

ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

УДК 621.311

Джабраил Магомедович Идрисов

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», аспирант кафедры автоматического управления электроэнергетическими системами, Россия, Иваново, e-mail: dm.idrisov@bk.ru

Владимир Дмитриевич Лебедев

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», кандидат технических наук, доцент кафедры автоматического управления электроэнергетическими системами, Россия, Иваново, e-mail: vd_lebedev@mail.ru

Разработка и исследование блока питания измерительных датчиков от первичного тока

Авторское резюме

Состояние вопроса. Создание цифровых измерительных трансформаторов тока и напряжения связано с организацией системы питания электронных блоков, входящих в состав цифровых измерительных трансформаторов тока и напряжения. При реализации цифровых измерительных трансформаторов тока и напряжения классов напряжения 35 кВ и выше требуется обеспечение питания электронных компонентов на первичной стороне, т.е. на стороне высокого потенциала. Организация питания электронных модулей строится по резервированной схеме. Существуют различные подходы к решению этой задачи в виде организации питания за счет преобразования электрической энергии от цепей собственных нужд энергообъекта, например, передача энергии с помощью силы света по оптическому волокну. Также перспективным остается отбор энергии от подключенной к цифровому трансформатору линии электропередачи, который осуществляется путем преобразования как напряжения, так и тока линии. Наиболее перспективным является комплексное решение, при котором осуществляется одновременный отбор энергии от напряжения и тока, тем самым реализуется резервированная система питания. Сложность организации питания от первичного тока заключается в том, что ток постоянно меняется и зависит от режима работы линии, в отличие от напряжения, которое является практически постоянным. Подбор параметров трансформатора тока и системы защиты от перегрузки в различных режимах, включая аварийные с токами короткого замыкания, является сложной, но актуальной задачей.

Материалы и методы. В качестве методов проведения исследований выбран комбинированный подход на основе физического моделирования питающего трансформатора, работающего на нагрузку с выпрямителем и накопителем энергии в виде конденсаторов, и имитационного моделирования в программном комплексе Matlab и приложении Simulink, а также в программе Multisim. Данный подход позволяет достоверно верифицировать модели, составленные в программных комплексах, с физическими моделями.

Результаты. Рассматривается организация питания от первичного тока, проходящего через цифровые измерительные трансформаторы тока и напряжения. Разработаны математические модели питающих трансформаторов тока с нелинейной нагрузкой. Сформулирован подход к организации питания электронных блоков в широком диапазоне первичных токов. Предложена схемная реализация ограничения подачи энергии при токах короткого замыкания.

Выводы. Предложенный подход к моделированию трансформаторов тока, питающих электронную нагрузку, с помощью математических моделей с перебором параметров позволяет получить необходимые характеристики питающих трансформаторов тока в широком диапазоне исходных параметров. Предложенные методы компенсации больших токов позволяют исключить превышение напряжения при токах короткого замыкания.

Ключевые слова: питающий трансформатор тока, цифровой измерительный трансформатор тока и напряжения, параметры трансформатора тока, имитационное моделирование в программе Matlab, моделирование в программе Multisim

Dzhabrail Magomedovich Idrisov

Ivanovo State Power Engineering University, Post-graduate Student of Automatic Control of Electric Power Systems Department, Russia, Ivanovo, e-mail: dm.idrisov@bk.ru

Vladimir Dmitrievich Lebedev

Ivanovo State Power Engineering University, Candidate of Engineering Sciences, (PhD), Associate Professor of Automatic Control of Electric Power Systems Department, Russia, Ivanovo, e-mail: vd_lebedev@mail.ru

Development and study of a power supply unit for measuring sensors powered by primary current

Abstract

Background. The development of digital current and voltage transformers (DCVTs) is associated with the organization of a power supply system for the electronic components incorporated in the DCVTs. When implementing DCVTs of 35 kV and higher voltage classes, it is necessary to provide power to the electronic components on the primary side, i.e. on the high-potential side. The power supply for the electronic modules is designed according to a redundant scheme. There are various approaches to solving this problem, including organizing the power supply by converting electrical energy from the power facility's auxiliary circuits; for example, there are solutions to transmit energy using light through optical fiber. Another promising approach is to extract energy from the power line to which the digital transformer is connected by converting both the line voltage and current. The most promising approach is an integrated solution that simultaneously extracts energy from both voltage and current, thereby implementing a redundant power supply system. The difficulty of organizing power supply from primary current is that the current is constantly fluctuating and depends on the operation mode of the line, unlike voltage, which is virtually constant. Selecting the parameters of the current transformer and overload protection system for various modes, including emergency conditions with short-circuit currents is a complex but challenging task.

Materials and methods. The research methods chosen are a combined approach based on physical modeling of a power transformer operating with a rectifier and capacitor energy storage devices, and simulation using Matlab, Simulink, and Multisim software. This approach enables reliable verification of models designed in software packages with physical models.

Results. This article presents the development of a power source from the primary current passing through the DCVT. Mathematical models of current supply transformers with nonlinear loads have been developed. An approach to organize the power supply of electronic components over a wide range of primary currents has been formulated. A circuit implementation to limit energy supply during short-circuit currents has been proposed.

Conclusions. The proposed approach to modeling current transformers supplying electronic loads using mathematical models with parameter enumeration allows obtaining the required characteristics of supply current transformers in a wide range of initial parameters. The proposed methods to compensate high currents make it possible to eliminate overvoltage during short-circuit currents.

Key words: supply current transformer, digital measuring current and voltage transformer, current transformer parameters, simulation modeling in Matlab, modeling in Multisim

DOI: 10.17588/2072-2672.2026.4.025-034

Введение. Организация резервированного питания электронных модулей цифровых измерительных трансформаторов тока и напряжения (ЦТТН) является ключевой задачей, решение которой обеспечивает надежность их работы [1]. Резервирование питания наилучшим образом обеспечивается от источников, построенных на различных физических принципах, например организация питания в виде отбора энергии от напряжения и тока первичной сети [2].

Классические аналоговые трансформаторы тока и напряжения не требуют питания, что является существенным преимуществом перед устройствами, требующими внешнего питания. Реализация отбора энергии для питания электронных блоков от тока и напряжения первичного

провода позволит приблизить ЦТТН к аналоговым трансформаторам. Организация отбора энергии может быть выполнена посредством отбора энергии от первичного напряжения и от тока линии. При одновременном отборе энергии от напряжения и от тока выполняется резервирование. Резервирование, выполненное на различных принципах, обеспечивает более высокую надежность электроснабжения электронных блоков. Например, при коротких замыканиях напряжение может существенно снизиться, что не позволит осуществить отбор энергии от напряжения линии, при этом питание от тока сохранится.

