

Запорізький національний технічний університет

Міністерство освіти і науки України

Національний технічний університет

"Харківський політехнічний інститут"

Міністерство освіти і науки України

Кваліфікаційна наукова

праця на правах рукопису

ВАСИЛЕВСЬКИЙ ВОЛОДИМИР ВАЛЕНТИНОВИЧ

УДК 648.3.048.1

## ДИСЕРТАЦІЯ

### ПРОГНОЗУВАННЯ СТРОКУ СЛУЖБИ СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА ЗА ДОПОМОГОЮ КОМПЛЕКСНОЇ МОДЕЛІ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ЦЕЛЮЛОЗНОЇ ІЗОЛЯЦІЇ

05.09.01 – електричні машини й апарати

14 – Електрична інженерія

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук (доктора філософії)

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

В.В. Василевський

Науковий керівник Поляков Михайло Олексійович, кандидат технічних наук, доцент кафедри електричних та електронних апаратів ЗНТУ

Харків – 2019

## АНОТАЦІЯ

Василевський В.В. Прогнозування строку служби силового трансформатора за допомогою комплексної моделі технічного стану целюлозної ізоляції.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук (доктора філософії) за спеціальністю 05.09.01 «Електричні машини й апарати» (14 – Електрична інженерія) – Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", м. Харків, 2019 р.

Дисертацію присвячено удосконаленню математичних моделей для прогнозування строку служби целюлозної ізоляції силового трансформатора та техніко-економічного обґрунтування стратегії його технічного обслуговування шляхом розробки комплексної моделі технічного стану целюлозної ізоляції. В роботі проаналізовані розрахункові методи прогнозу скорочення строку служби целюлозної ізоляції. Визначено, що ці методи наряду з позитивними якостями мають і недоліки, пов'язані з недостатнім урахуванням зміни факторів експлуатації трансформатора в періоді прогнозування та впливу проведення технічного обслуговування на швидкість старіння ізоляції. Дано визначення комплексної моделі технічного стану целюлозної ізоляції силового трансформатора, під якою мається на увазі сукупність математичних моделей, що описують зміну технічного стану целюлозної ізоляції внаслідок впливу зовнішніх експлуатаційних факторів та проведення технічного обслуговування. Визначено, що необхідним є розробка такої комплексної моделі на основі існуючих методів та моделей. Для досягнення мети дисертаційної роботи поставлені завдання, які включають:

- аналіз методів визначення ресурсних характеристик целюлозної ізоляції;
- розробку моделі формування ресурсу целюлозної ізоляції трансформатора на етапі його виробництва;
- розробку моделі технічного стану целюлозної ізоляції силового трансформатора на етапі експлуатації;

- розробку системи техніко-економічного обґрунтування вибору стратегії технічного обслуговування ізоляції трансформатора на стадії його експлуатації;
- вибір параметрів розробленої комплексної моделі технічного стану целюлозної ізоляції та її верифікація, реалізація моделі у вигляді програми та впровадження її в експлуатацію.

Об'єкт дослідження – процес формування та витрати ресурсу целюлозної ізоляції силового трансформатора під час зміни його технічного стану.

Предмет дослідження – методи та засоби оцінки і прогнозування ресурсних характеристик целюлозної ізоляції силового трансформатора.

Методи дослідження – при розробці комплексної моделі витрати ресурсу целюлозної ізоляції під час експлуатації використані методи математичного моделювання, теоретичних основ електротехніки і теорії надійності, модель формування ресурсу целюлозної ізоляції трансформатора на етапі його виробництва базується на теорії графів, алгебри нечітких чисел та теорії надійності, для вибору параметрів розробленої комплексної моделі технічного стану целюлозної ізоляції використані методи апроксимації розрахунково-експериментальних залежностей та метод Монте – Карло.

В роботі отримані такі наукові результати.

Виконано аналіз розрахункових методів та моделей визначення ресурсних характеристик целюлозної ізоляції силових маслонаповнених трансформаторів, що дозволило встановити шляхи удосконалення цих методів та моделей.

