



УКРАЇНА

(19) UA (11) 34637 (13) A

(51) 6 G01R19/00

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ
І НАУКИ УКРАЇНИДЕРЖАВНИЙ ДЕПАРТАМЕНТ
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
ВЛАСНОСТІ

ОПИС

ДО ДЕКЛАРАЦІЙНОГО ПАТЕНТУ
НА ВИНАХІДвидається під
відповідальність
власника
патенту

(54) ПРИСТРІЙ ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ ВИСОКИХ НАПРУГ

(21) 98105441

(22) 16.10.1998

(24) 15.03.2001

(46) 15.03.2001, Бюл. № 2, 2001 р.

(72) Скрипник Юрій Олексійович, Скирта Михайло Андрійович, Куцинський Олег Анатолійович

(73) ДЕРЖАВНА АКАДЕМІЯ ЛЕГКОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ УКРАЇНИ

(57) Пристрій для вимірювання високих напруг, який містить масштабний подільник напруги, високовольне плече якого виконане з високоомного резистора і підключене до шини високої напруги, низьковольне плече виконане з низькоомного резистора і заземлене та низьковольний вольтметр, який відрізняється тим, що в нього введені польовий транзистор, витік якого з'єднаний з потенціальним вводом низькоомного

резистора низьковольного плеча масштабного подільника напруги, два додаткових послідовно з'єднаних низькоомних резистори, які включені між високовольним плечем масштабного подільника напруги і стоком польового транзистора, автоматичний ключ, підключений паралельно двом додатковим низькоомним резисторам, до середньої точки з'єднання яких підключений паралельно низьковольтний вольтметр, коло з послідовно з'єднаних амплітудного детектора, фільтра нижніх частот, підсилювача частоти комутації ключа, фазочутливого випрямляча та інтегратора, вихід якого з'єднаний з затвором польового транзистора, підключене паралельно до середньої точки з'єднання додаткових низькоомних резисторів, і релаксаційний генератор, вихід якого з'єднаний з керуючим входом автоматичного ключа і керуючим входом фазочутливого випрямляча.

Винахід належить до електровимірювальної техніки і може бути використаний для вимірювання високих напруг в колах змінного струму промислової частоти (50–60 Гц) і колах постійного струму.

Сучасна практика і наукові дослідження потребують вимірювань високих та надвисоких напруг до 10–100 МВ. Так, введені в дію лінії електропередач з напругою 1,2–1,5 МВ, проєктуються лінії передачі та енергетичне устаткування на більш високі напруги. У високовольних випробувальних установках напруги досягають декількох мегавольт, а в термоядерних установках використовуються напруги біля десятків МВ.

Економічні міркування і вимоги оптимізації режимів роботи енергосистем та енергетичних об'єктів висувають задачу підвищення точності і вимірювання високих напруг, яка зараз характеризується похибками 1,5–2,5% і більше. Для підвищення якості електроенергії необхідно знизити похибки робочих засобів вимірювань до 0,1–0,5%, а зразкових до 0,02–0,05%. Виконання цих вимог зв'язано з технічними труднощами створення зразкових високовольних засобів та необхідністю високоякісної ізоляції засобів вимі-

рювань від високих напруг (див. Сви П.М. Контроль изоляции оборудования высокого напряжения. 2-е изд. перераб. и доп. – М.: Энергия, 1998, с. 78–80).

Відомий пристрій для вимірювання високих напруг (див. Грибанов Ю.И. Измерения в высокоомных цепях – М – Л. Энергия, 1987, с. 26–29), який містить в собі кіловольтметр з електростатичним механізмом і послідовно з'єднаний з ним додатковий конденсатор для змінного струму і додатковий резистор для постійного струму. Паралельно вимірювальному механізму і частині додаткового резистора включається розрядник, який захищає пристрій від перенапруг. Через неминучі зміни вхідної ємності електростатичного механізму виникає перерозподіл падінь напруг на вимірювальному механізмі кіловольтметра і на додатковому резисторі або додатковій ємності, що порушує пропорційну залежність між вхідною і вихідною напругами, тобто змінює коефіцієнт ділення масштабного подільника напруги. Нелінійність перетворення не дозволяє знизити похибку вимірювання менше 1%. На високих та надвисоких напругах важко виконати додатковий резистор з стабільними параметрами і якісною

(19) UA (11) 34637 (13) A

ізоляцією, що значно підвищує вартість масштабного подільника високих напруг.