К организации резервного канала источника питания от тока предъявляются следующие требования:

– работа в широком диапазоне первичных токов. Значения токов первичной сети могут колебаться в широких пределах, при этом для большей эффективности резервирования целесообразно обеспечивать работу системы питания в максимально охватываемом диапазоне, включая аварийные режимы, сопровождаемые токами коротких замыканий;

– ограничение по массогабаритным показателям, обусловленное заданной конструкцией цифрового измерительного трансформатора. В силу того что основным элементом системы питания от тока является электромагнитный трансформатор, выполненный на основе тороидального магнитопровода, работа системы питания напрямую зависит от размеров трансформатора. Данное ограничение может вступать в противоречие с первым требованием с учетом того, что для получения необходимой энергии на малых токах может потребоваться увеличение сечения магнитопровода. Сам электромагнитный трансформатор, исходя из особенностей его применения и режимов его работы, назовем трансформатором тока цепи питания (ТТЦП).

Степень изученности проблемы. Аналитический обзор существующих решений по отбору энергии от тока. На подстанциях без дежурного персонала часто используется переменный оперативный ток, источником которого служат трансформаторы тока. В релейной защите существуют решения по отбору энергии от стандартных электромагнитных трансформаторов тока, как в схемах на электромагнитных реле, так и в схемах с применением современных микропроцессорных терминалов [3–5]. Подходы к выбору элементной базы и схем с питанием от тока иногда вызывают дискуссию среди профессионалов [6]. Надежность работы комбинированных блоков питания от тока и напряжения изучена и отражена в [7].

Наиболее глубокие исследования в области организации систем питания от тока представлены в работах Я.С. Гельфанда и др. [8, 9], где показана необходимость организации стабилизации выходного напряжения в широком диапазоне токов на основе схем, представленных на рис. 1.

В [8] также показано, что стабилизация напряжения СН может быть выполнена путем использования схем непрерывного действия с применением аналогового регулирующего звена на основе стабилитронов, варисторов, транзисторов, включая насыщающиеся трансформаторы или дроссели насыщения, а также путем использования схем импульсного действия на базе транзисторов или тиристоров с управляемой скважностью или углом отпираания.

Схемы стабилизации, выполненные на аналоговых звеньях полупроводниковых элементов, приводят к выделению большой активной мощности, которую нужно рассеивать с учетом того, что кратности токов короткого замыкания в десятки

раз превышают номинальные токи. В связи с этим, как показано в [8], практический интерес могут представлять схемы на основе импульсных СН и схемы на основе индуктивных реагирующих звеньев.

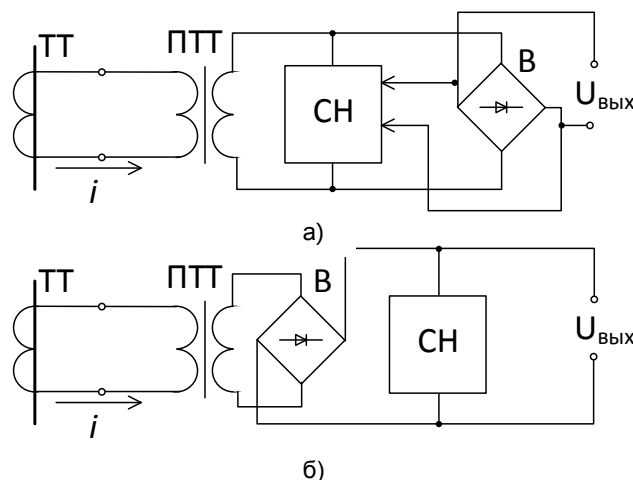


Рис. 1. Принципиальные схемы блоков питания от тока со схемой стабилизации напряжения (СН) на стороне переменного (а) и выпрямленного (б) напряжений

В [9] говорится об оптимальном сопротивлении нагрузки для заданного типа трансформатора, особое внимание уделяется перенапряжениям при повышенной нагрузке.

Наиболее эффективным является применение феррорезонансных схем, однако в [8] показано, что при больших кратностях токов стабилизирующий эффект перестает быть эффективным. Также в [8] предложен математический аппарат для расчетов схем стабилизации напряжения с нелинейной индуктивностью на основе метода эквивалентных синусоид и на основе кусочно-линейной аппроксимации. В настоящее время численные методы, реализованные в современных программных пакетах, таких как Matlab Simulink, Multisim и др., позволяют воспроизвести нелинейные процессы с более высокой степенью точности.

Также следует отметить, что в связи с развитием электронной компонентной базы можно получить более эффективную реализацию токового блока питания, основываясь на решениях, предложенных в [4, 5].

Наиболее близкое решение по организации блока питания представлено в [10], где рассматриваются аспекты моделирования устройства питания датчика измерения, расположенного на проводнике воздушной линии электропередачи высокого напряжения в нормальных и аварийных режимах линии электропередачи высокого напряжения.

Следует отметить, что полностью воспользоваться наработками, представленными в рассмотренной выше литературе, невозможно в связи с особенностями организации питания

электронных блоков от тока в цифровом измерительном трансформаторе.

Ключевыми особенностями организации питания в ЦТТН являются:

- организация питания непосредственно от первичного тока;
- неизменная нагрузка в виде электронных плат ЦТТН, т.е. постоянное потребление с повышенным пусковым током, обусловленным зарядом сглаживающих конденсаторов, установленных по питанию;
- применение на электронных платах импульсных схем стабилизации, влияющих на характеристики потребления;
- высокие требования по электромагнитной совместимости, низкому содержанию гармонических составляющих и шумов;
- необходимость стабилизации в широком диапазоне первичных токов;
- ограничение по массогабаритным показателям.

