

1. Галузь техніки запропонованого винаходу.

Запропонований на розгляд пристрій вимірювання кута вибігу ротора синхронних машин належить до галузі техніки систем автоматичного регулювання та захисту електричних машин.

2. Рівень техніки.

Стійкість режиму роботи синхронної машини в мережі або на автономного споживача зумовлена значенням та зміною кута вибігу ротора δ , який визначається як кут між віссю магнітних полюсів ротора та віссю обертового магнітного поля статора синхронної машини. Зміна кута вибігу ротора $\Delta\delta$, та параметри режиму роботи синхронної машини, які з нею зв'язані, такі наприклад як зміна активної потужності ΔP , або кутової швидкості $\Delta\omega$ (частоти напруги статора синхронної машини Δf) використовуються в існуючих автоматичних регуляторах збудження (АРЗ) синхронних машин для роботи каналів стабілізації коливань ротора синхронної машини при виникненні перехідних процесів. Крім того значення та зміна кута вибігу ротора δ може бути використана в захисті синхронної машини від асинхронного*ходу.

Принцип роботи існуючих пристроїв вимірювання кута вибігу ротора δ полягає в тому, що фаза синхронної електрорушійної сили (Е.Р.С.) E_q жорстко зв'язана з кутовим положенням вала, на якому розташована обмотка збудження. Тому визначення кута вибігу ротора δ зводиться до визначення кута повороту вала відносно вектора напруги мережі U при навантаженні синхронної машини. При холостому ході (ХХ) синхронної машини $\delta=0$, що дозволяє знайти точку його відліку.

Найбільш просто кут δ може бути визначений за допомогою строботометра. При цьому методом на ротор синхронного генератора наноситься мітка, яка освітлюється стробоскопом з частотою спалахів, синхронізованою з частотою напруги мережі U . При обертанні ротору мітка уявляється нерухомою, а при навантаженні синхронної машини вона зміщується на кут δ . Для відліку δ в коло синхронізації спалахів стробоскопу включається невеликий вимірювальний фазорегулятор з кутовою шкалою повороту ротора. При цьому чим більшу кількість пар полюсів має синхронна машина, тим менший фізичний кут відповідає 1° електричного кута, тому для отримання достатньо точних відліків мітки повинні наноситися на ділянки валу синхронної машини більшого діаметру, наприклад бандажі ротору [1]. Недоліками таких пристроїв вимірювання кута вибігу ротора δ , є те, що на їх покази впливають крутильні коливання валу, вимірювання кута вибігу ротора можливо тільки один раз за оборот вала, невелика точність вимірювання як в ustalених так особливо в перехідних режимах роботи синхронної машини.

У відповідності з другим пристроєм, який взятий за прототип, метод вимірювання кута вибігу ротора синхронної машини заснований на визначенні часового інтервалу між нулем змінної напруги мережі та імпульсом від датчика кутового положення вала, заповненням одержаного проміжку часу тактовими імпульсами з послідовним їх підрахуванням [2]. Вимірювання виконується з кожним оборотом вала синхронної машини. Пристрій складається з датчиків та електронної схеми вимірювання. Вхідні сигнали пристрою поступають від трансформатора напруги синхронної машини та датчика обертів, розташованого на валу синхронної машини. Вимірювальна схема приладу виконана на мікросхемах серії K155, операційних підсилювачах K140УД1 та транзисторах КТ315 і включає в себе вхідний субблок на який заводиться напруга живлення та вхідні сигнали, субблок підрахунку кута вибігу ротора, субблок виділення кутів вибігу ротора та асинхронного ходу, субблок фіксації виділених кутів вибігу ротора та три субблоки індикації для реєстрації та відображення отриманого значення кута вибігу ротора.

Недоліками розглянутого пристрою (прототипу) вимірювання кута вибігу ротора δ є те, що на його покази також впливають крутильні коливання валу, вимірювання кута вибігу ротора можливо тільки один раз за оборот вала, невелика точність вимірювання як в ustalених так особливо в перехідних режимах роботи синхронної машини.

