

УДК 621.313.2

ДО ФОРМУВАННЯ НАВАНТАЖУВАЛЬНИХ РЕЖИМІВ В КОМПЛЕКСАХ ВИПРОБУВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

А. І. Ломонос

Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського
вул. Першотравнева, 20, м. Кременчук, 39600, Україна. E-mail: ai_lomonos@ukr.net

У статті розглянуто питання аналізу розроблених підходів до формування навантажувальних режимів в комплексах випробування машин постійного струму. Проаналізовано особливості побудови трирівневої системи керування процесом випробування машин постійного струму. Розглянуто існуючі підходи до побудови випробувальних комплексів електричних машин після ремонту та особливості їх роботи. Запропоновано алгоритм автоматизованого формування навантажувальних режимів. Розкрито питання застосування елементів інтелектуальних технологій для вирішення задачі визначення параметрів керування силовими напівпровідниковими перетворювачами енергії в системах випробування. Наведено графічний інтерфейс нечіткої системи керування навантажувальними режимами випробувального комплексу. Розглянуто блок-схему моделі системи керування взаємним навантаженням машин постійного струму.

Ключові слова: випробувальний комплекс, машина постійного струму, напівпровідниковий перетворювач енергії, параметри керування, навантажувальний режим, нечіткий контролер, гідридна мережа.

К ФОРМИРОВАНИЮ НАГРУЗОЧНЫХ РЕЖИМОВ В КОМПЛЕКСАХ ИСПЫТАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН ПОСТОЯННОГО ТОКА

А. И. Ломонос

Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского
ул. Первомайская, 20, г. Кременчуг, 39600, Украина. E-mail: ai_lomonos@ukr.net

В статье рассмотрен вопрос анализа разработанных подходов к формированию нагрузочных режимов в комплексах испытания машин постоянного тока. Проанализированы особенности построения трехуровневой системы управления процессом испытания машин постоянного тока. Рассмотрены существующие подходы к построению испытательных комплексов электрических машин после ремонта и особенности их работы. Предложен алгоритм автоматизированного формирования нагрузочных режимов. Раскрыты вопросы применения элементов интеллектуальных технологий для решения задачи определения параметров управления силовыми полупроводниковыми преобразователями энергии в системах испытания. Приведен графический интерфейс нечеткой системы управления нагрузочными режимами испытательного комплекса. Рассмотрена блок-схема модели системы управления взаимным нагружением машин постоянного тока.

Ключевые слова: испытательный комплекс, машина постоянного тока, полупроводниковый преобразователь энергии, параметры управления, нагрузочный режим, нечеткий контроллер, гибридная сеть.

АКТУАЛЬНІСТЬ РОБОТИ. Незважаючи на вдо-сконалювання технологій виготовлення конструкційних матеріалів і технологій ремонту, показники надійності електроустаткування, як відмічено в [1], є приблизно такими: із загальної кількості ушкоджених електродвигунів близько 78 % ремонтується й 22 % замінюється резервними.

Відповідальність за аварії лягає на недостатнє профілактичне обслуговування (17 %), неправильне застосування (9 %), завод-виготовлювач (15 %), відсутність профілактичного обслуговування (2 %).

Це обумовлено тим, що з кожним роком парк електричних машин (ЕМ) і електромеханічного устаткування фізично все більше застаріває, оскільки не відбувається його оновлення, що видно з наведених статистичних даних [1].

Зазвичай підприємства прагнуть створювати ремонтні цехи, що призводить до зниження надійності електроустаткування через недостатню кваліфікацію ремонтного персоналу, відсутність випробувального й діагностичного устаткування, порушення технології ремонту.

Така ситуація призводить до зниження загальної надійності всіх вузлів і елементів електричної машини – магнітної системи, обмоток статора й ротора, підшипників, колектора або контактних кілець і щіткового пристрою. Вихід з ладу кожної із цих час-

тин призводить до відмови у роботі машини. Слід зазначити, що відмові звичайно передують внутрішня зміна в машині, а саме: зростання втрат, температури нагрівання, споживаної потужності й т. ін.

Достатній обсяг інформації про якість ремонту електричної машини може бути отриманий у ході випробувань, у результаті яких визначаються параметри машини й відповідність їх нормам, механічні властивості, стійкість до механічних і струмових навантажень. При масовому ремонті електричних машин їх випробування в повному обсязі вимагають досконалості іспитового устаткування, високої його продуктивності й простоти обслуговування.

