

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ
№ 2586115

СПОСОБ ФИЛЬТРАЦИИ ТОКА НАМАГНИЧИВАНИЯ И ВОСПРОИЗВЕДЕНИЯ ВТОРИЧНОГО ТОКА СИЛОВЫХ И ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ НАПРЯЖЕНИЯ

Патентообладатель(ли): *федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого" (ФГАОУ ВО "СПбПУ") (RU)*

Автор(ы): *Ванин Валерий Кузьмич (RU)*

Заявка № 2015117137

Приоритет изобретения 05 мая 2015 г.

Зарегистрировано в Государственном реестре изобретений Российской Федерации 13 мая 2016 г.

Срок действия патента истекает 05 мая 2035 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

 Г.П. Ивлиев





ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(21)(22) Заявка: 2015117137/07, 05.05.2015

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
05.05.2015

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 05.05.2015

(45) Опубликовано: 10.06.2016 Бюл. № 16

(56) Список документов, цитированных в отчете о
поиске: US 2007007943 A1, 11.01.2007. US
2002070724 A1, 13.06.2002. RU 2526834 C2,
27.08.2014. RU 2526834 C2, 20.04.1996. RU
2538214 C1, 10.01.2015.

Адрес для переписки:

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая,
29, ФГАОУ ВО "СПбПУ", отдел
интеллектуальной собственности

(72) Автор(ы):

Ванин Валерий Кузьмич (RU)

(73) Патентообладатель(и):

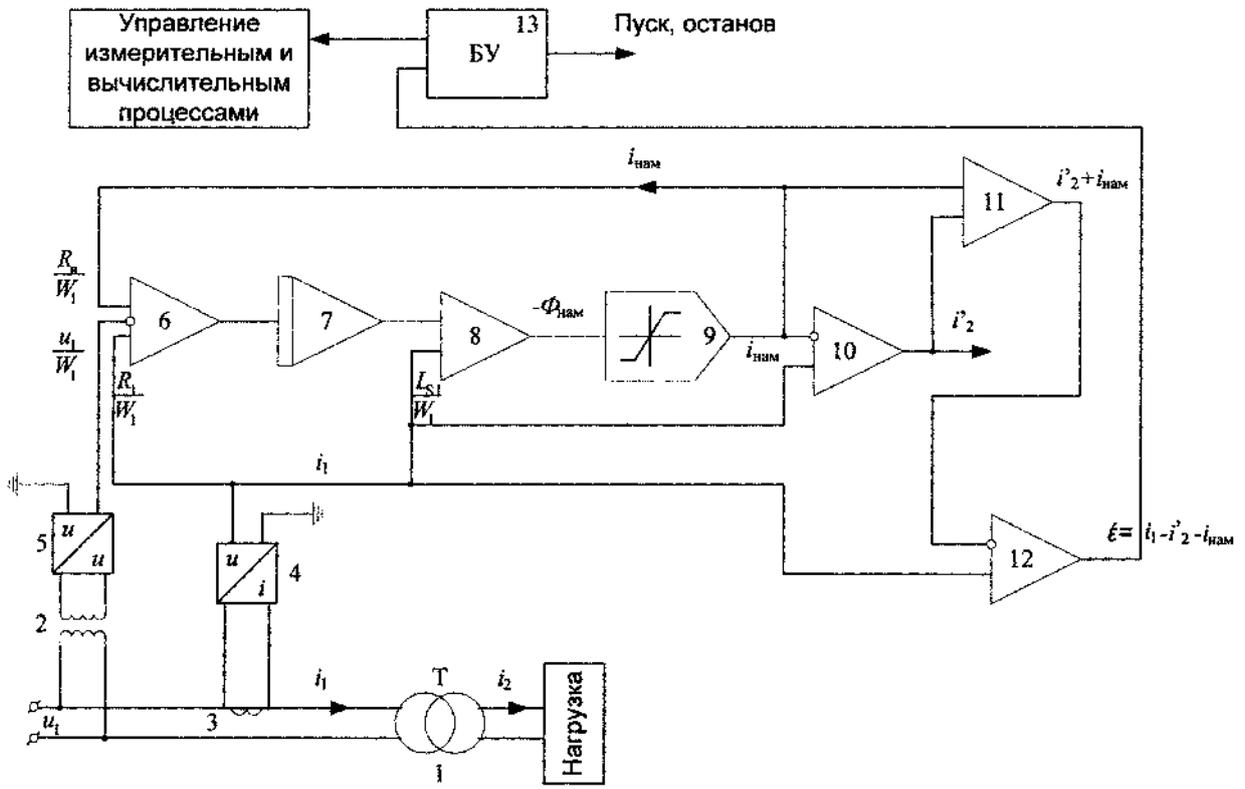
федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего
образования "Санкт-Петербургский
политехнический университет Петра
Великого" (ФГАОУ ВО "СПбПУ") (RU)