Розроблені математичні моделі для оцінки впливу етапу виробництва на призначений ресурс, які відрізняються урахуванням недосконалості засобів контролю і стохастичності процесу зміни ресурсу в ході технологічного процесу. При вирішенні задачі розробки моделей технологічної та контрольної операції був застосований апарат алгебри нечітких чисел. Використання зазначених моделей дозволяє підвищити точність розрахунку залишкового ресурсу трансформатора шляхом урахування зменшення призначеного ресурсу через внесення дефектів на етапі виробництва.

Розроблено математична модель технічного стану целюлозної ізоляції силового трансформатора на етапі експлуатації, яка складається з моделей факторів експлуатації, теплових процесів, вологообміну в системі паперова ізоляція – трансформаторне масло та блоку оцінки зносу. Урахування динаміки вмісту вологи в ізоляції дозволяє підвищити точність оцінки ресурсу ізоляції трансформатора. Запропонована модель вологообміну дозволяє будувати прогнозований графік вологості целюлозної ізоляції за даними моніторингу одиничного трансформатора або за результатами моделювання зміни експлуатаційних параметрів трансформатора.

Запропонована система техніко-економічного обґрунтування вибору стратегії технічного обслуговування ізоляції трансформатора на стадії його експлуатації. Проведено аналіз впливу проведення технічного обслуговування силового трансформатора (зокрема, сушіння активної частини) на ресурсні характеристики целюлозної ізоляції. Виконано моделювання витрати ресурсу трансформатора для різних стратегій технічного обслуговування. За допомогою аналізу результатів моделювання обґрунтовано необхідність урахування технічного обслуговування (зокрема, сушіння ізоляції) при розрахунках залишкового ресурсу ізоляції в експлуатації.

Здійснено вибір параметрів розробленої комплексної моделі технічного стану целюлозної ізоляції. Дістав розвитку розрахунковий метод визначення скорочення строку служби ізоляції за рахунок корегування відомої формули інтегралу старіння шляхом більш точної інтерполяції вихідних даних, що використовуються для побудови залежності швидкості старіння від вмісту вологи в ізоляції. Урахування стохастичного характеру змінення факторів експлуатації трансформатору здійснено за допомогою методу Монте – Карло.

Розроблені моделі реалізовані у вигляді програми в середовищі Matlab Simulink ® 7.7.0. Результати досліджень впроваджено в Українському науково-дослідному, проектно-конструкторському та технологічному інституті трансформаторобудування ПАТ "ВІТ" (м. Запоріжжя) та в навчальний процес кафедри Електричних та електронних апаратів Запорізького національного

технічного університету. Розглянута можливість використання отриманих в дисертаційній роботі результатів при модернізації системи неперервного контролю SAFE-T (виробництва ТОВ «Енергоавтоматизація», м. Запоріжжя) силового трансформатора ТРДНС-40000/35-УХЛ 1 встановленої на Аксуській ТЕС у республіці Казахстан у 2015 році.

Ключові слова: моделювання, ресурс, надійність, целюлозна ізоляція, силовий трансформатор, технічне обслуговування.

### СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА

1. Василевский В.В. Моделирование динамики распределений дефектов в изделиях в ходе технологического процесса / М.А. Поляков, В.В. Василевский // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. – 2013. – №4(87). – С.73 – 81.

2. Василевский В.В. Определение границ оптимальности технологических процессов изготовления / М.А. Поляков, В.В. Василевский // Сучасні енергетичні установки на транспорті, технології та обладнання для їх обслуговування СЕУТТОО–2013: Матеріали 4-ї Всеукраїнської науково-практичної конференції. – Херсон : ХДМА, 2013, – С. 276 – 278.

3. Василевский В.В. Оценка остаточного ресурса изоляции на основе учета индивидуальных особенностей жизненного цикла силового трансформатора / М.А. Поляков, В.В. Василевский // Електротехніка і електромеханіка. – 2014. – №3. – С.33 – 36.

4. Vasilevskij V.V. Prognosis of wearing out of power transformer winding insulation / V.V. Vasilevskij, M.A. Polyakov // Технічна електродинаміка. – 2014. – №5. – С.65 – 67.

