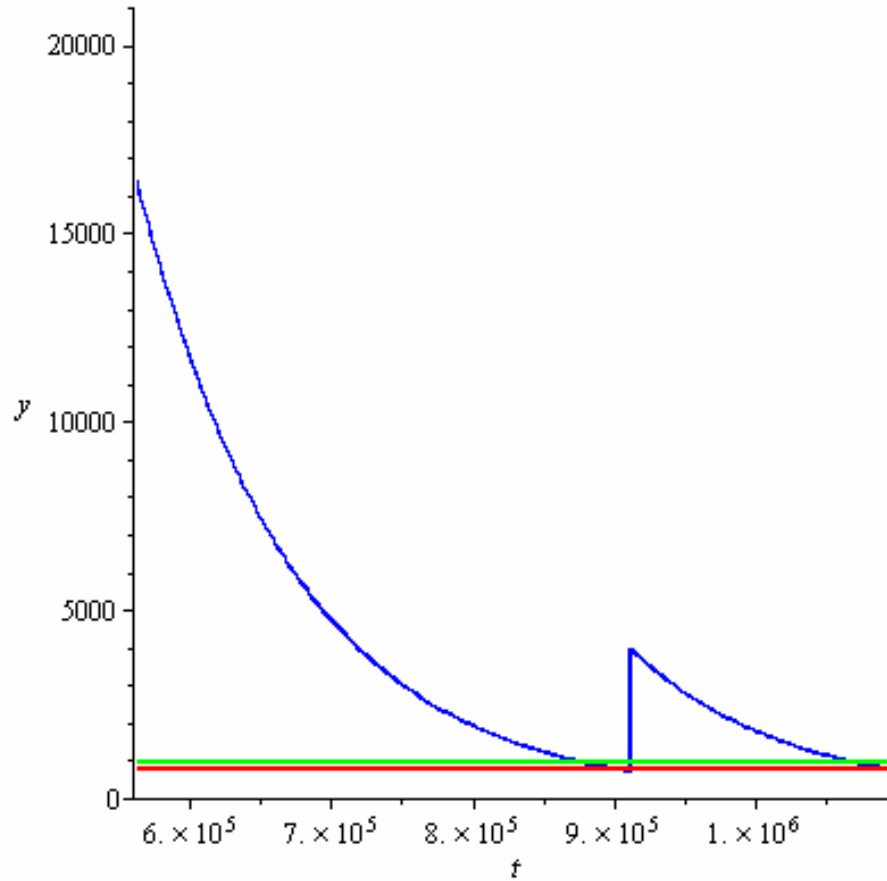
```
Lkr1 := solve(
  A0 * e^(-b * (t - g * tau * trunc(t/tau))) = Amin2, t
) : Ln := Lkr1 :
```

```
Lkr2 := solve(
  A0 * e^(-b * (t - Ln + 27000. - tau * g * m)) = Amin2, t
) : Ln; Lkr2;
```

5.622145813 10⁵

1.097429163 10⁶

```
display( plot( A0 * e-b * (t - Ln + 27000. - tau * g * trunc( (t - Ln) / tau)) , t = Ln .. Lkr2 , y = 0 .. 21000 , color
= blue ), plot( Amin , t = Ln .. Lkr2 , color = green ), plot( 750 , t = Ln .. Lkr2 , color = red ) );
```



```
n := 3 : tau := 15000. : m := 3 :
```

```
Lkr1 := Lren(n);
```

```
5.909491614 105
```

```
;
```

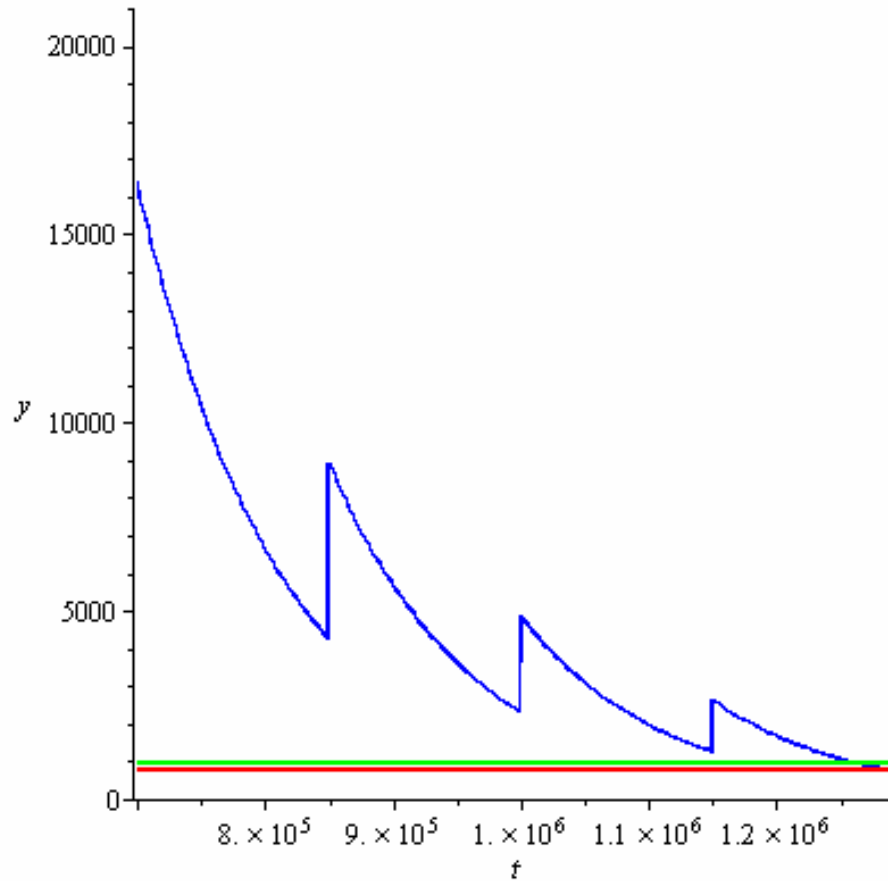
```
Lkr1 := solve( A0 * e-b * (t - g * tau * trunc( (t) / tau)) = Amin2 , t ) : Ln := Lkr1 :
```

```
Lkr2 := solve( A0 * e-b * (t - Ln + 27000. - tau * g * m) = Amin2 , t ) : Ln, Lkr2;
```

```
6.997145813 105
```

```
1.289929163 106
```

```
display( plot( A0·e-b·(t - Ln + 27000. - tau·g·trunc( (t-Ln)/tau ) ) , t=Ln..Lkr2 , y=0..21000, color
= blue ), plot( Amin, t=Ln..Lkr2, color=green ), plot( 750, t=Ln..Lkr2, color=red ) );
```



```
n := 3 : tau := 150000. : m := 2 :
```

```
Lkr1 := Lren(n);
```

5.909491614 10⁵

```
;
```

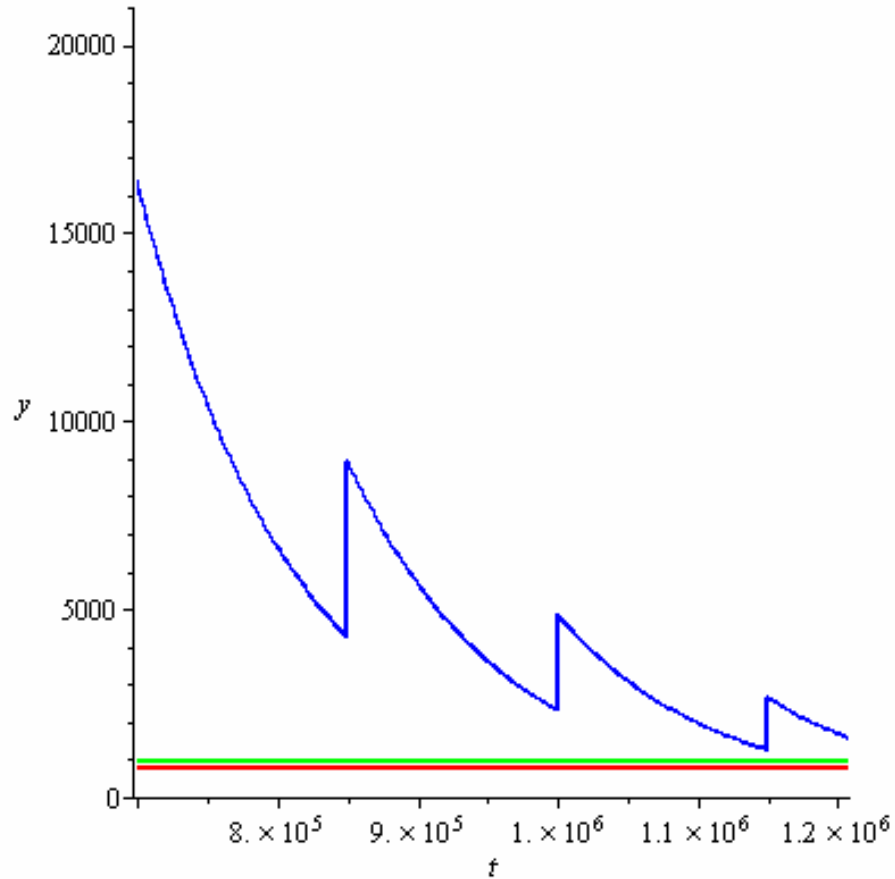
```
Lkr1 := solve( A0·e-b·(t - g·tau·trunc( t/tau ) ) = Amin2, t ) : Ln := Lkr1 :
```

```
Lkr2 := solve( A0·e-b·(t - Ln + 27000. - tau·g·m) = Amin2, t ) : Ln; Lkr2;
```

6.997145813 10⁵

1.207429163 10⁶

```
display( plot( A0 * e-b * (t - Ln + 27000. - tau * g * trunc( (t - Ln) / tau)) , t = Ln .. Lkr2 , y = 0 .. 21000 , color
= blue ), plot( Amin , t = Ln .. Lkr2 , color = green ), plot( 750 , t = Ln .. Lkr2 , color = red ) );
```



```
n := 3 : tau := 150000. : m := 4 :
```

```
Lkr1 := Lren(n);
```