(54) СПОСОБ ФИЛЬТРАЦИИ ТОКА НАМАГНИЧИВАНИЯ И ВОСПРОИЗВЕДЕНИЯ ВТОРИЧНОГО ТОКА СИЛОВЫХ И ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ НАПРЯЖЕНИЯ

(57) Реферат:

Изобретение относится к электротехнике и может быть использовано в различных средствах релейной защиты, противоаварийного управления энергосистем, измерения, регистрации аварийных событий и диагностики состояния оборудования. Технический результат состоит в снижении погрешности фильтрации тока намагничивания и в воспроизведении вторичного тока в переходных и установившихся режимах трансформатора, повышении устойчивости и расширении линейного диапазона оценивания параметров как самого трансформатора, так и последовательно включенных с ним элементов. Способ фильтрации тока намагничивания и воспроизведения вторичного тока трансформатора включает составление системы

нелинейных уравнений, отражающих реальные электромагнитные физические процессы в трансформаторе, выбор первичных и вторичных измерительных преобразователей для подключения к энергосистеме, а также аналоговых и цифровых элементов для организации вычислительного процесса, выбор метода для решения системы уравнений в реальном времени с использованием замкнутой следящей системы, на выходе которой формируют напряжения, пропорциональные току намагничивания и воспроизводимому вторичному току в аналоговом либо цифровом виде, дополнительно управляют вычислительным процессом, контролируя ошибку слежения. 4 ил.



Фиг. 1



FEDERAL SERVICE
FOR INTELLECTUAL PROPERTY

(51) Int. Cl.
H01F 27/42 (2006.01)
H01F 38/28 (2006.01)

(12) **ABSTRACT OF INVENTION**

(21)(22) Application: 2015117137/07, 05.05.2015

(24) Effective date for property rights:
05.05.2015

Priority:

(22) Date of filing: 05.05.2015

(45) Date of publication: 10.06.2016 Bull. № 16

Mail address:

195251, Sankt-Peterburg, ul. Politekhnikeskaja, 29,
FGAOU VO "SPbPU", otdel intellektualnoj
sobstvennosti

(72) Inventor(s):

Vanin Valerij Kuzmich (RU)

(73) Proprietor(s):

federalnoe gosudarstvennoe avtonomnoe
obrazovatelnoe uchrezhdenie vysshego
obrazovaniya "Sankt-Peterburgskij
politekhnikeskij universitet Petra Velikogo"
(FGAOU VO "SPbPU") (RU)

(54) **METHOD OF FILTERING MAGNETISING CURRENT AND REPRODUCTION OF SECONDARY CURRENT OF POWER AND MEASURING VOLTAGE TRANSFORMERS**

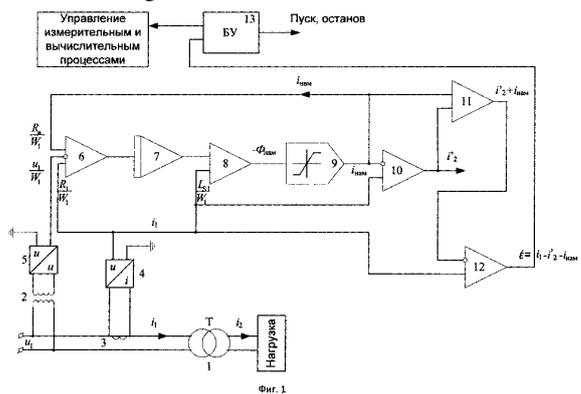
(57) Abstract:

FIELD: electronic equipment.