5. Василевский В.В. Моделирование динамики процессов миграции влаги в бумажно-масляной изоляции силового трансформатора / В.В. Василевский // Тиждень науки 2014: Збірник тез доповідей щорічної науково-практичної

конференції серед викладачів, науковців, молодих учених, аспірантів і студентів ЗНТУ. – Запоріжжя : ЗНТУ, 2014, – С. 227.

6. Василевский В.В. Оценка расхода ресурса бумажной изоляции силового маслонаполненного трансформатора с помощью уточненной формулы интеграла старения / Василевский В.В. // Електротехніка і електромеханіка. – 2015. – №1. – С.18 – 21.

7. Василевский В.В. Автоматизация формирования тренда влажности бумажной изоляции силового маслонаполненного трансформатора / В.В. Василевский // Тиждень науки 2015: Збірник тез доповідей щорічної науково-практичної конференції серед викладачів, науковців, молодих учених, аспірантів і студентів ЗНТУ. – Запоріжжя : ЗНТУ, 2015, – С. 81.

8. Василевский В.В. Автоматизация оценки ресурса бумажной изоляции силовых маслонаполненных трансформаторов на разных стадиях жизненного цикла / В.В. Василевский, М.А. Поляков // Електромеханічні та енергозберігаючі системи. – 2015. – №3. – С.110 – 116.

9. Василевский В.В. Модель динамики влажности в системе "Бумажная изоляция – Трансформаторное масло" в нестационарных тепловых режимах силового трансформатора/ В.В. Василевский // Електротехніка і електромеханіка. – Харків : НТУ "ХП", 2016. – №13, – С.17 – 20.

10. Василевский В.В. Разработка технико-экономической модели обновления ресурса бумажной масляной изоляции силовых трансформаторов / В.В. Василевский // Тиждень науки 2016: Збірник тез доповідей щорічної науково-практичної конференції серед викладачів, науковців, молодих учених, аспірантів і студентів ЗНТУ. – Запоріжжя : ЗНТУ, 2016, – С. 380.

11. Василевский В.В. Модели влияния технологических и контрольных операций изготовления на реальный ресурс силового трансформатора/ Василевский В.В. // Електротехнічні та комп'ютерні системи. – 2017. – №25 (101) – С.425 – 431.

12. Василевский В.В. Когнитивное управление жизненным циклом изоляции обмоток маслонаполненного силового трансформатора / М.А. Поляков,

И.А. Андрияс, С.П. Конограй, В.В. Василевский // Вісник Національного технічного університету "ХП". Серія: Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії. –2018. –№ 5. – С. 90-96.

13. Василевский В.В. Прогнозування витрати ресурсу целюлозної ізоляції шляхом моделювання зменшення ступеню її полімеризації / В.В. Василевский // Тиждень науки 2018: Збірник тез доповідей щорічної науково-практичної конференції серед викладачів, науковців, молодих учених, аспірантів і студентів ЗНТУ. – Запоріжжя : ЗНТУ, 2018, – С. 459.

## ABSTRACT

Vasilevsky V.V. Predicting the lifetime of power transformer using a complex model of technical condition of cellulose insulation. – Qualifying scientific work on the rights of manuscripts.

Thesis for granting the Degree of Candidate of Technical sciences in speciality 05.09.01 – Electric machines and apparatus (14 – Electrical Engineering). – National Technical University “Kharkiv Politechnical Institute”, Kharkiv, 2019.

The thesis is dedicated to the improvement of mathematical models for forecasting the residual lifetime of a power transformer and the feasibility study of its maintenance strategy by developing a complex model of cellulose insulation technical condition. The paper analyzes the calculated methods of forecasting the residual lifetime of cellulose insulation. It is determined that these methods, along with the positive qualities, also have disadvantages associated with insufficient consideration of changes in the factors of transformer operation in the period of forecasting and the effect of maintenance on the rate of aging insulation. The definition of a complex model of the technical state of cellulose insulation of a power transformer is given, which implies a set of mathematical models describing the change in the technical state of cellulose insulation due to the flow of external operational factors and maintenance. It is determined that the development of such a complex model is necessary based on existing methods and models. To achieve the goal of the dissertation, the tasks are set, which include:

- analysis of methods for determining the resource characteristics of cellulose insulation;
- development of the transformer cellulose insulation resource formation model at the stage of its production;
- development of the model of the technical state of the power transformer cellulose insulation during the operation stage;
- development of a system of feasibility studies for choosing a maintenance strategy for transformer insulation at the stage of its operation;

– selection of parameters of the developed complex model of the technical condition of cellulose insulation and its verification, implementation of the model in the form of a program and its implementation in operation.

