

Міністерство освіти і науки України
Вінницький національний технічний університет

В. В. Грабко, О. В. Дідушок

**МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ ДІАГНОСТУВАННЯ
ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ВАКУУМНИХ ВИМИКАЧІВ**

Монографія

Вінниця
ВНТУ
2022

УДК 621.316.5:681.518.5

Г75

Рекомендовано до видання Вченою радою Вінницького національного технічного університету Міністерства освіти і науки України (протокол № 7 від 31.03.2022 р.)

Рецензенти:

доктор технічних наук, професор **В. М. Кутін**
доктор технічних наук, професор **О. П. Чорний**

Грабко, В. В.

Г75 Методи та засоби діагностування технічного стану вакуумних вимикачів : монографія [Електронний ресурс] / В. В. Грабко, О. В. Дідушок. – Вінниця: ВНТУ, 2022. – 113 с.

ISBN 978-966-641-905-0

В монографії здійснено огляд та аналіз існуючих методів і засобів діагностування вакуумних вимикачів. Представлені розроблені авторами математичні моделі визначення технічного стану вакуумних вимикачів та побудовані на їх основі пристрої, що дозволяють опосередковано діагностувати технічний стан вакуумних вимикачів.

Книга розрахована на інженерно-технічних працівників електротехнічної промисловості та електроенергетики, що займаються експлуатацією електричного обладнання, а також може бути корисною студентам та аспірантам закладів вищої освіти та наукових установ.

УДК 621.316.5:681.518.5

ISBN 978-966-641-905-0

© В. Грабко, О. Дідушок, 2022

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ.....	5
ВСТУП.....	6
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ПИТАНЬ ДІАГНОСТУВАННЯ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ВАКУУМНИХ ВИМИКАЧІВ	8
1.1 Аналіз методів діагностування комутаційних апаратів	8
1.2 Аналіз засобів діагностування приводів вимикачів	14
1.3 Аналіз засобів діагностування контактної системи вимикачів	21
1.4 Узагальнення результатів аналізу і постановка задачі дослідження	26
РОЗДІЛ 2 МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ ДЛЯ ДІАГНОСТУВАННЯ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ВАКУУМНИХ ВИМИКАЧІВ	28
2.1 Математична модель діагностування технічного стану електромагнітного привода на основі аналізу вебер-амперних характеристик	28
2.2 Математична модель системи виявлення зносу контактної системи вакуумного виимикача.....	32
2.3 Математична модель оцінки та налаштування синхронної роботи контактної системи вакуумного вимикача	40
РОЗДІЛ 3 СИНТЕЗ ПРИСТРОЇВ ДІАГНОСТУВАННЯ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ВАКУУМНИХ ВИМИКАЧІВ	46
3.1 Мікропроцесорна реалізація засобу для діагностування електромагнітного привода вакуумного вимикача на основі аналізу вебер-амперних характеристик.....	46
3.2 Пристрій діагностування електричного привода вакуумного вимикача.....	49
3.3 Пристрій для визначення неузгодження одночасності ввімкнення полюсів вимикача	53

3.4 Пристрій для формування керуючої дії налаштування синхронної роботи контактної системи.....	55
3.5 Реалізація пристрою діагностування неузгодження одночасності ввімкнення полюсів вимикача із застосуванням програмованих логічних інтегральних мікросхем.....	58
3.6 Мікропроцесорний пристрій для виявлення зносу контактної системи вакуумного вимикача.....	61
3.7 Інтеграція реалізованих засобів.....	65
РОЗДІЛ 4 МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМИ ДІАГНОСТУВАННЯ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ВАКУУМНОГО ВИМИКАЧА.....	66
4.1 Комп'ютерна модель електромагнітного привода вакуумного вимикача.....	67
4.2 Комп'ютерна модель системи виявлення зносу контактної системи вакуумного вимикача.....	72
4.3 Обробка експериментальних даних	79
ВИСНОВКИ.....	89
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	91
Додаток Комп'ютерне моделювання електромагнітного привода Е-10 вакуумного вимикача ВР0-10-12,5/630 У2 у програмі FEMM.....	107

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

ПД	– пристрій діагностування
ТХ	– технічний стан
ДК	– датчик комутації
ДН	– датчик напруги
ДС	– датчик струму
АВС	– автоматична вимірювальна система
КС	– контактна система
ППП	– пакет прикладних програм
ДЖ	– джерело живлення
РП	– реєструючий пристрій
БУ	– блок управління
ПК	– персональний комп'ютер
ЕРС	– електрорушійна сила
ФНЧ	– фільтр низьких частот
КДС	– кероване джерело струму

ВСТУП

Надійне електропостачання споживачів можливе лише у випадку надійної роботи усього обладнання енергосистеми. При цьому особлива увага приділяється вимикачам, за допомогою яких здійснюється комутація в електричних мережах [1]. Вони належать до найбільш важливих комутаційних апаратів, від надійності функціонування яких, залежить стійкість забезпечення електропостачання споживачів. За допомогою вимикачів здійснюється відключення аварійних струмів короткого замикання, операції комутації номінального робочого струму, а також комутації, пов'язані зі зміною напрямку потоків потужностей в електроенергетичних системах.

Світова тенденція розвитку електротехнічного устаткування свідчить про заміну поширених у минулому масляних та маломасляних вимикачів напругою 6-35 кВ на вакуумні вимикачі [2]. Вакуумні комутаційні апарати мають найбільшу динаміку розвитку і є найбільш перспективними в розподільчих установках середньої номінальної напруги. Вакуумні дугогасильні пристрої мають високу надійність і зносостійкість [3]. Але є також певні недоліки: перенапруги, викликані неодночасністю комутації полюсів вимикача; розрегулювання контактної системи в процесі довготривалої роботи; висока вартість даного типу комутаційного обладнання.

Для оцінки технічного стану вакуумного вимикача використовуються різні засоби діагностування [4]. Особливу увагу в процесі діагностування технічного стану вакуумного вимикача приділяють дослідженню роботи його приводу [5]. Від технічного стану приводу залежить надійність роботи усього комутаційного апарату, його технічна можливість здійснити замикання/розмикання головних і допоміжних контактів із заданими швидкісними та динамічними параметрами. В процесі роботи вакуумного вимикача дугові процеси під час комутації призводять до зношення контактної системи (зміна форми, розміру, маси робочих поверхонь силових контактів, зменшення їх провалу). Існуючі засоби діагностування

контактної системи вакуумних вимикачів зводяться до виявлення існуючих відхилень від заводських параметрів, але виявлення прихованих дефектів або тих, що зароджуються, потребує застосування нових методів діагностування.

Дослідженню та створенню засобів діагностування технічного стану вимикачів присвячена велика кількість робіт, авторами яких є: В. М. Кутін, Б. С. Стогній, М. Ф. Сопель, Є. М. Танкевич, А. В. Панов, В. І. Паньків, Г. М. Міхєєв, В. А. Шахнін, В. І. Прівалов, О. Є. Рубаненко, Н. І. Овчаренко, А. І. Ящура та багато інших.

ВИСНОВКИ

В монографії наведене теоретичне узагальнення та нове вирішення наукової задачі діагностування електромагнітного привода, виявлення зношення та розрегулювання контактної системи вакуумного вимикача та її технічні реалізації, що дозволяє підвищити надійність роботи вакуумного комутаційного апарата.

Основні наукові та практичні результати роботи є такими:

1. Розроблено математичну модель для діагностування електромагнітного привода вакуумного вимикача на основі аналізу вебер-амперних характеристик, застосування якої дозволяє в процесі роботи оцінити поточний стан електромагніту та ступінь його зносу через порівняння коефіцієнтів відхилення вебер-амперних характеристик.

2 Розроблено математичну модель виявлення зносу контактної системи при комутації вакуумного вимикача, застосування якої дозволяє визначати знос комутаційної системи при ввімкненні та вимкненні вакуумного вимикача.

3. Розроблено математичну модель для оцінки робочого стану контактної системи вакуумного вимикача, застосування якої, на відміну від відомих, дозволяє розраховувати відхилення від допустимого значення часу ввімкнення вимикача та формувати сигнали керуючої дії для оперативного персоналу щодо регулювання рухомих контактів полюсів вимикача.