Відомий також пристрій для вимірювання високих напруг (див. Спектор С. А. Электрические измерения физических величин. Методы измерений — Л. Энергоатомиздат, Ленингр. отделение 1987, с. 48–50), який містить масштабний подільник напруги, високовольтне плече якого виконане з високоомного резистора і підключене до шини високої напруги, низьковольтне плече виконане з низькоомного резистора і заземлене та низьковольтний вольтметр.

Крім того, у масштабному подільнику напруги пристрою високовольтне плече безпосередньо з'єднане з низьковольтним, і точка їх з'єднання є виходом масштабного подільника напруги, а низьковольтний вольтметр підключений до виходу масштабного подільника.

Однак неминуча нестабільність високоомного плеча масштабного подільника напруги не дозволяє одержати високоточні результати вимірювання. Причиною нестабільності високоомного резистора з високовольтною ізоляцією є струми виткання, які залежать від температури і вимірюваної напруги, коронний розряд, мікропробій і таке інше. Підвищення стабільності високоомних високовольтних резисторів зв'язано з великими затратами і технічними труднощами.

В основу винаходу покладена задача створення такого пристрою для вимірювання високих напруг, в якому введення нових елементів і зв'язків дозволило б стабілізувати коефіцієнт ділення масштабного подільника напруги при нестабільному високоомному резисторі високовольтного плеча масштабного подільника напруги, що дозволить підвищити точність вимірювання високих напруг і знизити вартість масштабного подільника напруги.

Поставлена задача вирішується тим, що в пристрій для вимірювання високих напруг, який містить масштабний подільник напруги, високовольтне плече якого виконане з високоомного резистора і підключене до шини високої напруги, низьковольтне плече виконане з низькоомного резистора і заземлене та низьковольтний вольтметр, згідно з винаходом, введені польовий транзистор, витік якого з'єднаний з потенціальним вводом низькоомного резистора низьковольтного плеча масштабного подільника напруги, два додаткових послідовно з'єднаних низькоомних резистори, які включені між високовольтним плечем масштабного подільника напруги і стоком польового транзистора, автоматичний ключ, підключений паралельно двом додатковим низькоомним резисторам, до середньої точки з'єднання яких підключений паралельно низьковольтний вольтметр, коло з послідовно з'єднаних амплітудного детектора, фільтра нижніх частот, підсилювача частоти комутації ключа, фазочутливого випрямляча та інтегратора, вихід якого з'єднаний з затвором польового транзистора, підключене паралельно до середньої точки з'єднання додаткових низькоомних резисторів, і релаксаційний генератор, вихід якого з'єднаний з керуючим входом автоматичного ключа і керуючим входом фазочутливого випрямляча.

Введення в низьковольтну частину пристрою двох низькоомних резисторів, шунтованих автоматичним ключем, які періодично комутуються прямокутною напругою релаксаційного генератора, використання середньої точки з'єднання низькоомних резисторів як виходу масштабного подільника напруги, включення послідовно з резистором низьковольтного плеча подільника польового транзистора, опір якого керується напругою від підключеного до виходу масштабного подільника напруги кола з амплітудного детектора, фільтра нижніх частот, підсилювача частоти комутації автоматичного ключа, фазочутливого випрямляча та інтегратора дозволяють автоматично керувати опором низьковольтного плеча подільника напруги в залежності від поточного опору високовольтного плеча подільника, досягаючи заданого співвідношення між високоомними і низькоомними опорами масштабного подільника напруги. При цьому результуючий коефіцієнт ділення подільника напруги стає залежним тільки від відношення опорів введених двох низькоомних резисторів з стабільними параметрами, що дозволяє підвищити точність вимірювання високих напруг низьковольтним вольтметром і знизити вартість масштабного подільника напруги за рахунок використання у високовольтному плечі дешевих ізоляторів замість прецизійних високовольтних резисторів.

На рисунку зображена електрична функціональна схема пристрою для вимірювання високих напруг.

