



УКРАЇНА

(19) UA (11) 93246 (13) C2

(51) МПК

G01N 21/01 (2011.01)

G01R 31/34 (2011.01)

H05B 6/02 (2011.01)

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ  
І НАУКИ УКРАЇНИ

ДЕРЖАВНИЙ ДЕПАРТАМЕНТ  
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ  
ВЛАСНОСТІ

## ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА ВИНАХІД

(54) СПОСІБ ЛОКАЛЬНОГО КОНТРОЛЮ ЗУБЦІВ СТАТОРІВ ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН ЗМІННОГО СТРУМУ ТА ПРИСТРІЙ ДЛЯ ЙОГО РЕАЛІЗАЦІЇ

1

(21) а200814271

(22) 11.12.2008

(24) 25.01.2011

(46) 25.01.2011, Бюл.№ 2, 2011 р.

(72) ПРУС В'ЯЧЕСЛАВ В'ЯЧЕСЛАВОВИЧ, СУТОРМІНА АННА ОЛЕКСАНДРІВНА, СМІРНОВА ОЛЕСЯ ВОЛОДИМИРІВНА

(73) КРЕМЕНЧУЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІМЕНІ МИХАЙЛА ОСТРОГРАДСЬКОГО

(56) UA 62491 A, 15.12.2003

Анемподистов В.П., Белонин В.К., Дегусаров. Ю.А. и др. Выявление местных нагревов сердечников статора // Электротехника. - 1982. - №10. - С. 62-63

UA 57934 A, 15.07.2003

UA 84041 C2, 25.12.2007

US 6399949, 04.06.2002

JP 61230053, 14.10.1986

US 20020170162, 21.11.2002

EP 2113780, 26.10.2004

RU 2223587, 10.02.2004

RU 2206951, 20.06.2003

RU 2216841, 20.11.2003

US 4996486, 26.02.1991

JP 2004117238, 15.04.2004

JP 2241340, 26.09.1990

SU 1080091, 15.03.1984

SU 1023549, 15.06.1983

Ростик Г.В., Павлов Е.В. О тепловизионном контроле электрических машин и электрооборудова-

2

ния // Энергетик. - 2002. - №8. - [www.irtis.ru/paper/en0802.pdf](http://www.irtis.ru/paper/en0802.pdf)

(57) 1. Спосіб локального контролю зубців статорів електричних машин змінного струму, що полягає у визначенні стану поверхні зубців шляхом вимірювання електричних та магнітних параметрів і відео-ідентифікації в інфрачервоному та видимому діапазоні, який **відрізняється** тим, що за допомогою вимірювального сканера нагрівальним індуктором примусово нагрівають локальні ділянки зубців з фіксацією їх зображень в інфрачервоному діапазоні, складеним індуктором шляхом перемагнічування вимірюють значення магнітної індукції та втрат у сталі на кожній окремій ділянці зубців, відеокамерою фіксують зображення поверхні зубців у видимому діапазоні для контролю положення сканера, зміщення його з осі і визначення швидкості переміщення по поверхні зубців, отримані дані обробляють на ЕОМ з використанням нейронних мереж та ідентифікують пошкодження.

2. Пристрій для локального контролю зубців статорів електричних машин змінного струму, що містить діагностичний комплекс у складі ЕОМ та вимірювальний сканер, який включає систему його переміщення та складений індуктор, який **відрізняється** тим, що вимірювальний сканер, до складу якого входять також нагрівальний індуктор і відеокамера, направляє отримані дані на обробку в ЕОМ, з якої, у випадку зміщення сканера з осі зубців і перевищення швидкості переміщення, подається сигнал на світлоіндикатори.

Винахід відноситься до галузі електротехніки, а саме до застосування засобів індукційного, теплового та відеоконтролю для діагностики шихтованих матеріалів, і може бути використаний при діагностиці поверхні зубців магнітопроводів електричних машин і будь-яких шихтованих пакетів електротехнічної сталі.

Відомий спосіб локальної діагностики сердечників статорів електричних машин з метою виявлення місцевих нагрівів зубців шляхом наведення змінного магнітного потоку на локальних ділянках

зубців разом з тепловим контролем їх поверхні [Анемподистов В.П., Белонин В.К., Дегусаров Ю.А. и др. Выявление местных нагревов сердечников статора // Электротехника. - 1982. - №10. - С. 62-63].