4. На основі математичних моделей діагностування електромагнітного привода вакуумного вимикача розроблено алгоритми та функціональні схеми мікропроцесорних засобів, застосування яких дозволяє здійснювати діагностування електромагнітного привода вакуумного вимикача, що, в свою чергу, дозволяє з високою достовірністю визначати його технічний стан.

5. На основі математичної моделі діагностування електромагнітного привода за вебер-амперними характеристиками розроблена структурна схема пристрою, застосування якого дозволяє здійснювати діагностування електромагнітного привода в процесі роботи вакуумного вимикача.

6. На основі математичної моделі оцінки робочого стану контактної системи вакуумного вимикача розроблені структурні схеми пристроїв, поєднання яких дозволяє реалізувати комплексний пристрій визначення робочого стану контактної системи та формувати дії для оперативного персоналу щодо регулювання рухомих контактів полюсів вимикача.

7. Розроблено комп'ютерну модель електромагнітного привода вакуумного вимикача у програмному середовищі FEMM та комп'ютерну модель виявлення та попередження зносу контактної системи вакуумного вимикача у програмі у Matlab Simulink, які адекватно відображають та підтверджують достовірність запропонованих математичних моделей та їх технічні реалізації.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

[1] K. Niayesh, and M. Runde, *Power Switching Components: Theory, Applications and Future Trends*. Cham, Switzerland: Springer International Publishing AG, 2017.

[2] P. Gill, *Electrical Power Equipment Maintenance and Testing. Second Edition*. Bosa Roca, United States: Taylor & Francis Inc, 2009.

[3] R. Smeets, L. Sluis, M. Kapetanovic, D. Peelo, and A. Janssen, *Switching in Electrical Transmission and Distribution Systems*. Chichester, United Kingdom: John Wiley & Sons, Ltd, 2015.

[4] D. F. Peelo, *Current Interruption Transients Calculation*. Chichester, United Kingdom: John Wiley & Sons, Ltd, 2014.

[5] S.G. Jeyaraj, and Y. Habtay, «Effective and efficient circuit breaker analysis», in *IET Conference on reliability of transmission and distribution networks (RTDN 2011)*, London, 2011, pp. 157-162.

[6] В. М. Кутін, М. О. Ілюхін, та М. В. Кутіна, *Діагностика електрообладнання: навчальний посібник*. Вінниця: ВНТУ, 2014.

[7] В. Я. Кучер, *Основы технической диагностики и теории надежности*. Санкт-Петербург, Россия: СЗТУ, 2004.

[8] В. М. Казак, *Основы контролю та технічної діагностики*. Київ, Україна: НАУ, 2013.

[9] А. И. Хальясма, С. А. Дмитриев, С. Е. Кокин, и Д. А. Глушков, *Диагностика электрооборудования электрических станций и подстанций: учебное пособие*. Екатеринбург: Издательство Урал. Ун-та, 2015.

[10] W. Hauschild, and E. Lemke, *High-Voltage Test and Measuring Techniques*. Cham, Switzerland: Springer International Publishing AG, 2019.

[11] Г. М. Михеев, *Цифровая диагностика высоковольтного оборудования*. М.: Изд. дом “ДОДЭКА”, 2009.

[12] ПУЕ-2017. *Правила улаштування електроустановок*. Київ: Міненерговугілля України, 2017.

[13] СОУ-Н ЕЕ 20.302:2007. *Норми випробування електрообладнання*. Харків: Мінпаливенерго України норми, 2009.

[14] В. И. Григорьев и др., *Приборы и средства диагностики электрооборудования и измерений в системах электроснабжения: Справочное пособие*. М.: Колос. - 2006.

[15] Е. Е. Привалов, *Диагностика электроэнергетического оборудования: учебное пособие*. М.: Директ-Медиа, 2015.

[16] Е. Е. Привалов, *Диагностика электроэнергетического оборудования*. Ставрополь: Параграф, 2014.

[17] В. М. Левин, *Диагностика и эксплуатация оборудования электрических сетей*. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2011.

[18] Г. М. Михеев, *Электростанции и электрические сети. Диагностика и контроль оборудования*. М.: Изд. дом «Додэка-XXI», 2010.

[19] В. Н. Кольцов, и Ю. М. Миронюк, «Современные мобильные комплексы для диагностики объектов электроснабжения», *Контроль. Диагностика*. № 12. с. 39-43, 2014.

[20] Н. И. Овчаренко, *Автоматизированный анализ состояния высоковольтного оборудования*. М.: Изд. Дом МЭИ, 2009.

[21] В. А. Шахнин, *Методы и средства диагностики высоковольтного оборудования: учеб. пособие*. Владимир: Изд-во ВлГУ, 2018

[22] Обзор отечественных и импортных приборов для контроля высоковольтных выключателей, 2020. [Электронный ресурс]. Доступно: <https://skbpribor.ru/info/reviews/5746>. Дата обращения: Июнь. 1, 2020.

[23] Прибор контроля высоковольтных выключателей ПКВ/М7, 2020. [Электронный ресурс]. Доступно: <https://skbpribor.ru/instrument/pkv-m7/>. Дата обращения: Июнь. 1, 2020.

[24] Б. Г. Стогній, М. Ф. Сопель, О. І. Стасюк, В. В. Сорочинський, та О. С. Михайлевський «Інформаційно-діагностичний комплекс РЕГІНА», *МПК G06F 11/00 (2014.01)*. № 88652, Бер. 25, 2015.

[25] «BDM» – система моніторингу та діагностики дефектів комутаційного обладнання, 2020. [Електронний ресурс]. Доступно: <https://dimrus.ru/manuals/bdm.pdf>. Дата звернення: Червень. 1, 2020.

[26] О. Ф. Буткевич, та В. Л. Тутик, «Моніторинг та діагностування електроенергетичних об'єктів та систем України на базі комплексів «Регіна», *Гідроенергетика України*, № 3, с. 46-49, 2010.

[27] Б. С. Стогній, О. В. Кириленко, О. Ф. Буткевич, М. Ф. Сопель, О. Б. Рибіна, та В. Л. Тутик, «Система збору та обробки інформації, що реєструється комплексами «Регіна-Ч», *Праці Інституту електродинаміки НАН України*, Вип. 29, с. 35-46, 2011.

[28] О. Є. Рубаненко, *Вдосконалення методів і засобів діагностування високовольтних вимикачів: монографія*. Вінниця: ВНТУ, 2012.

[29] В. М. Кутін, О. Є. Рубаненко, та С. В. Мисенко, «Вдосконалення методів діагностування високовольтних вимикачів», *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, №1, с. 109-113, 2012.

[30] В. М. Кутін, О. Є. Рубаненко, та С. В. Мисенко, «Досвід впровадження та забезпечення надійності елегазових вимикачів в умовах експлуатації», *Наукові праці ВНТУ*, №1, с. 1-7, 2013.

[31] В. М. Кутін, О. Є. Рубаненко, та С. В. Мисенко, «Визначення діагностичних параметрів оцінки технічного стану високовольтного вимикача», *Енергетика: економіка, технології, екологія*, № 3, с. 33-39, 2014.

[32] В. М. Кутін, О. Є. Рубаненко, та С. В. Мисенко, «Визначення технічного стану елегазових високовольтних вимикачів в умовах експлуатації», *Вісник НТУ «ХПІ»*, №60 (1102), с. 57-68, 2014.

[33] О. Є. Рубаненко, Ю. Г. Ведміцький, та С. В. Мисенко, «Вдосконалення методів визначення технічного стану високовольтних вимикачів», *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, № 3, с. 78-86, 2016.

[34] Є. І. Удод, Р. М. Горбей, та В. Ф. Чернов, *Діагностування електроустановок 0,4–750 кВ засобами інфрачервоної техніки*. К.: «КВІЦ», 2007.

[35] В. М. Кутін, О. О. Шпачук, М. В. Нікітчук, та В. М. Світко, «Автоматизація аналізу теплового стану електрообладнання», *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, № 3, с. 51-56, 2018.

[36] В. П. Вавилов, и А. Н. Александров, *Инфракрасная термографическая диагностика в строительстве и энергетике*. М.: Энергопрогресс, 2014.