Пристрій містить шину 1 високої напруги, до якої підключені послідовно з'єднані високоомний резистор 2 та низькоомні резистори 3 і 4, канал польового транзистора 5 і низькоомний резистор 6. Релаксаційний генератор 7 з'єднаний з керуючим входом автоматичного ключа 8, який підключений паралельно резисторам 3 і 4. До середньої точки з'єднання цих резисторів підключений вольтметр 9 і послідовно з'єднані амплітудний детектор 10, фільтр 11 нижніх частот, підсилювач 12 частоти комутації ключа, фазочутливий випрямляч 13 та інтегратор 14. Вихід інтегратора з'єднаний з затвором польового транзистора 5, а керуючий вхід фазочутливого випрямляча 13 з'єднаний з виходом релаксаційного генератора 7. Резистор 6, вольтметр 9 і інтегратор 14 заземлені.

Пристрій для вимірювання високих напруг працює таким чином.

Вимірювання синусоїдальної напруги $U_1 = U_m \sin(\omega t + \varphi)$ промислової частоти ω з шини високої напруги 1 подається на масштабний подільник напруги, складений високоомним резистором 2 з високовольтною ізоляцією і низькоомними резисторами 3 і 4, каналом польового транзистора 5 і низькоомним резистором 6. Вихідна низьковольтна напруга подільника, яка знімається з середньої точки з'єднання резисторів 3 і 4,

$$U_2 = \frac{U_m}{K_1} \sin(\omega t + \varphi), \quad (1)$$

де K_1 — коефіцієнт ділення подільника напруги.

Релаксаційний генератор 7 виробляє прямокутні імпульси, які керують роботою авто-

матичного ключа 8. Частота проходження керуючих імпульсів Ω вибирається в 5–10 раз меншою частоти ω вимірюваної напруги (5–10 Гц). В результаті періодичних замикань ключа 8 коефіцієнт ділення подільника напруги змінюється від значення (ключ 8 розімкнений)

$$K_1' = \frac{R_1 + R_2 + R_3 + R_4}{R_3 + R_4} \quad (2)$$

до значення (ключ 8 замкнений)

$$K_1'' = \frac{R_1 + R_4}{R_4} \quad (3)$$

де R_1 – опір високоомного резистора 2;

R_2 і R_3 – опори низькоомних резисторів 3 і 4 відповідно;

R_4 – сумарний опір польового транзистора 5 і низькоомного резистора 6.

Через періодичні зміни коефіцієнта ділення подільника напруги на амплітудний детектор 10 впливають пакети змінних напруг тривалістю $\Delta t = \pi/\Omega$ з амплітудами:

$$U_{m2} = U_{m1}/K_1', \quad (4)$$

$$U_{m2} = U_{m1}/K_1'' \quad (5)$$

В результаті детектування пакетів змінних напруг не рівних амплітуд на виході фільтра 11 нижніх частот виділяється напруга прямокутної обвідної пакетів частоти комутації Ω . Амплітуда змінної напруги частоти комутації

$$U_{m3} = SK_2 \frac{U_{m1} - U_{m2}}{2} \quad (6)$$

де S – чутливість детектора 10;

K_2 – коефіцієнт передачі фільтра 11.

Напруга частоти комутації підсилюється підсилювачем 12 частоти комутації, яка далі випрямляється фазочутливим випрямлячем 13. Як опорна напруга фазочутливого випрямляча використовується керуюча напруга ключа 8 від генератора 7. Випрямлена напруга заряджає інтегратор 14, вихідна напруга якого впливає на затвор польового транзистора 5.

Спочатку інтегратор 14 не заряджений і його вихідна напруга близька до нуля. При нульовій напрузі затвора відносно витoku транзистор відкритий і опір R_4' каналу стік-витік мінімальний. Опір R_4'' низькоомного резистора 6 вибирається набагато більшим опору відкритого транзистора ($R_4'' \gg R_4'$).

