

В.В. КУХАРЧУК, С. М. ЗЛЕПКО
Винницкий национальный технический университет
В.Е. КРИВОНОСОВ
Приазовский государственный технический университет
Е.Л. ПИРРОТИ
Харьковский политехнический институт

ДИАГНОСТИКА ПРЕДАВАРИЙНОГО СОСТОЯНИЯ БОЛТОВОГО ТОКОВЕДУЩЕГО СОЕДИНЕНИЯ ПРИ СТАЦИОНАРНОМ И НЕ СТАЦИОНАРНОМ РЕЖИМАХ ТОКОВ НАГРУЗКИ

Основная проблема контактного соединения – это ослабление плотности болтового соединения и увеличение переходного сопротивления контакта, в результате чего, согласно закону Джоуля-Ленца, возникает перегрев соединения с последующим развитием аварии и отключением электрооборудования. Существующие методы неразрушающего контроля целостного соединения не позволяют определить начальный момент ослабления токоведущего соединения. Разработанные математические модели позволили сформулировать условия выявления начального момента образования аварийного режима для различных режимов токовой нагрузки.

Ключевые слова: ослабление болтового соединения, стационарный, нестационарный и случайный режимы токовой нагрузки, неразрушающий контроль, начальный момент ослабления контакта.

V. V. KUKHARCHUK, S.M. ZLEPKO
Vinnytsia National Technical University
V.E. KRIVONOSOV
Priazovsky State Technical University
E. L. PIRROTI
Kharkov Polytechnic Institute

MATHEMATICAL MODELS OF NON-DESTRUCTIVE METHODS FOR DIAGNOSING BOLTED CONNECTIONS

The main problem of a bolted current-conducting connection is the mechanical weakening of the contact density of the adjacent surfaces of busbars, cable lugs, switching equipment connections, etc., which causes an increase in contact resistance of the contact, as a result of which the load current flows through it Joule-Lenz law, there is overheating of the connection. Development of methods for non-destructive testing of diagnostics of the state of a bolted current-conducting connection, which allow timely detection of a pre-emergency situation regardless of the magnitudes and mode of the current load and the ambient temperature. The solution of the task is relevant, in connection with the transition of enterprises from the system of planned preventive repairs to repairs according to the actual state of the object. The nature of the change in current load is due to the technological mode of operation of the equipment, and the stationary and deterministic nature of the change in current is a special case of a non-stationary mode. Changes in the magnitude of the current discretely, monotonously decreasing or increasing will lead to the appearance of a transient process of heating and cooling the bolted current-carrying connection, at which the temperature of the bolted current-carrying connection will vary in a decreasing or increasing exponential relationship. The change in ambient temperature also monotonously increases or decreases. In the modes of non-stationarity of the current load, it is important to identify areas of stationarity. The diagnostics of the emergency mode of current-carrying attenuation describe the estimated Boolean functions that take into account changes in load current and ambient temperature. For non-stationary current modes, detecting the initial moment of a contact current-carrying bolted connection is possible only in the area of simultaneous stationarity of monitored values. The timely detection of the initial moment of loosening of the bolt-conducting connection allows you to move from the CPD system to the electrical equipment maintenance system upon the detection of a defect.

Keywords: relaxation of bolted connection, stationary, non-stationary and random modes of current load, non-destructive testing, initial moment of contact attenuation

Анализ последних исследований и публикаций

Основная проблема болтового токоведущего соединения (БТС) – это механическое ослабление плотности контактов прилегающих поверхностей токоведущих шин, кабельных наконечников, присоединений коммутационной аппаратуры и т.д., что является причиной увеличения переходного сопротивления контакта, в результате чего, при протекании в нем тока нагрузки, согласно закону Джоуля-Ленца, возникает перегрев соединения с последующим развитием аварии и аварийным отключением электрооборудования (ЭО) [1, 2].

На появление градиента температур в месте соединения оказывают влияния изменения климатических параметров, в диапазоне от -25°C до 50°C и динамически изменяющие режимы эксплуатационных токовых нагрузок. Динамическое изменение токов в пределах $(0,1-1,1) I_n$, где I_n – номинальный ток нагрузки; пусковые токи до $(5-7) I_n$ и постоянно действующая электродинамическая сила с частотой 100 Гц, возникающие при протекании тока в соседних проводах, являются причиной ослабления БТС [3].