Недоліки даного способу:

- відсутня можливість вірогідного виявлення пошкоджень внаслідок того, що дослідженню підлягають лише ті ділянки, пошкодження яких засвідчив візуальний огляд статора;

(13) C2

(11) 93246

(19) UA

- неможливість розрізнення основних видів пошкоджень зубців статора, а саме - ослаблення пресування і закорочення окремих листів;

- не дозволяє окремо оцінювати стан поверхні зубців, яка є найбільш пошкоджуваною областю статора;

- не дозволяє визначати розміри пошкоджених ділянок. Даний спосіб прийнятий в якості аналогу способу.

Відомий спосіб локальної діагностики статорів електричних машин шляхом змінного перемагнічування його зубців з вимірюванням значень втрат у сталі і магнітної індукції для визначення місцерозташування і характеру пошкоджень. [Деклараційний патент №62491 А, Україна, МКИ G01R 31/34, G01R 33/14, H02K 15/00, "Спосіб діагностики зубцевої зони пакетів електротехнічної сталі електричних машин" / Прус В.В., Родькін Д.Й., Войтех О.А., Петров Р.М., Опубл. 15.12.2003; Бюл. №12].

Недоліки способу:

- низька точність діагностики внаслідок відсутності точного позиціонування і повного прилягання індуктора до зубця через наявність нерівностей поверхні;

- недостатня вірогідність розрізнення видів пошкоджень внаслідок низької чутливості до них діагностичних параметрів;

- низька інформативність через відсутність можливості теплового контролю поверхні зубців.

Даний спосіб прийнятий в якості прототипу способу.

Відомий пристрій для діагностики зубців статорів електричних машин, до складу якого входить П-подібний індуктор разом з набором термопар, призначений для здійснення електромагнітного та теплового контролю стану поверхні зубців [Анемподистов В.П., Белонин В.К., Дегусаров Ю.А. и др. Выявление местных нагревов сердечников статора // Электротехника. - 1982. - №10. - С. 62-63]. Відповідно до застосування пристрою, індуктор приставляється до поверхні зубців і реалізує змінне перемагнічування та контроль параметрів створюваного магнітного потоку. Розміщені на досліджуваній ділянці термопари здійснюють контроль температури статора.

До недоліків цього пристрою належать:

- значні витрати енергії та часу на діагностику;
- трудомісткість процесу діагностики;
- недостатня міра вірогідності отриманої інформації внаслідок можливості перевищення розмірів пошкоджених ділянок, які є джерелом перегрівів, поперечними розмірами індуктора.

Даний пристрій є аналогом пристрою.

Відомий пристрій для локальної діагностики статорів електричних машин, що являє собою складений індуктор, який, безперервно переміщуючись уздовж зубців сердечника, дозволяє одночасно наводити та вимірювати магнітний потік як у двох сусідніх зубцях, замикаючи магнітне коло через ярмо сердечника, так і по кожному із зубців окремо, для визначення питомих втрат і виду пошкодження [Деклараційний патент №62491 А, Україна, МКИ G01R 31/34, G01R 33/14, H02K 15/00, "Спосіб діагностики зубцевої зони пакетів електротехнічної сталі електричних машин" / Прус В.В.,

Родькін Д.Й., Войтех О.А., Петров Р.М., Опубл. 15.12.2003; Бюл. №12].

Недоліками даного пристрою є:

- висока трудомісткість і низька інформативність діагностики внаслідок необхідності візуального контролю за положенням складеного індуктора на досліджуваних зубцях;

- низька вірогідність виявлення та розрізнення видів пошкоджень внаслідок виникнення додаткових похибок при зміні величини повітряного зазору між індуктором та поверхнею зубців і при сході індуктора з осі зубця;

- відсутність можливості виявлення перегрівів у зубцях сердечника. Указаний винахід прийнятий в якості прототипу пристрою.

Метою винаходу є підвищення вірогідності діагностики зубців статорів з виявленням та розрізненням виду пошкоджень та точності визначення розмірів пошкоджених ділянок.

Перелік фігур винаходу:

Фіг.1. Схема способу діагностики зубців статора за допомогою вимірювального сканера;

Фіг.2. Алгоритм процедури опитування вимірювальних каналів сканера у процесі діагностики;

Фіг.3. Алгоритм процедури обробки зображення, отриманого у видимому діапазоні;

Фіг.4. Блок-схема пристрою для реалізації способу локальної діагностики зубців статорів;

Фіг.5. Схема вимірювального сканера.