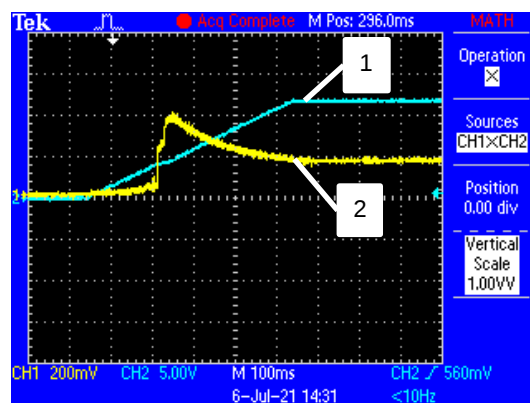
Материалы и методы. В настоящем исследовании остановимся на рассмотрении отдельных вопросов:

- разработка математической модели и исследование процессов перемагничивания ферромагнитного сердечника ТТЦП с выпрямительной и емкостной нагрузкой;
- анализ и выбор схемотехнических решений блока питания от тока линии электропередачи;
- анализ результатов математических и экспериментальных исследований блока питания.

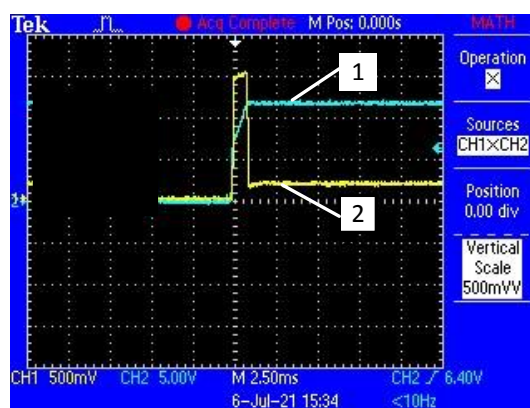
Разработка математической модели и исследование процессов перемагничивания ТТЦП. Эффекты, возникающие при перемагничивании электромагнитных трансформаторов тока, работающих на линейную нагрузку, хорошо изучены и представлены в литературе, например [11–18]. Однако динамические свойства ТТЦП существенным образом зависят как от характеристик нелинейности магнитной проницаемости ферромагнитного материала собственного сердечника ТТЦП, так и от нелинейности нагрузки, цепь которой содержит выпрямительные диоды, конденсаторы и интегральные микросхемы управления питанием. Следует также отметить, что предлагаемые методы расчета питающих трансформаторов тока [8–9] не позволяют организовать точный расчет и выбор параметров блока питания ЦТТН.

Электронная плата ЦТТН, представляющая собой нагрузку в момент подключения, может вести себя по-разному в зависимости от крутизны подаваемого на плату напряжения питания. Например, проведенные в ООО НПО «ЦИТ» эксперименты при подаче питания на одну из электронных плат демонстрируют совершенно различную динамику потребления электроэнергии. Так, на рис. 2,а показано, что при плавном увеличении напряжения питания (24 В/с) ток возрастает скачкообразно и в 2 раза превышает ток установившегося

режима, причем это превышение тока происходит в момент старта работы программного обеспечения самой платы.



а)



б)

Рис. 2. Осциллограммы пусковых напряжений (график 1) и токов (график 2): а – при подъеме питающего напряжения со скоростью 24 В/с; б – при подаче питающего напряжения со скоростью 12 кВ/с

Анализ полученных данных показывает, что, если напряжение подается с высокой скоростью (12 кВ/с), наблюдается кратковременное скачкообразное увеличение тока (в 7 раз по отношению к номинальному) длительностью 1 мс, затем происходит скачкообразное снижение потребления до номинального значения (рис. 2,б).

В целях исследования переходных процессов при перемагничивании сердечника методами математического и натурного моделирования на первом этапе была выбрана упрощенная схема, представленная на рис. 3.

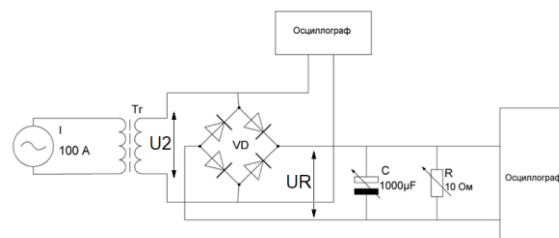


Рис. 3. Принципиальная схема блока питания для исследования процессов перемагничивания с выпрямительной активно-емкостной нагрузкой

В основу математической модели, описывающей работу ТТЦП, составленной в программе Matlab+Simulink (рис. 4), была заложена классическая система уравнений, описывающая процессы перемagnetизации сердечника трансформатора:

$$\begin{cases} u_2 = e_2 - L_{\sigma 2} \frac{di_2}{dt} - r_2 i_2, \\ e_2 = -w_2 \frac{d\Phi(t)}{dt}, \\ \Phi = B_{cp} S, \\ B_{cp} = f(H), \\ HI = i_1 w_1 - i_2 w_2. \end{cases} \quad (1)$$

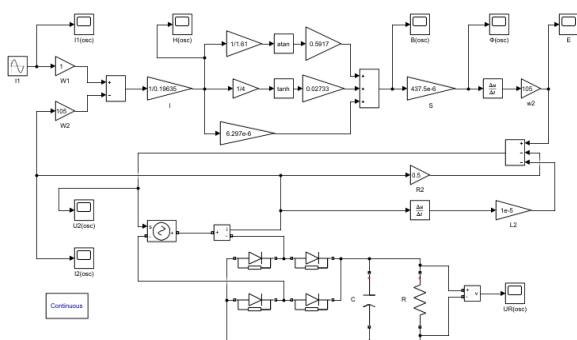


Рис. 4. Схема модели трансформатора тока, составленная в Matab+Simulink

Зависимость индукции в сердечнике от напряженности магнитного поля была определена экспериментально с помощью оборудования Omicron CT Analyzer (рис. 5).