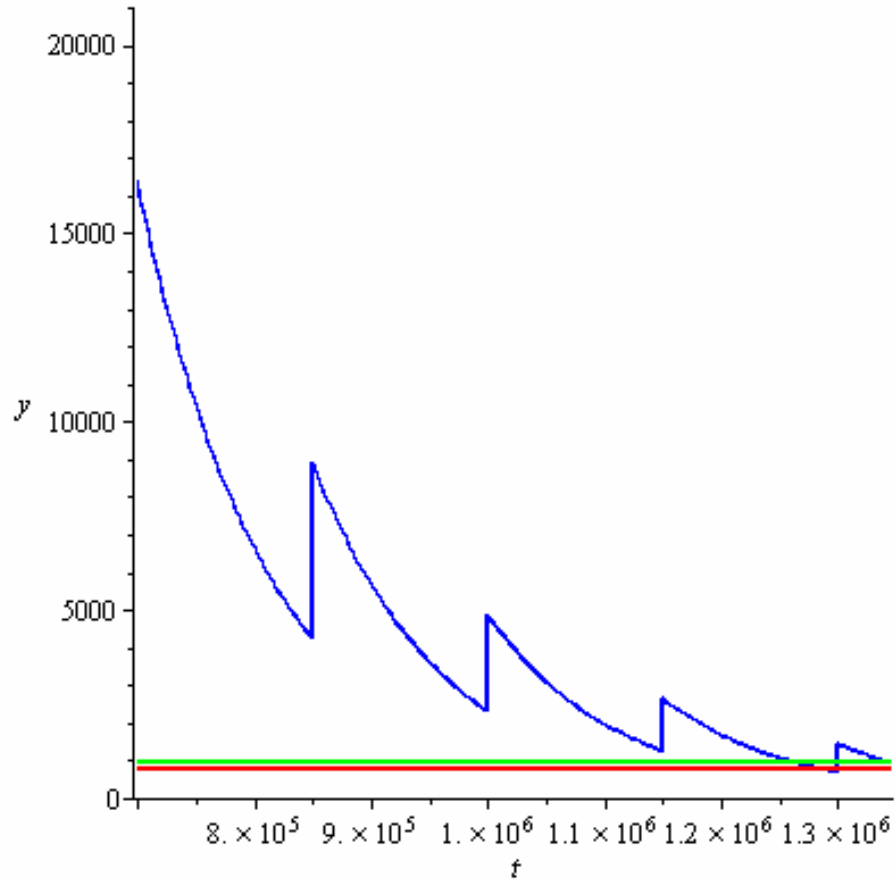
5.909491614 10⁵

```
Lkr1 := solve( A0 * e-b * (t - g * tau * trunc( (t) / tau)) = Amin2 , t ) : Ln := Lkr1 :
```

```
Lkr2 := solve( A0 * e-b * (t - Ln + 27000. - tau * g * m) = Amin , t ) : Ln , Lkr2;
```

6.997145813 10⁵1.346163742 10⁶

```
display( plot( A0·e-b·(t - Ln + 27000. - tau·g·trunc( (t-Ln)/tau) ), t=Ln..Lkr2, y=0..21000, color
= blue), plot(Amin, t=Ln..Lkr2, color=green), plot(750, t=Ln..Lkr2, color=red) );
```



```
n := 4 : tau := 120000. : m := 3 :
```

```
Lkr1 := Lren(n); Ln := Lkr1 :
```

6.074491614 10⁵

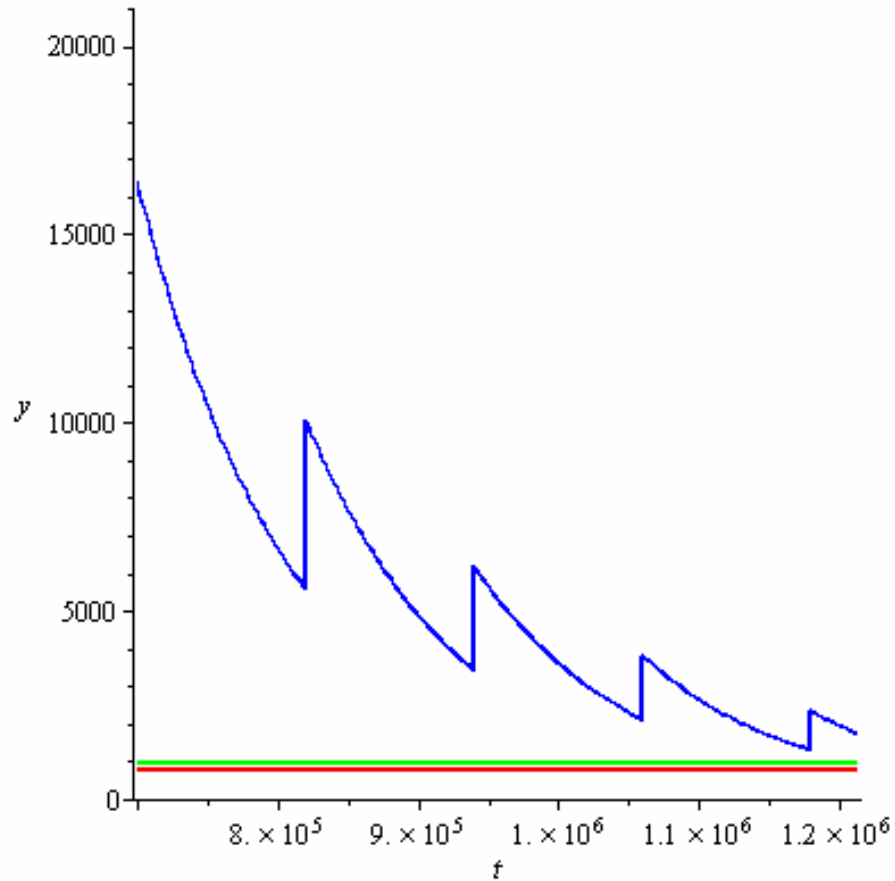
```
Lkr1 := solve( A0·e-b·(t - g·tau·trunc( (t)/tau) ) = Amin2, t) : Ln := Lkr1 :
```

```
Lkr2 := solve( A0·e-b·(t - Ln + 27000. - tau·g·m) = Amin, t) : Ln; Lkr2;
```

6.997145813 10⁵

1.214163743 10⁶

```
display( plot( A0·e-b·(t - Ln + 27000. - tau·g·trunc( (t-Ln)/tau) ), t=Ln..Lkr2, y=0..21000, color
= blue), plot(Amin, t=Ln..Lkr2, color=green), plot(750, t=Ln..Lkr2, color=red) );
```



$n := 4$: $\tau := 120000$. : $m := 4$:

$Lkr1 := Lren(n)$;

6.074491614 10^5

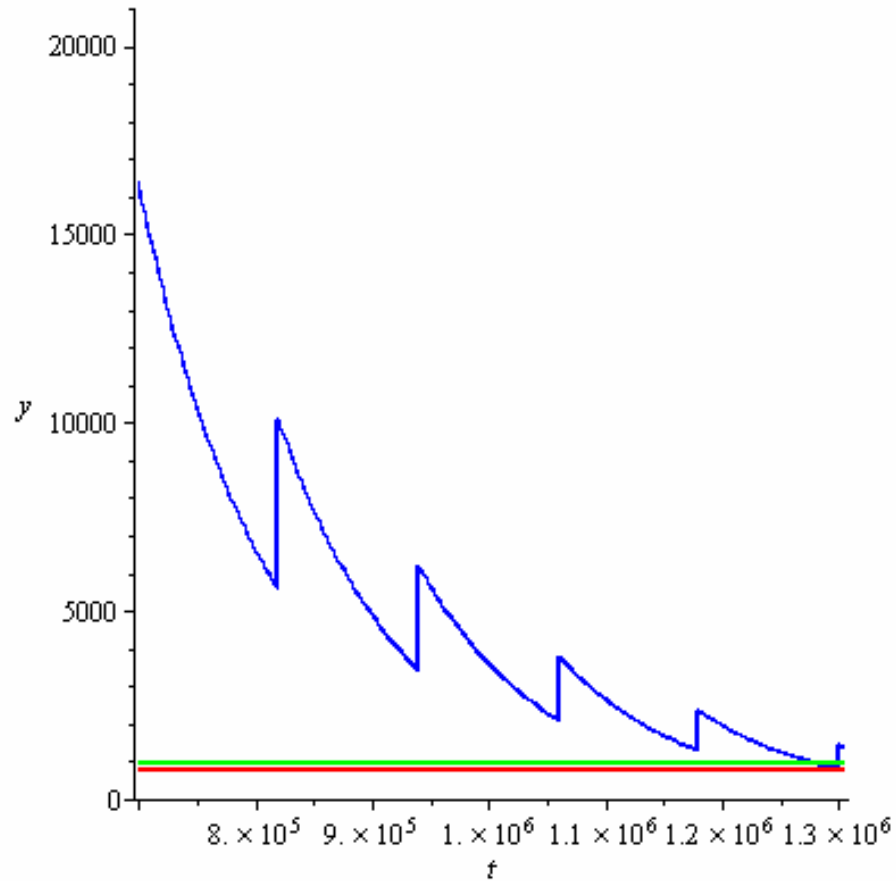
$Lkr1 := solve\left(A0 \cdot e^{-b \cdot \left(t - g \cdot \tau \cdot \text{trunc}\left(\frac{t}{\tau}\right)\right)} = Amin2, t\right) : Ln := Lkr1 :$

$Lkr2 := solve\left(A0 \cdot e^{-b \cdot (t - Ln + 27000. - \tau \cdot g \cdot m)} = Amin2, t\right) : Ln; Lkr2;$

6.997145813 10^5

1.306429163 10^6

$display\left(\text{plot}\left(A0 \cdot e^{-b \cdot \left(t - Ln + 27000. - \tau \cdot g \cdot \text{trunc}\left(\frac{t - Ln}{\tau}\right)\right)}\right), t = Ln .. Lkr2, y = 0 .. 21000, color = blue\right), \text{plot}(Amin, t = Ln .. Lkr2, color = green), \text{plot}(750, t = Ln .. Lkr2, color = red)\right);$



$n := 4$: $\text{tau} := 120000$. : $m := 5$:

$Lkr1 := Lren(n)$;

$6.074491614 \cdot 10^5$

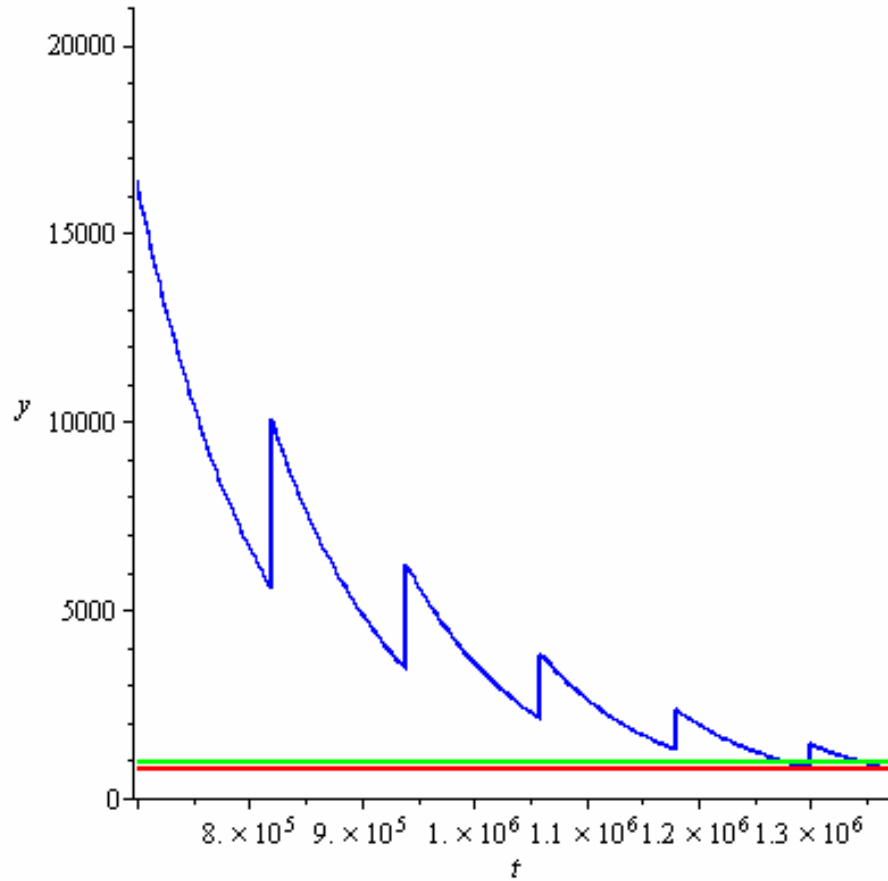
$Lkr1 := \text{solve}\left(A0 \cdot e^{-b \cdot \left(t - g \cdot \text{tau} \cdot \text{trunc}\left(\frac{t}{\text{tau}}\right)\right)} = \text{Amin2}, t\right)$: $Ln := Lkr1$:

$Lkr2 := \text{solve}\left(A0 \cdot e^{-b \cdot (t - Ln + 27000. - \text{tau} \cdot g \cdot m)} = \text{Amin2}, t\right)$: Ln , $Lkr2$;

$6.997145813 \cdot 10^5$

$1.372429162 \cdot 10^6$


```
display(
  plot(
    A0·e-b·(t - Ln + 27000. - tau·g·trunc( $\frac{t-Ln}{tau}$ )), t=Ln..Lkr2, y=0..21000, color=blue),
  plot(Amin, t=Ln..Lkr2, color=green),
  plot(750, t=Ln..Lkr2, color=red)
);
```



```
n := 1 : tau := 360000. : m := 1 :
```

```
Lkr1 := Lren(n);
```

5.414491614 10⁵

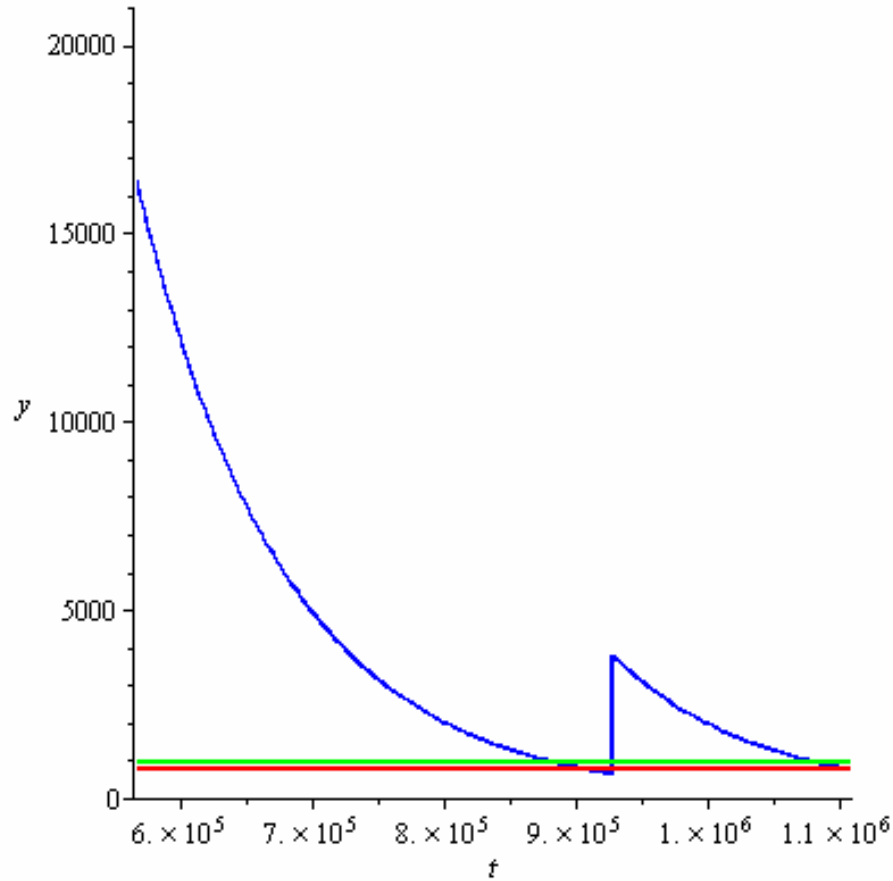
```
Lkr1 := solve(
  A0·e-b·(t - g·tau·trunc( $\frac{t}{tau}$ )) = Amin2, t) : Ln := Lkr1 :
```

```
Lkr2 := solve(
  A0·e-b·(t - Ln + 27000. - tau·g·m) = Amin2, t) : Ln, Lkr2;
```

5.677145813 10⁵

1.108429163 10⁶

```
display( plot( A0·e-b·(t - Ln + 27000. - tau·g·trunc( $\frac{t-Ln}{tau}$ )) , t=Ln..Lkr2 , y=0..21000, color
= blue ), plot(Amin, t=Ln..Lkr2, color=green), plot(750, t=Ln..Lkr2, color=red) );
```



```
n := 1 : tau := 300000. : m := 1 :
```

```
Lkr1 := Lren(n);
```

5.084491614 10⁵

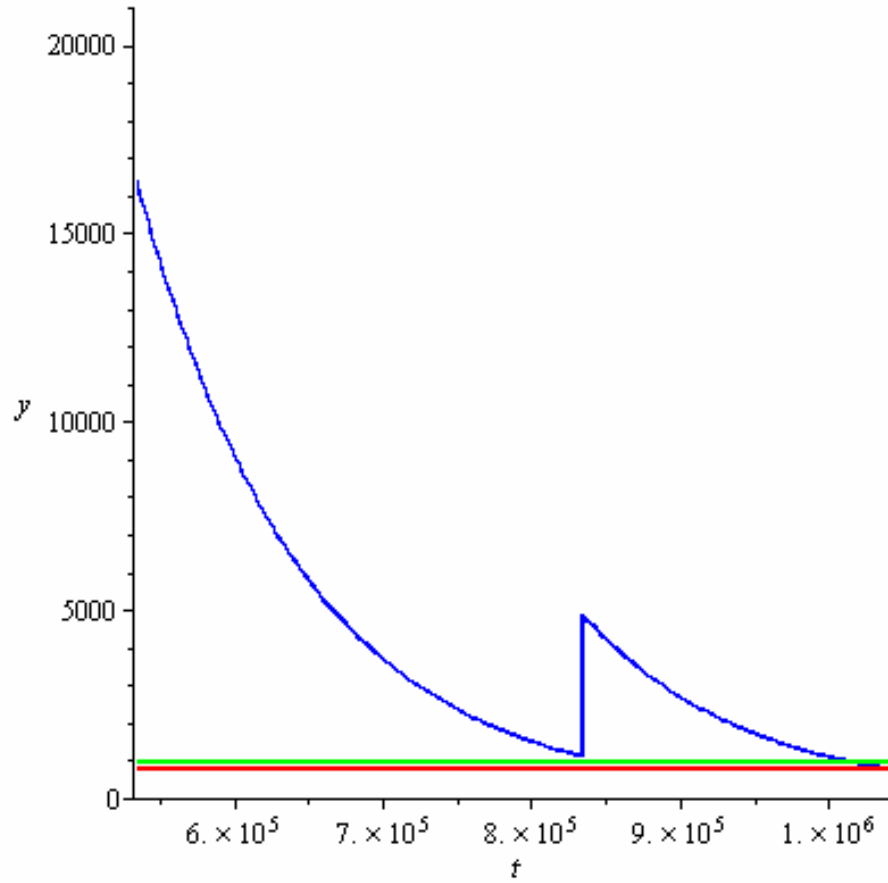
```
Lkr1 := solve( A0·e-b·(t - g·tau·trunc( $\frac{t}{tau}$ )) = Amin2, t ) : Ln := Lkr1 :
```

```
Lkr2 := solve( A0·e-b·(t - Ln + 27000. - tau·g·m) = Amin2, t ) : Ln, Lkr2;
```

5.347145813 10⁵

1.042429163 10⁶

```
display( plot( A0 * e-b * (t - Ln + 27000. - tau * g * trunc( (t - Ln) / tau)) , t = Ln .. Lkr2 , y = 0 .. 21000 , color
= blue ), plot( Amin , t = Ln .. Lkr2 , color = green ), plot( 750 , t = Ln .. Lkr2 , color = red ) );
```



ДОДАТОК Б**Кластерний аналіз станів корпусної ізоляції ТЕД НБ-406 за зворотною напругою**

Кількість котушок – 24 (вимірів зворотної напруги)

P1, P2, ..., P24 – позначення об'єктів кластеризації (ідентифікатор кривої зворотної напруги).

Для класифікації кривих зворотної напруги використано ізотонічне розбиття.

Програма розпізнавання виводить матрицю відстаней між об'єктами, формує первинні ланцюжки і визначає відстані між ланцюжками (в дужках вказано між якими об'єктами). Побудова графа і кластерів виконується вручну. Розглянемо, як виконується цей процес.

Для розбиття на кластери за методом куль необхідно порівнювати відстань між об'єктами з критичною. Об'єкти, відстань між якими чітко менше критичної, об'єднують в один кластер. Якщо взяти зазначені в ній мінімальні значення (не враховуючи значення на головній діагоналі, які завжди дорівнюють нулю) по кожній колонці і вибрати з них максимальне, то це і буде критичне значення.

Можна також визначити форму сліду в просторі, використовуючи в якості початкових елементів не кластери, а вихідні об'єкти. Формуються пари найближчих об'єктів з урахуванням відстані між ними.

Матриця ізотонічних відстаней

	<i>P1</i>	<i>P2</i>	<i>P3</i>	<i>P4</i>	<i>P5</i>	<i>P6</i>	<i>P7</i>	<i>P8</i>
<i>P1</i>	0	0,247717	0,268236	0,321495	0,255123	0,208817	0,304151	0,340472
<i>P2</i>	0,247717	0	0,218052	0,34547	0,314042	0,194176	0,220715	0,244437
<i>P3</i>	0,268236	0,218052	0	0,375163	0,28949	0,198919	0,302301	0,237973
<i>P4</i>	0,321495	0,34547	0,375163	0	0,181878	0,398737	0,196961	0,250932
<i>P5</i>	0,255123	0,314042	0,28949	0,181878	0	0,323535	0,267803	0,243099
<i>P6</i>	0,208817	0,194176	0,198919	0,398737	0,323535	0	0,318139	0,283999
<i>P7</i>	0,304151	0,220715	0,302301	0,196961	0,267803	0,318139	0	0,182711
<i>P8</i>	0,340472	0,244437	0,237973	0,250932	0,243099	0,283999	0,182711	0
<i>P9</i>	0,28838	0,348414	0,330229	0,299702	0,296006	0,257878	0,289123	0,285536
<i>P10</i>	0,33146	0,387308	0,441255	0,119967	0,236958	0,431155	0,242892	0,339931
<i>P11</i>	0,32986	0,294145	0,35878	0,407348	0,388522	0,239844	0,291181	0,310677
<i>P12</i>	0,163622	0,271891	0,309289	0,254124	0,222313	0,217893	0,274802	0,278825
<i>P13</i>	0,26849	0,217014	0,30404	0,228523	0,216223	0,259511	0,193053	0,234807
<i>P14</i>	0,33695	0,305316	0,360376	0,263032	0,229067	0,337589	0,229176	0,256968
<i>P15</i>	0,363011	0,267705	0,368781	0,355867	0,312197	0,312923	0,34339	0,326383
<i>P16</i>	0,411233	0,352406	0,449651	0,357396	0,418509	0,352116	0,275892	0,333124
<i>P17</i>	0,307237	0,3381	0,37253	0,318986	0,232118	0,313359	0,329023	0,338246
<i>P18</i>	0,285636	0,337367	0,336539	0,209665	0,141359	0,340995	0,25544	0,232341
<i>P19</i>	0,397555	0,341404	0,403068	0,427968	0,44531	0,325573	0,290939	0,354391
<i>P20</i>	0,350339	0,346096	0,413833	0,419998	0,419312	0,274601	0,343423	0,328533
<i>P21</i>	0,29696	0,20663	0,29356	0,356312	0,28523	0,198526	0,299605	0,238624
<i>P22</i>	0,48156	0,430766	0,526889	0,256462	0,327075	0,510965	0,319787	0,36671
<i>P23</i>	0,261019	0,287544	0,374789	0,24536	0,200702	0,323539	0,252357	0,304418
<i>P24</i>	0,293616	0,259423	0,376568	0,266455	0,226741	0,336922	0,263819	0,312229