Іспитова станція повинна бути обов'язковим елементом будь-якого електроремонтного цеху. До неї надходять електричні машини для ремонту й виявлення несправностей. Випробування включають вимірювання опору ізоляції обмоток, електричної міцності ізоляції, визначення опору обмоток, перевірку цілісності підшипників у режимі неробочого ходу, осьового вибігу ротора, правильності прилягання щіток до колектора, вимірювання вібрації, повітряного зазору, щільності посадки підшипникових вузлів [1, 2].

На сьогодні широко поширені спеціалізовані комплекси для випробування ЕМ, однак при широкому спектрі продукції, яка ремонтується, необхід-

ний складний парк іспитового устаткування, що реалізувати в умовах сучасних електроремонтних цехів підприємств практично неможливо. Відсутнє й універсальне устаткування, придатне для випробування машин як великої, так і малої потужності. Відповідно до виду випробувань ЕМ повинно підбиратися устаткування випробувальних комплексів, оснащення вимірювальними засобами й засобами контролю після ремонту.

Мета роботи – підвищення ефективності випробувань машин постійного струму шляхом автоматизації формування їх навантажувальних режимів.

МАТЕРІАЛ І РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ. Традиційні схемні рішення, за якими проводяться випробування машин під навантаженням, передбачають наявність механічно з'єднаних електромашинних агрегатів, що дозволяє реалізувати режим статичного навантаження, який не враховує реальних динамічних експлуатаційних режимів. Також відсутня можливість перевірки двигунів постійного струму за комутаційним фактором. Тому очевидно є необхідність застосування комплексів для випробування, які забезпечують навантаження електричних машин у динамічних режимах, виключаючи механічне агрегування [3–5].

У комплексах для випробування, що забезпечують випробування машин постійного струму (МПС) без механічного агрегування з іншими пристроями, не вимагаючи додаткового технологічного оснащення, застосовують системи динамічного навантаження (СДН). Навантаження здійснюється за рахунок формування знакозмінного електромагнітного моменту, що забезпечує необхідне струмове навантаження з підтримкою необхідної частоти обертання [4, 5].

Особливістю СДН є циркуляція потужності між двигуном і промисловою мережею, що може у відповідних умовах призводити до завищення встановленої потужності силового устаткування і перетворювачів енергії, зниження енергетичних показників мережі й порушення електромагнітної сумісності з іншими споживачами. Крім того, актуальним є завдання стабілізації навантаження і питання еквівалентності звичайних режимів роботи електричної машини та режиму динамічного навантаження [4, 5].

У схемі комплексу для одночасного навантаження декількох електричних машин формують навантажувальний режим, за яким між ними замикаються змінні складові якірних струмів. При цьому від силового перетворювача енергії споживається тільки постійна складова струму, що призводить до зниження його потужності, додатково створюючи умови для використання нереверсивного агрегату [4, 5].

Тому актуальною науково-практичною задачею є реалізація енергозберігаючих режимів випробування електричних машин, мінімізація впливу на мережу живлення, зниження питомих витрат та потужності електромеханічного іспитового обладнання в системі взаємного навантаження (СВН) машин постійного струму без механічного з'єднання валів, а також пошук нових режимів функціонування комплексу для випробування.

У роботі [6] запропоновано структурну схему трирівневої системи керування процесом випробування машин постійного струму. Виходячи із аналізу нормативних документів щодо загальних методів та загальних технічних умов випробувань, складений алгоритм проведення випробувань, реалізований у програмі верхнього рівня на ЕОМ оператора.

До верхнього рівня керування відносять автоматизоване робоче місце оператора із пультом керування персональним комп'ютером, який виконує інтерфейсні та контрольні функції.

На середньому рівні ієрархії розглянуто систему керування реального часу на базі промислового контролера (ПЛК) з функціональними модулями розширення. ПЛК реалізує основні функції керування та регулювання у реальному часі, вимірювання технологічних параметрів і захист обладнання від аварійних режимів роботи.

На нижньому рівні ієрархії розміщено локальні системи керування у складі силових напівпровідникових перетворювачів енергії, вимірювальних сенсорів, комутаційної апаратури, контрольних реле.

Особливістю побудови такого комплексу є можливість проведення навантажувальних випробувань МПС, реверсування та випробування за підвищеної частоти обертання, визначення параметрів заступної схеми машин із номінальною напругою до 800 В, номінальним струмом до 1370 А без зміни його апаратної частини [6].