Однак головним недоліком розглянутих вище пристроїв є те, що вимірювання кута вибігу ротора δ зв'язано безпосередньо з механічним положенням валу синхронної машини, а відповідно з зміною його кінетичної енергії, яка характеризується значною постійною часу T_j . Це не дозволяє створити на їх основі швидкодіючі канали стабілізації руху ротора в АРЗ, або пристрої стабілізації енергосистем (PSS), відповідно термінології прийнятій в західній літературі. Відповідно регулювання збудження синхронних машин з використанням існуючих пристроїв вимірювання кута вибігу ротора δ , частоти напруги f (кутової швидкості ротора $\omega=2\pi f$) не дозволяє встановлювати великі значення коефіцієнтів підсилення для ефективного демпфірування електромеханічних коливань, а в деяких випадках (при швидких змінах значних змін енергії магнітного поля синхронної машини) призводить до порушення стійкої роботи синхронної машини в мережі.

Аналогом винаходу є пристрій ИФ-01 вимірювання кута вибігу ротора [2].

3. Суть винаходу.

В основу винаходу поставлено задачу вимірювання кута вибігу ротора δ в ustalених та перехідних режимах роботи синхронної машини шляхом вимірювання радіальної B_r та тангенціальної B_t складових вектора індукції B_{Σ} результуючого магнітного поля в просторі робочого зазору, визначення арктангенса їх відношення, та використання розрахованого значення δ в автоматичних регуляторах збудження (АРЗ) та релейному захисті від асинхронного ходу для забезпечення стійкої роботи синхронної машини при виникненні електромеханічних коливань ротора з різними частотами та захисту від пошкоджень при виникненні асинхронного ходу. Від прототипу зазначений спосіб відрізняється тим, що для точного визначення кута вибігу ротора синхронної машини δ в якості параметрів, що вимірюються, використовуються саме тангенціальна та радіальна складові вектора індукції результуючого магнітного поля в просторі робочого зазору синхронної машини, а не інтервал часу між нулем змінної напруги мережі та імпульсом від датчика кутового положення вала. Тому в якості датчиків початкової інформації використовують два датчики Холла, розташовані в просторі робочого зазору синхронної машини певним чином.

Розглянемо можливість використання параметрів магнітного поля в просторі робочого зазору для вимірювання δ на основі рівняння руху ротора синхронного генератора [3]:

$$T_J \frac{d^2 \delta}{dt^2} = T_J \frac{d\omega}{dt} = M_{\text{мех}} - \frac{P_{\text{ел}} + \Delta P_{\text{ст}} - \frac{dW_c}{dt}}{\omega_0 + \frac{d\delta}{dt}} \quad (1)$$

де:

T_J - постійна інерції синхронної машини;

δ - кут вибігу ротора синхронної машини;

ω - кутова швидкість обертання ротору синхронної машини;

$M_{\text{мех}}$ - механічний момент, прикладений до ротору синхронної машини;

ω_0 - синхронна кутова швидкість обертання синхронної машини;

$P_{\text{ел}} = M\omega_0 + M d\delta/dt$ - електромагнітна потужність, що передається з ротора на статор;

M - момент електромагнітних сил, діючих на ротор;

$\Delta P_{\text{ст}}$ - втрати в активному опорі статора синхронної машини;

dW_c/dt - додаткова потужність, виникаюча при зміні електромагнітної енергії в індуктивностях синхронної машини.

Для синхронного генератора обертаючий механічний момент $M_{\text{мех}}$ повинен урівноважувати момент, зв'язаний з електричною потужністю, що віддається в мережу $P_{\text{ел}}$, потужністю, що витрачається в активному опорі статора $\Delta P_{\text{ст}}$ та потужністю, що виникає при зміні електромагнітної енергії в індуктивностях синхронної машини dW_c/dt . Кут δ не може миттєво змінитися в перехідному режимі роботи, відповідно, електрична енергія, яка видається (в режимі генератора), або споживається (в режимі двигуна) синхронною машиною не може миттєво перетворитися із механічної енергії, накопленої обертаючимися масами. Внаслідок значної механічної та електромагнітної інерційності ротора синхронної машини, енергія, що видається в режимі генератора, або споживається в режимі двигуна, в початковий проміжок часу перехідного процесу являє собою енергію, накопичену в магнітних полях контурів статора. Зміна магнітної енергії контурів статора супроводжується зміною результуючої магніторухомої сили (М.Р.С.) в робочому зазорі синхронної машини, що призводить до зміни кута вибігу ротора δ . Накоплена механічна енергія валу буде грати важливу роль, коли кут δ уже зміниться. Існуючі пристрої вимірювання кута вибігу ротора реагують тільки на другий етап виникаючих перехідних процесів, а саме на зміну кінетичної енергії ротору синхронної машини. Оскільки при цьому не враховується зміна енергії магнітного поля контурів статора і відповідно початкова зміна кута вибігу ротора $\Delta_0 \delta$, а зміна кутового положення валу затримується внаслідок значної постійної часу T_J , то виникає похибка в визначенні δ і відповідно в оцінці небалансу моментів на валу синхронної машини ΔM . Відповідно регулювання збудження синхронних машин з використанням існуючих пристроїв вимірювання кута вибігу ротора δ , частоти напруги f (кутової швидкості ротора $\omega = 2\pi f$) не дозволяє ефективно демпфувати електромеханічні коливання ротора, а в деяких випадках (при швидких значних змінах енергії магнітного поля синхронної машини) призводить до порушення стійкої роботи синхронної машини в мережі.