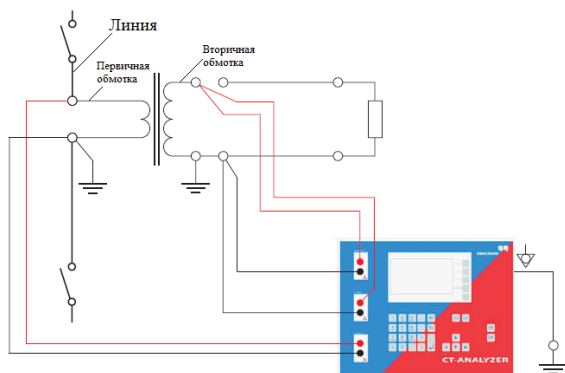
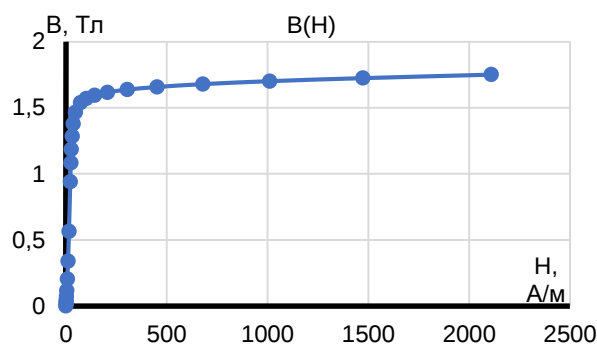
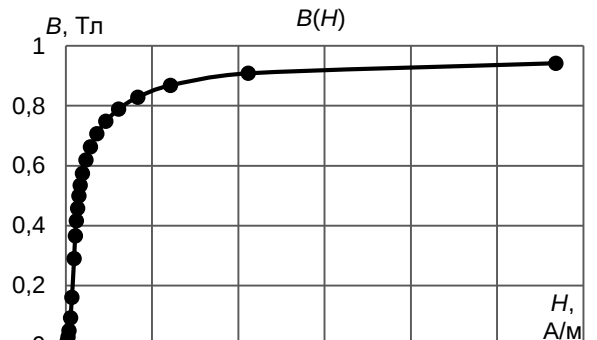


Рис. 5. Схема испытания ТТЦП с использованием CT Analyzer для определения характеристики намагничивания

Снятые экспериментальным путем характеристики намагничивания холоднокатанной (рис. 6,а) и аморфной (рис. 6,б) стали легли в основу аппроксимации кривой намагничивания, которая была выполнена с помощью встроенного пакета Curve Fitting Tool программного комплекса Matlab.



а)



б)

Рис. 6. Характеристики намагничивания холоднокатанной (а) и аморфной стали (б), полученные в эксперименте с применением CT Analyzer

Результат аппроксимации кривой намагничивания электротехнической стали (рис. 7) представлен следующей формулой:

$$B = 2,988 \left(a \tan\left(\frac{H}{5,412}\right) - \tanh\left(\frac{H}{5,637}\right) \right) + 2,069 \cdot 10^{-5} \cdot H. \quad (2)$$

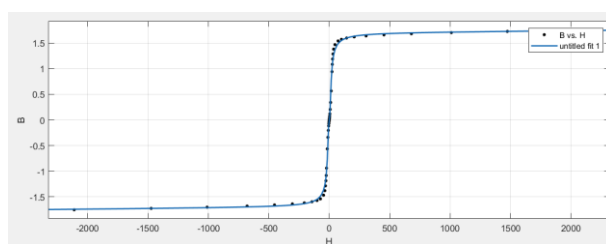


Рис. 7. Аппроксимация кривой намагничивания электротехнической стали

Математическое описание диодов в исследуемой схеме (см. рис. 4) реализовано посредством стандартной библиотеки Matlab/Simulink и представляет собой кусочно-линейную аппроксимацию двумя прямыми (рис. 8).

Следует отметить, что при моделировании сложных динамических процессов в целях исключения вычислительной неустойчивости желательно избегать построения модели с функциями дифференцирования и формировать уравнения через обратные – функции

интегрирования, как показано в [18]. Однако в данной задаче наблюдаемая вычислительная неустойчивость была устранена за счет выбранного решателя – ode4 с фиксированным шагом 10^{-6} .

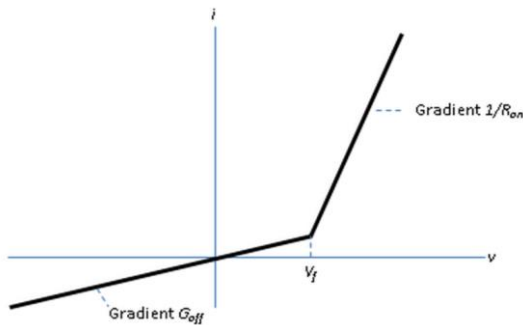


Рис. 8. Аппроксимация характеристики моделируемых диодов

Результат моделирования установившегося процесса при проявлении насыщения сердечника и влияния нелинейной нагрузки представлен на рис. 9. Характерная особенность переходного процесса при насыщении сердечника с выраженной нелинейной нагрузкой – это отсутствие синусоиды (или ее существенное искажение) во всех физических величинах B , H , U_2 , за исключением задаваемого первичного тока. Очевидно, что такого рода процессы могут быть решены только методом численного эксперимента с применением компьютерной техники.

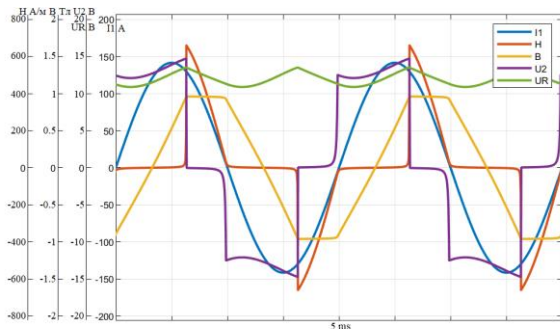


Рис. 9. Осциллограммы основных физических величин, полученные при моделировании в программе Matlab+Simulink

Анализ поведения основных физических величин, представленных на осциллограммах в различных режимах работы схемы, демонстрирует существенную взаимосвязь между параметрами схемы: сопротивлением нагрузки и емкостью конденсатора; величиной первичного тока и степенью насыщения питающего трансформатора.

При работе питающего трансформатора на выпрямительную нагрузку с емкостным накопителем энергии (см. рис. 9) при переходе тока через нулевое значение происходит скачкообразное увеличение напряжения, характерное именно для схемы с накопителем энергии,

включенным через выпрямительное устройство. При этом энергия на конденсаторе начинает накапливаться спустя некоторое время после того, как первичный ток возрастет до некоторого значения, при котором количество передаваемой энергии становится больше, чем потребляется резистивной нагрузкой. Затем по мере роста тока начинается рост напряжения на конденсаторе, и рост тем интенсивнее, чем больше амплитуда питающего тока. При наличии эффекта насыщения (см. рис. 9) можно наблюдать скачкообразный спад вторичного тока, который является характерным при работе трансформатора тока во время насыщения. Эффект сброса тока можно использовать в качестве регулирующего фактора для осуществления ограничения перенапряжения при токах короткого замыкания большой кратности.

Для верификации результатов математического моделирования использовано программное средство Multisim, в котором была составлена имитационная модель (рис. 10).