SUBSTANCE: invention can be used in various facilities of relay protection, emergency control power systems, measuring, recording of emergency events and diagnosing state of equipment. Method of transformer magnetising current filtering and secondary current reproduction includes making system of nonlinear equations reflecting real electromagnetic physical processes in transformer, selection of primary and secondary transducers for connection to power system, as well as analogue and digital elements for arrangement of computation process, method selection for solving system of equations in real time using closed tracking system, at output of which voltage is generated proportional to magnetising current and reproducing secondary current in analogue or digital form, computing process is additionally controlled, monitoring tracking error.

EFFECT: reduced error of magnetisation current filtration and reproduction of secondary current in transition and steady-state modes of transformer, improving stability and expansion of linear range parameters both transformer, and components serially connected with it.

1 cl, 4 dwg



RU 2 586 115 C1

RU 2 586 115 C1

Изобретение относится к электротехнике и может быть использовано в различных средствах релейной защиты, противоаварийного управления энергосистем, измерения, регистрации аварийных событий и диагностики состояния оборудования.

Известны способы фильтрации тока намагничивания и воспроизведения первичного тока трансформаторов [Патент RU 2526834; Ванин В.К., Павлов Г.М. Релейная защита на элементах вычислительной техники «Энергоатомиздат», 1991, пл. 21, с. 266, 267; Патент RU 2538214]. Однако в указанных источниках рассматриваются способы компенсации погрешности только измерительных трансформаторов тока путем фильтрации их токов намагничивания и решения задачи воспроизведения (восстановления) первичного тока, которое осуществляется суммированием измеренного вторичного тока и тока намагничивания. Этим самым компенсируется погрешность в алгоритмах дифференциальных защит различного оборудования и повышается в первую очередь их чувствительность и быстродействие.

Для дальнейшего улучшения отмеченных параметров дифференциальной защиты силовых трансформаторов, а также увеличения точности и достоверности других измерительных процессов, отмеченных выше, не менее важной задачей является задача фильтрации тока намагничивания и воспроизведения вторичного тока силового трансформатора, являющегося одним из основных элементов энергосистемы и измерительных трансформаторов напряжения.

Известен способ фильтрации тока намагничивания силового трансформатора и воспроизведения его первичного тока [Compensated current differential relaying method and system for protecting transformer, United States, Pub. US. 2007/0007943 A1, jan. 11.2007, Yong - Cheol Kang K.R, Sang - Hee Kang, Seoul (KR)] для компенсации тока небаланса в цепях дифференциальной защиты, обусловленного неравенством первичного и приведенного к нему вторичного токов трансформатора при внешних коротких замыканиях и процессах их включения.

Способ является наиболее близким техническим решением, выбранным за прототип. В способе предварительно составляют схему замещения силового трансформатора, являющуюся его электрическим аналогом и содержащую элементы, моделирующие параметры трансформатора согласно уравнению

$$u_1(t) = R_1 i_1(t) + L_{\sigma} \frac{di_1(t)}{dt} + e_1(t),$$

где $i_1(t)$ - первичный ток трансформатора; R_1 - сопротивление первичной обмотки; L_{σ} - индуктивность рассеяния; $e_1(t)$ и $e_2(t)$ - первичное и соответственно вторичное напряжения идеализированного трансформатора с коэффициентом трансформации, равным отношению чисел витков $\frac{N_1}{N_2}$ (в прототипе названные возбуждающими).

Кроме того, в схему вводят сопротивление активных потерь в сердечнике R_c и индуктивность намагничивания L_m . После чего определяют ток, вызывающий активные

потери $i_c(t)$, производя операцию деления $i_c(t) = \frac{e_1(t)}{R_{c1}}$, и реактивную составляющую

тока намагничивания, интегрируя $e_1(t)$ по выражению $\lambda(t) = \int e_1(t) dt$, и осуществляют далее его функциональное преобразование в ток намагничивания i_m . Ток намагничивания (реактивная составляющая i_m) суммируется с током активных потерь

i_c и измеряемым вторичным током i_2 , который измеряется на вторичной стороне трансформатора и приводится к первичной стороне умножением на коэффициент трансформации α . Полученная сумма (воспроизведенный первичный ток) сравнивается с первичным током, этим самым определяется дифференциальный ток, который контролируется дифференциальной защитой.