	<i>P9</i>	<i>P10</i>	<i>P11</i>	<i>P12</i>	<i>P13</i>	<i>P14</i>	<i>P15</i>	<i>P16</i>
<i>P1</i>	0,28838	0,33146	0,32986	0,163622	0,26849	0,33695	0,363011	0,411233
<i>P2</i>	0,348414	0,387308	0,294145	0,271891	0,217014	0,305316	0,267705	0,352406
<i>P3</i>	0,330229	0,441255	0,35878	0,309289	0,30404	0,360376	0,368781	0,449651
<i>P4</i>	0,299702	0,119967	0,407348	0,254124	0,228523	0,263032	0,355867	0,357396
<i>P5</i>	0,296006	0,236958	0,388522	0,222313	0,216223	0,229067	0,312197	0,418509
<i>P6</i>	0,257878	0,431155	0,239844	0,217893	0,259511	0,337589	0,312923	0,352116
<i>P7</i>	0,289123	0,242892	0,291181	0,274802	0,193053	0,229176	0,34339	0,275892
<i>P8</i>	0,285536	0,339931	0,310677	0,278825	0,234807	0,256968	0,326383	0,333124
<i>P9</i>	0	0,30527	0,240288	0,201521	0,242652	0,294064	0,375431	0,242193
<i>P10</i>	0,30527	0	0,40783	0,273066	0,234561	0,26384	0,376105	0,341172
<i>P11</i>	0,240288	0,40783	0	0,295288	0,268272	0,263071	0,391309	0,223861
<i>P12</i>	0,201521	0,273066	0,295288	0	0,213508	0,297155	0,301764	0,318739
<i>P13</i>	0,242652	0,234561	0,268272	0,213508	0	0,165023	0,189554	0,247821
<i>P14</i>	0,294064	0,26384	0,263071	0,297155	0,165023	0	0,308366	0,30291
<i>P15</i>	0,375431	0,376105	0,391309	0,301764	0,189554	0,308366	0	0,358875
<i>P16</i>	0,242193	0,341172	0,223861	0,318739	0,247821	0,30291	0,358875	0
<i>P17</i>	0,281218	0,297104	0,297431	0,271608	0,175408	0,15547	0,270466	0,341473
<i>P18</i>	0,295484	0,257601	0,336033	0,237939	0,253846	0,196209	0,3777	0,395534
<i>P19</i>	0,274776	0,415808	0,139454	0,375952	0,302433	0,299339	0,446273	0,207339
<i>P20</i>	0,267846	0,438173	0,189528	0,263943	0,340153	0,36276	0,42674	0,267579
<i>P21</i>	0,31221	0,395879	0,265171	0,233656	0,202411	0,259304	0,198024	0,327682
<i>P22</i>	0,430066	0,245419	0,463547	0,395651	0,265261	0,265544	0,319122	0,366941
<i>P23</i>	0,312699	0,227621	0,301058	0,231986	0,163062	0,13906	0,282108	0,337693
<i>P24</i>	0,365928	0,261812	0,349814	0,26889	0,152366	0,184779	0,212229	0,359978

	<i>P17</i>	<i>P18</i>	<i>P19</i>	<i>P20</i>	<i>P21</i>	<i>P22</i>	<i>P23</i>	<i>P24</i>
<i>P1</i>	0,307237	0,285636	0,397555	0,350339	0,29696	0,48156	0,261019	0,293616
<i>P2</i>	0,3381	0,337367	0,341404	0,346096	0,20663	0,430766	0,287544	0,259423
<i>P3</i>	0,37253	0,336539	0,403068	0,413833	0,29356	0,526889	0,374789	0,376568
<i>P4</i>	0,318986	0,209665	0,427968	0,419998	0,356312	0,256462	0,24536	0,266455
<i>P5</i>	0,232118	0,141359	0,44531	0,419312	0,28523	0,327075	0,200702	0,226741
<i>P6</i>	0,313359	0,340995	0,325573	0,274601	0,198526	0,510965	0,323539	0,336922
<i>P7</i>	0,329023	0,25544	0,290939	0,343423	0,299605	0,319787	0,252357	0,263819
<i>P8</i>	0,338246	0,232341	0,354391	0,328533	0,238624	0,36671	0,304418	0,312229
<i>P9</i>	0,281218	0,295484	0,274776	0,267846	0,31221	0,430066	0,312699	0,365928
<i>P10</i>	0,297104	0,257601	0,415808	0,438173	0,395879	0,245419	0,227621	0,261812
<i>P11</i>	0,297431	0,336033	0,139454	0,189528	0,265171	0,463547	0,301058	0,349814
<i>P12</i>	0,271608	0,237939	0,375952	0,263943	0,233656	0,395651	0,231986	0,26889
<i>P13</i>	0,175408	0,253846	0,302433	0,340153	0,202411	0,265261	0,163062	0,152366
<i>P14</i>	0,15547	0,196209	0,299339	0,36276	0,259304	0,265544	0,13906	0,184779
<i>P15</i>	0,270466	0,3777	0,446273	0,42674	0,198024	0,319122	0,282108	0,212229
<i>P16</i>	0,341473	0,395534	0,207339	0,267579	0,327682	0,366941	0,337693	0,359978
<i>P17</i>	0	0,253948	0,353335	0,390359	0,257189	0,322115	0,155551	0,193409
<i>P18</i>	0,253948	0	0,405275	0,352556	0,286874	0,337116	0,1874	0,253653
<i>P19</i>	0,353335	0,405275	0	0,294902	0,365979	0,479318	0,361954	0,403453
<i>P20</i>	0,390359	0,352556	0,294902	0	0,276976	0,497975	0,359307	0,406995
<i>P21</i>	0,257189	0,286874	0,365979	0,276976	0	0,382366	0,246369	0,232218
<i>P22</i>	0,322115	0,337116	0,479318	0,497975	0,382366	0	0,270074	0,245002
<i>P23</i>	0,155551	0,1874	0,361954	0,359307	0,246369	0,270074	0	0,104107
<i>P24</i>	0,193409	0,253653	0,403453	0,406995	0,232218	0,245002	0,104107	0

Ланцюжок
1 (3):

1

 0,163622

12

 0,201521

9

Ланцюжок
2 (3):

2

 0,194176

6

 0,198919

3

Ланцюжок
3 (2):

4

 0,119967

10

Ланцюжок
4 (2):

5

 0,141359

18

Ланцюжок
5 (2):

7

 0,182711

8

Ланцюжок
6 (4):

11

 0,139454

19

 0,207339

16

 0,267579

20

Ланцюжок
7 (5):

13

 0,152366

24

 0,212229

15

 0,198024

21

 0,382366

22

Ланцюжок
8 (3):

14

 0,13906

23

 0,155551

17

Матриця міжланцюжкових відстаней

	<i>Ланцюжок</i> <i>1</i>	<i>Ланцюжок</i> <i>2</i>	<i>Ланцюжок</i> <i>3</i>	<i>Ланцюжок</i> <i>4</i>
<i>Ланцюжок 1</i>	0 (0; 0)	0,208817 (1; 6)	0,254124 (12; 4)	0,222313 (12; 5)
<i>Ланцюжок 2</i>	0,208817 (1; 6)	0 (0; 0)	0,34547 (2; 4)	0,28949 (3; 5)
<i>Ланцюжок 3</i>	0,254124 (12; 4)	0,34547 (2; 4)	0 (0; 0)	0,181878 (4; 5)
<i>Ланцюжок 4</i>	0,222313 (12; 5)	0,28949 (3; 5)	0,181878 (4; 5)	0 (0; 0)
<i>Ланцюжок 5</i>	0,274802 (12; 7)	0,220715 (2; 7)	0,196961 (4; 7)	0,232341 (18; 8)
<i>Ланцюжок 6</i>	0,240288 (9; 11)	0,239844 (6; 11)	0,341172 (10; 16)	0,336033 (18; 11)
<i>Ланцюжок 7</i>	0,213508 (12; 13)	0,198526 (6; 21)	0,228523 (4; 13)	0,216223 (5; 13)
<i>Ланцюжок 8</i>	0,231986 (12; 23)	0,287544 (2; 23)	0,227621 (10; 23)	0,1874 (18; 23)
Мінімальна відстань між ланцюжками	0,208817 (1; 2)	0,198526 (2; 7)	0,181878 (3; 4)	0,181878 (4; 3)

	Ланцюжок 5	Ланцюжок 6	Ланцюжок 7	Ланцюжок 8
Ланцюжок 1	0,274802 (12; 7)	0,240288 (9; 11)	0,213508 (12; 13)	0,231986 (12; 23)
Ланцюжок 2	0,220715 (2; 7)	0,239844 (6; 11)	0,198526 (6; 21)	0,287544 (2; 23)
Ланцюжок 3	0,196961 (4; 7)	0,341172 (10; 16)	0,228523 (4; 13)	0,227621 (10; 23)
Цепочка 4	0,232341 (18; 8)	0,336033 (18; 11)	0,216223 (5; 13)	0,1874 (18; 23)
Ланцюжок 5	0 (0; 0)	0,275892 (7; 16)	0,193053 (7; 13)	0,229176 (7; 14)
Ланцюжок 6	0,275892 (7; 16)	0 (0; 0)	0,247821 (16; 13)	0,263071 (11; 14)
Ланцюжок 7	0,193053 (7; 13)	0,247821 (16; 13)	0 (0; 0)	0,104107 (24; 23)
Ланцюжок 8	0,229176 (7; 14)	0,263071 (11; 14)	0,104107 (24; 23)	0 (0; 0)
Мінімальна відстань між ланцюжками	0,193053 (5; 7)	0,239844 (6; 2)	0,104107 (7; 8)	0,104107 (8; 7)

Критича відстань має значення $r_{кр} = 0.25$.

Безліч ланцюжків розпадається на 5 кластерів:

- в перший входять об'єкти: P10, P4, P5, P18;
- в другий – P1, P12, P9, P2, P6, P3, P11, P19, P16;

- в третій – P13, P7, P8, P24, P15, P21, P23, P14, P17;
- в четвертий – P20;
- в п'ятий – P22

Кожен з P22 і P20 утворює окремий кластер, оскільки всі інші елементи знаходяться від них на відстані, що перевищує або відповідає критичній.

На рисунках Б.1 – Б.4 зображено зв'язки між елементами кожного кластеру в вигляді графів.