Спосіб локального контролю зубців статорів електричних машин змінного струму, що забезпечує визначення стану поверхні зубців шляхом вимірювання електричних і магнітних параметрів та відеоідентифікації; відрізняється примусовим нагрівом локальної ділянки зубця шляхом її перемагнічування з фіксацією зображень поверхні в інфрачервоному та видимому діапазоні, використанням для їх обробки системи нейронних мереж; контролем положення, зміщення з осі і швидкості переміщення сканера по поверхні зубця. Спосіб дозволяє підвищити вірогідність виявлення та розрізнення видів дефектів зубців статора при визначенні розмірів і місцерозташування пошкоджених ділянок.

Сутність способу полягає в тому, що вимірювальний сканер, безперервно переміщуючись вздовж кожного з зубців статора, послідовно здійснює примусовий нагрів локальної ділянки зубця шляхом перемагнічування, фіксацію зображення поверхні зубців у інфрачервоному та видимому діапазоні і вимірювання значень магнітної індукції та втрат у сталі зубців з наступною їх обробкою та ідентифікацією пошкоджень системою нейронних мереж.

Результати обробки зображень, отриманих у видимому діапазоні, дозволяють здійснювати контроль положення вимірювального сканера, а у поєднанні з зображеннями, отриманими в інфрачервоному діапазоні, та значеннями втрат у сталі на кожній окремій ділянці поверхні зубців у сукупності дають можливість визначити наявність та вид пошкоджень - ослаблення пресування або замикання окремих листів пакету.

Результатом діагностики є виявлення та розрізнення видів пошкоджень статора, визначення

розмірів пошкоджених ділянок. Отримані у процесі діагностики дані являються основою для формування рекомендацій щодо проведення ремонтних робіт, що дозволяє підвищити якість ремонту статорів.

Схема способу відображена на Фіг.1, що містить наступні позначення:

- 1 - зубці статора;
- 2 - нагрівальний індуктор;
- 3 - відеокамера;
- 4 - складений індуктор для визначення електричних і магнітних параметрів зубця.

Спосіб передбачає здійснення наступної послідовності етапів діагностики (Фіг.2):

- вимірювальний сканер виставляється на край зубця;

- натискання кнопки початку/кінця вимірювань активізує нагрівальний індуктор і відеокамеру;

- відеокамера фіксує зображення у видимому та інфрачервоному діапазонах;

- запускається процедура аналізу відеозображення, призначена для фіксації координат переміщення сканера по зубцю з можливістю визначення початку і кінця зубця та контролю положення сканера відносно осі зубця. У випадку зміщення сканера з осі або перевищення межового значення швидкості, яке визначається припустимою частотою опитування інформаційних каналів сканера, операторові подається сигнал через відповідні світлоіндикатори;

- по ходу переміщення сканера по зубцю при фіксації камерою його початку активізується складений індуктор для визначення електричних і магнітних параметрів зубця;

- по досягненню кінця зубця натискається кнопка ініціалізації початку/кінця вимірювань, у результаті чого вимірювальні канали сканера вимикаються;

- вимірювальний сканер виставляється на наступний зубець і послідовність етапів вимірювання повторюється;

- після завершення вимірювань по кожному з зубців здійснюється обробка та аналіз результатів вимірювань з метою визначення точного місцезнаходження, розмірів та видів пошкоджених ділянок.

При тепловому контролі поверхні зубця використовується нагрівач індукційного типу, що обумовлюється неоднорідністю поверхні об'єкта тестування, а також характером досліджуваних видів пошкоджень. Фізичною основою для його застосування є те, що внаслідок посиленої дії вихрових струмів ділянки зубців з ослабленим пресуванням або з замиканням окремих листів при перемагнічуванні є джерелами локальних перегрівів.

Алгоритм процедури обробки зображень, отриманих у видимому діапазоні, для контролю координат переміщення сканера представлений на Фіг.3. Для цього отримані кадри конвертуються у напівтоновий формат, після чого з метою бінаризації визначається коефіцієнт середньої яскравості зображення. Відповідно до співвідношення розмірів зображення поверхні зубця та зображення фону, що його оточує, у кадрі визначається кількість сегментів, на які розбивається отримане зображення. У кожному із сегментів підраховується кіль-

кість світлих та темних пікселів, яка є визначальним критерієм наявності зубця у кадрі. Поверхні зубця відповідають світлі пікселі зображення, а фону - темні.