[37] С. А. Бажанов, *Инфракрасная: диагностика электрооборудования РУ*. М.: НТФ «Энергопрогресс», 2000.

[38] Е. Е. Привалов, *Диагностика и тепловизионный контроль электроэнергетического оборудования: учебное пособие*. Ставрополь: Изд-во ПАРАГРАФ, 2014.

[39] Д. Ю. Уразов, «О преимуществах тепловизионного метода анализа работы электрооборудования», *Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий*. № 3 (53), с. 51-53, 2012.

[40] А. Ю. Хренников, и М. Г. Сидоренко, «Тепловизионное обследование электрооборудования подстанций и промышленных предприятий и его экономическая эффективность», *Рынок Электротехники*, № 2 (14), с. 96-100, 2009.

[41] H. Tianshu, L. Bo, W. Yaowei, L. Tianci, S. Yuanlin, S. Yang, H. Yang, H. Wenfeng, L. Chenyang, and H. Lin, «Research and application of infrared leak detection technology for SF6 equipment», in *2018 6th International Conference on Machinery, Materials and Computing Technology (ICMMCT 2018)*, Jinan, 2018, pp. 189-193.

[42] Y. Kang, Y. Li, T. Wang, L. Guo, G. Yang and N. Zhang, «Detection and analysis of internal abnormal heating for high voltage switchgear based on

infrared thermometric technology», in *2017 2nd International Conference on Power and Renewable Energy (ICPRE)*, Chengdu, 2017, pp. 199-203.

[43] B. A. Freer, S. P. Iannce, J. M. Manahan, R. Rothenberger, and J. Bonaccio, «Infrared sensor array circuit breaker monitoring», *U.S Patent Appl. US10371576B2*, Aug. 6, 2019.

[44] M. Landry, F. Leonard, C. Landry, R. Beauchemin, O. Turcotte and F. Brikci, «An Improved Vibration Analysis Algorithm as a Diagnostic Tool for Detecting Mechanical Anomalies on Power Circuit Breakers» in *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 23, no. 4, 2008, pp. 1986-1994.

[45] J. V. Anjaneyulu, and G. K. Mohan Rao, «Analysis and Vibration Behavior of a Medium Voltage Spring Operated Switch Gear Mechanism used for Circuit Breaker» in *16th National Conference on Machines and Mechanisms (iNaCoMM2013)*, IIT Roorkee, India, 2013, pp. 972-979.

[46] О. Є. Рубаненко, С. В. Мисенко, та О. О. Рубаненко, «Вплив вібрації на подальшу роботу високовольтних вимикачів», *Вібрації в техніці та технологіях*, № 1 (69), с. 72-77, 2013.

[47] П. М. Сви, *Методы и средства диагностики оборудования высокого напряжения*. М.: Энергоатомиздат, 1992.

[48] А. И. Ящура, *Система технического обслуживания и ремонта общепромышленного оборудования: справочник*. М.: Энас, 2012.

[49] С. И. Чичев, В. Ф. Калинин, и Е. И. Глинкин, *Система контроля и управления электротехническим оборудованием подстанций*. М.: Спектр, 2011.

[50] Стабилизированный источник постоянного тока РИП-2. Руководство по эксплуатации, 2020. [Электронный ресурс]. Доступно: <http://www.elizpribor.ru/files/products/rip-2.pdf>. Дата обращения: Июн. 1, 2020.

[51] B10E AC/DC Voltage Power Supply, 2020. [Online]. Available: http://www.steoelectric.be/user/image/megger-b10e_ds_en_v03.pdf. Accessed on: June 1, 2020.

[52] A. Gadyuchko, and E. Kallenbach, «Magnetische Messung - Neue Wege der Funktionsprüfung bei der Herstellung von Magnetaktoren», in *Innovative Klein- und Mikroantriebstechnik*, Würzburg, 2010, pp. 59-64.

[53] M. Ruderman, and A. Gadyuchko, «Phenomenological Modeling and Measurement of Proportional Solenoid with Stroke-dependent Magnetic Hysteresis Characteristics», *IEEE International Conference on Mechatronics*, Takamatsu, 2013, pp. 180-185.

[54] Д. В. Шайхутдинов, С. Г. Январев, К. М. Широков, и Р. И. Леухин, «Метод технической диагностики межвитковых замыканий электромагнитных устройств на базе их вебер-амперных характеристик», *Современные наукоемкие технологии*, № 8, с. 69–71, 2014.

[55] Д. В. Шайхутдинов, С. Г. Январев, К. М. Широков, и Ш. В. Ахмедов, «Метод технической диагностики нарушений геометрических параметров магнитной системы электромагнитных устройств на базе их вебер-амперных характеристик», *Международный журнал экспериментального образования*, № 8, с. 84–86, 2014.

[56] К. М. Широков, «Алгоритм определения магнитных характеристик электротехнических изделий», *Известия вузов. Сев.-Кавк. регион. Техн. науки.*, № 1, с. 70-73, 2013.

[57] Е. В. Комаров и др., *Испытание магнитных материалов и систем*. М.: Энергоатомиздат, 1984.

[58] Н. И. Горбатенко, М. В. Ланкин, и Н. Д. Наракидзе, «Прибор для определения магнитных характеристик образцов и деталей из магнитомягких материалов», на *Металлургия. Машиностроение. Станкоинструмент – 2006*, Ростов-на-Дону, 2006, с. 77- 80.

[59] Н. И. Горбатенко, М. В. Ланкин, Д. В. Шайхутдинов, и К. М. Широков, «Устройство для измерения характеристик магнитомягких материалов», *МПК G01R33/12. № 20091121158/28*, Май 27, 2010.

[60] В. Г. Сергеев, и А. Я. Шихин, *Магнитоизмерительные приборы и установки*. М.: Энергоатомиздат, 1982.

[61] U. Glet, «Verfahren und Vorrichtung zum Ermitteln von magnetischen Kenngrößen», *Patent DE 102005011227A1*, Br. 11, 2005.

[62] J. Baumbach, E. Kallenbach, U. Kucera, and K. Neumann, «MagHyst®-modular — ein universelles Gerät zur Messung magnetischer Größen und Kennlinien an Materialien, Halbzeugen und Magnetaktoren», *Messeartikel für die Sensor+Test*, 2009.

[63] А. М. Ланкин, и М. В. Ланкин, «Метод измерения вебер-амперной характеристики электротехнических устройств», *Современные проблемы науки и образования*, № 1, с. 246-258, 2014.

[64] А. М. Ланкин, М. В. Ланкин, В. В. Гречихин, и Д. В. Шайхутдинов, «Определение гистерезисных магнитных характеристик методом решения обратной задачи гармонического баланса», *Фундаментальные исследования*, № 8 (часть 2), с. 303-306, 2015.

[65] А. М. Гречко, «Экспериментальное исследование влияния вихревых токов в сердечнике магнитопровода на динамические характеристики электромагнитного привода», *Вісник НТУ «ХПИ»*, № 49 (955), с. 9-17, 2012.

[66] Б. В. Клименко, и А. М. Гречко, «Электромагнитный привод с двухпозиционной магнитной защелкой для вакуумного выключателя среднего напряжения», *Електротехніка і Електромеханіка*, № 6, с. 40-43, 2007.

[67] Е. И. Байда, «Расчет динамики двухпозиционного электромагнита постоянного тока с магнитной защелкой», *Електротехніка і Електромеханіка*, № 4, с. 10-12, 2010.

[68] Е. И. Байда, «Динамика нечеткого срабатывания бистабильного электромагнитного актуатора на базе высококоэрцитивных постоянных магнитов», *Електротехніка і Електромеханіка*, № 5, с. 18-20, 2012.

[69] R. Alexandru, M. Mihai, V. N. Iosif, and C. Radu, «New solution of linear DC actuator with additional permanent magnets: Working principle, design and testing», *Revue Roumaine des Sciences Techniques – Serie Électrotechnique et Énergétique*, no. 62, pp. 3-7, 2017.

[70] Y. Yong-Min, K. Dae-Kyung, and K. Byung-Il, «Optimal Design of a Permanent Magnetic Actuator for Vacuum Circuit Breaker using FEM», *Journal of Electrical Engineering & Technology*, no. 1, pp. 92-97, 2006.