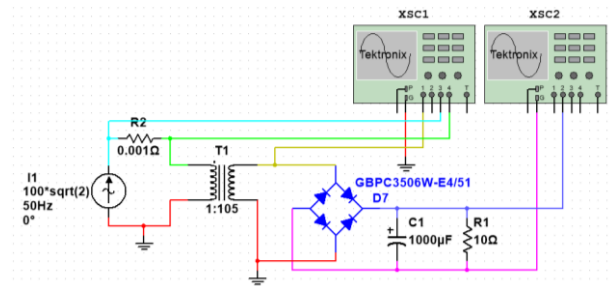


Рис. 10. Схема модели трансформатора тока с нелинейной нагрузкой, составленная в программе Multisim

Сравнительный анализ осциллограмм демонстрирует высокую степень совпадения результатов моделирования в обеих программных средах, что позволяет определять основные технические и энергетические параметры, необходимые для проектирования. Однако модель, построенная в среде Multisim, имеет характерную особенность: в момент наступления насыщения, сопровождающегося резким спадом вторичного тока и напряжения, на осциллограммах наблюдается короткий импульс микросекундного диапазона (рис. 11).

Сравнительный анализ математических моделей, реализованных в программах моделирования Matlab+Simulink и Multisim, показал, что модели полупроводниковых диодов в них имеют различия. В частности, среда Multisim обеспечивает более точное описание диодов, тогда как в модели Simulink (рис. 4) использовалась кусочно-линейная аппроксимация вольт-амперной характеристики (рис. 8) и не учитывались частотные свойства.

Частотные свойства диода определяются инерционными свойствами неосновных и основных носителей заряда, явлениями релаксации.

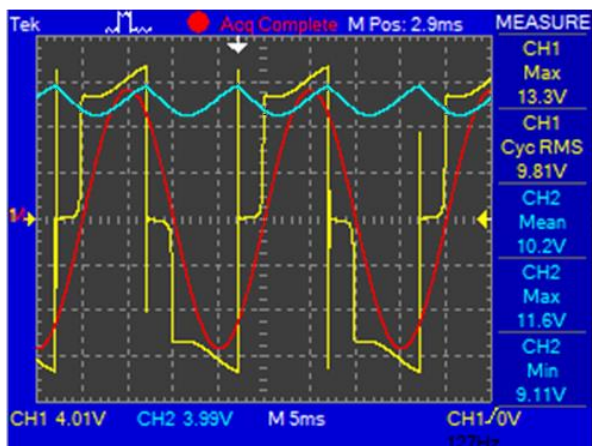


Рис. 11. Осциллограммы основных физических величин, полученные при моделировании в программе Multisim

В научно-технической литературе [19] отмечается проявление как емкостных, так и индуктивных свойств, проявляемых на высоких частотах в соответствии со схемами замещения, представленными на рис. 12.

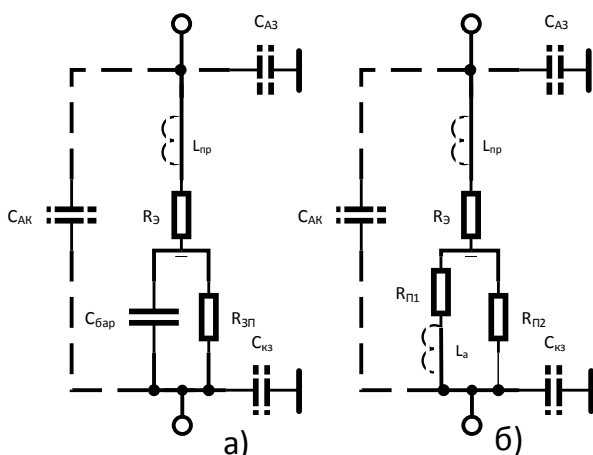


Рис. 12. Схемы замещения полупроводникового диода: а – при обратном смещении; б – при прямом смещении

Частотные свойства в программе Multisim [20] учитываются благодаря параметрически-зависимой емкости рп-перехода C_D :

$$C_D = \begin{cases} \tau_t \frac{dI_D}{dV_D} + C_{j0} \left(1 - \frac{V_D}{\phi_0} \right) & \text{для } V_D < FC * j_0, \\ \tau_t \frac{dI_D}{dV_D} + \frac{C_{j0}}{F_2} \left(F_3 + \frac{mV_D}{\phi_0} \right) & \text{для } V_D \geq FC * j_0, \end{cases} \quad (3)$$

где C_{j0} – емкость перехода с нулевым смещением; ϕ_0 – тепловой потенциал перехода; τ_t – постоянная времени; m , F_2 , F_3 , FC и j_0 – константы, определяемые свойствами полупроводника.

В целях ограничения импульсных напряжений во вторичной обмотке предложено шунтирование высокочастотных импульсов фильтром

с конденсаторами с керамической изоляцией малой емкости.

Для последующих исследований за основу принята модель в Multisim.

Разработанная модель подготовлена для исследований ее работы в различных условиях.

Ограничение перенапряжений. Схема, представленная на рис. 10, работоспособна в небольшом диапазоне значений первичного тока, так как даже с учетом насыщения питающего трансформатора напряжение на вторичной обмотке может достигать недопустимо высоких амплитудных значений.

Для увеличения диапазона значений первичного тока, при котором будет обеспечиваться работоспособность системы питания, следует предусмотреть дополнительное схемотехническое решение ограничителя перенапряжений.

По результатам исследований, проведенных в [21], наиболее эффективным решением данной проблемы является использование схем ограничения и стабилизации с применением полупроводниковых элементов. В [22] рассматривается схема ограничителя перенапряжений на основе двух обратно включенных тиристорных цепочек, работающих отдельно на свой полупериод тока основной частоты и подключаемых ко вторичной обмотке питающего трансформатора (рис. 13).