Підрахунок кількості світлих пікселів здійснюється у двох напрямках - по горизонталі та по вертикалі, що відповідає ширині та довжині зубця. Відповідність кількості світлих пікселів по горизонталі ширині зубця свідчить про наявність у кадрі зубця. Підрахунок пікселів по вертикалі здійснюється лише для першого кадру при тестуванні кожного з зубців з метою визначення довжини захопленої ділянки їх поверхні. При наступних переміщеннях сканера для контролю його координат положення вздовж осі зубця до початкового значення довжини захопленої першим кадром ділянки зубця додається величина переміщення сканера.

Для виявлення відхилення сканера від заданої траєкторії визначається його еталонне положення відносно осі зубців і координати зон фону по обидві сторони від кромки зубця. Процедура контролю положення зводиться до перевірки наявності і підрахунку кількості світлих пікселів зубця у кожній з цих областей, що відповідають зонам зміщення сканера вліво і вправо від осі зубця.

На етапі обробки результатів вимірювань дані контролю положення індуктора відносно осі зубця дозволяють виявляти параметри, отримані з індукційного датчика, які не є достовірними внаслідок зміщення індуктора з поверхні зубця.

При обробці зображень, отриманих у видимому діапазоні, для виявлення пошкоджень поверхні зубця аналізуються дві характеристики зображення - середня яскравість і контрастність. Критерії виявлення і розрізнення пошкоджень сформовані, виходячи з того, що:

- пікселі поверхні листів сталі пакету зубців статора світліші і мають найбільше значення яскравості;

- міжлистовий простір знаходиться в області локального мінімуму, тобто значення яскравості пікселів у даній області наближається до 0;

- у випадку відсутності пошкодження встановлюється еталонна яскравість  $x_1$ , сумарне значення якої складається з комбінації яскравості поверхні і міжлистових щілин.

У випадку ділянки з ослабленим пресуванням переважає кількість темних пікселів, а середнє значення яскравості зменшується. Для ділянки із замкненими листами переважає кількість світлих пікселів, середнє значення яскравості при цьому збільшується.

Критерії розрізнення пошкоджень мають форму наступних нерівностей:

- на ділянці з ослабленим пресуванням градація яскравості має відповідати умові  $x_{во} < x_{вн}$ , а контрастність наближатись до значення  $\sigma_{во} \rightarrow 255$ , де  $x_{во}$ ,  $\sigma_{во}$  - градація яскравості та контрастність зображення, отриманого у видимому діапазоні, на ділянці з ослабленим пресуванням,  $x_{вн}$  - градація яскравості зображення, отриманого у видимому діапазоні на нормальній ділянці;

- на ділянці з замкненими листами градація яскравості має відповідати умові  $x_{вн} < x_{вз}$ , контраст-

ність наближається до значення  $\sigma_{вз} \rightarrow 0$ , де  $x_{вз}$ ,  $\sigma_{вз}$  - градація яскравості та контрастність зображення, отриманого у видимому діапазоні на ділянці із замкненими листами;

- на ділянці без пошкоджень градація яскравості дорівнює  $x_{вз}$ , а контрастність  $0 < \sigma < 255$ .

При обробці термограм, отриманих при роботі відеокамери в інфрачервоному діапазоні, визначається розподіл температури по нагрітій ділянці. Підвищення рівня теплових випромінювань поверхні зубців є індикатором наявності пошкоджень. Критерієм виявлення перегрівів на поверхні зубця є значення яскравості інфрачервоного зображення - на пошкодженій ділянці значення яскравості відповідає умові  $x_{ін} < x_{ін}$ , де  $x_{ін}$ ,  $x_{ін}$  - значення яскравості інфрачервоного зображення відповідно на нормальній і пошкодженій ділянках.

Обробка зображень, отриманих у видимому та інфрачервоному діапазонах, і формування висновку щодо наявності та виду пошкоджень здійснюється нейронними мережами. Застосування нейронних мереж обумовлюється мінімумом апіорної інформації про об'єкт тестування і відсутністю чітких меж для критеріїв розрізнення пошкоджень по даним відеоспостереження як у видимому, так і у інфрачервоному діапазоні. При вирішенні даної задачі нейронна мережа виконує роль багатоканального класифікатора.