Общей частью технической задачи прототипа и заявляемого способа является фильтрация тока намагничивания силового трансформатора. Недостатками прототипа является большая погрешность фильтрации тока намагничивания в переходных процессах в энергосистеме, обусловленная использованием практически электрической схемы замещения трансформатора, в которой отсутствует учет взаимной индуктивности обмоток, не учитывается трансформаторный характер возникновения потерь в сердечнике, погрешность в определении индуктивности рассеяния обмотки и индуктивности намагничивания, которая представлена сосредоточенным элементом, что характерно для электрических схем замещения и приемлемо только для анализа стационарных процессов при допущении линейности параметров схемы [Атабеков Г.И. Теоретические основы электротехники, ч. I, Линейные электрические цепи. - М.: Энергия, 1964., 312 с., с. 124, 125, 126 и Атабеков Г.И. Теоретические основы электротехники, ч. II-III, Нелинейные цепи. Электромагнитное поле. - М.: Энергия, 1966, 280 с., с. 81, 82).

Технической задачей заявляемого способа является снижение погрешности фильтрации тока намагничивания, а также воспроизведение вторичного тока в переходных и установившихся режимах трансформатора, повышение устойчивости и расширение линейного диапазона оценивания параметров как самого трансформатора, так и последовательно включенных с ним элементов.

Поставленная задача достигается тем, что предложен способ фильтрации тока намагничивания и воспроизведения вторичного тока, в котором первоначально составляют систему нелинейных уравнений, отражающую реальные электромагнитные физические процессы в трансформаторе и включающую в себя следующие уравнения:

$$u_1 = i_1 R_1 + \frac{L_{s1} di_1}{dt} + \frac{W_1 d\Phi_{\text{нам}}}{dt} + k_{\Pi} i_{\text{нам}} R_B, \quad (1)$$

$$i_{\text{нам}} = f(\Phi_{\text{нам}}), \quad (2)$$

$$W_1 \frac{d\Phi_{\text{нам}}}{dt} = \frac{Hl}{W_1} \cdot R_B \cdot k_{\Pi} \approx i_{\text{нам}} R_B, \quad (3)$$

$$\frac{i_2 W_2}{W_1} = i_1 - \frac{Hl}{W_1}, \quad (4)$$

где u_1 - первичное напряжение трансформатора,

i_1 - первичный ток трансформатора,

i_2 - вторичный ток,

R_1 - активное сопротивление первичной обмотки трансформатора,

L_{s1} - индуктивность рассеяния первичной обмотки,

$\Phi_{\text{нам}}$ - магнитный поток намагничивания в сердечнике трансформатора,

k_{Π} - коэффициент преобразования тока намагничивания в вихревой ток i_B ,

учитывающий влияние паразитных параметров цепи его протекания, приближенно $k_{\Pi} \approx 1$,

$i_{\text{нам}}$ - ток намагничивания, определяемый по кривой намагничивания стали сердечника,

H - напряженность магнитного поля,

l - длина средней магнитной линии,

W_1, W_2 - число витков соответственно первичной и вторичной обмоток трансформатора,

R_B - сопротивление цепи протекания вихревых токов в сердечнике трансформатора, определяемое конструкцией сердечника.

Затем выбирают элементы для организации вычислительного и измерительного процессов, определяют параметры силового или измерительного трансформатора напряжения и оборудования для подключения к энергосистеме, масштабируют соответствующим образом зависимые и независимые переменные, разрядность и быстродействие аналого-цифровых и цифроаналоговых преобразователей, параметры цифровых и аналоговых микросхем.