У той же час актуальним є питання визначення параметрів керування силовими напівпровідниковими перетворювачами енергії [7].

Проведений у [7] аналіз показав ряд підходів щодо визначення параметрів керування силовими напівпровідниковими перетворювачами енергії:

- математичний розрахунок амплітудних значень постійних і змінних складових та частоти навантаження;
- визначення коефіцієнтів заповнення імпульсів керування перетворювачами у колах обмоток збудження випробуваної машини (М2) та компенсатора (М1), кута зсуву імпульсу керування перетворювачем у колі обмотки збудження компенсатора з використанням методу планування експерименту;
- застосування блок-схеми моделі системи керування взаємним навантаженням МПС з реалізацією режимів навантаження та компенсації.

Для вирішення задач побудови систем керування електромеханічним обладнанням та визначення параметрів керування силовими напівпровідниковими перетворювачами енергії у роботах [8–11] запропоновано застосування елементів інтелектуальних технологій (нечітка логіка та нейронні мережі).

Виходячи із результатів, одержаних у роботах [6, 7], запропоновано алгоритм автоматизованого формування енергозберігаючих навантажувальних режимів під час випробування електричних машин (рис. 1).

Для реалізації етапів 1–6 алгоритму (рис. 1) у пакеті Matlab розроблено графічний інтерфейс нечіткої системи керування навантажувальними режимами комплексу для випробування МПС (рис. 2).

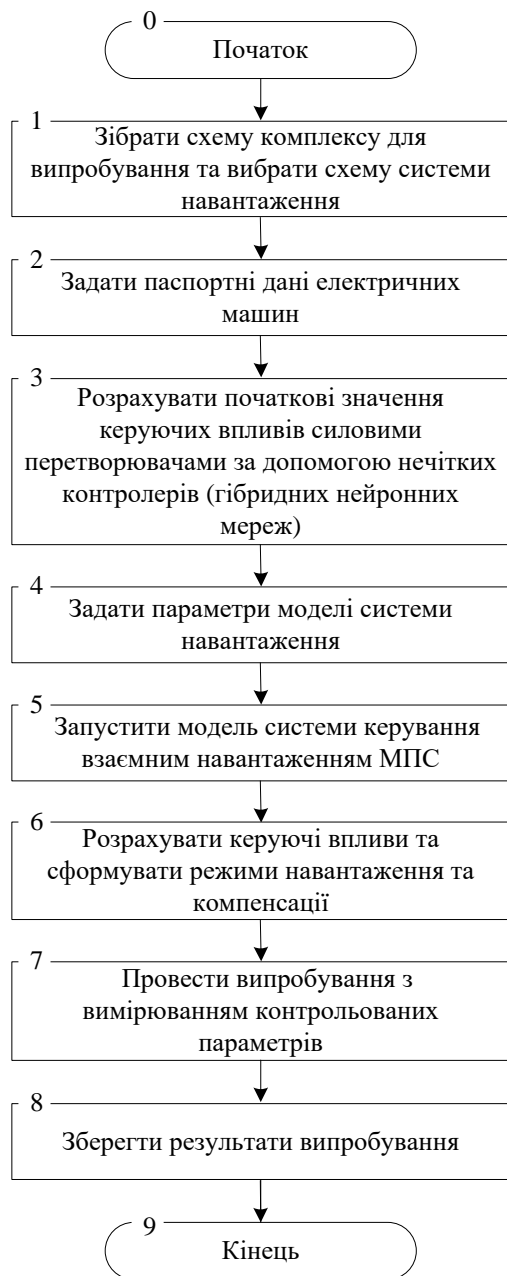


Рисунок 1 – Алгоритм автоматизованого формування навантажувальних режимів

Робота з графічним інтерфейсом користувача (рис. 2) відбувається відповідно до розробленої UML-діаграми станів (рис. 3).

На першому етапі необхідно вибрати схему системи навантаження у складі випробувального комплексу (блок 3, рис. 2): із впливом на якірне коло, на коло обмотки збудження або із комбінованим впливом [5, 7].

Після введення паспортних даних випробуваних електричних машин необхідно розрахувати початкові значення керуючих впливів силовими напівпровідниковими перетворювачами енергії. Для автоматизації даної задачі можливе використання систем нечіткої логіки та гібридних нейронних мереж [8, 9, 12, 13].