Для обробки зображень, отриманих у видимому та інфрачервоному діапазонах, застосовуються дві незалежні нейронні мережі. Перед поданням відеосигналу на входи мереж виконується їх попередня обробка, що складається з наступних етапів. На першому етапі, подібно до процедури визначення координат переміщення сканера, зображення, отримані у видимому та інфрачервоному діапазоні, переводяться до напівтонового формату та бінаризуються, визначається їх яскравість та контрастність для зображень, отриманих у видимому діапазоні. Другий етап полягає у нормалізації отриманих даних з метою зменшення часу та підвищення точності роботи мережі у процесі навчання.

Навчання нейронних мереж здійснюється за допомогою вибірок, що сформовані на базі сигналів, отриманих на ділянках пакетів сталі із штучно внесеними пошкодженнями заданих видів. У процесі навчання мереж розраховується функція похибки відгуків, на основі якої здійснюється корегування значення ваги кожного з нейронів мереж. Умовою завершення навчання є рівність нулю функції похибки.

На основі вхідних даних кожна з двох мереж формує висновок про стан досліджуваної ділянки пакету, відносячи її до однієї з трьох категорій - із замкненими листами, нормальної чи з ослабленим пресуванням. Кожній категорії відповідають окремі виходи мереж. Функція активації кожного з виходів мережі є сигмоїдальною, що збільшує вірогідність виявлення дефекту незалежно від ступеню пошкодження.

Складений індуктор здійснює перемагнічування статора по одному та двом зубцям з вимірюванням значень величин магнітної індукції та втрат у сталі.

Результати вимірювання електричних і магнітних параметрів разом із висновками нейронної мережі поступають до блока обробки гіпотез. Сформований блоком гіпотез висновок щодо стану кожної досліджуваної ділянки передається до бази даних з результатами тестування у формі змінних, що відповідають виду та ступеню пошкодження.

Пристрій, призначений для локального контролю зубців статорів електричних машин змінного струму, являє собою діагностичний комплекс у складі ЕОМ та вимірювального сканера, що включає складений індуктор та систему його переміщення. Вимірювальний сканер додатково містить нагрівальний індуктор, відеокамеру та індикатори зміщення з осі зубця і перевищення швидкості переміщення сканера.

Пристрій зображено на Фіг.4, де:

5 - вимірювальний сканер;

6 - таймер;

7 - TV-тюнер;

8 - ЕОМ;

9 - програма, що реалізує синхронізацію захвата та обробку кадрів;

10 - блок програмного забезпечення, що відповідає за попередню обробку даних тестування;

10\_1 - програмний блок, що реалізує захват кадрів;

10\_2 - програмний блок, що здійснює розрахунок координат положення сканера на поверхні зубця вздовж його осі;

10\_3 - програмний блок, що реалізує контроль зміщення індуктора відносно осі зубця;

11 - блок відеоідентифікації стану пакету зубців статора;

11\_1 - нейронна мережа для аналізу зображення, отриманого у видимому діапазоні;

11\_2 - нейронна мережа для аналізу зображення, отриманого в інфрачервоному діапазоні;

12 - обчислювальний блок розрахунку електричних і магнітних параметрів статора за результатами вимірювань індукційним датчиком;

13 - блок гіпотез;

14 - база даних результатів тестування.

Пакет сталі 1 тестується за допомогою вимірювального сканера 5, який складається з нагрівального індуктора 2, відеокамери 3 та складеного індуктора 4. Після запуску системи на нагрівальний індуктор 2 та на відеокамеру 3 подається живлення. Вмикається таймер 6. Відеокамера 3 починає зйомку в ІЧ-діапазоні. По закінченню витримки часу камера перемикається до стандартного відеодіапазону. Дані, одержані у ході відеоспостереження, поступають на ЕОМ 8 через тюнер 7, де здійснюється їх обробка та аналіз програмою 9. Блок попередньої обробки даних 10 активує процес захвату кадрів 10\_1, здійснює контроль координат положення сканера на поверхні зубця 10\_2 і контролює зміщення сканера відносно осі зубця 10\_3. Аналіз зображень з метою визначення стану пакета здійснюється блоком відеоідентифікації 11, складовими обчислювальними блоками якого являються нейронні мережі 11\_1 та 11\_2, які реалізують аналіз зображень, отриманих у інфрачервоному та видимому діапазонах відповідно. Розрахунок електричних і магнітних параметрів за