Последовательность выполнения измерительных, вычислительных операций и назначение элементов (блоков) отображено на фиг. 1. На фиг. 2а, б, с отображены наиболее характерные осциллограммы процесса включения трансформатора под активно-индуктивную нагрузку. На фиг. 2а показана осциллограмма воспроизведения вторичного приведенного тока. На фиг. 2б - осциллограмма тока намагничивания, а фиг. 2с - первичного тока. На фиг. 1 также показаны обозначения основных величин, участвующих в вычислительном процессе и коэффициенты их преобразования отдельными блоками. Так элементом 1 отображают трансформатор, у которого определяют ток намагничивания $i_{\text{нам}}$ и воспроизводят вторичный ток i_2 . С помощью измерительных трансформаторов напряжения 2 и тока 3 преобразуют первичное напряжение u_1 и ток i_1 в стандартные величины, а вторичных преобразователей тока и напряжения 5 соответственно ток в напряжение, пропорциональное току i_1 , и напряжение в напряжение, пропорциональное u_1 , удовлетворяющие требованиям аналоговой и цифровой микроэлектроники. Если вычислительный процесс реализуют цифровыми средствами, то на выходе блоков 4, 5 дополнительно включают аналого-цифровые преобразователи. Все вычислительные операции далее осуществляют над напряжениями, пропорциональными физическим величинам трансформатора.

Вычислительный процесс далее реализуют методом переменных состояния, при этом уравнение (1) системы записывают относительно выходной величины (потока намагничивания) $\Phi_{\text{нам}}$

$$-\Phi_{\text{нам}} = \frac{i_1 R_1 + L_{s1} p i_1 + i_{\text{нам}} R_B - u_1}{W_1 p}, \quad (5)$$

где $p = \frac{d}{dt}$ (символ дифференцирования), а деление на p соответствует выполнению операции интегрирования.

Это позволяет избежать выполнения операции дифференцирования и существенно повысить устойчивость и точность решения задачи в сравнении с прототипом, где авторы используют операцию дифференцирования тока i_1 в индуктивности рассеяния согласно принятой схемы замещения.

Далее определяют числитель уравнения (5) с помощью сумматора-вычислителя 6. Инвертирование одной из величин для пояснения отображено на схеме кружком. Сумма

интегрируется интегратором 7. А с помощью сумматора 8, на выходе которого получают магнитный поток в сердечнике трансформатора $\Phi_{\text{нам}}$, учитывают падение напряжения на индуктивности рассеяния. Магнитный поток $\Phi_{\text{нам}}$ преобразуют функциональным преобразователем 9 в ток намагничивания $i_{\text{нам}}$ согласно кривой намагничивания стали сердечника. Найдя ток намагничивания, определяют потери на вихревые токи и гистерезис по уравнению (3) и замыкают обратную связь в вычислительном процессе. В результате получают фильтр тока намагничивания на основе вычислительной системы с обратной связью, включающей преобразователи 2, 3, 4, 5 и блоки 6, 7, 8, 9. Далее вычитают из первичного тока i_1 ток намагничивания $i_{\text{нам}}$ с помощью вычитателя 10 и получают воспроизведенный, приведенный вторичный ток i'_2 трансформатора.

Для контроля вычислительного процесса формируют ошибку путем определения разницы первичного тока i_1 с суммой приведенного вторичного тока и тока

намагничивания $i'_2 + i_{\text{нам}}$, а также числителя уравнения (5), который является первой производной потокосцепления потока намагничивания с первичной обмоткой. При превышении ошибки допустимого значения вычислительный процесс останавливается. В противном случае его не прерывают до отключения блоком управления 13.

При проверке заявляемого способа было проведено его математическое моделирование в программной среде Matlab для модельного трансформатора со следующими основными параметрами:

$W_1=1500$ - число витков.

$W_2=750$ - число витков вторичной обмотки.

$k_{\text{п}}=1$.

$R_1=40$ Ом.

$R_B=15$ и 50 Ом.

Для вычислительного эксперимента использовалась кривая намагничивания одной из электротехнических сталей. При этом исследования проведены для оценки влияния на точность воспроизведения процессов большинства негативных факторов.