Графічний інтерфейс містить нечітку систему (НСК) з розробленими нечіткими контролерами (НК), призначенням яких є розрахунок амплітудних

значень гармонічних складових напруги керування для досліджуваної електричної машини та способу реалізації навантажувального режиму [7].

Нечіткі контролери побудовано відповідно до розробленої UML-діаграми станів у програмі Matlab з використанням пакету нечіткої логіки Fuzzy Logic Toolbox за алгоритмом Сугено [8, 13].

Нечіткий контролер виконує наближений розрахунок параметрів. Занесення введених параметрів МПС та завантаження нечіткого контролеру до робочої області Matlab відбувається автоматично з відкриттям математичної моделі розрахунку параметрів керування (блок 1, рис. 2).

При натисканні кнопки «Розрахунок» (рис. 2) користувачеві відкривається та запускається на розрахунок математична модель на основі обраного НК. Результатом розрахунку є одержання початкових значень гармонічних складових параметрів керування силовими перетворювачами.

Альтернативним методом розрахунку параметрів керування є використання нейронних мереж [8, 13]. Гібридні нейронні мережі (ГНМ) являють собою об'єднання декількох нейронних мереж для вирішення певних завдань. Це дозволяє виконати декомпозицію складної задачі на більш прості підзадачі, а архітектура нейронної мережі може бути оптимізованою під конкретну задачу.

Побудову гібридної нейронної мережі виконують відповідно до UML-діаграми станів у програмі Matlab з використанням пакету Fuzzy Logic Toolbox [8, 13].

Для вирішення поставленого завдання розглянуто використання трьох гібридних нейронних мереж, призначенням яких є розрахунок амплітудних значень гармонічних складових напруги керування напівпровідниковим перетворювачем для конкретного електричного двигуна та способу реалізації навантажувального режиму [7].

Формування навчальної вибірки, необхідної для побудови гібридної нейронної мережі, відбувається аналогічно як і для НК. Для кожного параметру керування створюється окрема гібридна нейронна мережа. Вибірку поділяють на три файли, в кожному з яких вхідними параметрами для системи є: номінальна потужність двигуна, струм якірного кола та частота навантаження, а виходом – один з параметрів керування.

Потім вводять до системи параметри електричних машин M1, M2 (блок 2, рис. 2), які використовуються під час розрахунку математичної моделі системи взаємного навантаження. Користувач може, за необхідності, обрати необхідний функціонал якості та задати параметри регуляторів математичної моделі.

Занесення параметрів електричних машин та розрахованих початкових значень параметрів керування відбувається автоматично з відкриттям математичної моделі формування режиму навантаження та компенсації.

Після натискання кнопки «Запуск моделі СВН» (блок 4, рис. 2) завантажувється математична модель, в результаті розрахунку якої формуються навантажувальний режим та режим компенсації.