По мірі зарядження інтегратора зростає напруга на затворі транзистора 5. Якщо напруга на затворі досягне напруги відсічки ($U_{\text{відс}}$) току стоку, то транзистор закривається, і його опір стає максимальним. Напрямок регулювання опору каналу польового транзистора вибирається таким, щоб різниця напруги (6) зменшувалась. Ця напруга з урахуванням виразів (4) і (5), а також (2) і (3) приймає вигляд

$$U_{m3} = \frac{1}{2} SK_2 \left(\frac{R_2 + R_4}{R_1 + R_2 + R_3 + R_4} - \frac{R_4}{R_1 + R_4} \right) U_{m1} =$$

$$= \frac{1}{2} SK_2 \frac{R_1 R_3 - R_2 R_4}{(R_1 + R_2 + R_3 + R_4)(R_1 + R_4)} U_{m1} \quad (7)$$

При наявності інтегратора 14 в колі автоматичного регулювання опору каналу транзистора

процес змінювання опору закінчиться, коли зникне напруга обвідної ($U_{m3}=0$). Тоді з виразу (7) виходить, що виконується умова

$$R_1 R_3 - R_2 R_4 = 0. \quad (8)$$

Розв'язуючи рівняння (8) відносно опору R_4 , одержуємо

$$R_4 = R_4' + R_4'' = \frac{R_2}{R_1} R_1 \quad (9)$$

Підставивши значення опору R_4 у вираз (2), одержимо

$$K_1' = \frac{R_2}{R_3} + 1, \quad (10)$$

а у вираз (3), одержимо

$$K_1'' = \frac{R_2}{R_3} + 1. \quad (11)$$

З виразів (10) і (11) видно, що при виконанні умови (8) коефіцієнт ділення перестав залежати від стану ключа 8 і приймає постійне значення

$$K_1 = K_1' = K_1'' = \frac{R_2}{R_3} + 1. \quad (12)$$

При цьому зникає амплітудна модуляція в детектованій напрузі, вихідна напруга фазочутливого випрямляча 13 обертається в нуль, а вихідна напруга інтегратора 14 підтримує значення опору R_4' на рівні, необхідному для виконання умови (9).

Вольтметр 9 дозволяє виміряти установлене значення вихідної напруги масштабного подільника напруги. З урахуванням значення коефіцієнта умови (12) маємо

$$U_{m2} = \frac{R_3}{R_2 + R_3} U_{m1}. \quad (13)$$

З виразів (13), (2) і (3) видно, що автоматично установлюваний коефіцієнт ділення K_1 не залежить від опору R_1 високоомного резистора 2 і опору R_4 низьковольтного плеча подільника, а визначається тільки значеннями опорів низькоомних резисторів 3 і 4 (R_2 і R_3). Тому напруга, вимірювана низьковольтним вольтметром 9, пропорційна високій напрузі на шині 1 і не залежить від нестабільності високовольтного плеча масштабного подільника напруги і опору низьковольтного плеча R_4 . Шкала вольметра 9 градується безпосередньо в значеннях високій напруги.

Так як нестабільність високоомного резистора 2 не впливає на точність результату вимірювання, то можна значно знизити вимоги до якості та надійності високовольтної ізоляції резистора. Зокрема, як високоомний резистор з опором 10^9 – 10^{10} Ом можна використати стандартні високовольтні ізолятори з струмом витікання 10–100 мкА при напругах у сотні кіловольт.

Опори низькоомних резисторів R_2 і R_3 повинні бути стабільними і мати малу температурну залежність. Оскільки ці резистори функціонують при низьких напругах, то цим вимогам задовольняють вимірювальні резистори, виконані з манганового дроту.

Опір R_4'' низькоомного резистора 6 вибирають з початкових умов ($R_4' = 0$) і мінімаль-

ному значенні опору високовольтного резистора R_1 . З співвідношення (9) витікає

$$R_4'' = \frac{R_3}{R_2} R_{1\min} \quad (14)$$

Мінімальне значення опору R_1 можна оцінити з прогнозованої нестабільності опору ізоляції високовольтного плеча подільника

$$R_{1\min} = (1 - \frac{\gamma}{100}) R_1, \quad (15)$$

де γ – відносна нестабільність в процентах через вплив дестабілізуючих факторів.

Опори низькоомних резисторів R_2 і R_3 вибирають з потрібного коефіцієнта подільника у відповідності з співвідношенням (13)

$$K_1 = \frac{U_{m1}}{U_{m2}} = \frac{R_2 + R_3}{R_3} \quad (16)$$

Враховуючи, що $K_1 \gg 1$ опором резистора R_3 в чисельнику виразу (16) можна знехтувати. Тоді

$$K_1 = \frac{U_{m1}}{U_{m2}} = \frac{R_2}{R_3} \quad (17)$$

Якщо задатися низькоомним резистором R_3 з конструктивних міркувань, то

$$R_2 = K_1 R_3. \quad (18)$$

Приклад вибору параметрів масштабного подільника високої напруги.