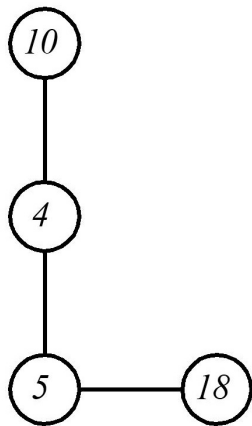


Рисунок Б.1 – Граф зв'язків елементів кластеру 1 – «задовільний стан»

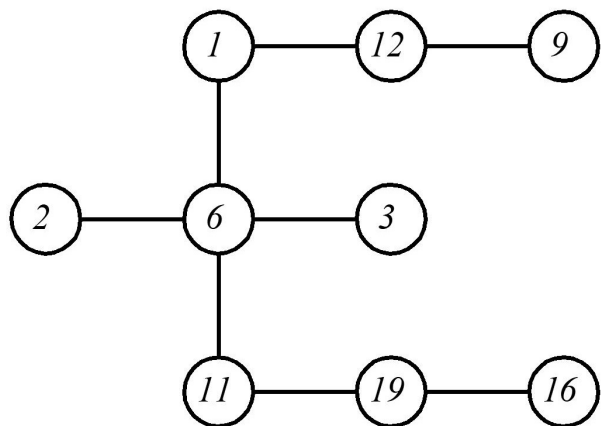


Рисунок Б.2 – Граф зв'язків елементів кластеру 2 – ремонтний стан»

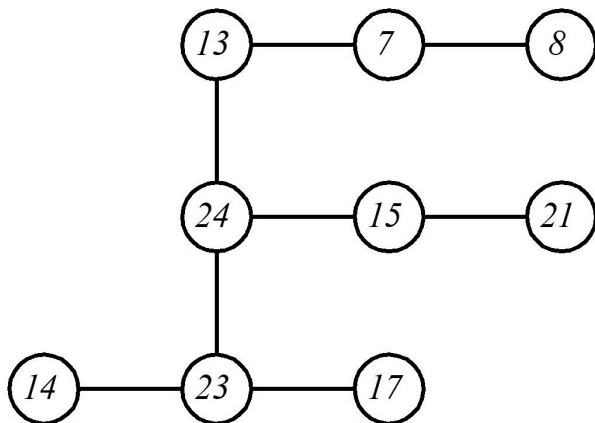


Рисунок Б.3 – Граф зв'язків елементів кластеру 3 – «стан підвищеного ризику»



Рисунок Б.4 – Граф зв'язків елементів кластерів 4 та 5 – неінформативні кластери

ДОДАТОК В**Підпрограми до задачі кластеризації об'єктів**

```
Attribute VB_Name = "KlasternAnaliz"
```

```
Option Base 1
```

```
'Розбиття на кластери за допомогою ізотонічних відстаней
```

```
Sub clast_izoton_trek()
```

```
Dim s_1()
```

```
Dim s_2()
```

```
Dim s_3()
```

```
Dim mat_res()
```

```
Dim mas_Max_Min() As Double
```

```
Dim mas_num() As Integer
```

```
Dim Ind_mas() As Integer
```

```
Set myCELL = Application.InputBox( _  
    prompt:="Выберите исходную матрицу данных", _  
    Type:=8)
```

```
Set myCell3 = Application.InputBox( _  
    prompt:="Выберите ячейки, содержащие имена объектов", _  
    Type:=8)
```

```
Set myCELL2 = Application.InputBox( _  
    prompt:="Выберите ячейку, с которой будут выводятся результаты", _  
    Type:=8)
```

```
Num_row = myCELL.Rows.count 'Вычисление количества строк
```

```
Num_col = myCELL.Columns.count 'Вычисление количества столбцов
```

```
' Выполним нормировку исходных данных
```

```
ReDim s_1(Num_col)
```

```
ReDim s_2(1 To Num_col, 1 To Num_row)
```

'Вычисление суммы по столбцам и помещение ее в массив s_1

```
For i = 1 To Num_col
s_1(i) = Application.Sum(myCELL.Columns(i))
For j = 1 To Num_row
s_2(i, j) = myCELL.Columns(i).Cells(j) / s_1(i)
Next j
Next i
```

ReDim s_3(Num_row)

'Розрахунок довжини векторів

ReDim mas_min(Num_row)

```
For i = 1 To Num_row
```

s_3(i) = 0

mas_min(i) = 1

```
For j = 1 To Num_col
```

s_3(i) = s_3(i) + s_2(j, i)

Next j

Next i

ReDim mat_res(1 To Num_row, 1 To Num_row)

'Розрахунок матриці відстаней

```
For i = 1 To Num_row
```

```
For j = 1 To Num_row
```

mat_res(i, j) = Abs(s_3(i) - s_3(j))

If mat_res(i, j) < 1.1E-15 Then mat_res(i, j) = 0

Next j

Next i

'Формирование и вывод изотонической матрицы расстояний

myCELL2.Offset(0, 1).Value = "Матрица изотонических расстояний"

```
For i = 1 To Num_row
```

myCELL2.Offset(1, i).Value = myCell3.Cells(i)

myCELL2.Offset(1, i).Font.Italic = True

```

myCELL2.Offset(1, i).Borders.Item(xlEdgeBottom).LineStyle = xlDouble
myCELL2.Offset(i + 1, 0).Value = myCell3.Cells(i)
myCELL2.Offset(i + 1, 0).Font.Italic = True
myCELL2.Offset(i + 1, 0).Borders(xlEdgeRight).LineStyle = xlDouble
Next i
myCELL2.Offset(1, 0).Borders.Item(xlEdgeBottom).LineStyle = xlDouble
myCELL2.Offset(1, 0).Borders(xlEdgeRight).LineStyle = xlDouble
For i = 1 To Num_row
For j = 1 To Num_row
myCELL2.Offset(i + 1, j).Value = mat_res(i, j)
Next j
Next i
'Розбиття на ланцюжки і пошук слідів
Dim Sum_dist As Double 'Сумарна відстань
Dim Num_Links As Integer 'Кількість зв'язків
'Створення індексного масиву для запам'ятовування, чи включений
'певний об'єкт у якій-небудь ланцюжок, чи ні: 0-ще не включений;
'n-включений у n-й ланцюжок.
Dim k_A As Integer 'Номер об'єкта A
Dim k_B As Integer 'Номер об'єкта B
Dim Ind_mas_order() As Integer 'Масив порядку включення об'єктів у ланцюжки
ReDim Ind_mas_order(Num_row)
Dim Num_obj_in_trek() As Integer
'Формування вектору мінімальних значень
For i = 1 To Num_row
If Ind_mas(i) = 0 Then
k_A = i
For j = 1 To Num_row
If i <> j Then
If mas_min(i) > mat_res(i, j) Then

```

```

mas_min(i) = mat_res(i, j)
k_B = j
End If
End If
Next j
'End If
If Ind_mas(k_B) <> 0 Then 'Приєднання об'єкта до вже існуючого ланцюжка
Ind_mas(k_A) = Ind_mas(k_B)
Num_obj_in_trek(Ind_mas(k_B)) = Num_obj_in_trek(Ind_mas(k_B)) + 1
Ind_mas_order(k_A) = Num_obj_in_trek(Ind_mas(k_B))
Sum_dist = Sum_dist + mas_min(i)
Else 'Початок утворення наступного первинного ланцюжка
Num_of_trek = Num_of_trek + 1
ReDim Preserve Num_obj_in_trek(Num_of_trek)
Ind_mas(k_B) = Num_of_trek
Ind_mas(k_A) = Num_of_trek
Num_obj_in_trek(Num_of_trek) = 2
Ind_mas_order(k_A) = 1
Ind_mas_order(k_B) = 2
Sum_dist = Sum_dist + mas_min(i)
End If
End If
Next i
Dim Tmp_mas() As Integer
Dim ind As Integer
Dim tp_ind As Integer
For i = 1 To Num_of_trek
Num_in_treks = 0
myCELL2.Offset(Num_row + i * 2 + 1, 0).Value = _
"Цепочка " & i & " (" & Num_obj_in_trek(i) & ")" & ":"

```

```

ReDim Tmp_mas(2, Num_obj_in_trek(i))
For j = 1 To Num_row
If Ind_mas(j) = i Then
Num_in_treks = Num_in_treks + 1
Tmp_mas(1, Num_in_treks) = j
Tmp_mas(2, Num_in_treks) = Ind_mas_order(j)
End If
Next j
'Сортування ланцюжка для виводу
ind = 1
While ind = 1
ind = 0
For i1 = 1 To Num_obj_in_trek(i) - 1
If Tmp_mas(2, i1) > Tmp_mas(2, i1 + 1) Then
ind = 1
tp_ind = Tmp_mas(2, i1)
Tmp_mas(2, i1) = Tmp_mas(2, i1 + 1)
Tmp_mas(2, i1 + 1) = tp_ind
tp_ind = Tmp_mas(1, i1)
Tmp_mas(1, i1) = Tmp_mas(1, i1 + 1)
Tmp_mas(1, i1 + 1) = tp_ind
End If
Next i1
Wend
'Виведення ланцюжка
For j = 1 To Num_obj_in_trek(i)
myCELL2.Offset(Num_row + i * 2 + 1, j * 2 - 1).Value = Tmp_mas(1, j)
myCELL2.Offset(Num_row + i * 2 + 1, j * 2 - 1).HorizontalAlignment = xlCenter
myCELL2.Offset(Num_row + i * 2 + 1, j * 2 - 1).Borders.LineStyle = xlDouble
If j < Num_obj_in_trek(i) Then

```



```

myCELL2.Offset(Num_row + i * 2 + 1, j * 2).Value = _
mat_res(Tmp_mas(1, j), Tmp_mas(1, j + 1))
myCELL2.Offset(Num_row + i * 2 + 1, j * 2).Borders(xlEdgeBottom).LineStyle =
xlContinuous

End If
Next j
Next i

'Формування матриці відстаней між ланцюжками
Dim mas1() As Integer
Dim mas2() As Integer
Dim Mas_Links() As Integer
Dim mas_trek_dist() As Double 'матриця відстаней між кластерами (ланцюжками)
ReDim mas_trek_dist(Num_of_trek, Num_of_trek)
ReDim mas1(Num_row)
ReDim mas2(Num_row)
ReDim Mas_Links(2, Num_of_trek, Num_of_trek)
For i = 1 To Num_of_trek - 1
' Формування масиву номерів об'єктів і-го ланцюжка
k_A = 0
For j = 1 To Num_row
If Ind_mas(j) = i Then
k_A = k_A + 1
mas1(k_A) = j
End If
Next j
For j = i + 1 To Num_of_trek
' Формування масиву номерів об'єктів j-го ланцюжка
k_B = 0
For k = 1 To Num_row
If Ind_mas(k) = j Then