Из эксперимента следует, что, если пренебрегать гистерезисом характеристики намагничивания, то методическая погрешность практически отсутствует при аналоговом решении задачи, а инструментальная погрешность будет определяться погрешностью исходной информации и элементной базой, которой можно пренебречь. На погрешность цифрового решения задачи влияет правильный выбор дискретизации процесса во времени и разрядность аналого-цифрового и цифроаналогового преобразования, а также погрешность исходной информации. Способ фильтрации тока намагничивания и воспроизведения вторичного тока силовых и измерительных трансформаторов напряжения позволяет существенно снизить погрешность фильтрации тока намагничивания и воспроизведения вторичного тока в переходных и установившихся режимах введением более точного описания физических процессов в трансформаторе на основе учета электромагнитной связи между обмотками, трансформаторной сути возникновения активных потерь на вихревые токи и гистерезис. Ток намагничивания и вторичный ток определяется при этом с помощью замкнутой схемы вычислительного процесса, обеспечивающей его устойчивость, повышенную точность, что особенно важно и характерно для непрерывных систем измерения контроля и управления.

Таким образом, совокупность отличительных признаков достаточна и необходима для решения поставленной задачи.

Формула изобретения

Способ фильтрации тока намагничивания и воспроизведения вторичного тока силовых и измерительных трансформаторов напряжения, включающий подключение к их первичным обмоткам измерительных трансформаторов напряжения и тока, а на выходе этих трансформаторов подключение вторичных преобразователей напряжения и тока с целью масштабирования сигналов и преобразование их в вид, необходимый для использования в аналоговых или цифровых средствах обработки измерительной информации для дальнейшего суммирования, интегрирования, функционального преобразования и получения сигналов, пропорциональных току намагничивания и вторичному току трансформатора, отличающийся тем, что эти сигналы формируют согласно следующей системе нелинейных уравнений:

$$u_1 = i_1 R_1 + \frac{L_{s1} di_1}{dt} + \frac{W_1 d\Phi_{\text{нам}}}{dt} + k_{\Pi} i_{\text{нам}} R_B, \quad (1)$$

$$i_{\text{нам}} = f(\Phi_{\text{нам}}), \quad (2)$$

$$W_1 \frac{d\Phi_{\text{нам}}}{dt} = \frac{Hl}{W_1} \cdot R_B \cdot k_{\Pi} \approx i_{\text{нам}} R_B, \quad (3)$$

$$\frac{i_2 W_2}{W_1} = i_1 - \frac{Hl}{W_1}, \quad (4)$$

где u_1 - первичное напряжение трансформатора,

i_1 - первичный ток трансформатора,

R_1 - активное сопротивление первичной обмотки трансформатора,

L_{S1} - индуктивность рассеяния первичной обмотки,

$\Phi_{\text{нам}}$ - магнитный поток намагничивания в сердечнике трансформатора,

k_{Π} - коэффициент преобразования тока намагничивания в вихревой ток i_B ,

учитывающий влияние паразитных параметров цепи его протекания, приближенно $k_{\Pi} \approx 1$,

$i_{\text{нам}}$ - ток намагничивания, определяемый по кривой намагничивания стали сердечника,

H - напряженность магнитного поля,

l - длина средней магнитной линии,

W_1, W_2 - число витков соответственно первичной и вторичной обмоток трансформатора,

R_B - сопротивление цепи протекания вихревых токов в сердечнике трансформатора, определяемое конструкцией сердечника,

затем для организации вычислительного процесса уравнение (1) записывают относительно потока намагничивания $\Phi_{\text{нам}}$ в виде

$$-\Phi_{\text{нам}} = \frac{i_1 R_1 + L_{s1} p i_1 + i_{\text{нам}} R_B - u_1}{W_1 p}, \quad (5)$$

после чего получение указанных выше сигналов в непрерывном следящем процессе в реальном времени первоначально суммируют величины, входящие в числитель выражения 5, т.е. $i_1 R_1 + L_{s1} p i_1 + i_{\text{нам}} R_B - u_1$, с одновременным интегрированием этой суммы

с масштабным коэффициентом W_1 и получают величину потока намагничивания $\Phi_{\text{нам}}$, который функционально преобразуют в $i_{\text{нам}} = f(\Phi_{\text{нам}})$, затем определяют потери в стали трансформатора и замыкают обратную связь в вычислительном процессе, при этом ток намагничивания непрерывно вычитают из первичного тока i_1 и этим самым формируют приведенное значение воспроизведенного вторичного тока i_2 , которое используют для формирования ошибки $\varepsilon = i_1 - (i_2' + i_{\text{нам}})$ и для управления вычислительным процессом, который дополнительно также контролируется выполнением уравнения 5.

