

інструмент для оцінки електроенергетичних процесів під час виникнення визначених позаштатних ситуацій.

Аналіз електричних параметрів у часі при виникненні нештатних ситуацій й та після їх усунення дозволив виявити ознаки, які вирізняють кожну з них незважаючи на аналогію їх розвитку при живленні електротехнічного комплексу від мережі змінного і постійного струмів.

Виявлені під час досліджень ознаки нештатних ситуацій в елементах тягового електротехнічного комплексу можуть бути використані під час розробки систем діагностики, моніторингу або контролю режимів комплексу.

Список літератури

1. Магистральные электровозы. Тяговые электрические машины / В.И. Бочаров, Г.В. Василенко, А.Л. Курочка и др. – М.: Энергоатомиздат, 1992. – 464 с.
2. Система управления и диагностики электровоза ЭП10/ Под ред. С.В. Покровского. – М.: Интекст, 2009. – 356с.
3. Анализ технического состояния электровозного парка на сети железных дорог России за 1999 г. МПС РФ, Департамент локомотивной тяги, 2000.
4. Тихменев Б.Н. Подвижной состав электрических железных дорог. / Б.Н.
5. Электроподвижной состав с асинхронными тяговыми двигателями/ Н.А. Ротанов, А.С. Курбасов, Ю.Г. Быков, В.В. Литовченко; под ред. Н.А. Ротанова. – М.: Транспорт, 1991. – 336с.
6. Черных И.В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink. – М.: ДМК Пресс; СПб.: Питер, 2008. – 288с.: ил.

Рекомендовано до друку к-том техн. наук, доц. Беитою О.С.

УДК 621.313.323

О.В. Бялобржеський, канд. техн. наук, Д.В. Слободенюк

Україна, Кременчук, Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського

СИСТЕМА КЕРУВАННЯ ДИНАМІЧНИМИ РЕЖИМАМИ ЗБУДЖЕННЯ СИНХРОННОГО ДВИГУНА

Робота синхронного двигуна (СД) екскаватора ЕКГ-8І характеризується тривалим режимом роботи з навантаженням, що змінюється безсистемно, через різні проміжки часу [1]. Такий режим роботи при значних накидах навантаження синхронного двигуна без автоматичного регулювання збудження викликає хитання ротора та коливання активного і реактивного струмів двигуна, зниження віддачі реактивної потужності СД у мережу. Хитання ротора та коливання активного струму негативно впливають на стійкість синхронного двигуна і технологічного обладнання, знижується їх надійність, збільшуються втрати електроенергії. Крім того, коливання активного і реактивного струмів викликають відхилення напруги мережі за амплітудою та фазою. Таким чином компенсуюча можливість синхронного двигуна в повній мірі не використовується. Основним методом підвищення динамічної та статичної стійкості синхронних двигунів у перехідних режимах є застосування автоматичних регуляторів збудження.

Автоматичне регулювання збудження дозволяє значно підвищити техніко-економічні показники роботи потужних екскаваторних двигунів та живильної мережі, повною мірою використовувати властивість якості синхронного двигуна – можливість регулювання реактивної потужності [2].

Сучасною тенденцією розвитку систем збудження для синхронних машин є широке застосування швидкодіючих напівпровідникових перетворювачів. Але, незважаючи на їх високу швидкодію, інерційність контуру збудження не дозволяє моментально встановлювати необхідне значення струму збудження в перехідних режимах.

Значний прогрес у перетворювальній техніці пов'язаний зі створенням силових напівпровідникових вентилів у поєднанні з ємнісними накопичувачами енергії. Високі електричні параметри, малі габарити і маса, простота конструкції та обслуговування, висока експлуатаційна надійність дозволяють широко використовувати їх у схемах збудження СД [3]. До недоліків можна віднести: наявність додаткових резисторів в колі збудження, що призводить до втрат електроенергії; використання в схемі напівкерованих тиристорів, які не спроможні запиратись керуючим електродом, а також їх низька робоча частота.

Таким чином, мета роботи – синтез системи та напівпровідникового пристрою збудження синхронного двигуна з ємнісним накопичувачем.