[71] W. A. Zhenxing, S. Liqiong, H. Sainan, G. Yingsan, and L. Zhiyuan, «Permanent Magnetic Actuator for 126 kV Vacuum Circuit Breakers», *IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS*, vol. 50, no. 3, pp. 129-135, 2014.

[72] А. В. Панов, В. І. Паньків, М. Ф. Сопель, Б. С. Стогній та Є. М. Танкевич, «Актуальні питання моніторингу і технічного обслуговування високовольтних вимикачів», *Технічна електродинаміка*, № 2, с. 75-85, 2018. doi: <https://doi.org/10.15407/techned.2018.02.075>

[73] А. В. Панов, В. І. Паньків, М. Ф. Сопель, Б. С. Стогній та Є. М. Танкевич, «Вдосконалення моніторингу технічного стану механічних елементів високовольтних вимикачів», *Праці ІЕД НАНУ*, Вип. 51, с. 99-109, 2018. doi: <https://doi.org/10.15407/publishing2018.51.099>

[74] Y. Fan, and H. Xiaoquang, «Research on the mechanical state parameter extraction method of high voltage circuit breakers», in *10th IEEE International Conference on Industrial Informatics*, Beijing, China, 2012, pp. 1062-1066.

[75] М.-Н. Kim, А. Smajkic, М. Kapetanovic, and М. Muratovic, «Influence of contact erosion on the state of SF₆ gas in interrupted chambers of HV SF₆ circuit breakers», in *2014 IEEE International Power Modulator and High Voltage Conference*, Santa Fe, New Mexico, 2014, pp. 466-469.

[76] I. Manea, C. Chiciu, F. Balasiu, and N. Tulici, «Complex method to diagnose the technical state of the medium and high voltage circuit breakers after short-circuit events», in *16th International conference and exhibition on electricity distribution*. Amsterdam, Netherlands, 2001, pp. 1-5.

[77] F. Mei, K. Zhu, J. Zheng, and M. Zhu, «Design of high voltage vacuum circuit breaker's on-line monitoring and fault diagnosis system», in *2016 IEEE Advanced Information Management, Communicates, Electronic and Automation Control Conference*, Xi'an, China, 2016, pp. 408-413.

[78] L. Wenhua, Y. Xiaoquang, L. Jun, Y. Man, and Z. Sheng, «Study on the comprehensive test technology of circuit breaker mechanical life and its accessories based on virtual instrument», in *26th International Conference on Electrical Contacts*, Beijing, China, 2012. pp. 465-470. doi: <http://doi.org/10.1049/cp.2012.0698>

[79] Е. И. Байда, «Мультифизическая модель расчета граничного тока сваривания контактов вакуумного выключателя», *Вісник НТУ «ХПИ»*, № 41, с. 3-9, 2014.

[80] А. А. Перцев, В. П. Белотелов, и Л. А. Рыльская, «Способ испытаний вакуумных выключателей на стойкость при сквозных токах короткого замыкания», *МПК G01R 31/327 (2006.01)*. № 2269140, Янв. 1, 2006.

[81] В. С. Деева, и С. М. Слободян, «Модель коагуляции контакта вакуумного выключателя», *Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ*, № 4, с. 39-42, 2013.

[82] О. А. Аношин, П. В. Петров, и С. И. Малаховский, «О возможности использования силы удержания привода как критерия оценки основных характеристик вакуумных выключателей», *Электрические сети и системы*, № 6, с. 10-12, 2005.

[83] X. Wang, M. Rong, Y. Wu, F. Yang, and S. Jia, «Analyses of mechanical characteristics of vacuum circuit breaker during the closing process

taking electrodynamic force into account», *IET Sci. Meas. Technol.*, no. 6. pp. 323-328, 2007.

[84] M. Rong, X. Wang, W. Yang, and S. Jia, «Theoretical and experimental analyses of the mechanical characteristics of a medium-voltage circuit breaker», *IEE Proc.-Sci. Meas. Technol.* vol. 152, no. 2, pp. 45–49, 2005.

[85] J. Kang, S. Choi, D. En, H. Kim, and H. Jung, «Development and Analysis of New Type of Switchgear for High Voltage Gas Circuit Breaker», in *Proceedings of the 6th WSEAS/IASME Int. Conf. on Electric Power Systems, High Voltages, Electric Machines*, Tenerife, Spain, 2006, pp. 80-84.

[86] X. Zhan, X. Liu, L. Li, G. Zhu, and P. Li, «Experimental research on arc characteristics for a 40.5-kV vacuum circuit breaker», in *The 14th IET International Conference on AC and DC Power Transmission (ACDC 2018)*. J., Eng., 2018, pp. 2777-2780.

[87] A. Soloot, A. Gholami, and K. Niayesh, «Study on Post Arc Current and Transient Recovery Voltage in Vacuum Circuit Breaker», *International Review of Modeling and Simulation*, vol. 4, no. 2, pp. 1-11, 2011.

[88] Г. М. Михеев, *Цифровая диагностика высоковольтного оборудования*. М.: Изд. дом «ДОДЭКА-XX1», 2008.

[89] Ю. А. Федоров, Г. М. Михеев, и В. М. Шевцов, «Способ контроля характеристик высоковольтных выключателей и устройство для его осуществления», *МПК G01R 31/327 (2006.01)*. № 2330302, Июнь 27, 2008.

[90] Б. С. Стогній, М. Ф. Сопель, Л. Д. Третьякова, Є. М. Танкевич, А. В. Панов, та В. І. Паньків, «Визначення комутаційного ресурсу високовольтних вимикачів», *Технічна електродинаміка*, № 1, с. 71-80, 2017.

[91] И. С. Минкина, и А. А. Романов, «Алгоритм оценки остаточного ресурса выключателя», *Электрические станции*, № 12, с. 58-62, 2004.

[92] М. Ф. Сопель, В. Л. Тутик, А. В. Панов, та Ю.В. Пилипенко, «До визначення залишкового ресурсу елегазових високовольтних вимикачів 750 кВ», *Праці інституту електродинаміки Національної академії наук України. Збірник наукових праць*, №1(16), с.136-139, 2007.

[93] В. В. Грабко, та Б. І. Мокін, *Моделі та системи технічної діагностики високовольтних вимикачів*. Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 1999.

[94] В. В. Грабко, «До питання побудови ресурсних характеристик повітряних високовольтних вимикачів», *Вісник ВПИ*, № 4, с. 61-65, 2001.

[95] В. В. Грабко, «Синтез структури інформаційно-вимірювальної системи для діагностики групи високовольтних вимикачів», *Наукові вісті Національного технічного університету «Київський політехнічний інститут»*, № 3, с. 22-28, 2001.

[96] В. В. Грабко, В. В. Грабко, А. Л. Поліщук, та І. А. Співак «Пристрій для контролю ресурсу комутаційних апаратів», *МПК G 07 C 3 / 10. № 104059*, Січ. 1, 2016.

[97] В. В. Грабко, В. В. Грабко, А. Л. Поліщук, та І. А. Співак, «Пристрій для контролю ресурсу повітряних високовольтних вимикачів», *МПК G 07 C 3 / 10. № 104057*, Січ. 1, 2016.

[98] В. В. Грабко, В. В. Грабко, А. Л. Поліщук, та І. А. Співак, «Пристрій для контролю ресурсу групи повітряних високовольтних вимикачів», *МПК G 07 C 3 / 10. № 104055*, Січ. 1, 2016.

[99] L. Muyl, H. Jian, and H. Xiaoguang, «Insulative condition monitoring of high voltage circuit breaker», in *2010 the 5th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications*, Taichung, Taiwan, 2010, pp. 94-98.

[100] A. A. Razi-Kazemi, M. Vakilian, K. Niayesh, and M. Lehtonen, «Data mining of online diagnosed waveforms for probcondition assessment of SF6 circuit», *IEEE Transaction on power delivery*, vol. 30, no. 3, pp. 1354-1362, 2015.

[101] M. S. Silva, J. A. Jardini, and L.C.Margrini, «On-line condition monitoring system for in-service circuit breaker», in *Cired 18th International conference on electricity distribution*, Turin, 2005, pp. 1-7.