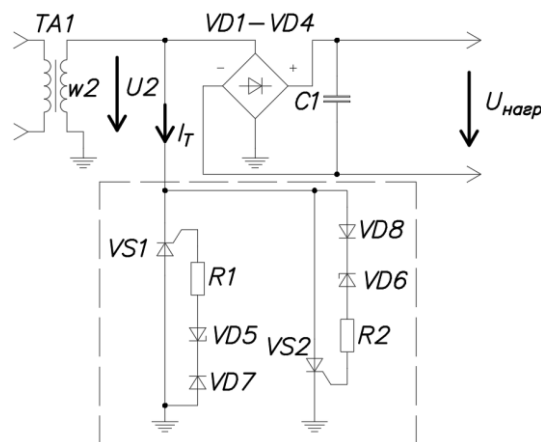
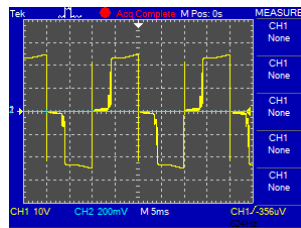


Рис. 13. Схема ТТЦП с ограничителем перенапряжений

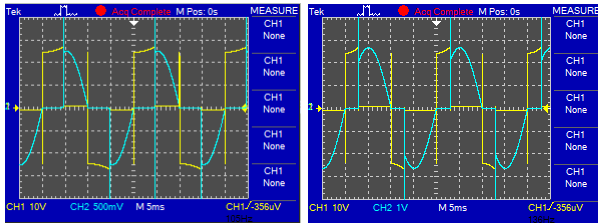
Принцип действия данной схемы основывается на замыкании вторичной обмотки при достижении мгновенным напряжением U_2 определенного значения. Осциллограммы напряжения U_2 и тока I_T , протекающего по тиристорной цепочке в режимах при отсутствии и наличии перенапряжений, представлены на рис. 14.

Анализ осциллограмм показывает, что при относительно невысоких значениях первичного тока наблюдается высокое значение вторичного тока, что может привести к перегреву тиристоров и выходу из строя схемы ограничителя перенапряжений.



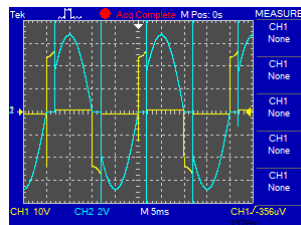
$I_1 = 70 \text{ A}$
 $U_2 - \text{CH1}; I_T - \text{CH2}, 1:1$

а)



$I_1 = 100 \text{ A}$

$I_1 = 200 \text{ A}$



$I_1 = 500 \text{ A}$
 $U_2 - \text{CH1}; I_T - \text{CH2}, 1:1$

б)

Рис. 14. Осциллограммы напряжения на вторичной обмотке и тока, протекающего по тиристорной цепочке: а – при отсутствии перенапряжения; б – при наличии перенапряжения

Для исключения перегрева предлагается установить дополнительную вторичную (защитную) обмотку на питающий трансформатор с большим числом витков по сравнению с питающей вторичной обмоткой для подключения схемы ограничителя перенапряжений (рис. 15).

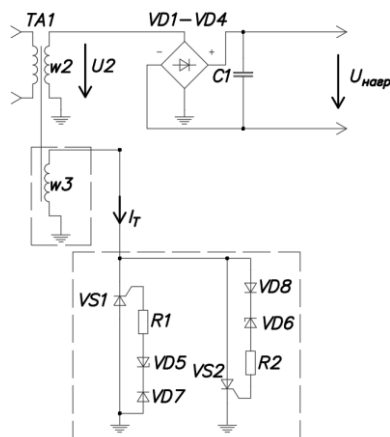
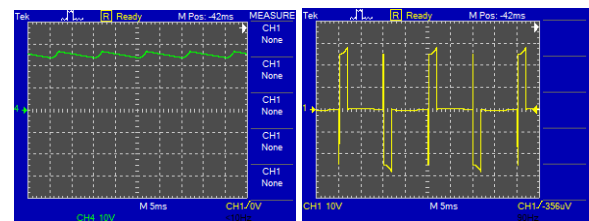


Рис. 15. ТТЦП с дополнительной вторичной обмоткой, подключенной к цепи защитного ограничителя перенапряжений

Таким образом, значение тока I_T снижается до уровня, допустимого для применяемых тиристоров. Это обеспечивает работоспособность схемы ограничителя перенапряжений в диапазоне токов термической стойкости до 40000 А с возможностью увеличения данного порога при использовании более мощных полупроводниковых приборов.

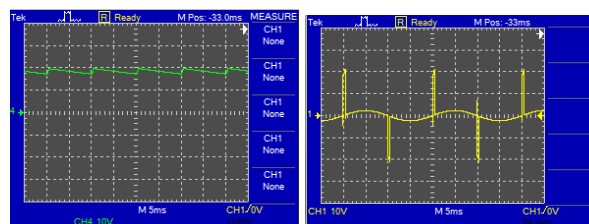
Стабилизация выходного напряжения. Принцип работы схемы ограничителя перенапряжений, представленной на рис. 15, основан на фиксированном максимальном мгновенном значении напряжения U_2 ТТЦП. При высоких значениях первичного тока это может привести к уменьшению выпрямленного напряжения $U_{нагр}$ за счет снижения длительности фронта U_2 и меньшей длительности подзарядки конденсатора (рис. 16).



$U_{нагр} - \text{CH4};$

$U_2 - \text{CH1}$

а)



$U_{нагр} - \text{CH4};$

$U_2 - \text{CH1}$

б)

Рис. 16. Осциллограммы выпрямленного напряжения и напряжения на вторичной питающей обмотке при различных значениях первичного тока: а – $I_1 = 500 \text{ A}$; б – $I_1 = 5000 \text{ A}$

Данный эффект может быть исключен с помощью применения обратной связи на основе оптотары, позволяющей регулировать максимальное мгновенное значение напряжения на вторичной обмотке за счет коммутации в цепи управления тиристором (рис. 17). В случае, когда напряжение $U_{нагр}$ падает ниже определенного значения, оптотара «разрывает» цепь управления тиристором до тех пор, пока $U_{нагр}$ не поднимется до определенного значения.

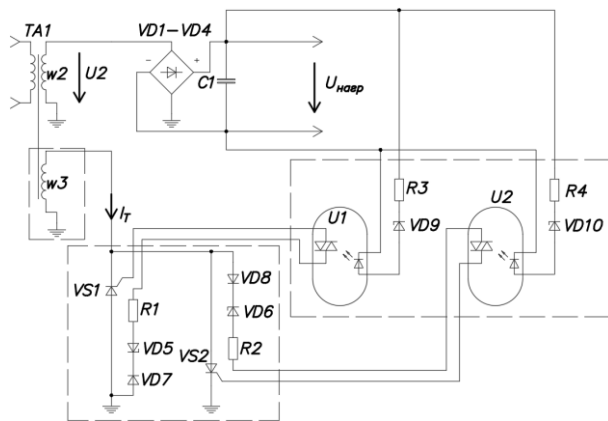


Рис. 17. Схема ТТЦП с дополнительной обмоткой, подключенной к цепи защитного ограничителя перенапряжений с обратной связью по напряжению

Результаты исследования. В целях верификации результатов моделирования была собрана физическая модель системы питания, электрическая принципиальная схема которой изображена на рис. 18.