Проведенные исследования причин остановки (ЭО) на ряде предприятий черной металлургии, горно-перерабатывающих комплексов, в медицинских учреждениях показал, что 1,5-2% причиной аварийной остановки ЭО является ослабление БТС [2, 4].

Широко используемый тепловой метод неразрушающего контроля температуры БТС позволяет выявлять аварийные состояния БТС, не нарушая технологического процесса.

Известные методы и устройства диагностики состояния БТС такие, как установка плавких меток с легкоплавким припоем (сплавом Розе), контактное измерение температуры, тепловизионный контроль, использование светочувствительных наклеиваемых индикаторов, установка биметаллических пластин под гайку БТС и др., реагируют на последствия ослабленного болтового соединения, то есть при достижении температуры БТС установленной критической величины. Контроль критического значения температуры БТС не позволяет диагностировать предаварийную ситуацию ослабления БТС, то есть начальный момент ослабления БТС [1, 3, 7].

Процесс механического ослабления БТС, при отсутствии внешних климатических, вибрационных факторов и при стационарном характере токовой нагрузки, не превышающей $0,5 I_n$, протекает от нескольких суток до нескольких месяцев.

Возрастание тока нагрузки от минимальной величины до номинального значения, особенно в сочетании с ростом температуры окружающего воздуха, приводит к нагреву ослабленного БТС выше критической температуры за время, равное нескольким постоянным нагрева БТС от 0,5 часа до 1 часа и, как правило, является причиной двух-, трехфазного короткого замыкания, выгорания распределительного щита и создания пожарной ситуации [7].

Цель работы

Разработка методов неразрушающего контроля диагностики состояния БТС позволяющих своевременно выявить предаварийную ситуацию независимо от величин и режима токовой нагрузки и температуры окружающего воздуха. Решение поставленной задачи является актуальной, в связи с переходом предприятий от системы планово предупредительных ремонтов к ремонту по фактическому состоянию объекта.

Изложение основного материала

Процесс нагрева БТС, вызванного потерями в болтовом соединении токами нагрузки, с достаточной для практических целей точностью, описывает дифференциальное уравнение нагрева однородного тела [10]:

$$\Delta P dt = \alpha F \Delta T dt + c G dT, \tag{1}$$

где $\Delta P = I_{нагр}^2 R_c$ – потери мощности, выделяемые в болтовом соединении, при протекании тока $I_{нагр}$ и имеющего R_c – суммарное сопротивление болтового соединения и переходного сопротивления контакта $R_c = R_{бс} + R_{пр}$,

dt – время протекания переходного процесса;

α – коэффициент теплопередачи;

F – площадь поверхности болтового соединения;

c – удельная теплоёмкость материала, из которого выполнено болтовое соединение;

G – масса болтового соединения

Решением уравнения (1) известно [10]:

$$T_{бз} = T_{убз} - (T_{убз} - T_{нач}) e^{-t / \tau}, \tag{2}$$

где $T_{бз}$ – температуры БТС;

$T_{убз}$ – температура БТС в установившийся режим;

τ – постоянная нагрева БТС;

$T_{нач}$ – начальная температура БТС, которая вызвана за счет нагрева первоначальными потерями и температурой окружающего воздуха.

Температура БТС в установившемся режиме, с учетом приращения температуры окружающей среды, где за нулевое значение температуры окружающей среды принято значение равное $24^{\circ}C$, и при отсутствии нагрева первоначальными потерями предыдущего токового режима, определяется выражением:

$$T_{убз} = \left(\frac{I_{нагр}^2}{\alpha F} (R_{бс} + R_{пр}) + 24^{\circ}C \right) + (T_{нач} - 24^{\circ}C) \tag{3}$$

Выражение (3) показывает функциональную зависимость температуры БТС от тока нагрузки, температуры окружающего воздуха, величины переходного сопротивления и температуры, вызванной первоначальным нагревом:

$$T_{убз} = f(I_{нагр}^2, (R_{бс} + R_{пр}), (T_{нач}), (T_{нач} - 24^{\circ}C)), \tag{4}$$

Функциональная структура метода позволяет определить начальный момент ослабления БТС

1. Контактным методом измеряют температуру БТС – $T_{убз}$.

2. Измеряют ток, протекающий в этом БТС, и определяют расчетное значение температуры исправного БТС – T_{ci} .