[102] X. Jin, Z. LiuJun, H. Xiaoquang, L. Liang, and Z. Lei, «Development of on-line monitoring system for SF6 circuit breaker», in *2011 6th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications*, Beijing, China, 2011, pp. 537-541.

[103] T. Suwanasri, S. Wattanawongpitak, T. Homkeanchan, and C. Suwanasri «Failure statistics and inventory management or high voltage circuit breaker using statistical distribution techniques», in *2012 IEEE International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis*, Bali, Indonesia, 2012, pp. 513-516.

[104] Е. В. Комаров, А. Д. Покровский, В. Г. Сергеев, и А. Я. Шихин, *Испытание магнитных материалов и систем* М.: Энергоатомиздат, 1984.

[105] А. Г. Сливинская, *Электромагниты и постоянные магниты*. М.: Энергия, 1972.

[106] В. В. Кухарчук, В. Ю. Кучерук, Є. Т. Володарський, та В. В. Грабко, *Основи метрології та електричних вимірювань: підручник*. Вінниця : ВНТУ, 2012.

[107] В. В. Грабко, та О. В. Дідушок, «Метод діагностування електромагнітного привода вакуумного вимикача на основі вебер-амперних характеристик», *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, № 6, с. 53 – 61, 2018. doi: <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2018-141-6-53-61>

[108] Г. Н. Александров, Г. С. Борисов, и Г. С. Каплан, *Теория электрических аппаратов: Учебник для вузов*. СПб.: Издательство СПб ГТУ, 2000.

[109] А. А. Перцев, и Л. А. Рыльская, *Вакуумные дугогасительные камеры. Сборник статей сотрудников ВЭИ*. Рязань: издательство «Рязанский дом», 2008.

[110] М. А. Любчик, *Силовые электромагниты аппаратов и устройств автоматики постоянного тока (Расчёт и элементы проектирования)*. М.: Энергия, 1968.

[111] А. А. Чунихин, *Электрические аппараты*. М.: Энергоатомиздат, 1988.

[112] В. В. Грабко, О. В. Дідушок, «Математична модель виявлення зносу контактної системи при комутації вакуумного вимикача», *Вісник Національного технічного університету «ХПИ»*. Сер. : *Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика*, № 4 (1358), с. 12 – 19, 2020. doi: 10.20998/2079-8024.2020.4.01

[113] А. А. Базавлук, А. Р. Бакиров, и Д. А. Шкитов, «Исследование перенапряжений при коммутациях вакуумных выключателей», *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*, № S4, с. 265-279, 2011.

[114] Высоковольтный союз РЗВА, *Выключатели вакуумные серии ВР Техническая информация НК АИ.670049.011*. Ровно, Украина: Высоковольтный союз РЗВА, 2013.

[115] 32-bit Atmel AVR Microcontroller, 2020. [Online]. Available: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/doc32099.pdf>. Accessed on: June 1, 2020.

[116] О. В. Дідушок, «Мікропроцесорний пристрій для діагностування електромагнітного привода вакуумного вимикача», *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, № 6, с. 31 – 36, 2019. doi: <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2019-147-6-31-36>

[117] В. В. Грабко, В. В. Грабко, та О. В. Дідушок, «Пристрій для діагностування електричного привода високовольтного вимикача», *МПК G07C 3/10 (2006.01). № 137512*, Жов. 25, 2019.

[118] Сравнительный анализ применения ПЛИС и микропроцессоров при разработке информационно-управляющих систем, важных для безопасности АЭС, Научно-технический отчет. НАУ им. Н. Е. Жуковского ХАИ, НТСКБ Полисвит, ИПМЭ им. Г. Е. Пухова НАН Украины, ИПММС НАН Украины, 2005.

[119] І. А. Клименко, «Класифікація та архітектурні особливості програмованих мультипроцесорних систем-на-кристалі», *Проблеми інформатизації та управління*, № 1, с. 55-72, 2012.

[120] Altera Corporation MAXII EMP570T100C5, 2020. [Online]. Available: <http://datasheet.buhieen.net/EPM570T100C5N.pdf>. Accessed on: June 1, 2020.

[121] CC3200 SimpleLink Wi-Fi Wireless MCU Technical Reference Manual (Rev. D), 2020. [Online]. Available: http://www.ti.com/lit/ug/swru367d/swru367d.pdf?ts=1591632539362&ref_url=https://www.google.com/. Accessed on: June 1, 2020.

[122] Б. Я. Советов, В. В. Цехановский, и В. Д. Чертовской, *Интеллектуальные системы и технологии: учебник*. М.: Академия, 2013.

[123] О. Б. Буль, *Методы расчета магнитных систем электрических аппаратов. Магнитные цепи, поля и программа FEMM*. М.: Академия, 2005.

[124] M. Augustyniak, and Z. Usarek, «Finite Element Method Applied in Electromagnetic NDTE: A Review», *Journal of Nondestructive Evaluation*, no. 35, 2016 doi: <https://doi.org/10.1007/s10921-016-0356-6>

[125] Meeker D. Finite Element Method Magnetics. Version 4.2. User's Manual [Online]. Available: <http://www.femm.info/wiki/Documentation/>.

[126] Е. И. Байда, *Расчет электромагнитных и тепловых полей с помощью программы FEMM: Учебно-методическое пособие*. Х.: НТУ «ХПИ», 2015.

[127] В. В. Грабко, О. В. Дідушок, «Дослідження роботи електромагнітного привода вакуумного вимикача як об'єкта діагностування», *Вісник Національного технічного університету «ХПИ». Сер. : Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика*, № 9 (1334), с. 57 – 62, 2019. doi: 10.20998/2079-8024.2019.9.11

[128] В. П. Дьяконов, *MATLAB. Полный самоучитель*. М.: ДМК Пресс, 2012.

[129] В. И. Раховский, *Физические основы коммутации электрического тока в вакууме*. М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1970.

[130] J. Budzisz, «The model of a vacuum circuit breaker for switching on capacitor bank», *Przegląd Elektrotechniczny*, no. 2, pp. 140–145, 2019. doi: 10.15199/48.2019.02.31

[131] N. Mahajan, K. Patil, and S. Shembekar, «Electric Arc model for High Voltage Circuit Breakers Based on MATLAB/SIMULINK», *INTERNATIONAL JOURNAL OF SCIENCE, SPIRITUALITY, BUSINESS AND TECHNOLOGY (IJSSBT)*, vol. 1, no. 2, pp. 15-21, 2013.

[132] S. Pasumpon, R. Saravanan, A. Maruthu, A. Saravanan, and M. Muneeswaran, «Evaluation of High-Voltage Circuit Breaker Performance with Modified Schavemaker Arc Model», *International Journal of Digital Communication and Networks (IJDCN)*. vol. 3, no. 2, pp. 18-23, 2014.

[133] N. Markovic, S. Bjelic, J. Zivanic, and U. Jaksic, «Numerical simulation and analytical model of electrical arc impedance in the transient processes», *Przegląd Elektrotechniczny*, vol. 89, no. 2a, pp. 113–117, 2013.

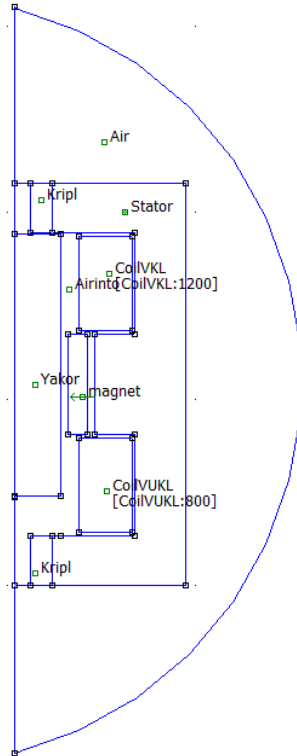
[134] Г. Н. Александров, Г. С. Борисов, Г. С. Каплан, *Теория электрических аппаратов: Учебник для вузов*. СПб.: Издательство СПб ГТУ, 2000.