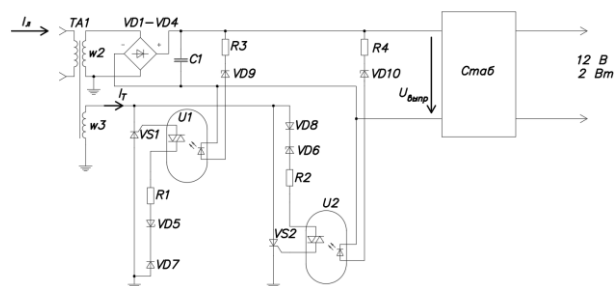


Рис. 18. Электрическая принципиальная схема системы питания

Верификация математической модели с физической производилась при значениях первичного тока, указанных в таблице.

Значения первичного тока

I_1 , А
1241
2270
4135
6235
7795
9159

Зависимости выпрямленного напряжения $U_{\text{выпр}}$ от первичного тока, полученные на математической и физической моделях, представлены на рис. 19.

Вывод. По результатам представленных исследований установлено, что система электропитания на основе питающего трансформатора тока с предложенной схемой ограничителя перенапряжений функционирует устойчиво при изменении первичного тока в широком диапазоне – от минимальной величины, характерной

для нормального режима, до максимальной, соответствующей условиям КЗ, сохраняя при этом требуемый уровень выходного напряжения на нагрузке.

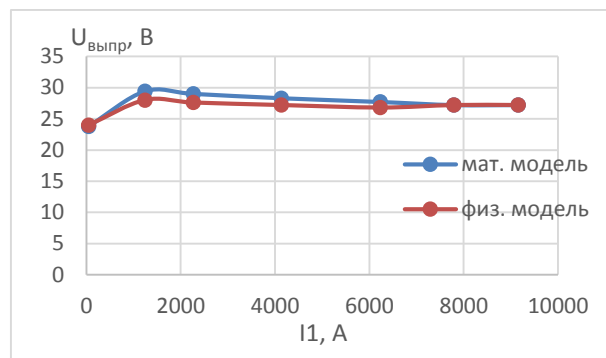


Рис. 19. Графики выпрямленного напряжения на математической и физической моделях

Список литературы

- Идрисов Д.М., Лебедев В.Д. Разработка и исследование токового блока питания с тиристорной защитой для ЦТН // XVII Всерос. (IX Междунар.) науч.-техн. конф. студ., асп., молодых ученых «Энергия-2022»: материалы конф.: в 6 т. Т. 3. – Иваново, 2022. – С. 74.
- Идрисов Д.М., Лебедев В.Д. Исследование динамических процессов перемагничивания насыщаемого трансформатора блока питания от первичного тока линии // XVI Всерос. (VIII Междунар.) науч.-техн. конф. студ., асп., молодых ученых «Энергия-2021»: материалы конф.: в 7 т. Т. 3. – Иваново, 2022. – С. 55.
- Аберсон М.Л. Источники оперативного тока на подстанциях. – М.; Л.: Изд-во «Энергия», 1964. – 48 с. [Библиотечка электромонтера. Вып. 138].
- Пат. № 2216844 С2 Российская Федерация, МПК H02M 7/12. Источник питания комбинированный: № 2001121064/09: заявл. 26.07.2001; опубл. 20.11.03 / С.В. Езерский, А.В. Миров, В.И. Потапенко, Ю.А. Алексеев. – 33 с.
- Захаров О.Г. Источники питания для схем с цифровыми устройствами релейной защиты. – М.: НФТ «Энергопрогресс», 2011. – 102 с. [Библиотечка электротехника, приложение к журналу «Энергетик»; Вып. 2(146)].
- Василевский Д. Дешунтирование снова в моде // 2016 [Электронный ресурс]. – URL: <https://pro-rza.ru/deshuntirovanie-snova-v-mode/>
- Захаров О.Г. Аппаратная надежность устройств релейной защиты. – М.: НФТ «Энергопрогресс», 2016. – 88 с. [Библиотечка электротехника, приложение к журналу «Энергетик»; Вып. 7(211)].
- Гельфанд Я.С. Выпрямительные блоки питания и зарядные устройства в схемах релейной защиты. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 192 с.
- Гельфанд Я.С., Голубев М.Л., Царев М.И. Релейная защита и автоматика на переменном оперативном токе. – Изд. 2-е перераб. – М.: Энергия, 1973. – 280 с.
- Скрипачев М.О., Кротков Е.А., Макаров Я.В. Устройство питания измерительных датчиков, расположенных на воздушной линии электропередачи // Электротехника. – 2022. – № 1. – С. 41–46. DOI: 10.53891/00135860_2021_1_41.
- Сирота И.М. К расчету переходных процессов в трансформаторах тока по частным кривым намагничивания // Электричество. – 1959. – № 2. – С. 21–26.

12. Сирота И.М. Методы расчета переходных процессов в трансформаторах тока // Труды ин-та электротехники АН УССР. – 1959. – Вып. 16. – С. 87–112.

13. Сирота И.М. Анализ и расчет переходных режимов работы трансформаторов тока. – Киев: Наукова думка, 1972.

14. Сирота И.М. Анализ и расчет нелинейных трансформаторов тока в переходных режимах // Электричество. – 1971. – № 1. – С. 32–36.

15. Либерзон Э.М. Инженерный метод расчета переходных процессов в трансформаторах тока // Электричество. – 1968. – № 12. – С. 38–43.

16. Трансформаторы тока / В.В. Афанасьев, Н.М. Адоньев, В.М. Кибель и др. – 2-е изд., перераб. и доп. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1989. – 416 с.

17. Казанский В.Е. Измерительные преобразователи тока в релейной защите – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 240 с.

18. Лебедев В.Д., Яблоков А.А. Исследование динамических процессов в измерительных трансформаторах тока и напряжения // Вестник ИГЭУ. – 2013. – Вып. 6. – С. 98–104.

19. Лукес Ю.С. Схемы на полупроводниковых диодах / пер. с нем. – М.: Энергия, 1972. – 336 с.

20. Multisim Component Reference Guide // National Instruments Corporation / January 2007.

21. Волович Г.И. Источники питания для электронных высоковольтных измерительных трансформаторов тока // Электротехника. – 2018. – № 1. – С. 49–54.