сигналами від складеного індукційного датчика здійснює обчислювальний блок 12. Блок гіпотез 13 формує остаточний висновок стосовно стану пакету, спираючись на висновки нейронних мереж 11\_1, 11\_2 та обчислювального блоку 12. Результатом роботи блоку відеоідентифікації є база даних 14, що містить інформацію про розміщення та вид пошкоджень поверхні зубців статора.

Схема сканера для локального індукційного тестування з відеоідентифікацією представлена Фіг.5, відповідно до якої:

15, 16, 17 - гільзи для нагрівального та складеного індукторів;

18 - захисний корпус сканера;

19, 20, 21 - кріпильні гвинти нагрівального та складеного індукторів;

22 - кріпильні гвинти для відеокамери;

23 - підставка для кріплення коліс;

24 - осі коліс;

25 - опорні штанги;

26 - амортизатори для опорних штанг;

27 - циліндр для кріплення рукоятки сканера;

28 - рукоятка сканера;

29 - кнопка ініціалізації початку тестування зубця;

30 - індикатор зміщення сканера з поверхні зубця;

31 - індикатор перевищення припустимого рівня швидкості сканера;

32 - сполучні інформаційні кабелі та кабелі живлення.

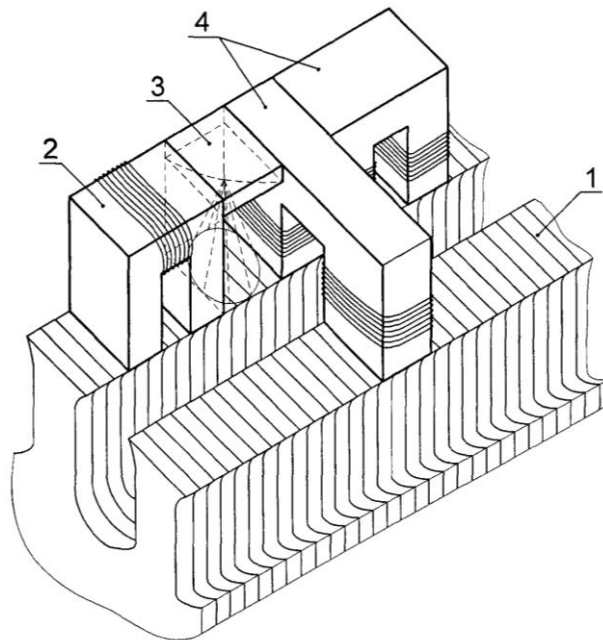
Нагрівальний індуктор 2, відеокамера 3 та складений індуктор 4 розміщені усередині відпові-

дних гільз 15, 16, 17, що є складовими захисного корпусу сканера 18, призначеного для захисту від пошкоджень сканера під час експлуатації. Кріпильні гвинти індукторів 19, 20, 21 є направляючими, що