[135] В. В. Грабко, О. В. Дідушок, «Комп'ютерна модель виявлення зносу контактної системи вакуумного вимикача», *Електромеханічні і енергозберігаючі системи*, Випуск 1 (49), с. 38 – 44, 2020. doi: 10.30929/2072-2052.2020.1.49.38-44.

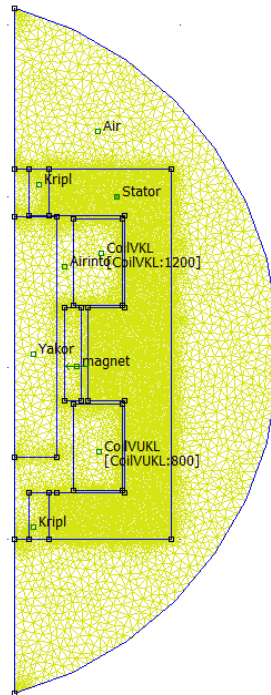
[136] О. Дідушок, «Математична модель діагностування технічного стану контактної системи вакуумного вимикача», на 5-ій Міжнародній науковій конференції «Вимірювання, контроль та діагностика в технічних системах», Вінниця, 2019, с. 90.

Додаток

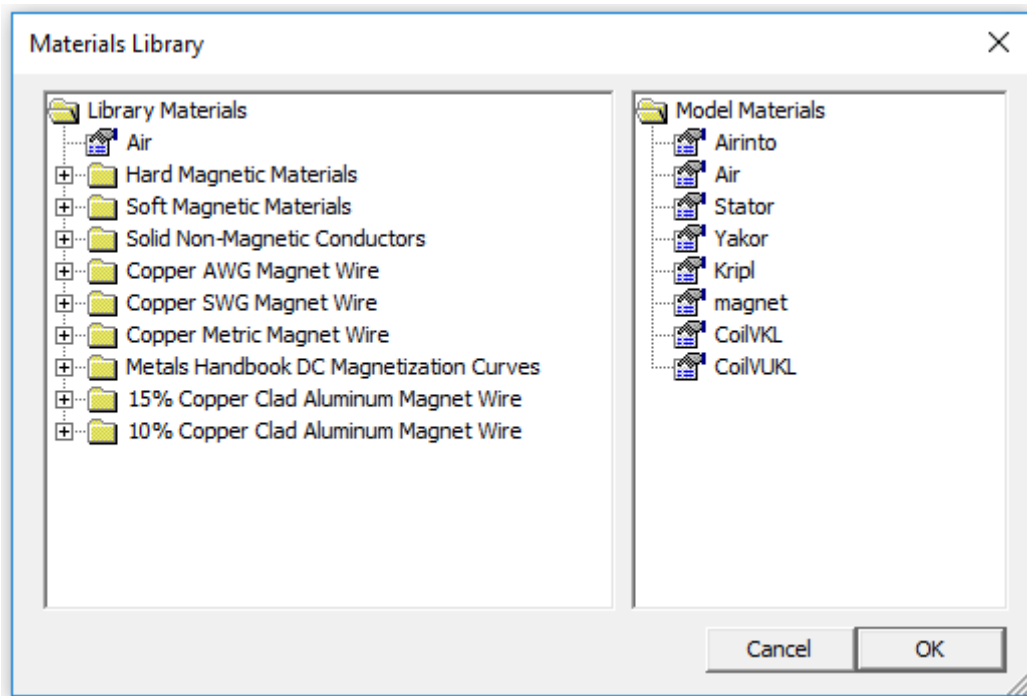
Комп'ютерне моделювання електромагнітного привода Е-10 вакуумного вимикача ВР0-10-12,5/630 У2 у програмі FEMM



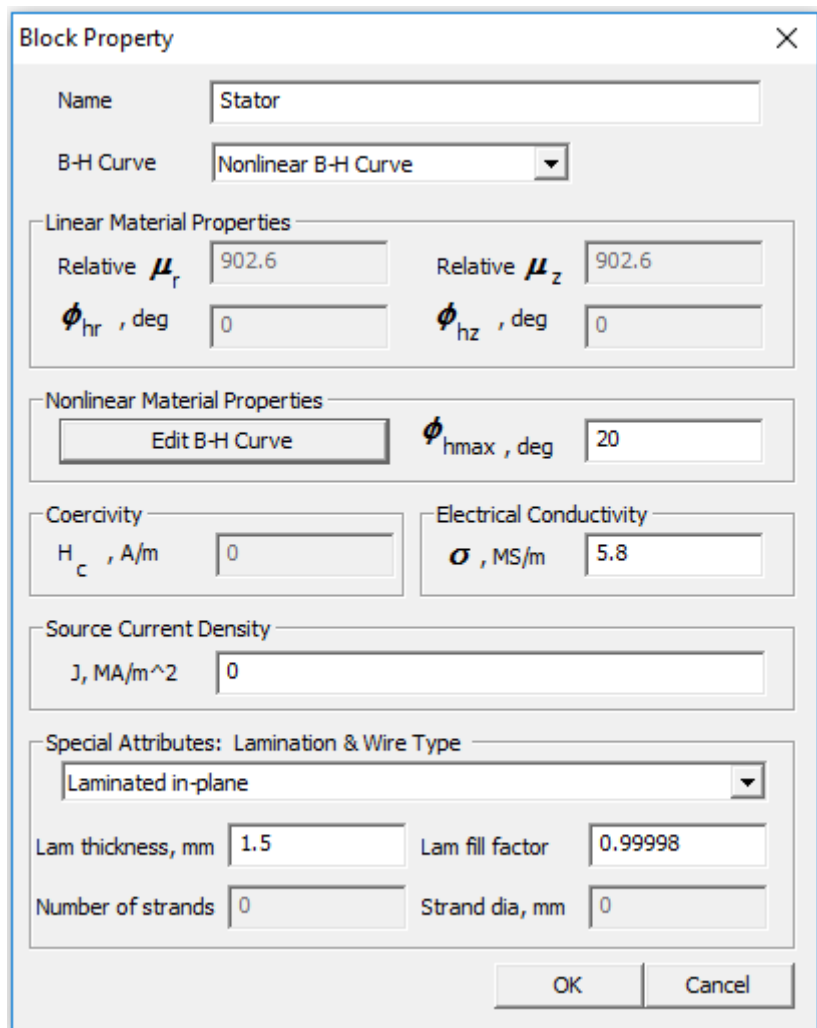
Модель електромагнітного привода із заданими властивостями блоків



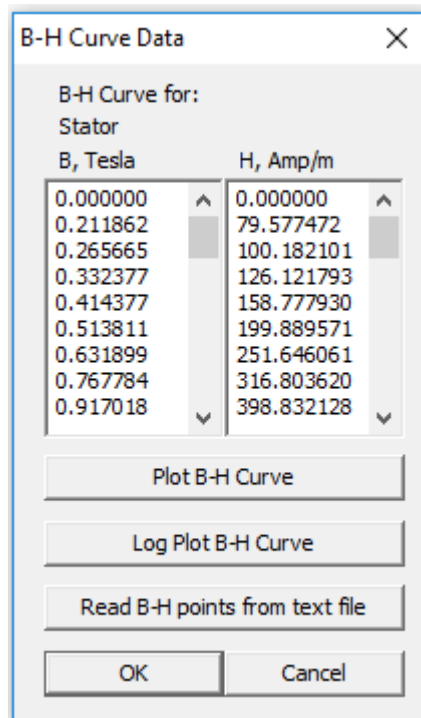
Модель електромагнітного привода в кінцево-елементній сітці