The object of the study is the process of formation and consumption of a resource of power transformer paper insulation of during the change of its technical condition.

Subject of research – methods and means of estimation and forecasting of resource characteristics of power transformer paper insulation.

Methods of research – developing a complex model of the consumption of the cellulose insulation's resource during operation are based on methods of mathematical modeling, theoretical foundations of electrical engineering and reliability theory, graph theory, model of the transformer's resource formation at the stage of its production carried out using algebra of fuzzy numbers and reliability theory, approximation of the calculation-experimental dependencies, the Monte – Carlo method using for choosing the parameters of the developed complex model of the cellulose insulation's technical condition.

The following scientific results were obtained in the work:

The analysis of calculation methods and models of determination of resource characteristics of power oil-filled transformers cellulose insulation has been carried out, which has made it possible to establish ways of improving these methods and models. The mathematical models for the estimation of the influence of the production stage on the assigned resource, which differ due to the imperfection of the control means and the stochastic nature of the resource change process during the technological process, are developed. In solving the problem of developing the models of technological and control operations, the apparatus of algebra of fuzzy numbers was used. The use of these models allows to increase the accuracy of the calculation of the residual life of the transformer by taking into account the reduction of the assigned resource due to the defects making at the production stage.

A mathematical model of the technical state of cellulose insulation of a power transformer during the exploitation phase is developed, which consists of models of

operation factors, thermal processes, water exchange in the system of cellulose insulation - transformer oil and a unit for calculation of consumed resource. Taking into account the dynamics of the moisture content in the insulation can improve the accuracy of the transformer insulation resistivity estimate. The proposed model of water exchange allows us to construct a predicted graph of humidity of cellulose insulation according to the monitoring of a single transformer or based on the simulation of the transformer's operational parameters change.

The system of feasibility study for the choice of a maintenance strategy for insulation of the transformer at the stage of its operation is proposed. The analysis of the influence of maintenance of power transformer (in particular, drying of the active part) on the characteristics of cellulose insulation is carried out. Modeling the cost of a transformer resource for different maintenance strategies is performed. The analysis of the modeling results justified the need to take into account maintenance (in particular, insulation drying) when calculating the remaining insulation resource in service.

Selection of the developed complex model parameters has been made. A calculation method has been developed to determine the reduction of the service life of insulation by adjusting the known formula of the aging integral by more accurate interpolation of the initial data used to construct the dependence of the aging rate on the moisture content in the insulation. The stochastic character of the transformer operation factors is taken into account using the Monte Carlo method.

The developed models are implemented as a program in the Matlab Simulink® 7.7.0 environment. The research results were implemented at the JSC "VIT", with the modernization of the SAFE-T monitoring system for the development of "Energoavtomatizatsiya" Ltd. and the educational process of the Department of electric and electronic apparatus of the Zaporizhzhya National Technical University. The acts of implementation are added.

Key words: modeling, resource, reliability, cellulose insulation, power transformer, maintenance.

## LIST OF PUBLICATIONS OF THE APPLICANT

1. Vasilevskij V.V. Modelirovanie dinamiki raspredelenij defektov v izdeliyax v xode texnologicheskogo processa / M.A. Polyakov, V.V. Vasilevskij // Systemni tekhnologii. Rehionalnyi mizhvuzivskiyi zbirnyk naukovykh prats. – 2013. – № 4(87). – P.73 – 81.

2. Vasilevskij V.V. Opređenje granic optimal'nosti texnologicheskix processov izgotovleniya / M.A. Polyakov, V.V. Vasilevskij // Suchasni enerhetychni ustanovky na transporti, tekhnologii ta obladnannia dlia yikh obsluhovuvannia SEUTTOO–2013: Materialy 4-yi Vseukrainskoi naukovo-praktychnoi konferentsii. – Kherson : KhDMA, 2013, – P.276 – 278.