Рисунок 2 – Графічний інтерфейс системи керування

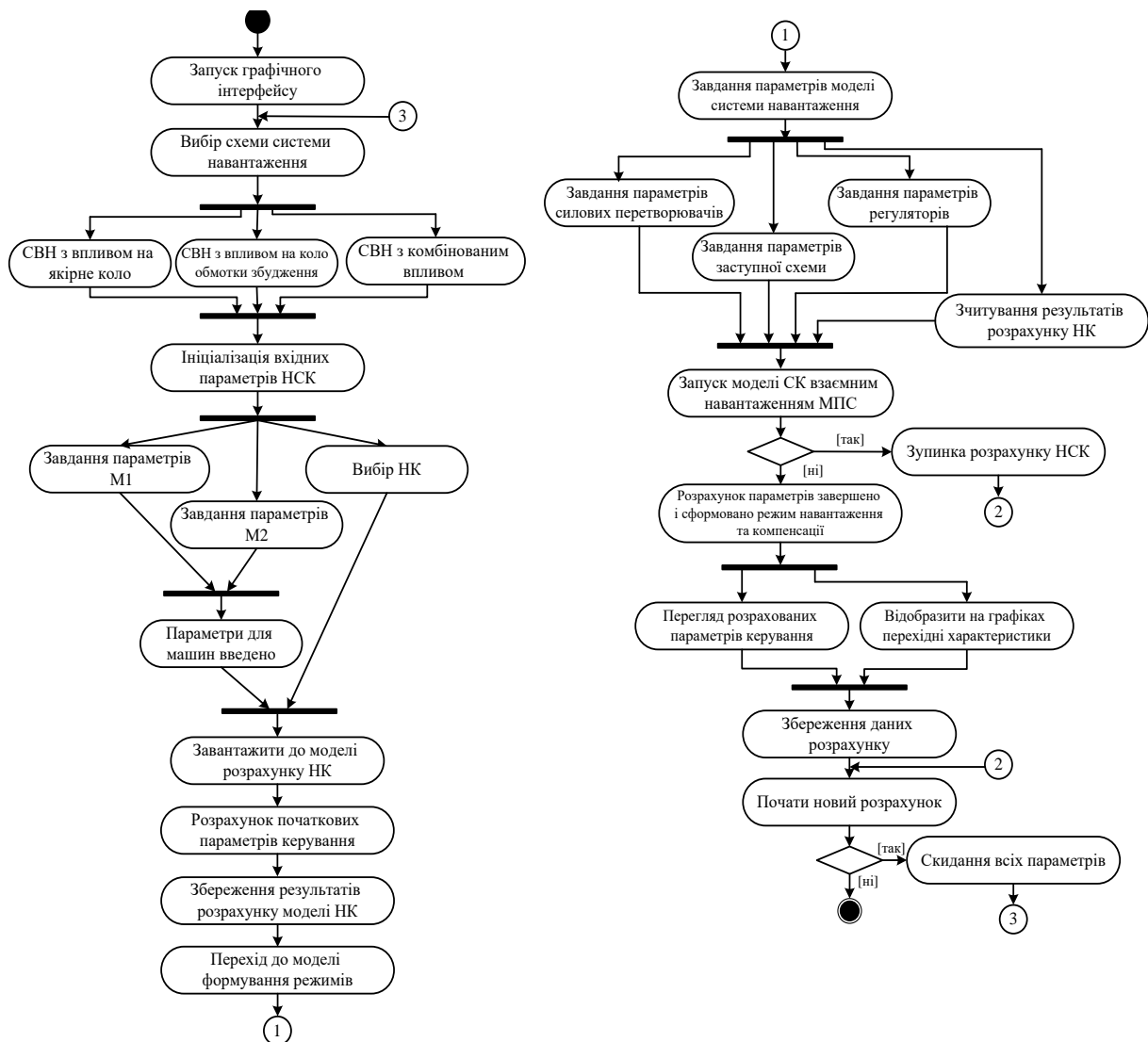


Рисунок 3 – UML-діаграма стану роботи з графічним інтерфейсом

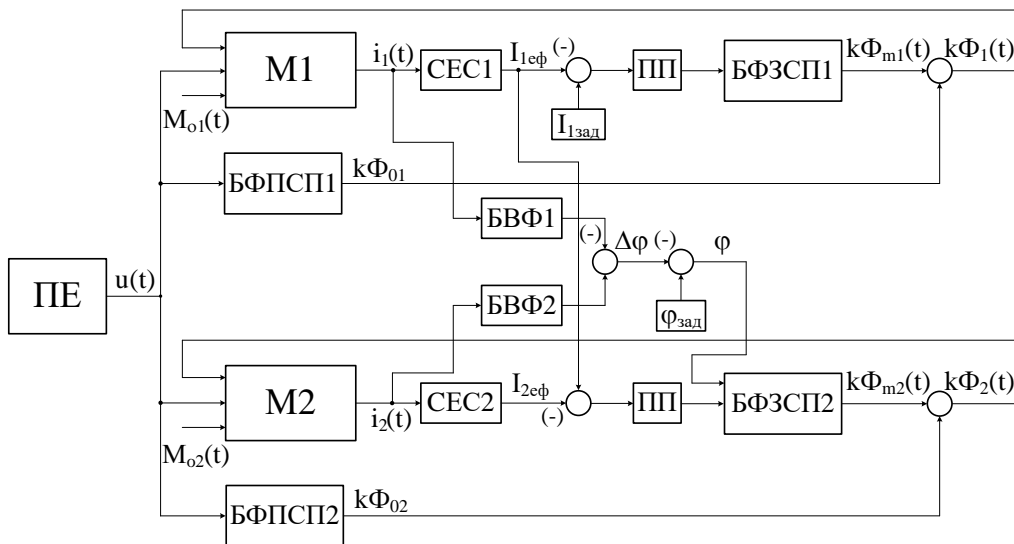


Рисунок 4 – Блок-схема моделі системи керування взаємним навантаженням МПС

Блок-схему системи керування взаємним навантаженням МПС з автоматичним формування режиму навантаження та компенсацією змінної складової струму силового перетворювача енергії (рис. 4) запропоновано у роботі [7].