Для напруги $U_1 = 100$ кВ вибираємо високовольтний ізолятор з струмом стікання $I_1 = 100$ мкА, що відповідає його початковому опору

$$R_1 = \frac{U_1}{I_1} = \frac{100 \cdot 10^3}{100 \cdot 10^{-6}} = 10^9 \text{ Ом.}$$

Нестабільність високоомного резистора $R_1 = 1$ ГОм через підвищення температури, виникнення коронного розряду, мікропробів і таке інше прогнозується на рівні 30%. Тоді мінімальний опір резистора 2 у відповідності з (15)

$$R_{1\min} = (1 - 0,3) 10^9 = 7 \cdot 10^8 \text{ Ом.}$$

Приймаємо опір низькоомного резистора 4 $R_3 = 100$ Ом. Вихідну напругу подільника вибираємо з міркувань безпеки

$$U_2 = 100 \text{ В.}$$

Потрібне значення коефіцієнта ділення відповідно (17)

$$K_1 = \frac{100 \cdot 10^3}{100} = 10^3.$$

Тоді резистор 3 у відповідності з співвідношенням (18) повинен мати значення

$$R_2 = 10^3 \cdot 100 = 100 \text{ кОм.}$$

Заземлений опір 6 визначаємо за формулою (14)

$$R_4'' = 10^{-3} \cdot 7 \cdot 10^8 = 7 \cdot 10^5 = 700 \text{ кОм.}$$

Так як опір R_4'' не впливає на коефіцієнт ділення (16), то низькоомний резистор 6 може бути недротяним без жорстких вимог до його стабільності. Реальний опір високоомного резистора 2 може знаходитись в межах $R_1(1 \pm \gamma/100)$, тобто змінюватися від $0,7 \cdot 10^9$ до $1,3 \cdot 10^9$ Ом. Таким чином динамічний діапазон опору R_4'' повинен складати від сотень Ом до сотень кОм.

Цим умовам відповідають керовані резистори на основі польових транзисторів. Канал польового транзистора стік-витік має чисто омичний характер, так як на шляху струму між стоком і витоків відсутні р-п переходи. Опір R_4 каналу визначається виразом

$$R_4 = \frac{1}{S} = \frac{U_{\text{відс}}}{2 \cdot I_{\text{с max}} \left(\frac{U_{\text{зс}}}{U_{\text{відс}}} - 1 \right)} \quad (19)$$

де S – крутість вольтамперної характеристики каналу;

$U_{\text{відс}}$ – напруга відсідки струму витоків;

$U_{\text{зс}}, U_{\text{св}}$ – напруги на затворі і стоці відносно витоків;

$I_{\text{с max}}$ – струм стоку при $U_{\text{зс}} = 0, U_{\text{св}} = U_{\text{св}}$.