```

```

k_B = k_B + 1
mas2(k_B) = k
End If
Next k
' Пошук найменшої відстані між об'єктами, що зберігаються в масивах mas1 і mas2
mas_trek_dist(i, j) = 1
For i1 = 1 To k_A
For j1 = 1 To k_B
If mas_trek_dist(i, j) > mat_res(mas1(i1), mas2(j1)) Then
mas_trek_dist(i, j) = mat_res(mas1(i1), mas2(j1))
Mas_Links(1, i, j) = mas1(i1)
Mas_Links(2, i, j) = mas2(j1)
End If
Next j1
Next i1
mas_trek_dist(j, i) = mas_trek_dist(i, j)
Mas_Links(1, j, i) = Mas_Links(1, i, j)
Mas_Links(2, j, i) = Mas_Links(2, i, j)
Next j
Next i
' Виведення матриці відстаней між ланцюжками
shift1 = Num_of_trek * 2 + 2 + 1
myCELL2.Offset(Num_row + shift1, 0).Value = _
"Матриця міжланцюжкових відстаней "
For i = 1 To Num_of_trek
myCELL2.Offset(Num_row + shift1 + 1, i).Value = "Цепочка" & i
myCELL2.Offset(Num_row + shift1 + 1, i).Font.Italic = True
myCELL2.Offset(Num_row + shift1 + 1, i).Borders.Item(xlEdgeBottom).LineStyle =
xlDouble
myCELL2.Offset(Num_row + shift1 + 2 * i, 0).Value = "Цепочка" & i

```

```

myCELL2.Offset(Num_row + shift1 + 2 * i, 0).Font.Italic = True
myCELL2.Offset(Num_row + shift1 + 2 * i, 0).Borders(xlEdgeRight).LineStyle =
xlDouble
myCELL2.Offset(Num_row + shift1 + 2 * i + 1, 0).Borders(xlEdgeRight).LineStyle =
xlDouble
Next i
myCELL2.Offset(Num_row + shift1 + 1, 0).Borders.Item(xlEdgeBottom).LineStyle =
xlDouble
myCELL2.Offset(Num_row + shift1 + 1, 0).Borders(xlEdgeRight).LineStyle = xlDouble
For i = 1 To Num_of_trek
For j = 1 To Num_of_trek
If (i = j) Then myCELL2.Offset(Num_row + shift1 + 2 * i + 1, i).Font.Bold = True
myCELL2.Offset(Num_row + shift1 + 2 * i, j).Value = mas_trek_dist(i, j)
myCELL2.Offset(Num_row + shift1 + 2 * i + 1, j).Value = _
 "(" & Mas_Links(1, i, j) & "; " & Mas_Links(2, i, j) & ")"
myCELL2.Offset(Num_row + shift1 + 2 * i + 1, j).HorizontalAlignment = xlCenter
Next j
Next i
'Пошук мінімальних відстаней між ланцюжками і об'єднання їх
ReDim mas_min(Num_of_trek)
Dim mas_trek_num() As Integer
ReDim mas_trek_num(Num_of_trek)
For i = 1 To Num_of_trek
mas_min(i) = 1
For j = 1 To Num_of_trek
If i <> j Then
If mas_min(i) > mas_trek_dist(i, j) Then
mas_min(i) = mas_trek_dist(i, j)
mas_trek_num(i) = j
End If

```

```

End If
Next j
Next i
shift1 = shift1 + 2 * Num_of_trek + 3
myCELL2.Offset(Num_row + shift1, 0).Value = "Мин. расст."
myCELL2.Offset(Num_row + shift1 + 1, 0).Value = "Между цеп."
For i = 1 To Num_of_trek
  myCELL2.Offset(Num_row + shift1, i).Borders(xlEdgeTop).LineStyle = xlDouble
  myCELL2.Offset(Num_row + shift1, i).Value = mas_min(i)
  myCELL2.Offset(Num_row + shift1 + 1, i).Value = _
  "(" & i & "; " & mas_trek_num(i) & ")"
  myCELL2.Offset(Num_row + shift1 + 1, i).HorizontalAlignment = xlCenter
Next i
End Sub
'Розбиття на кластери за допомогою ізоморфічних відстаней
Sub clast_izomorph_trek()
  Dim s_1()
  Dim s_2()
  Dim s_3()
  Dim mat_res()
  Dim mas_num() As Integer
  Dim Ind_mas() As Integer
  Set myCELL = Application.InputBox( _
  prompt:="Выберите исходную матрицу данных", _
  Type:=8)
  Set myCell3 = Application.InputBox( _
  prompt:="Выберите ячейки, содержащие имена объектов", _
  Type:=8)
  Set myCELL2 = Application.InputBox( _
  prompt:="Выберите ячейку, с которой будут выводятся результаты", _

```

```

Type:=8)
Num_row = myCELL.Rows.count 'Вычисление количества строк
Num_col = myCELL.Columns.count 'Вычисление количества столбцов
' Выполним нормировку исходных данных
ReDim s_1(Num_col)
ReDim s_2(1 To Num_col, 1 To Num_row)
'Вычисление суммы по столбцам и помещение ее в массив s_1
For i = 1 To Num_col
s_1(i) = Application.Sum(myCELL.Columns(i))
For j = 1 To Num_row
s_2(i, j) = myCELL.Columns(i).Cells(j) / s_1(i)
Next j
Next i
ReDim s_3(Num_row)
'Розрахунок довжини векторів
ReDim mas_min(Num_row)
For i = 1 To Num_row
s_3(i) = 0
mas_min(i) = 1
For j = 1 To Num_col
s_3(i) = s_3(i) + s_2(j, i)
Next j
Next i
'Перетворення матриці довжини векторів
For i = 1 To Num_row
For j = 1 To Num_col
s_2(j, i) = s_2(j, i) / s_3(i)
Next j
Next i

```

```
ReDim mat_res(1 To Num_row, 1 To Num_row)
```

```
'Розрахунок матриці відстаней та масиву мінімальних значень
```

```
For i = 1 To Num_row
```

```
For j = 1 To Num_row
```

```
s_tmp = 0
```

```
For n = 1 To Num_col
```

```
s_tmp = s_tmp + (s_2(n, i) - s_2(n, j)) ^ 2
```

```
Next n
```

```
mat_res(i, j) = Sqr(s_tmp)
```

```
Next j
```

```
Next i
```

```
'Формирование и вывод изоморфической матрицы расстояний
```

```
myCELL2.Offset(0, 1).Value = "Матрица изоморфических расстояний"
```

```
For i = 1 To Num_row
```

```
myCELL2.Offset(1, i).Value = myCell3.Cells(i)
```

```
myCELL2.Offset(1, i).Font.Italic = True
```

```
myCELL2.Offset(1, i).Borders.Item(xlEdgeBottom).LineStyle = xlDouble
```

```
myCELL2.Offset(i + 1, 0).Value = myCell3.Cells(i)
```

```
myCELL2.Offset(i + 1, 0).Font.Italic = True
```

```
myCELL2.Offset(i + 1, 0).Borders(xlEdgeRight).LineStyle = xlDouble
```

```
Next i
```

```
myCELL2.Offset(1, 0).Borders.Item(xlEdgeBottom).LineStyle = xlDouble
```

```
myCELL2.Offset(1, 0).Borders(xlEdgeRight).LineStyle = xlDouble
```

```
'Розбиття на ланцюжки і пошук слідів
```

```
Dim Sum_dist As Double 'Сумарна відстань
```

```
Dim Num_Links As Integer 'Кількість зв'язків
```

```
ReDim mas_num(1 To Num_row) As Integer
```

```
ReDim Ind_mas(1 To Num_row) As Integer
```

```
Num_of_trek = 0 'Кількість кластерів(ланцюжків)
```

```
Num_in_treks = 0 'Загальна кількість об'єктів що вже класифіковані
```

```
shift1 = 0
```

```
'Створення індексного масиву для запам'ятовування, чи включений
'певний об'єкт у якій-небудь ланцюжок, чи ні: 0-ще не включений;
'n-включений у n-й ланцюжок.
```

```
Dim k_A As Integer 'Номер об'єкта A
```

```
Dim k_B As Integer 'Номер об'єкта B
```

```
Dim Ind_mas_order() As Integer 'Масив порядку включення об'єктів у ланцюжки
```

```
ReDim Ind_mas_order(Num_row)
```

```
Dim Num_obj_in_trek() As Integer
```

```
For i = 1 To Num_row
```

```
    Ind_mas(i) = 0
```

```
    Ind_mas_order(i) = 0
```

```
    mas_min(i) = 1
```

```
Next i
```

```
'Формування вектору мінімальних значень
```

```
For i = 1 To Num_row
```

```
    If Ind_mas(i) = 0 Then
```

```
        k_A = i
```

```
        For j = 1 To Num_row
```

```
            If i <> j Then
```

```
                If mas_min(i) > mat_res(i, j) Then
```

```
                    mas_min(i) = mat_res(i, j)
```

```
                    k_B = j
```

```
                End If
```

```
            End If
```

```
        Next j
```

```
    'End If
```

```
    If Ind_mas(k_B) <> 0 Then 'Приєднання об'єкта до вже існуючого ланцюжка
```

```
        Ind_mas(k_A) = Ind_mas(k_B)
```

```

Num_obj_in_trek(Ind_mas(k_B)) = Num_obj_in_trek(Ind_mas(k_B)) + 1
Ind_mas_order(k_A) = Num_obj_in_trek(Ind_mas(k_B))
Sum_dist = Sum_dist + mas_min(i)
Else 'Початок утворення наступного первинного ланцюжка
Num_of_trek = Num_of_trek + 1
ReDim Preserve Num_obj_in_trek(Num_of_trek)
Ind_mas(k_B) = Num_of_trek
Ind_mas(k_A) = Num_of_trek
Num_obj_in_trek(Num_of_trek) = 2
Ind_mas_order(k_A) = 1
Ind_mas_order(k_B) = 2
Sum_dist = Sum_dist + mas_min(i)
End If
End If
Next i
Dim Tmp_mas() As Integer
Dim ind As Integer
Dim tp_ind As Integer
For i = 1 To Num_of_trek
  Num_in_treks = 0
  myCELL2.Offset(Num_row + i * 2 + 1, 0).Value = _
  "Цепочка " & i & " (" & Num_obj_in_trek(i) & ")" & ":"
  ReDim Tmp_mas(2, Num_obj_in_trek(i))
  For j = 1 To Num_row
    If Ind_mas(j) = i Then
      Num_in_treks = Num_in_treks + 1
      Tmp_mas(1, Num_in_treks) = j
      Tmp_mas(2, Num_in_treks) = Ind_mas_order(j)
    End If
  Next j

```


'Сортування ланцюжка для виводу

ind = 1

While ind = 1

ind = 0

For i1 = 1 To Num_obj_in_trek(i) - 1

If Tmp_mas(2, i1) > Tmp_mas(2, i1 + 1) Then

ind = 1

tp_ind = Tmp_mas(2, i1)

Tmp_mas(2, i1) = Tmp_mas(2, i1 + 1)

Tmp_mas(2, i1 + 1) = tp_ind

tp_ind = Tmp_mas(1, i1)

Tmp_mas(1, i1) = Tmp_mas(1, i1 + 1)

Tmp_mas(1, i1 + 1) = tp_ind

End If

Next i1

Wend

'Виведення ланцюжка

For j = 1 To Num_obj_in_trek(i)

myCELL2.Offset(Num_row + i * 2 + 1, j * 2 - 1).Value = Tmp_mas(1, j)

myCELL2.Offset(Num_row + i * 2 + 1, j * 2 - 1).HorizontalAlignment = xlCenter

myCELL2.Offset(Num_row + i * 2 + 1, j * 2 - 1).Borders.LineStyle = xlDouble

If j < Num_obj_in_trek(i) Then

myCELL2.Offset(Num_row + i * 2 + 1, j * 2).Value = _

mat_res(Tmp_mas(1, j), Tmp_mas(1, j + 1))

myCELL2.Offset(Num_row + i * 2 + 1, j * 2).Borders(xlEdgeBottom).LineStyle =

xlContinuous

End If

Next j

Next i

'Формування матриці відстаней між ланцюжками

,

Dim mas1() As Integer

Dim mas2() As Integer

Dim Mas_Links() As Integer

Dim mas_trek_dist() As Double 'матриця відстаней між кластерами (ланцюжками)