На автоматичні регулятори та системи збудження (АРЗ) синхронних машин покладають такі функції:

- забезпечення підтримання потрібного рівня напруги на затискачах машин або реактивної потужності в сталому режимі системи;
- підвищення статичної та динамічної стійкості при збуреннях в електроенергетичній системі;

– підвищення статичної та динамічної стійкості при роботі двигуна з різкозмінним навантаженням;

– підвищення якості перехідних процесів.

Існуючі пристрої АРЗ зазвичай поділяються на два типи:

– регулятори пропорційної дії, які змінюють струм збудження залежно від відхилення одного із параметрів режиму (наприклад, напруги, струму).

– АРЗ сильної дії, які регулюють збудження синхронних машин не тільки за відхиленням параметрів режиму, але і за швидкістю й прискоренням їх зміни. Це дозволяє на самому початку перехідного процесу інтенсивніше впливати на системи збудження, ніж при застосуванні АРЗ пропорційної дії. [4]

Схема АРЗ вибирається залежно від виду та характеру навантаження, типів двигунів і вузлі навантаження. Для синхронних двигунів, що працюють з різко змінним навантаженням на валу, може бути рекомендовано регулювання збудження за змінною активною складовою струму статора з підтриманням напруги у вузлі навантаження (у разі необхідності збереження стійкості синхронного режиму та інтенсивного демпфування хитань ротора може бути використано АРЗ сильної дії) [5].

До систем збудження синхронних машин ставляться високі вимоги. Вони мають забезпечувати:

– надійне живлення обмотки збудження в нормальних і аварійних режимах;

– стійке регулювання струму збудження при зміні навантаження машини;

– певну швидкість наростання струму ротора;

– кратність форсування напруги збудження не менш ніж за час, що необхідно для відновлення режиму після ліквідації аварії;

– ефективне (швидке) гасіння електромагнітного поля ротора.

Для підвищення швидкодії та точності керування збудженням синхронної машини в динамічних режимах запропоновано систему збудження з ємнісним накопичувачем [6], функціональна схема якої наведена на рис. 1.

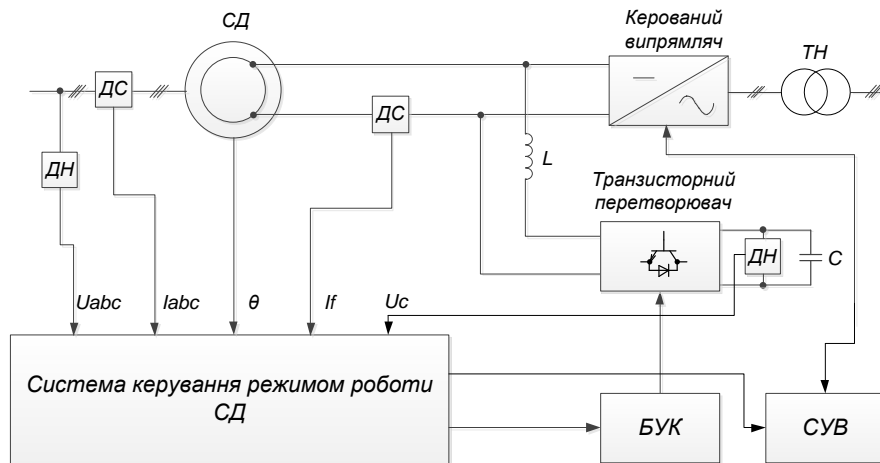


Рис. 1 Функціональна схема системи керування струмом збудження СД

Силова частина складається із синхронної машини, що працює в режимі двигуна (СД), навантаженням якої в електротехнічному комплексі екскаватора виступають генератори напруги, повороту, ходу; системи збудження, до якої входять обмотка збудження, що живиться від керованого тиристорного випрямляча; системи керування режимом роботи синхронного двигуна, яка на основі вимірюваних значень датчиків напруги, струму, кута повороту ротора та їх похідних подає сигнал до системи керування управління вентилями та задає необхідне значення струму збудження. До системи паралельно обмотці збудження через буферний дросель підключений транзисторний перетворювач (ТП) та ємнісний накопичувач енергії (С). В коло під'єднано датчик для вимірювання напруги на конденсаторі. Керування Управління транзисторним перетворювачем здійснюється за допомогою блоку управління ключами (БУК). На основі вимірюваних значень параметрів режиму роботи синхронного двигуна система керування розраховує та подає керуючі сигнали на перетворювачі, що живлять обмотку збудження [6].