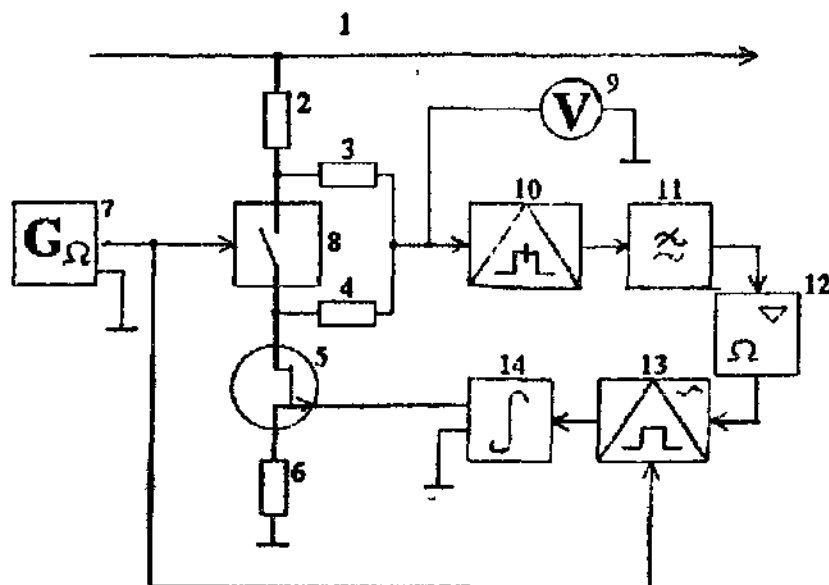
При $U_{\text{зс}} = 0$ транзистор відкритий, $R_4 = U_{\text{відс}} / 2 I_{\text{с max}}$ і має значення біля декількох десятків Ом. Якщо напруга $U_{\text{відс}} = U_{\text{зс}}$, то транзистор закритий і $R_4 \rightarrow \infty$. Практично опір закритого каналу не перевищує ста мегом. Значення $U_{\text{відс}}$ визначає межі "лінійного відрізка" вхідної характеристики польового транзистора, а від крутості S залежить опір відкритого транзистора. Указаним вимогам найбільш повно задовольняють польові транзистори типів 2П103Г, 2П103Д, 2П303Г, 2П303Д.

Як зазначалось вище в усталеному стані системи автоматичного регулювання опору R_4'' коефіцієнт ділення не залежить від стану ключа 8 (розімкнений чи замкнений). Тому як ключ 8 може бути використаний магнітокерований контакт (геркон), обмотка керування якого включена в одне з плечей релаксаційного генератора 7 (мультивібратора). Відносно великий час переключення не впливає на рівність (12), тому що навіть при повільному переключенні стан ключа "розімкнено" не змінюється, а стани "замкнено" – "розімкнено", які чергуються, не змінюють стану рівноваги. Для реалізації інших ланок пристрою використовуються детектори, фільтри, підсилювачі, фазочутливі випрямлячі та інтегратори, які широко застосовуються в радіоелектронній техніці. Вхідний опір амплітудного детектора 10 повинен бути вибраний достатньо великим, щоб виключити шунтування виходу масштабного подільника високої напруги. Нестабільність параметрів елементів ланки автоматичної стабілізації коефіцієнта ділення масштабного подільника напруги, як витікає з виразів (7) і (8), не впливає на точність вимірювання високої напруги. Все це дозволяє суттєво підвищити точність вимірювання високих змінних напруг до 10 МВ за рахунок зниження відносної похибки масштабного подільника

напруги до значення не більше 0,1–0,2%. Пристрій забезпечує також високоточні вимірювання постійних напруг в указаному діапазоні значень.

Об'єкт винаходу. Пристрій для вимірювання високих напруг. Галузь застосування. Електровимірювальна техніка. Вимірювання високих напруг у колах змінного струму промислової частоти та колах постійного струму. Суть винаходу. Пристрій містить масштабний подільник напруги, високовольне плече якого виконане з високоомного резистора і підключене до шини високої напруги, низькоомне плече виконане з низькоомного резистора і заземлене, низьковольтний вольтметр, польовий транзистор, витік якого з'єднаний з потенціальним вводом низькоомного резистора низьковольтного плеча подільника напруги, два додаткових послідовно з'єднаних

низькоомних резистори, які включені між високовольним плечем подільника напруги і стоком польового транзистора низьковольтного плеча подільника напруги, автоматичний ключ підключений паралельно двом додатковим резисторам, до середньої точки з'єднання яких підключені паралельно низьковольтний вольтметр і коло з послідовно з'єднаних амплітудного детектора, фільтра нижніх частот, підсилювача частоти комутації ключа, фазочутливого випрямляча та інтегратора, вихід якого з'єднаний з затвором польового транзистора, і релаксацийний генератор, вихід якого з'єднаний з керуючим входом автоматичного ключа і керуючим входом фазочутливого випрямляча. Технічний результат: підвищення точності вимірювання високих напруг, використання для вимірювання високих напруг низьковольтного вольтметра, зниження вартості масштабного подільника високих напруг.



Тираж 50 екз

Відкрите акціонерне товариство «Патент»
Україна, 88000, м. Ужгород, вул. Гагаріна, 101
(03122) 3 – 72 – 89 (03122) 2 – 57 – 03