3. Измеряют температуру окружающего воздуха – T_{nc} .

4. Определяют $T_{кр}$ – скорректированное расчетное значение температурное БТС с учетом изменения температуры окружающего воздуха T_{nc} .

5. Непрерывно сравнивают значения температур $T_{кр}$ и $T_{убз}$. По превышению температуры БТС расчетного значения судят об увеличении переходного сопротивления болтового соединения, что является критерием определения начального момента предаварийной ситуации.

6. Достижение температуры БТС критической величины, на пример $100^{\circ}C$, является определяющим моментом отключения оборудования от сети.

На рис. 1 представлена функциональная модель метода определения начального момента ослабления болтового соединения.

Графическая интерпретация метода выявления начального момента ослабления болтового соединения представлена на рис. 2.

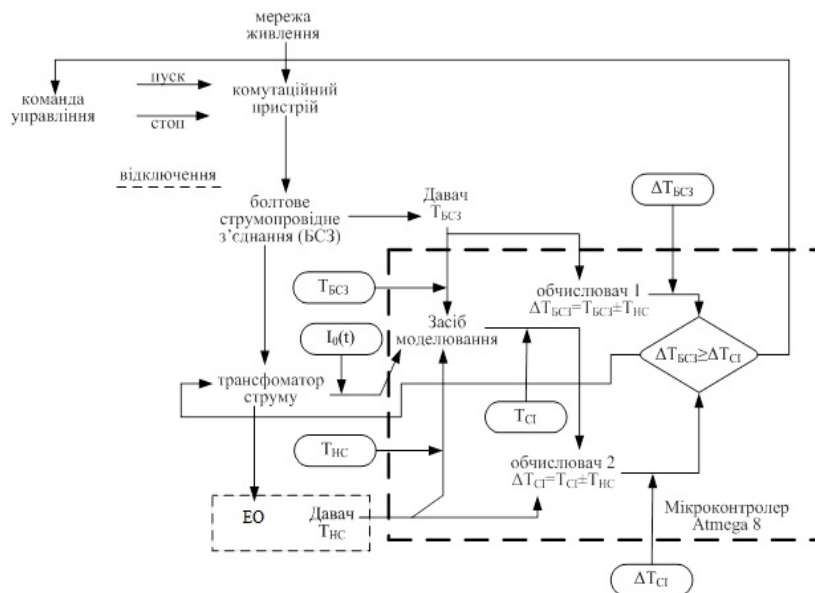


Рис. 1. Функциональная модель метода определения начального момента ослабления болтового соединения

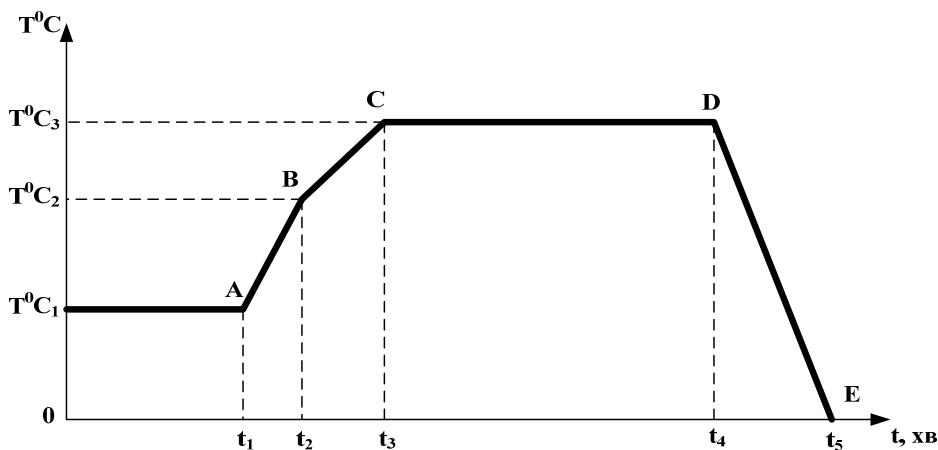


Рис. 2. Графическая интерпретация метода

Пояснения к рис. 2:

- Диапазон $(0-T^0C_1)$ и $(0-t_1)$ – рабочий диапазон работы оборудования;
- Диапазон $AB (T^0C_1-T^0C_2)$ и (t_1-t_2) – предаварийная ситуация;
- Диапазон $BC (T^0C_2-T^0C_3)$ и (t_2-t_3) – начало развития аварийного режима;
- Диапазон $CD (T^0C_3)$ и (t_3-t_4) – аварийная ситуация (время принятия решения);
- Диапазон $DE (T^0C_3-0)$ и (t_4-t_5) – катастрофа – выход оборудования из строя.