ReDim mas_trek_dist(Num_of_trek, Num_of_trek)

ReDim mas1(Num_row)

ReDim mas2(Num_row)

ReDim Mas_Links(2, Num_of_trek, Num_of_trek)

For j = i + 1 To Num_of_trek

' Формування масиву номерів об'єктів j-го ланцюжка

k_B = 0

For k = 1 To Num_row

If Ind_mas(k) = j Then

k_B = k_B + 1

mas2(k_B) = k

End If

Next k

' Пошук найменшої відстані між об'єктами, що зберігаються в масивах mas1 і mas2

mas_trek_dist(i, j) = 1

For i1 = 1 To k_A

For j1 = 1 To k_B

If mas_trek_dist(i, j) > mat_res(mas1(i1), mas2(j1)) Then

mas_trek_dist(i, j) = mat_res(mas1(i1), mas2(j1))

Mas_Links(1, i, j) = mas1(i1)

Mas_Links(2, i, j) = mas2(j1)

End If

Next j1

Next i1

mas_trek_dist(j, i) = mas_trek_dist(i, j)

Mas_Links(1, j, i) = Mas_Links(1, i, j)

Mas_Links(2, j, i) = Mas_Links(2, i, j)

Next j

Next i

' Виведення матриці відстаней між ланцюжками

shift1 = Num_of_trek * 2 + 2 + 1

myCELL2.Offset(Num_row + shift1, 0).Value = _

"Матриця міжланцюжкових відстаней "

For i = 1 To Num_of_trek

myCELL2.Offset(Num_row + shift1 + 1, i).Value = "Цепочка" & i

myCELL2.Offset(Num_row + shift1 + 1, i).Font.Italic = True

myCELL2.Offset(Num_row + shift1 + 1, i).Borders.Item(xlEdgeBottom).LineStyle = xlDouble

myCELL2.Offset(Num_row + shift1 + 2 * i, 0).Value = "Цепочка" & i

myCELL2.Offset(Num_row + shift1 + 2 * i, 0).Font.Italic = True

myCELL2.Offset(Num_row + shift1 + 2 * i, 0).Borders(xlEdgeRight).LineStyle = xlDouble

myCELL2.Offset(Num_row + shift1 + 2 * i + 1, 0).Borders(xlEdgeRight).LineStyle = xlDouble

Next i

myCELL2.Offset(Num_row + shift1 + 1, 0).Borders.Item(xlEdgeBottom).LineStyle = xlDouble

myCELL2.Offset(Num_row + shift1 + 1, 0).Borders(xlEdgeRight).LineStyle = xlDouble

For i = 1 To Num_of_trek

For j = 1 To Num_of_trek

If (i = j) Then myCELL2.Offset(Num_row + shift1 + 2 * i + 1, i).Font.Bold = True

```

myCELL2.Offset(Num_row + shift1 + 2 * i, j).Value = mas_trek_dist(i, j)
myCELL2.Offset(Num_row + shift1 + 2 * i + 1, j).Value = _
 "(" & Mas_Links(1, i, j) & "; " & Mas_Links(2, i, j) & ")"
myCELL2.Offset(Num_row + shift1 + 2 * i + 1, j).HorizontalAlignment = xlCenter
Next j
Next i

```

'Пошук мінімальних відстаней між ланцюжками і об'єднання їх

```

ReDim mas_min(Num_of_trek)
Dim mas_trek_num() As Integer
ReDim mas_trek_num(Num_of_trek)

For i = 1 To Num_of_trek
  mas_min(i) = 1
  For j = 1 To Num_of_trek
    If i <> j Then
      If mas_min(i) > mas_trek_dist(i, j) Then
        mas_min(i) = mas_trek_dist(i, j)
        mas_trek_num(i) = j
      End If
    End If
  Next j
Next i

```

```

shift1 = shift1 + 2 * Num_of_trek + 3
myCELL2.Offset(Num_row + shift1, 0).Value = "Мин. расст."
myCELL2.Offset(Num_row + shift1 + 1, 0).Value = "Между цеп."
For i = 1 To Num_of_trek
  myCELL2.Offset(Num_row + shift1, i).Borders(xlEdgeTop).LineStyle = xlDouble

```

```
myCELL2.Offset(Num_row + shift1, i).Value = mas_min(i)
myCELL2.Offset(Num_row + shift1 + 1, i).Value = _
 "(" & i & "; " & mas_trek_num(i) & ")"
myCELL2.Offset(Num_row + shift1 + 1, i).HorizontalAlignment = xlCenter
Next i

End Sub
```

ДОДАТОК Г

Підпрограми до задачі дискримінантного аналізу

Вихідними даними для проведення дискримінантного аналізу є кластери що отримані в результаті кластерного аналізу за кривими зворотної напруги. Кластери K1, K2, K3 є навчальною вибіркою, в якій відомо, до яких класів відносяться об'єкти. За навчальною вибіркою необхідно вибудувати правила, які в подальшому дозволять визначати, до якого класу відносяться нові об'єкти.

Необхідні умови до використання програмного забезпечення:

1. Об'єкти (спостереження) належать до двох або більше класів.
2. У кожному класі є як мінімум два об'єкти.
3. Число дискримінантних змінних не повинно бути більше кількості об'єктів мінус 2.
4. Дискримінантні змінні вимірюють за шкалою інтервалів або шкалою відносин.
5. Дискримінантні змінні повинні бути лінійно незалежними.

```
Attribute VB_Name = "DiscrimAnaliz"
```

```
Option Base 1
```

```
Sub diskrim_n()
```

```
'Подпрограма дискримінантного аналізу для n класов
```

```
'об'єктів
```

```
Dim Mean_n() As Double
```

```
Dim Mean_n_tmp() As Double
```

```
Dim Cov_mat_n() As Double
```

```
Dim Cov_all() As Double
```

```
Dim mas_min() As Double
```

```
Dim myfactor_n() As Double
```

```
Dim Obj_count As Integer 'Счетчик совокупностей (классов) объектов
```

```
Dim Row_n() As Integer
```

```
Dim Col_n() As Integer
```

```
Dim All_Row As Double
```

```
'Ввод ссылки на ячейку, в которой хранится количество
```

```
'совокупностей объектов
```

```
Set CELL_count = Application.InputBox( _
```

```
prompt:="Выберите ячейку, в которой содержится количество совокупностей  
объектов", _
```

```
Type:=8)
```

```
Obj_count = CELL_count.Cells.Value
```

```
ReDim Obj_mas(Obj_count)
```

```
ReDim Row_n(Obj_count) As Integer
```

```
ReDim Col_n(Obj_count) As Integer
```

```
Set myObj = Application.InputBox( _
```

```
prompt:="Выберите объект, предназначенный для классификации", _
```

```
Type:=8)
```

```
Set myCell3 = Application.InputBox( _
```

```
prompt:="Выберите ячейку, с которой будут выводиться результаты", _
```

```
Type:=8)
```

```
All_Row = 0
```

```
For i = 1 To Obj_count
```

```
Row_n(i) = Obj_mas(i).Rows.count 'Вычисление количества строк
```

```
All_Row = All_Row + Row_n(i)
```

```
Col_n(i) = Obj_mas(i).Columns.count 'Вычисление количества столбцов
Next i
```

'1. Вычисление векторов средних значений для каждого класса

' (совокупности) объектов

```
ReDim Mean_n(Col_n(1), Obj_count)
```

```
ReDim Mean_n_tmp(Col_n(1), 1)
```

```
For j = 1 To Obj_count
```

```
For i = 1 To Col_n(1)
```

```
Mean_n(i, j) = Application.Average(Obj_mas(j).Columns(i))
```

```
Next i
```

```
Next j
```

'2. Вычисление оценок ковариационных матриц для каждого класса

```
ReDim Cov_mat_n(1 To Obj_count, 1 To Col_n(1), 1 To Col_n(1))
```

```
For k = 1 To Obj_count
```

```
For i = 1 To Col_n(1)
```

```
For j = i To Col_n(1)
```

```
Cov_mat_n(k, i, j) = Application.Covar(Obj_mas(k).Columns(i),
```

```
Obj_mas(k).Columns(j))
```

```
Next j
```

```
Next i
```

```
Next k
```

'3. Вычисление несмещенной оценки объединенной ковариационной матрицы

```
ReDim Cov_all(1 To Col_n(1), 1 To Col_n(1))
```

```
For k = 1 To Obj_count
```

```
For i = 1 To Col_n(1)
```

```
For j = i To Col_n(1)
```



```

Cov_all(i, j) = Cov_all(i, j) + (1 / (All_Row - Obj_count - 1)) _
* (Row_n(k) * Cov_mat_n(k, i, j))
If (i <> j) Then Cov_all(j, i) = Cov_all(i, j)
Next j
Next i
Next k

```

'4. Вычисление матрицы, обратной объединенной ковариационной матрице

```

ReDim Cov_inv(1 To Col_n(1), 1 To Col_n(1))
Cov_inv() = Application.MInverse(Cov_all())

```

```

Dim Cof_tmp() As Double
ReDim Cof_tmp(1 To Col_n(1), 1 To 1)

```

'Вычисление дискриминантных констант лямда

```

Dim lamda_n() As Double
ReDim lamda_n(1 To Obj_count)
Dim Xl_tmp() As Double
ReDim Xl_tmp(1, Col_n(1))
Dim Res_tmp() As Double
ReDim Res_tmp(1, Col_n(1))
For i = 1 To Obj_count
  For j = 1 To Col_n(1)
    Xl_tmp(1, j) = Mean_n(j, i)
    Mean_n_tmp(j, 1) = Mean_n(j, i)
  Next j
  For j = 1 To Col_n(1)
    Res_tmp(1, j) = Application.Index(Application.MMult(Xl_tmp(), Cov_inv()), j)
    lamda_n(i) = lamda_n(i) + Res_tmp(1, j) * Mean_n_tmp(j, 1)
  Next j

```

```
lamda_n(i) = lamda_n(i) / 2
```

```
Next i
```

```
Dim cof_prinadl() As Double
```

```
ReDim cof_prinadl(Obj_count) As Double
```

```
For k = 1 To Obj_count
```

```
  cof_prinadl(k) = 0
```

```
  For i = 1 To Col_n(1)
```

```
    cof_prinadl(k) = cof_prinadl(k) + myObj.Cells(i) * Cof_disk(k, i)
```

```
  Next i
```

```
  cof_prinadl(k) = cof_prinadl(k) - lamda_n(k)
```

```
Next k
```

```
k = 1
```

```
Max_val = cof_prinadl(1)
```

```
For i = 2 To Obj_count
```

```
  If Max_val < cof_prinadl(i) Then Max_val = cof_prinadl(i): k = i
```

```
Next i
```

```
'Результаты дискриминантного анализа
```

```
myCell3.Offset(0, 0).Value = _
```

```
"Результаты дискриминантного анализа"
```

```
myCell3.Offset(1, 0).Value = _
```

```
"Максимальное значение выражения = "
```

```
myCell3.Offset(1, 4).Value = Max_val
```

```
myCell3.Offset(3, 0).Value = _
```

```
"Анализируемый объект принадлежит к " & k & "-й совокупности объектов"
```

```
End Sub
```