Для оцінки режимів роботи запропонованої системи збудження синтезовано модель силової частини (рис. 2 та 3). Обмотка збудження (ОЗ) являє собою активний опір та індуктивність, параметри яких розраховані для синхронного двигуна екскаватора ЕКГ-8І ($U_f = 36$ В, $I_f = 270$ А). Послідовно до обмотки збудження підключено додатково джерело ЕРС взаємодукції, що дозволяє врахувати потокозчеплення обмотки ротора з іншими обмотками машини. Тиристорний випрямляч, що входить до існуючого пристрою АРЗ, складається з таких блоків: джерела змінної ЕРС (ДЖ) з можливістю завдання потрібної напруги збудження та тиристора (VS) для забезпечення однонаправленості струму. У схемі паралельно

до ОЗ через буферний дросель (БД) ($L_b = 4 \cdot 10^{-6}$ Гн) підключено транзисторний перетворювач (ТП) та ємнісний накопичувач електроенергії (ЄН) ($\tilde{N} = 0,4$ Ф, $U_c = 180$ В).

Система керування складається з блока завдання струму збудження (БЗ), який формує потрібний динамічний режим. Заданий струм i_{f_ref} порівнюється з поточним значенням струму в обмотці i_f й у разі різниці між ними, яка визначається відповідними елементами, спрацьовують релейний елемент РЕ1 або ж РЕ2 залежно від знаку помилки регулювання. Сигнали з РЕ1 та РЕ2 подаються відповідно на логічні елементи ЛЕ1 або ЛЕ2. Паралельно до цих операцій за поточним значенням струму збудження виконується обчислення його похідної блоком диференціювання (ДБ).

У разі ненульового значення на виході ДБ, який з'єднаний з входом логічного інвертора (ЛІ1), останній формує на виході логічний нуль. Цей сигнал блокує тиристор VS, та одночасно, інвертуючись блоком (ЛІ2), встановлює на входах ЛЕ1 та ЛЕ2 логічну одиницю та дозволяє, тим самим, роботу транзисторів, і схема переходить у режим, при якому живлення ОЗ здійснюється від ємнісного накопичувача.

У разі нульового значення на виході ДБ та на виході (ЛІ1) формується логічна одиниця, що відкриває тиристор VS, та інвертована в логічний нуль блоком (ЛІ2), встановлює на входах ЛЕ1 та ЛЕ2 логічний нуль, яка забороняє роботу транзисторів. У цьому разі обмотка збудження живиться від джерела напруги (ДЖ), середнє значення напруги якого формується блоком множення (БМ) та підсилювачем (П) залежно від поточного значення струму збудження.