Розглянемо зв'язок між кутом δ та параметрами магнітного поля в робочому зазорі синхронної машини. Радіальна B_r та тангенціальна B_t складові вектора індукції результуючого магнітного поля в робочому зазорі синхронної машини, одержаного в результаті геометричного складання векторів індукцій магнітних полів струмів обмоток збудження та якоря, а також кут вибігу ротора показано на векторній діаграмі фігура 1.

В запропонованому пристрої, для вимірювання тангенціальної та радіальної складових вектора індукції результуючого магнітного поля використовуються два датчика Холла, розташованих посередині робочого зазору синхронної машини під кутом $(\pi/2p)$ радіан один до одного, де p - кількість пар полюсів ротора синхронної машини, як показано на фігурі 2, що є суттєвою ознакою, відрізняючого його від існуючих пристроїв вимірювання кута вибігу ротора. Причому обидва датчики мають загальне джерело живлення і конструктивно об'єднані в один. Таке розташування та конструкція датчиків дозволяє зменшити вплив полів пазового, лобового та диференційного розсіювання на результати вимірювання.

Одержані з датчиків електрорушійні сили (Е.Р.С.) Холла E_r та E_t , пропорційні радіальній та тангенціальній складовим вектора індукції результуючого магнітного поля, подаються відповідно на канал радіальної складової та канал тангенціальної складової електронної схеми вимірювання. До складу кожного каналу входить активний селективний фільтр, активний двошполуперіодний випрямляч та підсилювач сигналів. Смуга пропускання активних селективних фільтрів визначається промисловою частотою з якою працює синхронна машина. Тобто, якщо промислова частота роботи синхронної машини в мережі складає 50Гц, то смуга пропускання активних селективних фільтрів вибирається в діапазоні 45-55Гц. Для промислової частоти 60Гц смуга пропускання активних селективних фільтрів вибирається відповідно 55-65Гц. Використання активних селективних фільтрів дозволяє виділити в наведених Е.Р.С. Холла складову, пропорційну індукції магнітного поля основної гармоніки, усунути вплив полів пазового, лобового та диференційного розсіювання на результати вимірювання, що є суттєвою ознакою, відрізняючою запропонований пристрій від існуючих. Відфільтровані значення E_{r0} та E_{t0} , пропорційні радіальній та тангенціальній складовим вектора індукції основної гармоніки магнітного поля випрямляються за допомогою активних двошполуперіодних випрямлячів та підсилюються за допомогою підсилювача сигналів з можливістю регулювання чутливості та установки нуля. Тим самим забезпечується можливість налагодження пристрою в режимі холостого ходу синхронної машини при роботі на обертах без струму збудження $E_{r0}=0$, $E_{t0}=0$, і при подачі струму в обмотку збудження $E_{r0} \neq 0$, $E_{t0} \neq 0$.

Кут вибігу ротора синхронної машини δ знаходиться як арктангенс відношення перетворених та настроєних значень тангенціальної E_{t0} та радіальної E_{r0} складових результуючого магнітного поля основної гармоніки:

$$\delta = \arctg(E_{t0}/E_{r0}); \quad (2)$$

Принципова електрична схема вимірювальних каналів радіальної та тангенціальної складових запропонованого пристрою показана на фігурі 3. Вихідні значення E_{t0} та E_{r0} подаються на аналогово-цифровий

перетворювач (АЦП) мікропроцесорного АРЗ або мікропроцесорний захист від асинхронного ходу, в постійний запам'ятовуючий пристрій (ПЗП) котрих записана обчислювальна програма для визначення кута вибігу ротора синхронної машини за формулою (2). Кращим виконанням є побудова пристрою в вигляді єдиної інтегральної магніточутливої мікросхеми, розміщеної в стандартному корпусі, та маючому нормовані виходи для підключення до АЦП, та розміщеної посередині робочого зазору синхронної машини за допомогою діелектричної штанги.