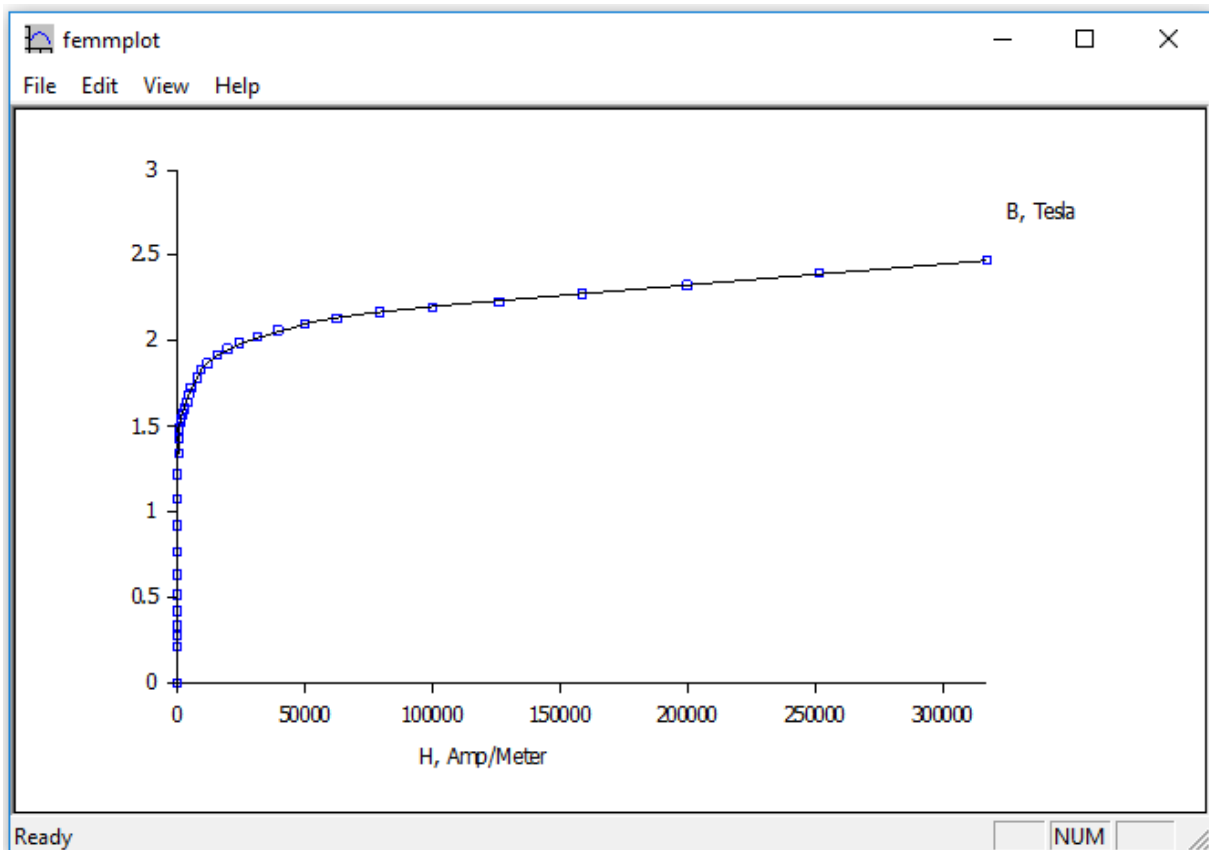
Бібліотека використаних блоків моделі



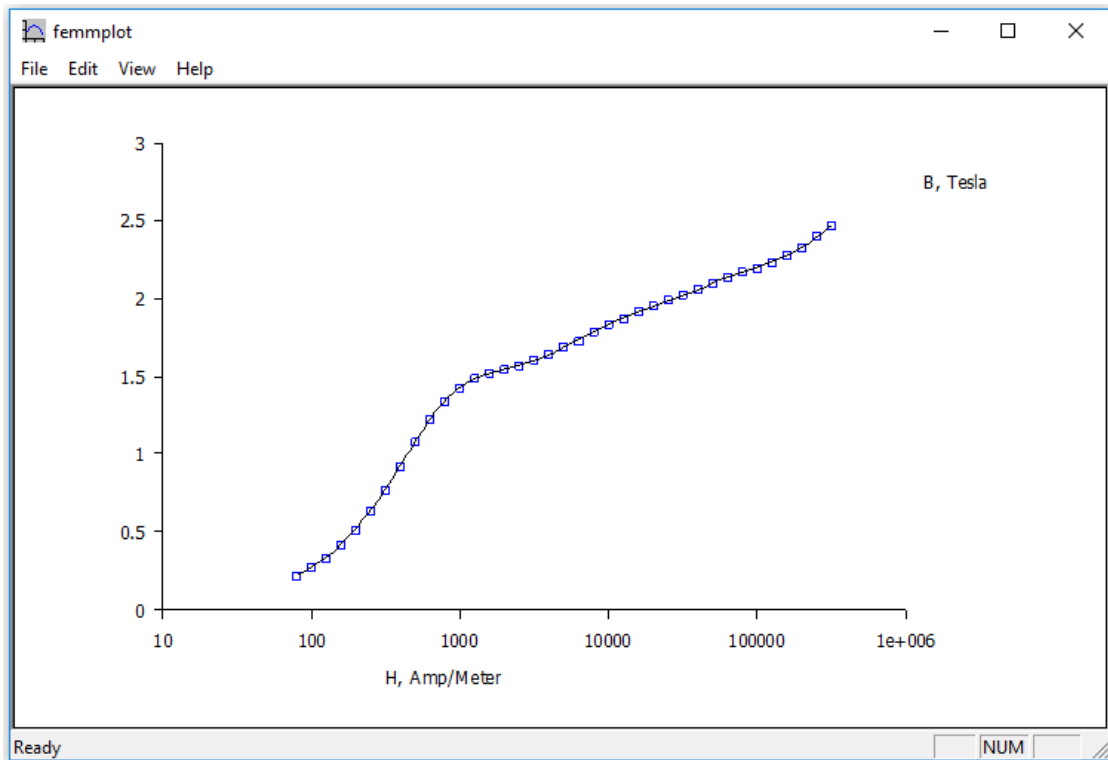
Блок властивостей моделі Stator



Координати точок кривої намагнічування для блоку Stator



Графік кривої намагнічування для блоку Stator



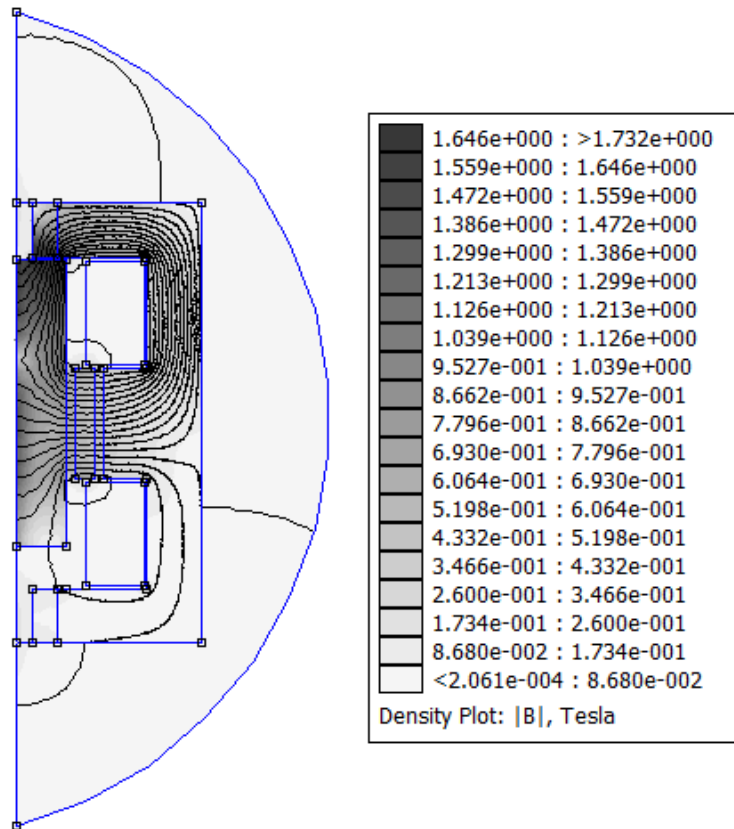
Логарифмічний графік кривої намагнічування для блоку Stator

The 'Block Property' dialog box for a magnet model contains the following settings:

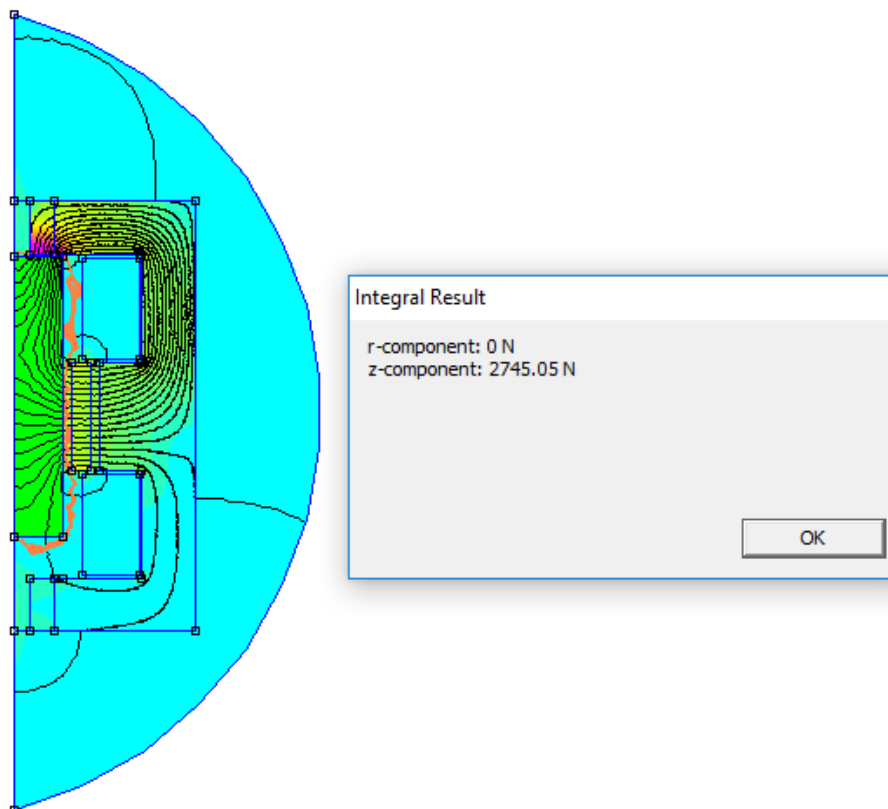
- Name: magnet
- B-H Curve: Linear B-H Relationship
- Linear Material Properties:
 - Relative μ_r : 1.05
 - Relative μ_z : 1.05
 - ϕ_{hr} , deg: 0
 - ϕ_{hz} , deg: 0
- Nonlinear Material Properties:
 - Edit B-H Curve: [button]
 - ϕ_{hmax} , deg: 0
- Coercivity:
 - H_c , A/m: 860000
- Electrical Conductivity:
 - σ , MS/m: 0
- Source Current Density:
 - J , MA/m²: 0
- Special Attributes: Lamination & Wire Type:
 - Not laminated or stranded
 - Lam thickness, mm: 0
 - Lam fill factor: 1
 - Number of strands: 0
 - Strand dia, mm: 0

Buttons: OK, Cancel

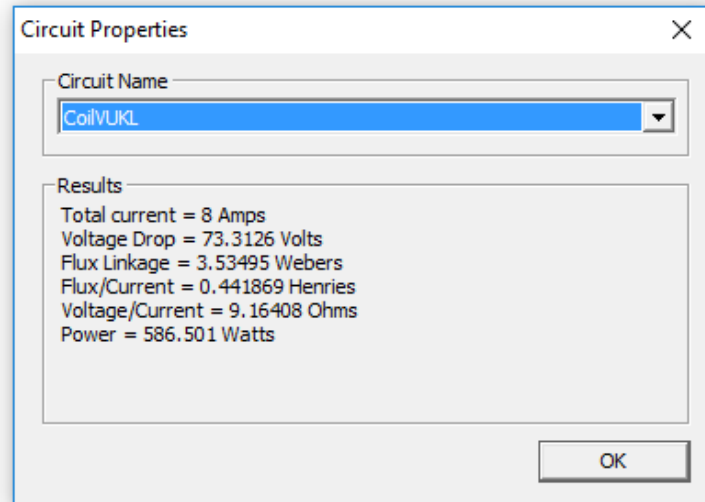
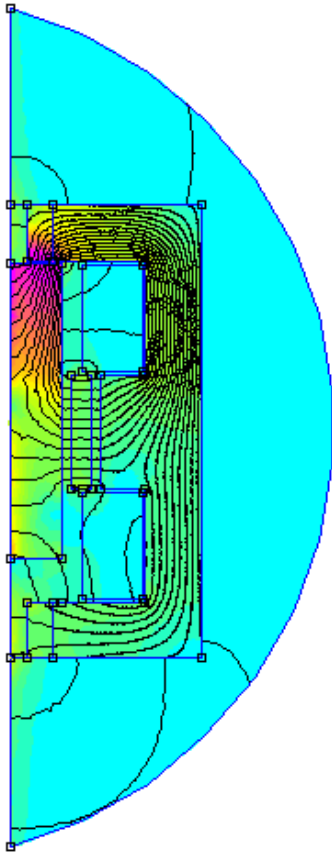
Блок властивостей моделі magnet



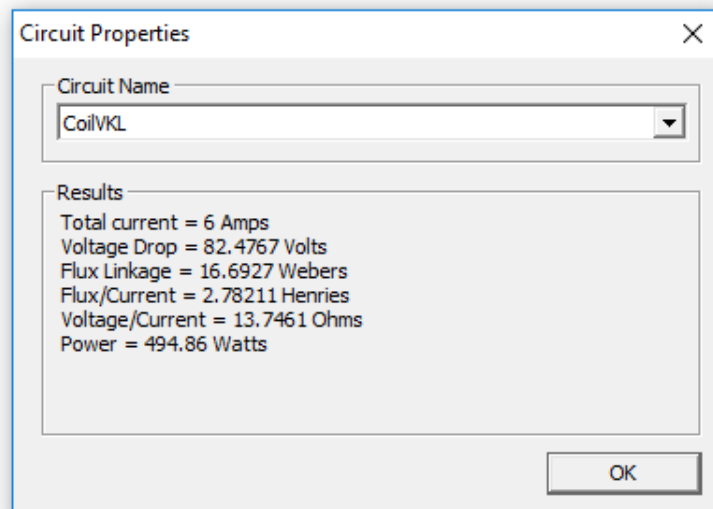
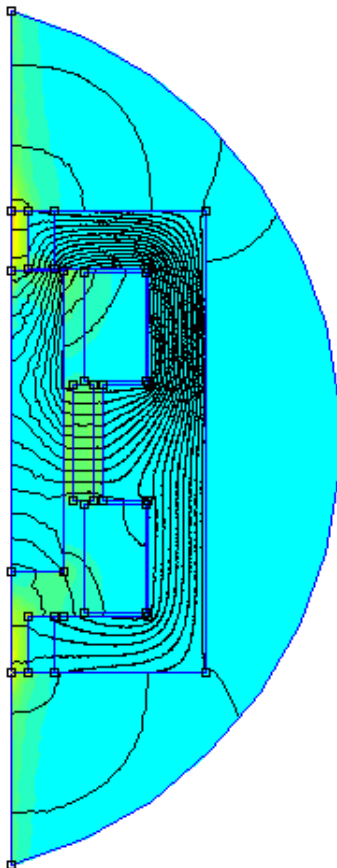
Картина поля ліній потоку електромагнітного привода



Розрахунок сили утримання привода методом інтеграла тензора Максвелла



Розрахунок параметрів електричного кола для блоку CoilVUKL



Розрахунок параметрів електричного кола для блоку CoilVKL

*Наукове електронне видання
комбінованого використання.
Можна використовувати в локальному та мережному режимах*

**Грабко Володимир Віталійович
Дідушок Олег Васильович**

МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ ДІАГНОСТУВАННЯ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ВАКУУМНИХ ВИМИКАЧІВ

Монографія

Видається в авторській редакції

Оригінал-макет підготовлено авторами

Підписано до видання 20.04.2022 р.
Зам № P2022-08.
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи серія
Видавець та виготовлювач
Вінницький національний технічний університет,
редакційно-видавничий відділ.
Хмельницьке шосе, 95, ВНТУ, ГНК, к. 114,
м. Вінниця, 21021, тел.: (0432) 59-85-32, 59-81-59.
press.vntu.edu.ua; *email*: irvc.vntu@gmail.com.
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
серія ДК № 3516 від 01.07.2009 р.