10

15

20

25

30

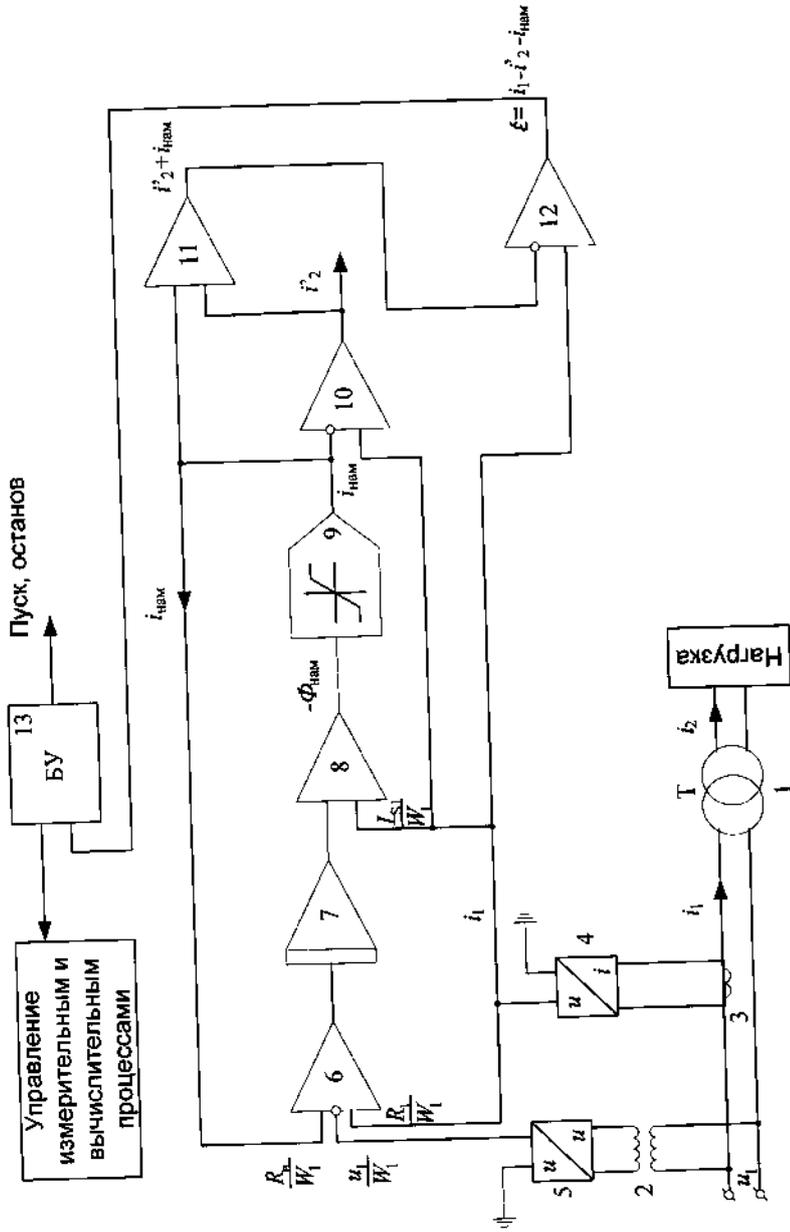
35

40

45

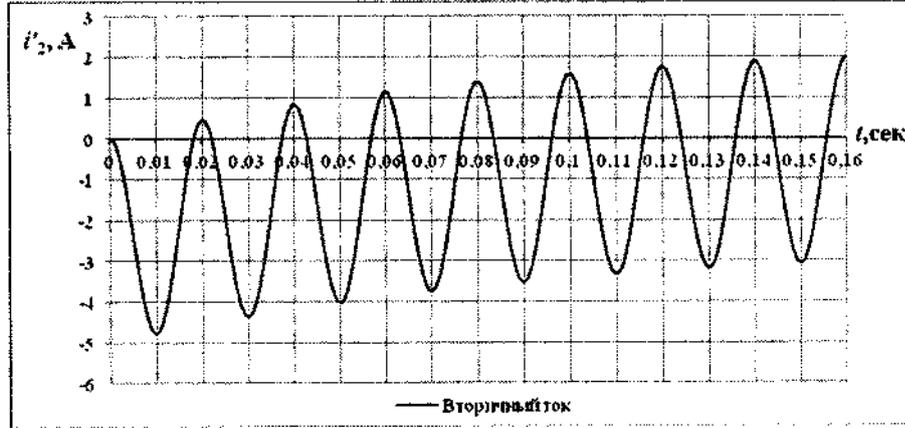
1

Способ фильтрации тока намагничивания и воспроизведения
вторичного тока силовых и измерительных трансформаторов напряжения.