До складу розробленої системи входять: перетворювач енергії ПЕ, електричні машини постійного струму М1 і М2, блоки формування постійної (БФПСП) та змінної складових магнітного потоку (БФЗСП), сенсори ефективного струму СЕС, перемикаючі пристрої ПП та блоки виділення фази БВФ.

Робота моделі відбувається відповідно до принципів формування навантажувальних режимів та режиму компенсації [5, 7].

Результати роботи системи керування взаємним навантаженням МПС можна переглянути, обравши для відображення (блок 5, рис. 2) на перехідних характеристиках ефективні та миттєві значення струмів електричних машин та силового перетворювача енергії, а також миттєві та середні значення куткових швидкостей електричних машин (блоки 6 та 7, рис. 2).

За одержаними характеристиками роблять висновки щодо ефективності сформованих режимів компенсації та навантаження відповідно до визначених параметрів керування напівпровідниковими перетворювачами енергії.

Далі виконують випробування електричних машин з вимірюванням відповідних параметрів та зберігають одержані результати (етапи 7–8, рис. 1).

ВИСНОВКИ. У роботі проведений аналіз питань автоматизації процесу випробування електричних машин постійного струму із реалізацією їх навантажувальних режимів.

Розкрито можливість автоматизованого визначення параметрів керування напівпровідниковими перетворювачами енергії у схемі комплексу для випробування. Використання елементів інтелектуальних технологій забезпечує визначення початкових значень параметрів керування. Величини відносних похибок розрахунку не перевищують 0,1 % для систем з нечіткими контролерами та 1 % для гібридних нейронних мереж.

ЛІТЕРАТУРА

1. Черный А.П., Родькин Д.И., Калинов А.П., Воробейчик О.С. Мониторинг параметров электрических двигателей электромеханических систем: Монография. – Кременчук: ЧП Щербатых А.В., 2008. – 244 с.
2. Волков В.К., Суворов А.Г. Повышение эксплуатационной надежности тяговых двигателей. – М.: Транспорт, 1988. – 128 с.
3. Егоров В.Ф. Электромеханические системы циклического нагружения. – Челябинск: Metallurgy, Челябинское отделение, 1991. – 208 с.
4. Родькин Д.И. Системы динамического нагружения и диагностики электродвигателей при послеремонтных испытаниях. – М.: Недра, 1992. – 236 с.
5. Ломонос А.И., Родькин Д.И., Мосюндз Д.А. Электротехнические комплексы с накопителями энергии для исследования электрических машин // Электромеханичні і енергозберігаючі системи. Щоквартальний науково-виробничий журнал. – Кременчук: КНУ, 2012. – Вип. 4/2012 (20). – С. 36–42.
6. Перекрест А.Л., Ломонос А.И., Конох И.С., Найда В.В. Автоматизированная система управления процессом испытания машин постоянного тока // Электротехнічні та комп'ютерні системи. Науково-технічний журнал. – Одеса: ОдНПУ, 2011. – Вип. 03/2011 (79). – С. 300–304.
7. Lomonos A. Definition of control parameters of power energy converter for direct current machines testing complexes // Электромеханичні і енергозберігаючі системи. Щоквартальний науково-виробничий журнал. – Кременчук: КрНУ, 2015. – Вип. 1/2015 (29). – С. 17–25.
8. Терехов В.А., Ефимов Д.В., Тюкин И.Ю. Нейросетевые системы управления. – М.: ИПРЖР, 2002. – Т. 8. – 650 с.
9. Isidori A. Nonlinear control systems. – Spribger-Verlag, 1995. – 550 p.
10. Vince T. Usage of artific neural network in remote DC motor speed regulation // Электромеханичні і енергозберігаючі системи. Щоквартальний науково-

виробничий журнал. – Кременчук: КрНУ, 2012. – Вип. 3/2012 (19). – С. 518–521.

11. Конох І.С., Найда В.В. Эмуляция сигналов объектов управления в электромеханических системах с использованием нечетких логических контроллеров, Електромеханічні і енергозберігаючі системи. Щоквартальний науково-виробничий жур-

нал. – Кременчук: КрНУ, 2013.– Вип. 4/2013 (24). – С. 70–83.