3. Vasilevskij V.V. Ocenka ostatochnogo resursa izolyacii na osnove ucheta individual'nyx osobennostej zhiznennogo cikla silovogo transformatora / M.A. Polyakov, V.V. Vasilevskij Vasylevskiyi // Elektrotehnika i elektromekhanika. – 2014. – №3. – P.33 – 36.

4. Vasilevskij V.V. Prognosis of wearing out of power transformer winding insulation / V.V. Vasilevskij, M.A. Polyakov // Tekhnichna elektrodynamika. – 2014. – №5. – P.65 – 67.

5. Vasilevskij V.V. Modelirovanie dinamiki processov migracii vlagi v bumazhno-maslyanoj izolyacii silovogo transformatora / V.V. Vasilevskij // Tyzhden nauky 2014: Zbirnyk tez dopovidei shchorichnoi naukovo-praktychnoi konferentsii sered vykladachiv, naukovtsiv, molodykh uchenykh, aspirantiv i studentiv ZNTU. – Zaporizhzhia : ZNTU, 2014, – P. 227.

6. Vasilevskij V.V. Ocenka rasxoda resursa bumazhnoj izolyacii silovogo maslonapolnennogo transformatora s pomoshh'yu utochnennoj formuly integrala stareniya / Vasilevskij V.V. // Elektrotehnika i elektromekhanika. – 2015. – №1. – P.18 – 21.

7. Vasilevskij V.V. Avtomatizaciya formirovaniya trenda vlazhnosti bumazhnoj izolyacii silovogo maslonapolnennogo transformatora / V.V. Vasilevskij// Tyzhden nauky 2015: Zbirnyk tez dopovidei shchorichnoi naukovo-praktychnoi konferentsii

sered vykladachiv, naukovtsiv, molodykh uchenykh, aspirantiv i studentiv ZNTU. – Zaporizhzhia : ZNTU, 2015, – P.81.

8. Vasilevskij V.V. Avtomatizaciya ocenki resursa bumazhnoj izolyacii silovyx maslonapolnennyx transformatorov na raznyx stadiyax zhiznennogo cikla / V.V. Vasilevskij, M.A. Polyakov// Elektromekhanichni ta enerhozberihaiuchi systemy. – 2015. – №3. – P.110 – 116.

9. Vasilevskij V.V. Model' dinamiki vlazhnosti v sisteme "Bumazhnaya izolyaciya – Transformatornoe maslo" v nestacionarnyx teplovyx rezhimakh silovogo transformatora/ V.V. Vasilevskij// Elektrotehnika i elektromekhanika. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2016. – №13, – P.17 – 20.

10. Vasilevskij V.V. Razrabotka texniko-e'konomicheskoy modeli obnovleniya resursa bumazhnoj maslyanoj izolyacii silovyx transformatorov / V.V. Vasilevskij// Tyzhden nauky 2016: Zbirnyk tez dopovidei shchorichnoi naukovo-praktychnoi konferentsii sered vykladachiv, naukovtsiv, molodykh uchenykh, aspirantiv i studentiv ZNTU. – Zaporizhzhia : ZNTU, 2016, – P. 380.

11. Vasilevskij V.V. Modeli vliyaniya texnologicheskix i kontrol'nyx operacij izgotovleniya na real'nyj resurs silovogo transformatora/ Vasilevskij V.V. // E'lektrotexnicheskie i komp'yuternye sistemy. – 2017. – №25 (101) – P.425 – 431.

12. Vasilevskij V.V. Kognitivnoe upravlenie zhiznennym ciklom izolyacii obmotok maslonapolnennogo silovogo transformatora / M.A. Polyakov, I.A. Andriyas, S.P. Konograj, V.V. Vasilevskij // Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu "KhPI". Seriya: Elektrychni mashyny ta elektromekhanichne peretvorennia enerhii. – 2018. – № 5. – P. 90-96.