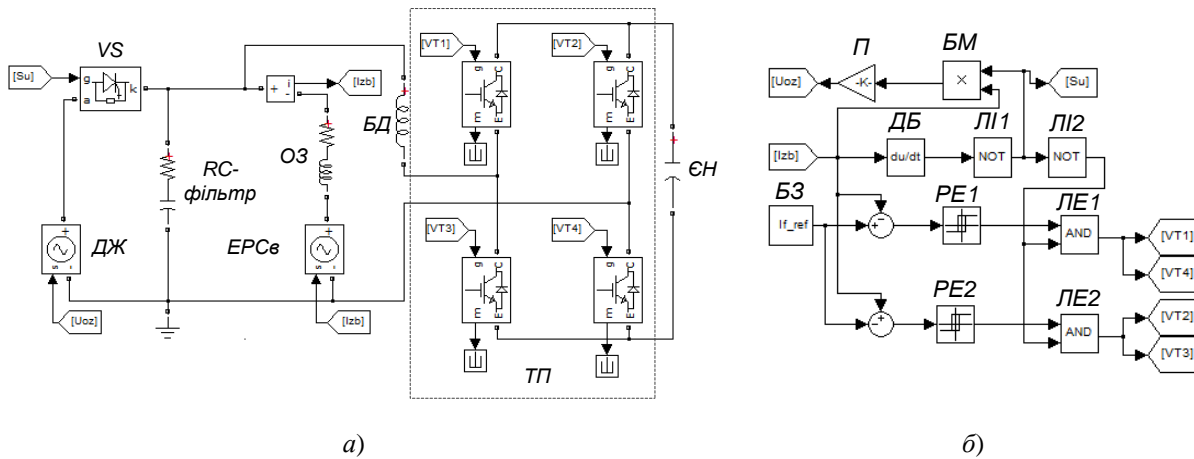


Рис. 2 Модель силової частини (а) та системи керування (б) збудженням СД

У стаціонарному режимі живлення обмотки здійснюється від джерела живлення (ДЖ) залежно від контрольованих параметрів: струму статора, коефіцієнта потужності, кута повороту ротора та інших параметрів (рис.1). При зміні режиму роботи (зміна навантаження, КЗ), відповідно до рівнянь балансу напруги в контурі збудження можна записати:

$$u_f = i_f R_f + \frac{d\psi_f}{dt}; \quad (1)$$

де: $i_f R_f$ – падіння напруги на активному опорі обмотки збудження; ψ_f – результуюче потокозчеплення ротора. Розкривши вираз потокозчеплення, отримаємо

$$u_f = i_f R_f + L_f \frac{di_f}{dt} + \sum M_{fi} \frac{di_i}{dt} = i_f R_f + L_f \frac{di_f}{dt} + e_f; \quad (2)$$

Власну індуктивність обмотки збудження L_f прийемо постійною, а взаєміндукцію M_i змінною і залежною від положення ротора відносно обмоток статора, а тому потокозчеплення змінюється за умов зміни взаєміндукції та відповідних струмів [7].

У статті Слободенюк Д.В. [8] досліджено роботу синхронного двигуна, де відображено зміну величини струму збудження під час реалізації типової діаграми роботи електротехнічного комплексу екскаватора. За допомогою досліджень побудовано діаграму зміни потокозчеплення та відповідно ЕРС взаєміндукції. При цьому визначено активний опір та індуктивність обмотки збудження, а також виміряне

струм збудження на всьому часовому інтервалі моделювання. Тоді ЕРС взаємоіндукції, яку необхідно сформулювати, визначиться так:

$$e_f^* = \sum M_{fi} \frac{di_i}{dt} = u_f^* - i_f^* R_f - L_f \frac{di_f^*}{dt}. \quad (3)$$

У режимі форсування струму збудження живлення обмотки відбувається від транзисторного перетворювача (ТП). Тому рівняння балансу напруг прийме такий вигляд:

$$u_f = L_b \frac{di_f}{dt} + u_{tr} = i_f R_f + L_f \frac{di_f}{dt} + e_f^*,$$

де L_b – індуктивність буферного дроселя; u_{tr} – напруга транзисторного перетворювача; $u_{tr} = U_c m$, U_c – напруга ємнісного накопичувача; m – комутуюча функція.

При зміні поточного або заданого значення струму та при певній швидкості його наростання di/dt починає працювати блок керування відповідно до функціональних зв'язків. Схема переходить у режим роботи, при якому живлення обмотки збудження здійснюється від ємнісного накопичувача. При керуванні накопиченням та розрядом енергії на конденсаторі методом релейного регулювання за рахунок явища самоіндукції в електричному колі під час його розмикання струм встановлюється не миттєво, а через певний час. При цьому величина ЕРС самоіндукції за рахунок буферного дроселя значно перевищує ЕРС джерела живлення, що дозволяє зарядити конденсатор до потрібного рівня напруги. Аналогічно здійснюється й розряд ємнісного накопичувача на обмотку збудження. Подача підвищеної напруги U_c на обмотку збудження сприяє швидшому наростанню струму до того самого значення сталої часу контуру збудження.

Дослідження режимів роботи моделі (рис. 2 та 3) було виконано при таких значеннях параметрів елементів схеми: активний опір обмотки збудження $R_f = 0,133$ Ом; індуктивність $L_f = 0,01$ Гн; індуктивність буферного дроселя попередньо вибрана $L_{fb} = 4 \cdot 10^{-5}$ Гн. У першому досліді на проміжку часу від 0 до 0,1 с задано лінійне наростання струму зі швидкістю $\frac{di_{f-ref}}{dt} = 500$ А/с, на проміжку часу від 0,1 до 0,2 с – лінійне спадання струму з тією ж швидкістю. При цьому ЕРС взаємоіндукції стає нульовою ($e_f^* = 0$). Як видно з графіка (рис. 3, а), струм обмотки збудження i_f повністю відпрацьовує заданий з пульсаціями, зумовленими принципом регулювання. Заряджений до 5-кратного значення напруги конденсатор розряджається, забезпечуючи при цьому необхідне значення кратності напруги та контрольоване наростання струму збудження (рис. 3, в). Оскільки живлення від ємнісного накопичувача здійснюється через транзисторний перетворювач, напруга на обмотці збудження має пульсуючий характер, що є недоліком (рис.3, б).