4. Перелік фігур, креслень.

Фігура №1 - діаграма векторів індукції магнітних полів обмоток збудження та якоря в просторі робочого зазору синхронної машини. На фігурі позначено:

B_1 - вектор індукції магнітного поля, наведеної струмом обмотки збудження;

B_2 - вектор індукції магнітного поля, наведеної струмом обмотки якоря;

B_Σ - вектор індукції результуючого магнітного поля в просторі робочого зазору;

$B_r = B_\Sigma \cos \delta$ - радіальна складова вектора індукції результуючого магнітного поля B_Σ ;

$B_t = B_\Sigma \sin \delta$ - тангенціальна складова вектора індукції результуючого магнітного поля B_Σ ;

δ - кут вибігу ротора синхронної машини;

Фігура №2 - два датчика Холла, конструктивно об'єднані в один для вимірювання тангенціальної та радіальної складових вектора індукції магнітного поля. На фігурі позначено:

B_t , B_r - тангенціальна та радіальна складові вектора індукції магнітного поля;

E_t , E_r - тангенціальна та радіальна електрорушійні сили (Е.Р.С.) Холла від відповідних компонент вектора індукції результуючого магнітного поля B_Σ ;

p - кількість пар полюсів ротора синхронної машини;

$(\pi/2p)$ - кут, під яким розташовані датчики Холла один до одного.

Фігура №3 - функціональна електрична схема каналів для вимірювання радіальної та тангенціальної складових вектора індукції результуючого магнітного поля в просторі робочого зазору. На фігурі позначено:

DX_r - датчик Холла, вимірюючий радіальну складову вектора індукції;

DX_t - датчик Холла, вимірюючий тангенціальну складову вектора індукції;

R_1-R_6 , $R_{19}-R_{24}$ - постійні опори схеми активних селективних фільтрів каналів вимірювання радіальної та тангенціальної складових вектора індукції;

C_1 , C_2 , C_5 , C_6 - ємності схеми активних селективних фільтрів каналів вимірювання радіальної та тангенціальної складових вектора індукції;

AR_1-AR_3 , AR_8-AR_{10} - операційні підсилювачі схеми активних селективних фільтрів каналів вимірювання радіальної та тангенціальної складових вектора індукції;

R_7 , R_9 , R_{10} , $R_{25}-R_{27}$ - постійні опори схеми активних двофолуперіодних випрямлячів каналів вимірювання радіальної та тангенціальної складових вектора індукції;

C_3 , C_4 - накопичуючі ємності схеми активних двофолуперіодних випрямлячів каналів вимірювання радіальної та тангенціальної складових вектора індукції;

D_1-D_4 - діоди схеми активних двофолуперіодних випрямлячів каналів вимірювання радіальної та тангенціальної складових вектора індукції;

AR_4 , AR_5 , AR_{11} , AR_{12} - операційні підсилювачі схеми активних двофолуперіодних випрямлячів каналів вимірювання радіальної та тангенціальної складових вектора індукції;

$R_{11}-R_{16}$, $R_{29}-R_{34}$ - постійні опори схеми підсилювачів каналів вимірювання радіальної та тангенціальної складових вектора індукції;

R_{17} , R_{28} - змінні опори схеми підсилювачів каналів вимірювання радіальної та тангенціальної складових вектора індукції для установки нульового виходу каналів;

R_{18} , R_{35} - змінні опори схеми підсилювачів каналів вимірювання радіальної та тангенціальної складових вектора індукції для установки чутливості каналів;

AR_6 , AR_7 , AR_{13} , AR_{14} - операційні підсилювачі схеми підсилення каналів вимірювання радіальної та тангенціальної складових вектора індукції;

12V - джерело живлення пристрою для вимірювання кута вибігу ротора;

E_{10} , E_{r0} - тангенціальна та радіальна електрорушійні сили (Е.Р.С.) Холла від відповідних компонент вектора індукції основної гармоніки результуючого магнітного поля B_Σ .

5. Відомості, які підтверджують можливість здійснення винаходу.