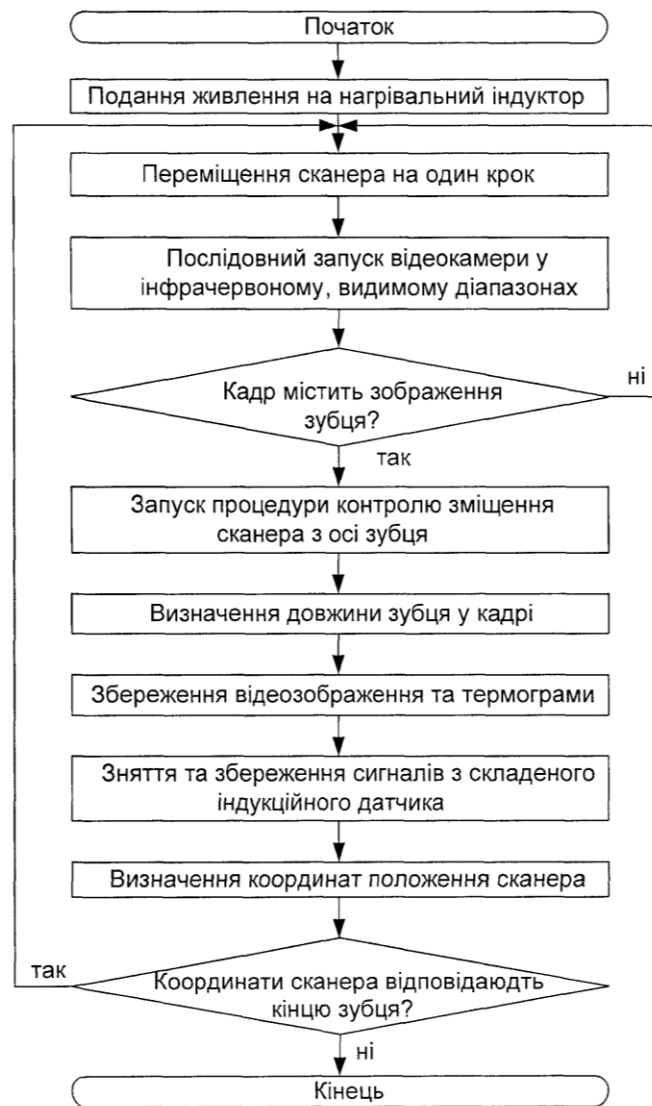
додають більшої жорсткості конструкції і обмежують величину осьового повороту зубців індукторів. Пружини, встановлені на цих гвинтах, дозволяють при допустимому рівні нерівностей поверхні зубців сердечника статора досягати необхідного притискового зусилля у місці контакту індуктор-зубець. Кріпильні гвинти 22 призначені для закріплення відеокамери 3.

У підставці 23 встановлені осі коліс 24. Опорні штанги 25 з амортизаторами 26 можуть у незначних межах змінювати кут нахилу осі індуктора до зубця у залежності від нерівностей його поверхні.

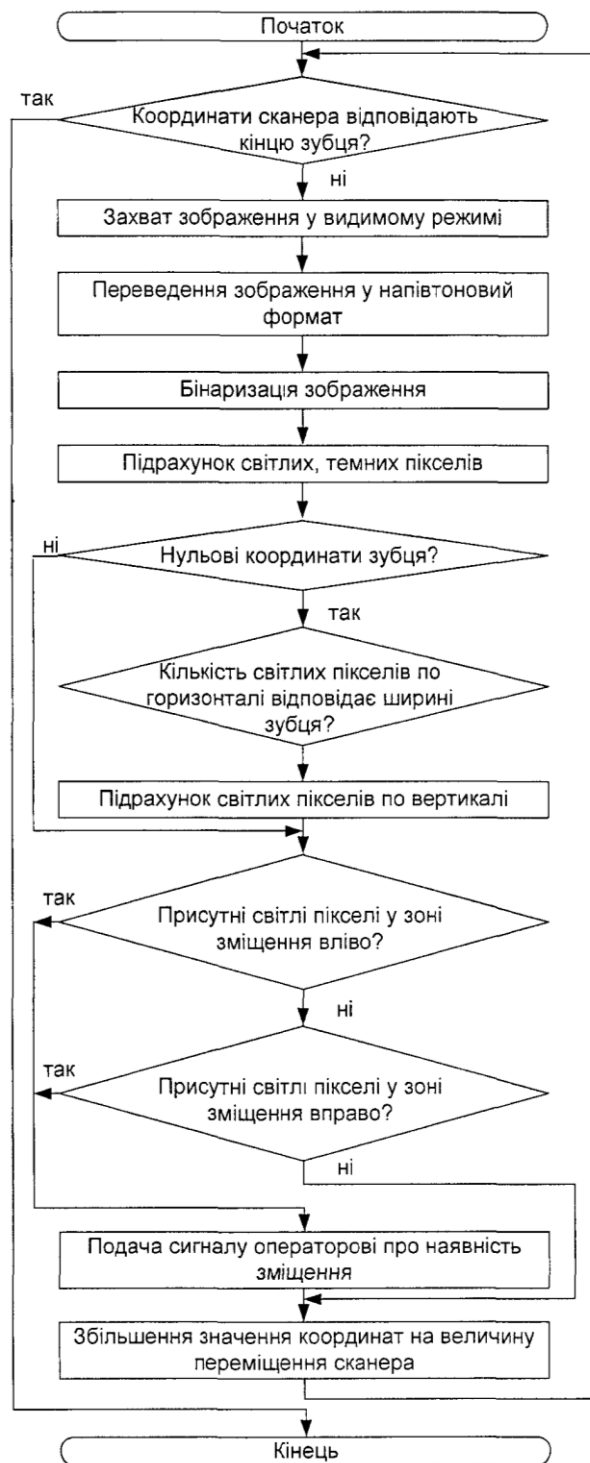
Для керування переміщенням сканера по зубцях сердечника статора до його кришки за допомогою циліндричного шарніра 27 приєднана рукоятка 28. Таке з'єднання перешкоджає відриву коліс сканера від поверхні зубців під час тестування. На ручці встановлена кнопка ініціалізації моменту початку тестування нового зубця 29, а також світлоіндикатори контролю зміщення сканера відносно осі зубця поздовжнього тестування 30 і перевищення допустимого рівня швидкості пересування сканера 31. Протилежний від сканера кінець рукоятки є ізольованим. Сполучні кабелі 32 від кнопки і індуктора проведені усередині рукоятки, причому сигнали від індуктора, з метою зменшення впливу завад, передаються по екранованому кабелю.