Условия выявления начального момента ослабления БТС соединения при стационарном и непрерывном процессе тока нагрузки позволяют оценочные булевых функций.

Обозначения булевых переменных:

- $X_1 = \langle 0 \rangle$ – логический ноль – при отсутствии тока.
- $X_1 = \langle 1 \rangle$ – логическая единица – при протекании тока в БТС.
- $X_2 = \langle 0 \rangle$ – при выполнении неравенства $(T_{c1} + (24^{\circ}C - T_{nc})) > (T_{\bar{\theta}3})$,
- $X_2 = \langle 1 \rangle$ – при выполнении неравенства $(T_{c1} + (24^{\circ}C - T_{nc})) < (T_{\bar{\theta}3})$,
- $X_3 = \langle 0 \rangle$ – при выполнении неравенства $(T_{\bar{\theta}3}) < (T_{кр})$,
- $X_3 = \langle 1 \rangle$ – при выполнении неравенства $(T_{\bar{\theta}3}) > (T_{кр})$.

Совершенной дизъюнктивной новой формой СДНФ [12], описывающей состояние болтового соединения, является выражение:

$$(X_1 \cap X_2 \cap X_3) \cup (X_1 \cap \overline{X_2} \cap \overline{X_3}) \cup (\overline{X_1} \cap X_2 \cap \overline{X_3}) \cup (\overline{X_1} \cap \overline{X_2} \cap X_3), \quad (7)$$

где $\cup, \cap, \overline{X_3}$ – соответственно символы конъюнкции, дизъюнкции и отрицания.

Минимизированные булевы функции для различных режимов болтового соединения имеют вид:
 Нормальному режиму работы соответствует оценочная функция:

$$f_{p.p} = (X_1 \cap \overline{X_2} \cap \overline{X_3}) = (1, 0, 0) \quad (8)$$

Наступлению начального момента ослаблению болтового соединения соответствует оценочная функция:

$$f_{осл\ бз} = (X_1 \cap X_2 \cap \overline{X_3}) = (1, 1, 0) \quad (9)$$

Наступлению аварийного режима, приводящего к отключению объекта соответствует оценочная функция вида:

$$f_{ав.p} = (X_1 \cap X_2 \cap X_3) = (1, 1, 1) \quad (10)$$

Характер изменения токовой нагрузки обусловлен технологическим режимом работ оборудования, а стационарный и детерминированный характер изменения величины тока является частным случаем не стационарного режима. На рис. 3 приведен график циклического изменения тока нагрузки при работе ЭО с повторно кратковременными режимами (пресс, компрессоры, электроприводы заполнения и откачки резервуаров, рентгеновские компьютерные томографы и др.). Изменения величины тока дискретно, монотонно убывающей или возрастающей приведет к появлению переходного процесса нагревания и охлаждения БТС, при котором температура БТС будет изменяться по убывающей или возрастающей экспоненциальной зависимости. Изменение температуры окружающего воздуха так же монотонно возрастает или убывает. В режимах не стационарности токовой нагрузки важным является выявление участков стационарности.

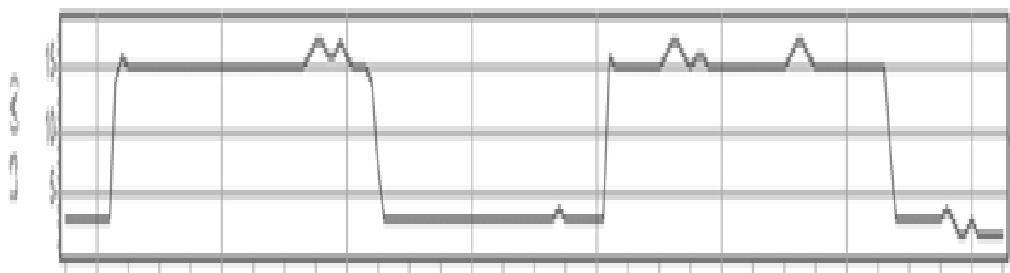


Рис. 3. Оциллограмма циклического изменения токовой нагрузки

Особенностью выявления начального момента БТС в режиме изменения величин тока и температуры окружающего воздуха является выбор участков удовлетворяющих одновременной стационарности всех контролируемых параметров. Для выбора участков стационарности введем дополнительные аргументы:

$$X_4 - \langle 0 \rangle - \text{при выполнении условия } \frac{dI_n}{dt} \neq 0,$$

$$X_4 - \langle 1 \rangle - \text{при выполнении условия } \frac{dI_n}{dt} = 0.$$

$$X_5 - \langle 0 \rangle - \text{при выполнении условия } \frac{dT_{nc}}{dt} \neq 0,$$

$$X_5 - \langle 1 \rangle - \text{при выполнении условия } \frac{dT_{nc}}{dt} = 0.$$

$$X_6 - \langle 0 \rangle - \text{при выполнении условия } \frac{dT_{бз}}{dt} \neq 0,$$

$$X_6 - \langle 1 \rangle - \text{при выполнении условия } \frac{dT_{бз}}{dt} = 0.$$

Булевых функций от шести переменных существует $2^6 = 64536$.

Минимизированные оценки булевых функций для выявления ослабленного и аварийного режимов болтового соединения имеют вид. Наступление начального момента ослаблению болтового соединения соответствует функция:

$$f_{осл\ бз} = (X_1 \cap X_2 \cap \overline{X_3}) \sim (X_4 \cap X_5 \cap X_6) = (1, 1, 0, 1, 1, 1) \quad (11)$$

Наступлению аварийного режима, приводящего к отключению объекта, соответствует функция

$$f_{ав.p} = (X_1 \cap X_2 \cap X_3) \sim (X_4 \cap X_5 \cap X_6) = (1, 1, 1, 1, 1, 1) \quad (12)$$

где ~ символ эквивалентности.

Для выявления начального момента ослабления болтового соединения разработаны новые методы, устройства неразрушающего контроля и программное обеспечения, используемые в устройствах [8, 9].

Выводы

1. Диагностика предаварийного режима ослабления токоведущего соединения описывают оценочные булевы функции, учитывающие изменения тока нагрузки и температуры окружающего воздуха.

2. Для нестационарных режимов тока выявления начального момента контактного токоведущего болтового соединения возможно только в участок одновременной стационарности контролируемых величин.

3. Своевременное выявления начального момента ослабления БТС позволяет перейти от системы ППР к системе обслуживания ЭО по факту выявления дефекта.

Литература

1. Власов А. Б. Тепловизионная диагностика объектов электро- и теплоэнергетики (диагностические модели) / А. Б. Власов. – Мурманск : Изд-во МГТУ, 2005. – 265 с.

2. Кривонос В. Е. Критерии диагностики винтовых соединений в ультразвуковой томографической аппаратуре / В. Е. Кривонос, С. М. Злепко, Р. М. Вирозуб, Д. М. Барановский // Вісник Хмельницького національного університету. Серія: Технічні науки. – 2017. – Випуск № 1. – С. 52–57.

3. Измайлов В. В. Автоматизированная система прогнозирования остаточного ресурса электроконтактных соединений / В. В. Измайлов, А. Е. Наумов // Программные продукты и системы. – 2008. – № 2. – С. 73–75.

4. Злепко С.М. Алгоритм діагностики стану болтового струмопровідного з'єднання комп'ютерного томографа / С.М. Злепко, В.Е. Кривонос, Т.А. Чернишова, Я.І. Ярославський // ВКДТС. – Вінниця, 2017. – С. 248–250.

5. Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей : утв. 25.07.06, № 258 / Мин-во топлива и энергетики Украины. – Х. : «Индустрия», 2007. – 288 с.

6. Федоров А. А. Справочник энергетика промышленных предприятий. Том 1. Электроснабжение / Федоров А. А. – 1961. – 569 с.

7. Пат. RU № 2408120, H02H5/04, 2009. Устройство для контроля температуры контактных соединений в устройствах, находящимся под высоким напряжением.

8. Пат. № 107749 Україна МПКН02Н 5/04. Спосіб контролю за станом болтових з'єднань електрообладнання, що працює зі змінним навантаженням / Кривонос В. Е. – № а 201309491, опубл. 10.02.2014 : Бюл. № 3. – 4 с.