13. Vasylevskyi V.V. Prohnozuvannia vytraty resursu tseliuloznoi izoliatsii shliakhom modeliuвання zmeshennia stupeniui yii polimeryzatsii / V.V. Vasylevskyi // Tyzhden nauky 2018: Zbirnyk tez dopovidei shchorichnoi naukovo-praktychnoi konferentsii sered vykladachiv, naukovtsiv, molodykh uchenykh, aspirantiv i studentiv ZNTU. – Zaporizhzhia : ZNTU, 2018, – P. 459.

## ЗМІСТ

Вступ.....	5
Розділ 1 Аналіз розрахункових методів визначення ресурсних характеристик целюлозної ізоляції силових маслонаповнених трансформаторів.....	12
1.1. Аналіз методів визначення скорочення строку служби ізоляції в результаті теплового старіння.....	12
1.2. Основні підходи до оцінки впливу зволоженості ізоляції трансформатора на скорочення строку її служби.....	21
1.3 Аналіз сучасних систем неперервного контролю силових трансформаторів.....	26
Висновки за розділом 1.....	36
Розділ 2 Аналіз моделей технічного стану целюлозної ізоляції силового трансформатора.....	38
2.1 Система управління життєвим циклом силового трансформатора.....	38
2.1.1 Характеристика етапів життєвого циклу силового трансформатора з точки зору формування та витрати ресурсу його целюлозної ізоляції.....	38
2.1.2 Розробка структури когнітивної системи управління життєвим циклом целюлозної ізоляції силових трансформаторів.....	43
2.2 Модель формування ресурсу целюлозної ізоляції трансформатора на етапі його виробництва.....	54
2.2.1 Розробка моделей для оцінки впливу етапу виробництва на призначений ресурс ізоляції силового трансформатора.....	54
2.2.2 Розробка методики визначення меж оптимальності технологічних процесів виготовлення вузлів силового трансформатора.....	61
2.3 Модель скорочення строку служби целюлозної ізоляції силового трансформатора на стадії його експлуатації.....	66
2.3.1 Характеристика елементів комплексної моделі скорочення строку служби целюлозної ізоляції.....	66

2.3.2	Статистичне моделювання зміни факторів експлуатації в періоді прогнозування.....	69
2.3.3	Розробка моделі динаміки вологості в системі целюлозна ізоляція – трансформаторне масло.....	71
	Висновки за розділом 2.....	76
	Розділ 3. Дослідження комплексної моделі технічного стану целюлозної ізоляції силового трансформатора на етапі його експлуатації.....	78
3.1	Визначення параметрів моделі технічного стану целюлозної ізоляції.....	78
3.1.1	Модель теплових процесів в трансформаторі.....	78
3.1.2	Вибір коефіцієнтів моделі оцінки скорочення строку служби целюлозної ізоляції.....	82
3.1.3	Модель факторів експлуатації силового трансформатора.....	92
3.1.4	Вибір коефіцієнтів моделі факторів експлуатації за допомогою методу Монте – Карло.....	94
3.1.5	Вибір коефіцієнтів моделі динаміки вологості в системі целюлозна ізоляція – трансформаторне масло.....	98
3.2	Моделювання витрати ресурсу целюлозної ізоляції силового трансформатора.....	100
3.2.1	Вибір об'єкту моделювання.....	100
3.2.2	Програмна реалізація моделі технічного стану целюлозної ізоляції на етапі експлуатації.....	101
3.2.3	Прогнозування витрати ресурсу целюлозної ізоляції шляхом моделювання зменшення ступеню полімеризації.....	104
3.2.4	Дослідження витрати ресурсу целюлозної ізоляції трансформатора АОДЦТН – 167000/500/220.....	108
	Висновки за розділом 3.....	112
	Розділ 4 Практична реалізація розроблених моделей та розробка методики їх застосування.....	113
4.1	Функціональність та технічні характеристики розробленої програми.....	113

4.2 Розробка алгоритму роботи з програмою.....	115
4.3 Моделювання стратегій технічного обслуговування за станом та планової стратегії технічного обслуговування.....	118
4.4 Економічна оцінка ефективності стратегій технічного обслуговування.....	125
Висновки за розділом 4.....	128
Висновки.....	129
Перелік використаних джерел.....	131
Додатки.....	146