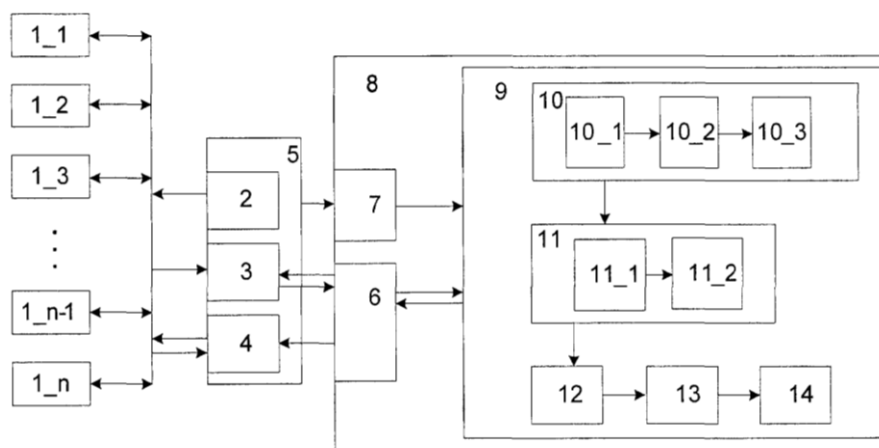
Фіг.1



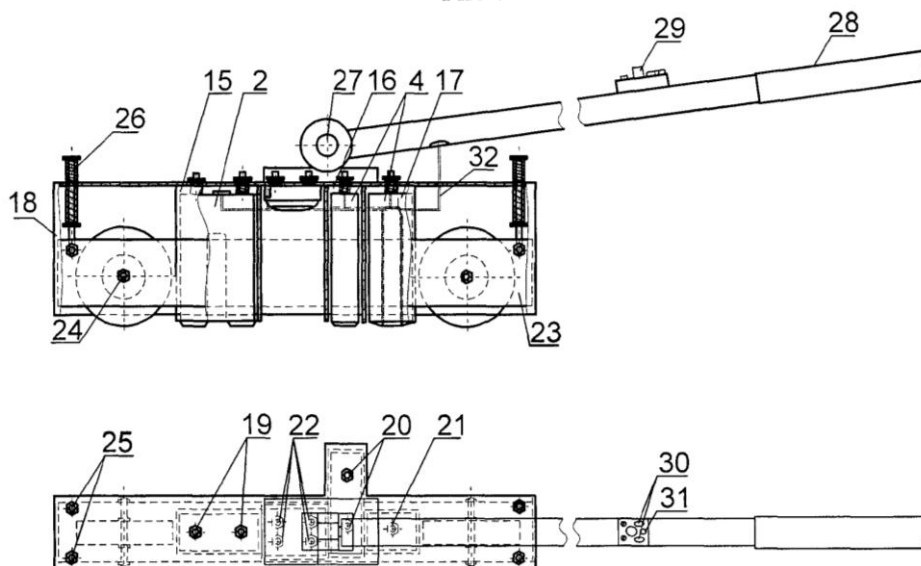
Фіг. 2



Фіг. 3



Фіг. 4



Фіг. 5