9. Комп'ютерна програма діагностики стану болтових з'єднань і контролю цілісності струмових ланцюгів / В. Є. Кривонос, С. М. Злепко, Є. Л. Піротті, В. В. Кривонос, А. О. Борякін // Свід. № 77423 від 06.03.2018.

10. Сыромятников И. А. Режимы работы асинхронных и синхронных двигателей / Сыромятников И. А.; под ред. М. Л. Мамиконянца. – М. : Энергоатомиздат, 1984. – 240 с.

11. Патент на корисну модель № 127922 Україна МПКН02Н 5/04. Пристрій діагностування ослаблення болтових струмоведучих з'єднань і обриву струмоведучих частин системи електропостачання електроприймача / Кривонос В. Е, Піротті Є. Л. и др. – заявка № 2018 02711, опубл. 27.08.2018, Бюл. № 16. – 4 с.

References

1. Vlasov A. B. Teplovizionnaya diagnostika obektov elektro- i teploenergetiki (diagnosticheskie modeli) / A. B. Vlasov. – Murmansk : Izd-vo MGTU, 2005. – 265 s.

2. Krivonosov V. E. Kriterii diagnostiki vintovykh soedinenij v ultrazvukovoj tomograficheskoj apparature / V. E. Krivonosov, S. M. Zlepko, R. M. Virozub, D. M. Baranovskij // Herald of Khmelnytskyi National University. – 2017. – Vypusk № 1. – S. 52–57.

3. Izmajlov V. V. Avtomatizirovannaya sistema prognozirovaniya ostatochnogo resursa elektrokontaktnykh soedinenij / V. V. Izmajlov, A. E. Naumov // Programmnye produkty i sistemy. – 2008. – № 2. – S. 73–75.

4. Zlepko S.M. Alhorytm diahnostryky stanu boltovoho strumoprovodnoho ziednannia kompiuternoho tomografa / S.M. Zlepko, V.E. Kryvonosov, T.A. Chernyshova, Ya.I. Yaroslavskiy // VKDTS. – Vinnytsia, 2017. – S. 248–250.

5. Pravila tehniczeskoj ekspluatatsii elektroustanovok potrebitelej : utv. 25.07.06, № 258 / Min-vo topliva i energetiki Ukrainy. – H. : «Industriya», 2007. – 288 s.

6. Fedorov A. A. Spravochnik energetika promyshlennykh predpriyatij. Tom 1. Elektrosnabzhenie / Fedorov A. A. – 1961. – 569 s.

7. Pat. RU № 2408120, H02H5/04, 2009. Ustrojstvo dlya kontrolya temperatury kontaktnykh soedinenij v ustrojstvah, nahodyashimsya pod vysokim napryazheniem.

8. Pat. № 107749 Ukraina MPKN02N 5/04. Sposib kontroliu za stanom boltovykh ziednan elektroobladnannia, shcho pratsiuie zi zminnym navantazheniam / Kryvonosov V. E. – № a 201309491, opub. 10.02.2014 : Biul. № 3. – 4 s.

9. Kompiuterna prohrama diahnostryky stanu boltovykh ziednan i kontroliu tsilisnosti strumovykh lantsiuhiv / V. Ye. Kryvonosov, S. M. Zlepko, Ye. L. Pirotti, V. V. Kryvonosov, A. O. Boriakin // Svid. № 77423 vid 06.03.2018.

10. Syromyatnikov I. A. Rezhimy raboty asinhronnykh i sinhronnykh dvigatelej / Syromyatnikov I. A.; pod red. M. L. Mamikonyanca. – M. : Energoatomizdat, 1984. – 240 s.

11. Patent na korysnu model № 127922 Ukraina MPKN02N 5/04. Prystrii diahnostuvannia oslablennia boltovykh strumoveduchykh ziednan i obryvu strumoveduchykh chastyn systemy elektropostachannia elektroprymacha / Kryvonosov V. E, Pirotti Ye. L. y dr. – zaiavka № 2018 02711, opubl. 27.08.2018, Biul. № 16. – 4 s.

Рецензія/Peer review : 27.4.2019 р.

Надрукована/Printed : 1.6.2019 р.
Рецензент: д.т.н., проф. Кичак В.М.