Пристрій вимірювання кута вибігу ротора синхронних машин включає в себе два датчика Холла, які розташовані посередині робочого зазору синхронної машини під кутом $(\pi/2p)$ радіан один до одного, де p - кількість пар полюсів ротора синхронної машини, як показано на фігурі 2, та електронну схему показану на фігурі 3, яка виконує функції фільтрації, випрямлення, підсилення і регулювання сигналів на виході датчиків Холла. Пристрій виконується в вигляді єдиної інтегральної магніточутливої мікросхеми, розміщеної в стандартному корпусі, яка об'єднує датчики Холла та пропоновану електронну схему з нормованими виходами для підключення до АЦП, та розміщеної посередині робочого зазору синхронної машини за допомогою діелектричної штанги. Електрорушійна сила на виході одного датчика Холла (DX) Е.Р.С. E_{ix} прямо пропорційна складовій вектора індукції магнітного поля B_i , перпендикулярній вимірювальній площині датчика:

$$E_{ix} = (I \times B_i \times R \times 10^{-8}) / (\mu_r \times d \times \varphi(I/a)); \quad (2)$$

де: $i=r, t$ - позначення індексу радіальної та тангенціальної складових результуючого вектора індукції магнітного поля в робочому зазорі синхронної машини B ;

R - постійна Холла;

d, l, a - геометричні розміри DX ;

$\varphi(I/a)$ - функція, залежна від розмірів DX ;

I - струм зразкового джерела живлення.

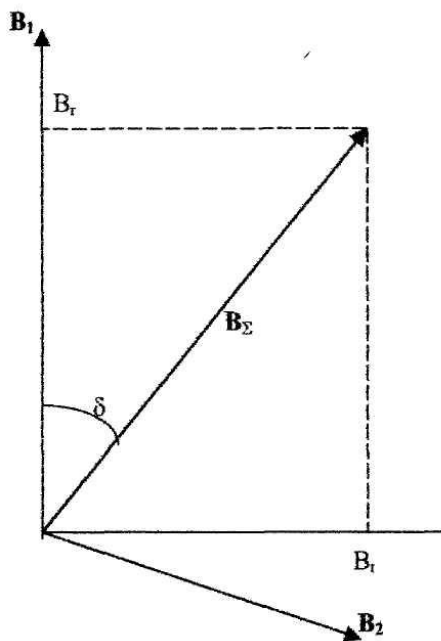
Пристрій вимірювання кута вибігу ротора синхронних машин, зображений на фігурі 3, працює наступним

чином. Одержані з датчика Холла $D\chi_r$, вимірюючого радіальну складову вектора індукції, та датчика Холла $D\chi_t$, вимірюючого тангенціальну складову вектора індукції, Е.Р.С. Холла E_r та E_t , подаються на вхід активних селективних фільтрів, виконаних відповідно на операційних підсилювачах AR1-AR3 та AR8-AR10. Смуга пропускання активних селективних фільтрів відповідає діапазону частот 45-55Гц при роботі синхронної машини з промисловою частотою 50Гц, та 55-65Гц при роботі синхронної машини з промисловою частотою 60Гц. Відфільтровані значення E_{r0} та E_{t0} пропорційні радіальній та тангенціальній складовим вектора індукції основної гармоніки магнітного поля, випрямляються за допомогою активних двохполуперіодних випрямлячів виконаних відповідно на операційних підсилювачах AR4, AR5 та AR11, AR12 та підсилюються за допомогою підсилювачів сигналів з можливістю регулювання чутливості та установки нуля виконаних відповідно на операційних підсилювачах AR6, AR7 та AR13, AR14. Тим самим забезпечується можливість налагодження пристрою в режимі холостого ходу синхронної машини при роботі на обертах без струму збудження $E_{r0}=0$, $E_{t0}=0$, і при подачі струму в обмотку збудження $E_{r0}\neq 0$, $E_{t0}\neq 0$. Вихідні значення E_{t0} та E_{r0} подаються на аналогово-цифровий перетворювач (АЦП) мікропроцесорного АРЗ або мікропроцесорний захист від асинхронного ходу, в постійний запам'ятовуючий пристрій (ПЗП) котрих записана обчислювальна програма для визначення кута вибігу ротора синхронної машини за формулою (1):

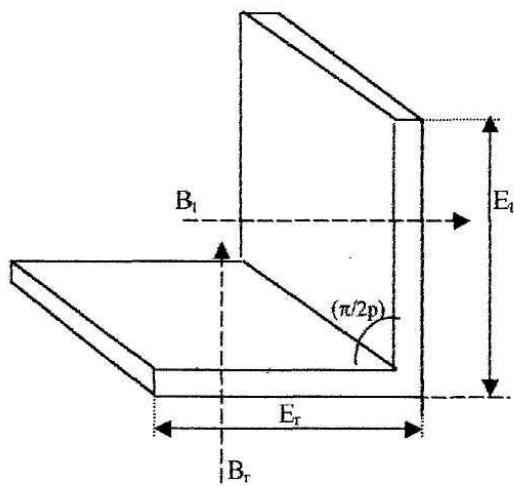
$$\delta = \arctg(E_{t0}/E_{r0})$$

6. Список літератури.