ДОДАТОК Д

Акти впровадженнь та список публікацій

Список публікацій

1. Kapitsa, M., Laguta, V., Kozik, Y. Selecting the parameters of the diagnosis of frame insulation condition in electrical machines of locomotives (2018) International Journal of Engineering and Technology(UAE), 7 (4), pp. 110-114. DOI: 10.14419/ijet.v7i4.3.19718. [Електрон. ресурс] / – Режим доступа: <https://www.sciencepubco.com/index.php/ijet/issue/view/394>.
2. Козік Ю. Г. Оптимальне за питомими витратами прогнозування ресурсу корпусної ізоляції тягових електричних двигунів локомотивів. Зб. наук. пр. Держ. ун-ту інфраструктури та технологій. Серія: Трансп. системи і технології. Київ, 2019. Вип. 34. С. 30-47. DOI: <https://doi.org/10.32703/2617-9040-2019-34-1-3>.
3. Лагута, В. В., Козік, Ю. Г. Визначення періодів відновлення корпусної ізоляції тягового електродвигуна ЕД-118А за спостереженнями зворотної напруги. Наука та прогрес транспорту. 2020. № 3 (87). С. 163-173. DOI: 10.15802/stp2020/208270.
4. Kapitsa, M. Classification of Quality Conditions of a Traction Motor Frame Insulation of Locomotives [Electronic resource] / Michail Kapitsa, Vasiliy Laguta, Yuriy Kozik // MATEC Web of Conferences. – 2019. – Vol. 294 : 2nd International Scientific and Practical Conference “Energy-Optimal Technologies, Logistic and Safety on Transport” (EOT-2019). – P. 1-7. – Access Mode: https://www.matec-conferences.org/articles/matecconf/pdf/2019/43/matecconf_eot18_03002.pdf (21.10.2019). – DOI: 10.1051/matecconf/201929403002.
5. Обґрунтування методу контролю стану корпусної ізоляції тягових електричних машин локомотивів. Лагута В.В., Козік Ю.Г. Тези [Текст] 78 Міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту» [Текст] Дніпропетр. нац. ун-т залізн. трансп. ім. акад. В.Лазаряна. – Дніпро: Дніпропетр. нац. ун-т залізн. трансп. ім. акад. В.Лазаряна, 2018, С.15;
6. Неруйнівні технології контролю корпусної ізоляції тягових електричних машин

- локомотивів Капіца М.І., Козік Ю.Г. Науково-технічний прогрес на транспорті [Текст]. Тези доповідей Всеукраїнської науково-технічної конференції молодих вчених, магістрів та аспірантів. Секція «Механіка»; Дніпропетр. нац. ун-т залізн. трансп. ім. акад. В.Лазаряна. – Дніпро: Дніпропетр. нац. ун-т залізн. трансп. ім. акад. В.Лазаряна, 2018, С.54-55;
7. Вибір параметрів контролю стану корпусної ізоляції електричних машин локомотивів Козік Ю.Г., Лагута В.В. Тези [Текст]. XI Міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні інформаційні та комунікаційні технології на транспорті, в промисловості та освіті» Дніпропетр. нац. ун-т залізн. трансп. ім. акад. В.Лазаряна. – Дніпро: Дніпропетр. нац. ун-т залізн. трансп. ім. акад. В.Лазаряна, 2017, С.38;
 8. Методи випробувань ізоляційних конструкцій тягових електричних машин локомотивів Капіца М.І., Козік Ю.Г. Міжнародна науково-технічна конференція «Технології та інфраструктура транспорту», Харків, 14-16 травня 2018 р.: Тези доповідей. – Харків: УкрДУЗТ, С.107-109;
 9. Застосування енергозощаджуючих технологій під час випробувань ізоляційних конструкцій тягових електричних машин локомотивів. Капіца М.І., Лагута В.В., Козік Ю.Г. Матеріали міжнародної науково – практичної конференції (Львів, 18-19 червня 2018 р.) – Дніпро.: Дніпропетр. нац. ун-т залізн. трансп. ім. акад. В.Лазаряна, 2018, С.46-47
 10. Капіца М.І., Ю.Г. Козік Неруйнівні технології контролю корпусної ізоляції тягових електричних машин локомотивів [Текст]. Транспорт і логістика: проблеми та рішення: Збірник наукових праць за матеріалами VIII-ї Міжнародної науково-практичної конференції, Северодонецьк – Одеса – Вільнюс – Київ, 23-25 травня 2018р. / Східноукраїнський національний університет ім. В. Даля, Одеський національний морський університет – Одеса : КУПРІЄНКО СВ, 2018. – С.79
 11. Козік Ю. Г., Капіца М. І. Визначення оптимального напруження корпусної ізоляції ТЕД локомотивів з врахуванням ступені її відновлення [Текст]. Науково-технічний прогрес на транспорті: Тези доповідей 79 Всеукраїнської науково-

технічної конференції молодих вчених, магістрантів та студентів / Дніпровський нац. ун-т за-лізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпро : Дніпровський нац. ун-т залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, 2019. – С78.

12. Козік Ю.Г., Лагута В.В. Прогнозування ресурсу корпусної ізоляції тягових електричних двигунів локомотивів за питомими витратами [Текст] / Козік Ю.Г., Лагута В.В.// Тези 79-ї Міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту» 16-17 травня 2019 р. – Дніпро: Вид-во ДНУЗТ, 2019. – С. 29 – 30.
13. Капица М.И., Козик Ю.Г., Лагута В.В. Оценка остаточного ресурса корпусной изоляции ТЭД методом классификации ее состояний [Текст] /Капица М.И., Козик Ю.Г., Лагута В.В.// ІКСЗТ, 2018 №4 (додаток): Тези 31-ї міжнародної практичної конференції «Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті» – Харків: Вид-во УкрДУЗТ, 2018. – С. 11 – 12.
14. M. Kapitsa, V. Laguta, and Yu. Kozik Classification of quality conditions of a traction motor frame insulation of locomotives AGENDA of the 2-nd international scientific and practical conference "ENERGY-OPTIMAL TECHNOLOGIES, LOGISTICS AND SAFETY ON TRANSPORT" DNIPRO NATIONAL UNIVERSITY OF RAILWAY TRANSPORT NAMED AFTER ACADEMICIAN V. LAZARYAN RAILWAY INSTITUTE; September 19-20th, 2019, Lviv, Ukraine.

УЗГОДЖЕНО:
проректор з навчально-наукової,
економічної роботи, перспективного та
інноваційного розвитку ДНУЗТ, професор
Радкевич А.В.

« 6 » 02 2019 р.



ЗАТВЕРДЖУЮ:
Головний інженер служби локомотивного
господарства
Рибалко Ю.В.

« 5 » 02 2019 р.



АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ НДР

Ми, які нижче підписалися, представник **Виконавця** – проректор з навчально-наукової, економічної роботи, перспективного та інноваційного розвитку Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, професор Радкевич Анатолій Валентинович з однієї сторони та представник **Замовника** – Головний інженер служби локомотивного господарства Рибалко Ю.В. з другої сторони, склали цей акт про те, що згідно договору №0118U005059 «Підвищення надійності тягових електричних машин локомотивів» проведено наукові дослідження та досягнуто наступні результати:

Найбільшу інформативність про процес старіння корпусної ізоляції мають параметри, пов'язані з процесами абсорбції і ресорбції в динаміці.

Основною характеристикою для визначення показників стану ізоляції вибрано зворотну напругу.

Отримано аналітичні залежності для визначення показників стану корпусної ізоляції, які відмінні від показників що використовуються в даний час при проведенні діагностування електричних машин локомотивів.

Запропоновано раціональні періодичності відновлення властивостей корпусної ізоляції тягових електричних машин локомотивів з урахуванням якості виконуваних робіт на заводах під час виконання КР1 та КР2.

Робота є одним із етапів розробки та впровадження раціональної системи утримання локомотивів. Впровадження результатів досліджень в цьому напрямку, дасть можливість скоротити витрати на технічні обслуговування та ремонти тягових електричних машин локомотивів на 15%.

Виконавці:

Капіца М.І., д.т.н., професор

Лагута В.В., к.т.н., доцент

Козік Ю.Г., аспірант

« 1 » 02 2019 р.

Головний інженер Дніпровського
локомотивного депо
Всеволодський В.М.

« 4 »

Начальник Дніпровського локомотивного
депо
Любка В.С.

« 4 » 02 2019 р.



УЗГОДЖЕНО:

ЗАТВЕРДЖУЮ:

проректор з навчально-наукової, економічної роботи, перспективного та інноваційного розвитку ДНУЗТ, професор Радкевич А. В.

Директор технічний ПрАТ «Металургтрансремонт» Мінчук В.П.



2020 р.

2020 р.

АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ НДР

Ми, які нижче підписалися, представник **Виконавця** – проректор з навчально-наукової, економічної роботи, перспективного та інноваційного розвитку Дніпровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, професор Радкевич Анатолій Валентинович з однієї сторони та представник **Замовника** – директор технічний ПрАТ «Металургтрансремонт» Мінчук Вячеслав Петрович з другої сторони, склали цей акт про те, що згідно договору №0119U000430 «Удосконалення системи утримання тягових електричних машин локомотивів» проведено наукові дослідження та досягнуто наступні результати:

Вирішена задача визначення станів якості корпусної ізоляції тягового електродвигуна (ТЕД) за спостереженнями зворотної напруги на основі проведення класифікації міри зносу ізоляції що діагностується, а також визначено оцінки напрацювання корпусної ізоляції (далі ізоляція) до моменту відновлення або заміни ізоляції на нову. Для класифікації станів якості ізоляції і прогнозування її залишкового ресурсу до моменту відновлення використано кластерний аналіз і дискримінантний аналіз, ґрунтуючись на показниках що відбивають властивості кривої зворотної напруги ізоляції. Обґрунтовано інформативність зворотної напруги корпусної ізоляції в порівнянні з її опором з точки зору діагностування стану ізоляції і прогнозування її залишкового ресурсу. Розроблено програмне забезпечення класифікації стану ізоляції за спостереженнями кривих зворотної напруги і дискримінантного аналізу для оцінювання стану корпусної ізоляції та прогнозування залишкового ресурсу. Для проведення процедури класифікації стану ізоляції запропоновано інтегральне оцінювання стану якості ізоляції. Інтегральне оцінювання здійснювалось по кривій зворотної напруги і використовується як показник в процедурі кластеризації, другим таким показником є час що відповідає моменту спаду зворотної напруги до величини рівної половині її максимуму. Експериментальне дослідження запропонованого методу підтвердило його ефективність на практиці, що дає можливість визначати глибину (обсяг) ремонту (КР-1 або КР-2) ТЕД.

Виконавці:

Капіца М.І., д.т.н., професор

Лагута В.В., к.т.н., доцент

Козік Ю.Г., аспірант

«22» 04 2020 р.

Начальник відділу технічного контролю
ПрАТ «Металургтрансремонт»
Харченко О.А.

«22» 04 2020 р.

Начальник технічного відділу
ПрАТ «Металургтрансремонт»
Зімокос Т.Г.

«22» 04 2020 р.