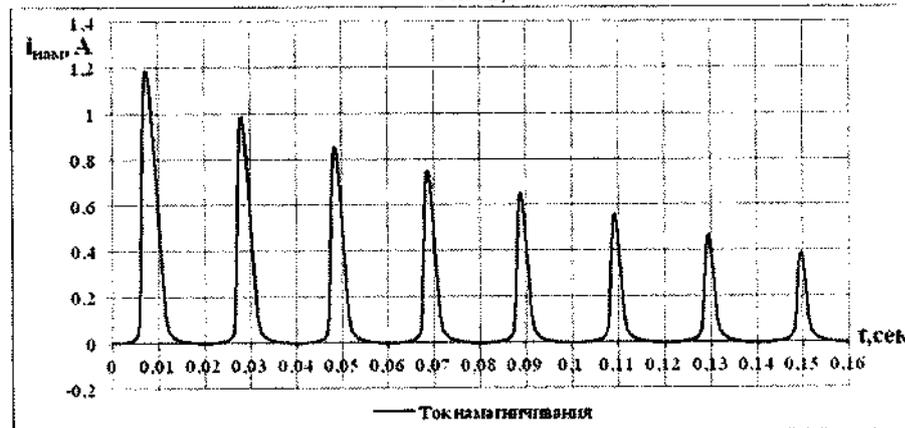


Фиг. 1

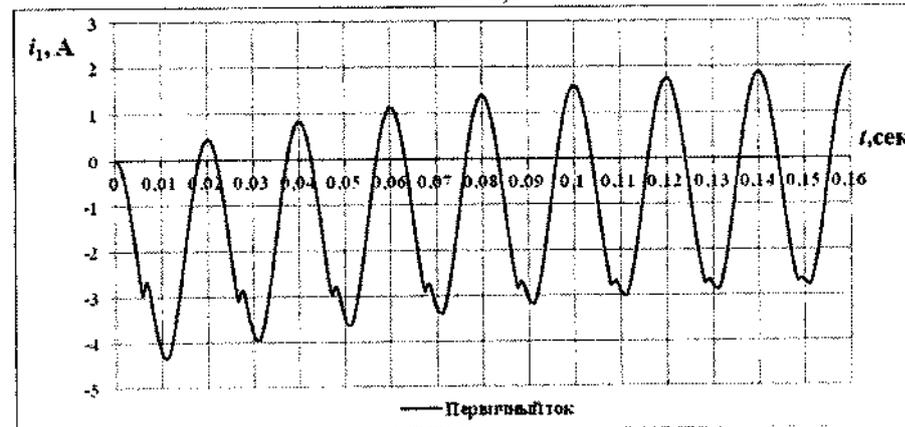
Способ фильтрации тока намагничивания и воспроизведения вторичного тока силовых и измерительных трансформаторов напряжения



Фиг. 2,а



Фиг. 2,б



Фиг. 2,с