22. Нечаев Е.В. Исследование и анализ систем питания электронных модулей цифровых измерительных трансформаторов тока // ВКР. – Иваново, 2017.

References

1. Idrisov, D.M., Lebedev, V.D. Razrabotka i issledovanie tokovogo bloka pitaniya s tiristornoy zashchitoy dlya TSTTN [Development and study of a current power supply unit with thyristor protection for a centralized voltage transformer substation]. *Materialy XVII Vserossiyskoy (IX Mezhdunarodnoy) nauchno-tekhnicheskoy konferentsii studentov, aspirantov, molodykh uchenykh «Energiya-2022»*: v 6 t., t. 3 [Proceedings XVII All-Russian (IX international) scientific and technical conference of students, postgraduate students, and young scientists "Energy-2022": in 6 vols., vol. 3]. Ivanovo, 2022, p. 74.

2. Idrisov, D.M., Lebedev, V.D. Issledovanie dinamicheskikh protsessov peremagnichivaniya nasyshchaemogo transformatora bloka pitaniya ot pervichnogo toka linii [Study of dynamic processes of magnetization reversal of a saturable transformer of a power supply unit from the primary current of the line]. *Materialy XVI Vserossiyskoy (VIII Mezhdunarodnoy) nauchno-tekhnicheskoy konferentsii studentov, aspirantov, molodykh uchenykh «Energiya-2021»*: v 7 t., t. 3 [Proceedings XVI All-Russian (VIII International) Scientific and Technical Conference of Students, Postgraduates, and Young Scientists "Energy-2021": in 7 vols., vol. 3]. Ivanovo, 2022, p. 55.

3. Aberson, M.L. Istochniki operativnogo toka na podstantsiyakh [Sources of operational current at substations]. Moscow; Leningrad: Izdatel'stvo «Energiya», 1964. 48 p.

4. Ezersky, S.V., Mirov, A.V., Potapenko, V.I., Alekseev, Yu.A. Istochnik pitaniya kombinirovannyy [Combined power source]. Patent RF, no. 2216844, 2003.

5. Zakharov, O.G. Istochniki pitaniya dlya skhem s tsifrovymi ustroystvami releynoy zashchity [Power Supplies for Circuits with Digital Relay Protection Devices]. Moscow: NFT «Energoprogress», 2011. 102 p.

6. Vasilevskiy, D. *Deshuntirovanie snova v mode* [Deshunting is Back in Fashion]. 2016. Available at: <https://pro-rza.ru/deshuntirovanie-snova-v-mode/>

7. Zakharov, O.G. *Apparatsnaya nadezhnost' ustroystv releynoy zashchity* [Hardware Reliability of Relay Protection Devices]. Moscow: NFT «Energoprogress», 2016. 88 p.

8. Gelfand, Ya.S. *Vypriamitel'nye bloki pitaniya i zaryadnye ustroystva v skhemakh releynoy zashchity* [Rectifier power supplies and chargers in relay protection circuits]. Moscow: Energoatomizdat, 1983. 192 p.

9. Gelfand, Ya.S., Golubev, M.L., Tsarev, M.I. *Releytnaya zashchita i avtomatika na peremennom operativnom toke* [Relay protection and automation with alternating operational current]. Moscow: Energiya, 1973. 280 p.

10. Skripachev, M.O., Krotkov, E.A., Makarov, Ya.V. *Ustroystvo pitaniya izmeritel'nykh datchikov, raspolozhennykh na vozduшной linii elektroperedachi* [Power supply device for measuring sensors located on an overhead power line]. *Elektrotehnika*, 2022, no. 1, pp. 41–46. DOI: 10.53891/00135860_2021_1_41.

11. Sirota, I.M. K raschetu perekhodnykh protsessov v transformatorakh toka po chastnym krivym namagnichivaniya [On the calculation of transient processes in current transformers using partial magnetization curves]. *Elektrichestvo*, 1959, no. 2, pp. 21–26.

12. Sirota, I.M. Metody rascheta perekhodnykh protsessov v transformatorakh toka [Methods for calculating transient processes in current transformers]. *Trudy instituta elektrotehniki AN USSR*, 1959, issue 16, pp. 87–112.

13. Sirota, I.M. *Analiz i raschet perekhodnykh rezhimov raboty transformatorov toka* [Analysis and calculation of transient modes of operation of current transformers]. Kiev: Naukova dumka, 1972.

14. Sirota, I.M. Analiz i raschet nelineynykh transformatorov toka v perekhodnykh rezhimakh [Analysis and calculation of nonlinear current transformers in transient modes]. *Elektrichestvo*, 1971, no. 1, pp. 32–36.

15. Liberzon, E.M. Inzhenernyy metod rascheta perekhodnykh protsessov v transformatorakh toka [Engineering method for calculating transient processes in current transformers]. *Elektrichestvo*, 1968, no. 12, pp. 38–43.

16. Afanas'ev, V.V., Adon'ev, N.M., Kibel', V.M., Sirota, I.M., Stogniy, B.S. *Transformatory toka* [Current transformers]. Leningrad: Energoatomizdat. Leningradskoe otdelenie, 1989. 416 p.

17. Kazanskiy, V.E. *Izmeritel'nye preobrazovateli toka v releynoy zashchite* [Measuring current transducers in relay protection]. Moscow: Energoatomizdat, 1988. 240 p.

18. Lebedev, V.D., Yablokov, A.A. Issledovanie dinamicheskikh protsessov v izmeritel'nykh transformatorakh toka i napryazheniya [Study of dynamic processes in measuring current and voltage transformers]. *Vestnik IGEU*, 2013, issue 6, pp. 98–104.

19. Lukes, Yu.S. *Skhemy na poluprovodnikovyykh diodakh* [Circuits on semiconductor diodes]. Moscow: Energiya, 1972. 336 p.

20. Multisim Component Reference Guide. National Instruments Corporation. January 2007.

21. Volovich, G.I. Istochniki pitaniya dlya elektronnykh vysokovol'tnykh izmeritel'nykh transformatorov toka [Power supplies for electronic high-voltage measuring current transformers]. *Elektrotehnika*, 2018, no. 1, pp. 49–54.

22. Nechaev, E.V. Issledovanie i analiz sistem pitaniya elektronnykh moduley tsifrovyykh izmeritel'nykh transformatorov toka [Research and analysis of power supply systems for electronic modules of digital measuring current transformers]. VKR. Ivanovo, 2017.