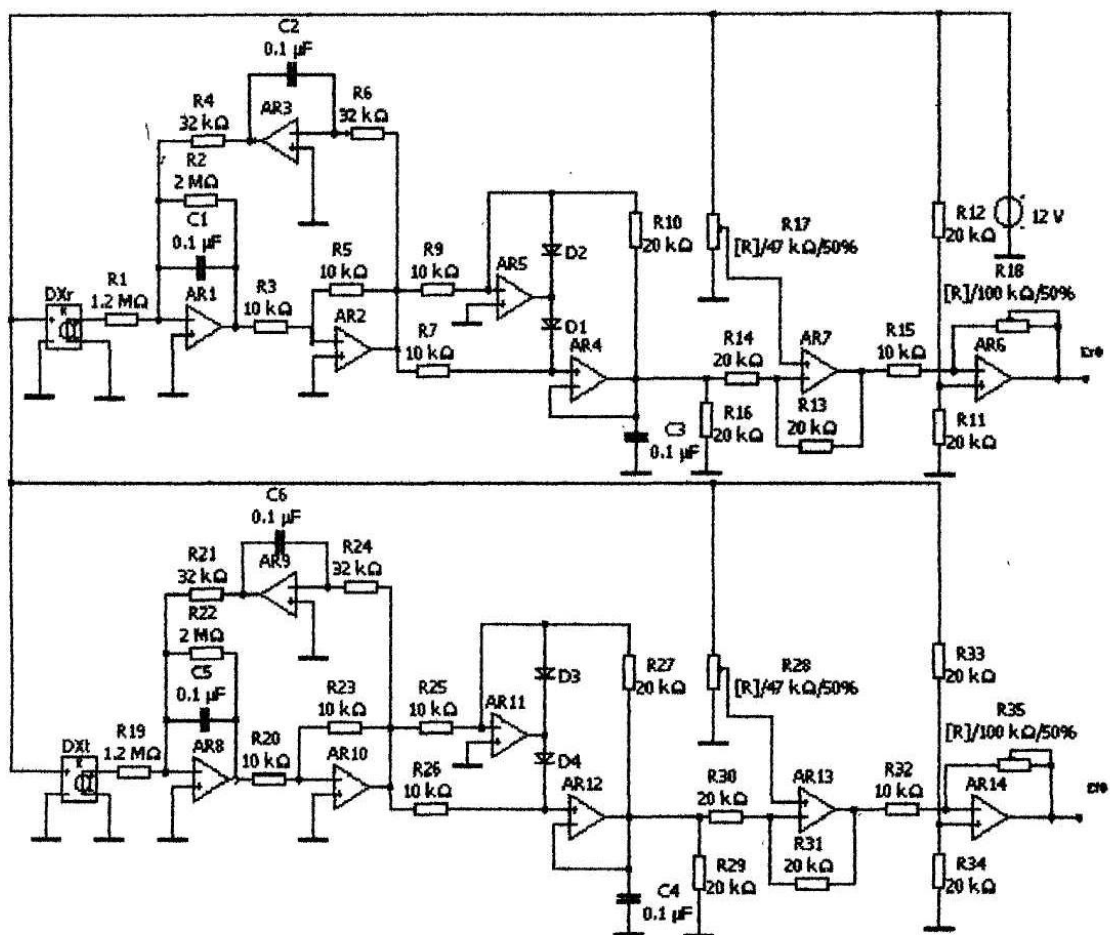
1. Коварский Е.М., Янко Ю.И. Испытание электрических машин. М.: Энергоатомиздат, 1990.
2. Устройство ИФ-01 измерения угла выбега. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. Предприятие "Южтехэнерго", Львов, 1988, 10с.
3. Электротехнический справочник: В 3т. Т.3 в 2 кн. Кн.1. Производство и распределение электрической энергии (Под общ. ред. Профессоров МЭИ: И.Н.Орлова (гл.ред.) и др.) 7-е изд., испр. и доп. - М.: Энергоатомиздат, 1988. - 880с.



Фиг. 1



Φir. 2



Φir. 3