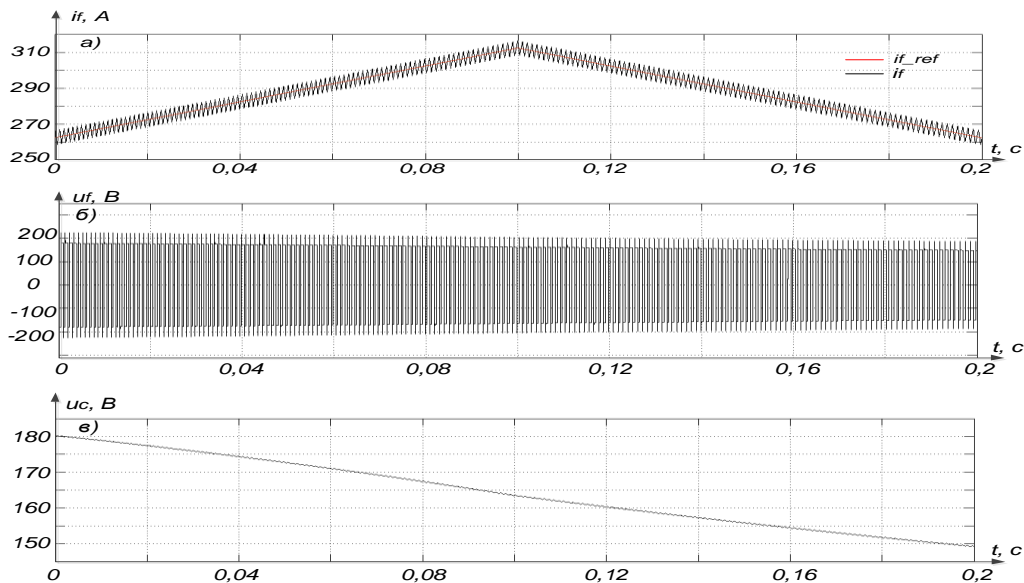


Рис. 3 Графіки струму (а) і напруги (б) збудження СД та напруги ємнісного накопичувача (в)

За умов роботи синхронної машини в складі електротехнічного комплексу екскаватора зміна струму збудження зумовлена як напругою збудження, так і напругою потокозчеплення з обмотками статора

згідно з виразами (1) – (3). Фрагмент зміни струму збудження i_{f_ref} на довільному інтервалі роботи синхронного двигуна екскаватора наведений на рис. 4, а. Така зміна струму зумовлена формуванням ЕРС взаємодії відповідно формули (3), яка фактично відображує зміну потокозчеплення індуктора з іншими обмотками. Завдання системи на даному інтервалі стабілізувати цей струм на номінальному рівні i_{f_nom} . Отримані часові залежності параметрів режиму наведені на рис. 4, а і б. Процеси стабілізації струму відбувається на інтервалі часу 5...6,8 с, а на інтервалі часу 6,8...7 с відбувається зрив регулювання. Цей зрив зумовлений недостатнім запасом енергії конденсаторного накопичувача, що відображується зниженням напруги збудження нижче рівня $U_f = 36$ В. Таким чином, у результаті моделювання доведено можливість використання запропонованого рішення для реалізації режимів форсування та гасіння поля, але при цьому потрібні додаткові дослідження процесів перерозподілу енергії в елементах для визначення їх раціональних параметрів.