12. Wasserman P.D. *Advanced Methods in Neural Computing*. – New York: Van Nostrand Reinhold, 1993. – 255 p.

13. Каллан Р. Основные концепции нейронных сетей / Пер. с англ. под ред. А.Г. Сивака. – М.: Изд. дом «Вильямс», 2003. – 288 с.

TO THE FORMATION OF LOAD-IN SET OF TESTS FOR DC ELECTRICAL MACHINES

A. Lomonos

Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University

vul. Pershotravneva, 20, Kremenchuk, 39600, Ukraine. E-mail: ai_lomonos@ukr.net

Purpose. To implement the energy saving mode testing of electrical machines, to minimize the impact of power supply, to decrease the unit costs and power of electromechanical equipment test system that is relative to load of DC machines without mechanical connection of shafts and to search for new operation modes for testing complex. **Methodology.** The method of object-oriented programming was used to build GUI with fuzzy control system with the fuzzy controller, which is the purpose of calculation of amplitude values of harmonic components of voltage control for the study of electric machines and method of implementation of load modes. **Results.** The analysis for process automation testing of DC electrical machines with the implementation of load modes was done. It reveals the possibility of determining the parameters of the automated control of the semiconductor power converters in the scheme for complex tests. **Originality.** The complex researches of questions of automation the processes of testing DC electric motors with implementation the load modes using the elements intelligent technologies were done. **Practical value.** Using the intelligent technology provides the definition of initial values of control parameters. Calculating relative error does not exceed 0,1 % for systems with fuzzy controllers and 1 % for hybrid neural networks. References 13, figures 4.

Key words: testing complex of DC machines, semiconductor power converter, control parameters, load mode, fuzzy controller, hybrid network.

REFERENCES

1. Chorny, A., Rodkin, D., Kalinov, A., and Vorobeichik, O. (2008), *Monitoring parametrov elektricheskikh dvigatelei elektromekhanicheskikh sistem* [Monitoring parameters of electric motors electromechanical systems], PE Scherbatyh A., Kremenchug, Ukraine.

2. Volkov, V., and Suvorov, A. (1988), *Povyshenie ekspluatatsionnoj nadegnosti tyagovykh dvigatelei* [Increasing the operational reliability of traction motors], Transport, Moscow, Russia.

3. Egorov, V. (1991), *Elektromekhanicheskie sistemy tsiklicheskogo nagruzheniya* [Electromechanical systems of cyclic loading], Metallurgiya, Cheliabinsk, Russia.

4. Rodkin, D. (1992), *Sistemy dinamicheskogo nagruzheniya i diagnostiki elektrodvigateley pri posleremontnykh ispytaniyakh* [Dynamic load systems and motor diagnosis at test after repair], Nedra, Moscow, Russia.

5. Lomonos, A., Rodkin D., and Mosyundz, D. (2012), "Electrotechnical complexes with energy storage systems for testing electric machine", *Electromechanical and Energy Saving Systems*, Iss. 4 (20), pp. 36–42.

6. Perekrest, A., Lomonos, A., Konoh, I., and Najda, V. (2011), "Automated process control system testing DC machines", *Electrical and computer systems*, Iss. 03 (79), pp. 300–304.

7. Lomonos, A. (2015), "Definition of control parameters of power energy converter for direct current machines testing complexes", *Electromechanical and Energy Saving Systems*, Iss. 1 (29), pp. 17–25.

8. Terehov, V. (2002), *Neyrosetevye sistemy upravleniya* [Neural network control systems], IPRGR, Moscow, Russia.

9. Isidori, A. (1995), *Nonlinear control systems*, Spribger-Verlag, London, Great Britain.

10. Vince, T. (2012), "Usage of artific neural network in remote DC motor speed regulation", *Electromechanical and Energy Saving Systems*, Iss. 3 (19), pp. 518–521.

11. Konoh, I., Nayda, V. (2013), "Emulation of signal control objects in electromechanical systems using fuzzy logic controllers", *Electromechanical and Energy Saving Systems*, Iss. 4 (24), pp. 70–83.

12. Wasserman, P. (1993), *Advanced Methods in Neural Computing*, Van Nostrand Reinhold, New York, USA.

13. Kallan, R. (2003), *Ocnovnye konceptsii neyronnykh setey* [The basic concepts of neural networks], Trans. from English. ed. A. Sivak, Publishing House "Williams", Moscow, Russia.

Стаття надійшла 30.10.2015.