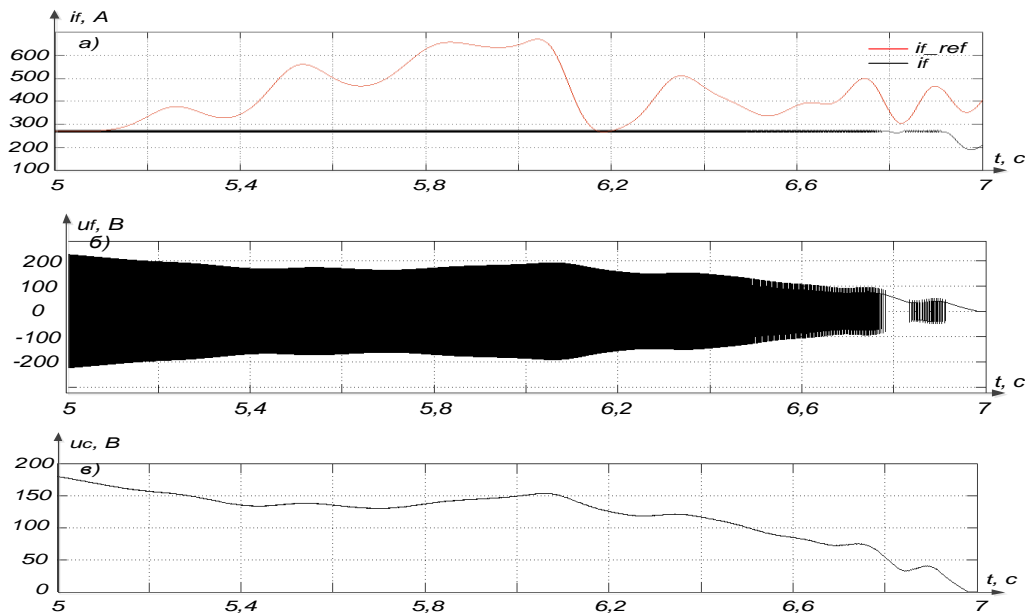


Рис. 4. Графіки струму (а) і напруги (б) збудження СД та напруги ємнісного накопичувача (в)

Висновки Система регулювання режимом збудження дозволяє підтримувати заданий струм збудження синхронного двигуна якийсь період часу за рахунок енергії ємнісного накопичувача, введеного в контур збудження транзисторного перетворювача. Запас енергії ємнісного накопичувача зумовлює тривалість роботи запропонованого пристрою. В динамічних режимах роботи для підвищення стійкості можливе застосування форсування та гасіння електромагнітного поля ротора СД шляхом зміни струму збудження за рахунок високопотенціальної енергії ємнісного накопичувача; при цьому визначення параметрів елементів схеми є окремим завданням.

Список літератури

1. Кацман М.М., Справочник по электрическим машинам: Учебное пособие/М.М. Кацман. – М.: Издательский центр «Академия», 2005. – 480 с.
2. Овчаренко А.С., Розинский Д.И. Повышение эффективности электроснабжения промышленных предприятий. – К.: Техника, 1989. – 287 с.
3. Низимов В.Б., Колычев С.В., Снижко А.А. Система параметрического пуска СД со ступенчатым накопителем энергии в обмотке возбуждения. / Низимов В.Б., Колычев С.В., Снижко А.А. // Збірник наукових праць Дніпродзержинського державного технічного університету. Дніпродзержинськ: ДДТУ. – 2011. – Випуск 1(16). – с. 101-106
4. Калентионюк Е.В., Устойчивость электроэнергетических систем. – Минск: Техноперспектива, 2008. – 375 с.
5. Гамазин С.И., Ставцев В.А., Цырук С.А. Переходные процессы в системах промышленного электроснабжения, обусловленные электродвигательной нагрузкой. – М.: Издательство МЭИ, 1997 – 424 с.
6. Пат. України, 60652, МПК (2006.01)H02P9/10, H02P9/14.Спосіб форсування струму збудження синхронного двигуна та пристрій для його реалізації / Нізімов В.Б., Нізімов Р.В., Сторожко В.С.; заяв. 24.01.2003 ; опубл. 15.10.2003, Бюл. № 10
7. Слодарж М.И., Режимы работы, релейная защита и автоматика синхронных электродвигателей. – М.: «Энергия», 1977. – 216 с.
8. Слободенюк Д.В. Аналіз впливу струму збудження на стійкість СД електротехнічного комплексу екскаватора / Слободенюк Д.В. // Збірник наукових праць XI Міжнародної науково технічної конференції молодих учених і спеціалістів. – Кременчук, КрНУ, 2013 – С. 200-201.

Рекомендовано до друку д-ром техн. наук, проф. Сінчуком О.М.