

Tarkibiy modellashtirish orqali funksional o'zgartgichlardagi noaniqliklarni tadqiq etish va minimallashtirish

Moxira U. Idrisxodjaeva¹, Xoljan E. Xolbutayeva^{1,a}, Moldagali B. Peysenov^{1,b}

¹ dots, Toshkent davlat texnika universiteti, Toshkent, 100095, O'zbekiston; i.moxiraxon@gmail.com <https://orcid.org/0000-0001-7738-1671>

^{1,a} katta o'qituvchi. Toshkent davlat texnika universiteti, Toshkent, 100095, O'zbekiston; xolbutayevatdu@gmail.com <https://orcid.org/0000-0001-7957-5664>

^{1,b} katta o'qituvchi. Toshkent davlat texnika universiteti, Toshkent, 100095, O'zbekiston; peysenovmoldagali@gmail.com <https://orcid.org/0009-0006-8150-9408>

Dolzarbli: zamonaviy elektronika, kuchlanishni o'zgartirish texnikasi hamda avtomatlashtirilgan boshqaruv tizimlarining taraqqiyoti uzluksiz signallarni tezkor va yuqori aniqlikda qayta ishlash ehtiyoji bilan uzviy bog'liqdir. Umumiy raqamlashtirish jarayonlariga qaramay, analogli funksional o'zgartirgichlar (FO') teskari aloqa konturlarida, real vaqt tizimlarida hamda kuchli elektromagnit shovqinlar va ekstremal haroratlar sharoitida ishlovchi majmualarda o'rnini bosib bo'lmaydigan vosita bo'lib qolmoqda, negaki bunday muhitda analog-raqamli/raqam-analog o'zgartirgichlar (ARO/RAO') va mikroprotsessorlardan foydalanish murakkablashadi. Kenglik-impulsli modulyatorlar (KIM) ishonchli hisoblash tugunlarini (ko'paytirgichlar, bo'luvchilar) loyihalashda ulkan salohiyatga ega. Biroq, zamonaviy sxemotexnikada ulardan foydalanish ko'lab asbobga oid xatoliklarni tahlil qilishning umumiy nazariyasi yetarlicha ishlab chiqilmaganligi sababli cheklanib qolmoqda. An'anaviy hisoblash usullari komponentlarning jismoniy kamchiliklarini (gisterezis, qoldiq kuchlanishlar) yakuniy hisoblash xatoligi bilan yaqqol bog'lash imkonini bermaydi. Shu bois, ushbu xatoliklarni aniqlash va bartaraf etish maqsadida tarkibiy modellashtirish usullarini ishlab chiqish dolzarb vazifa sanaladi, uning hal etilishi sanoat elektronikasi aniqlik darajasini sezilarli ravishda oshirish imkonini beradi.

Maqsad: mazkur tadqiqotning maqsadi sabab-oqibat graf-modellari yordamida magnit-tranzistorli kenglik-impulsli modulyatorlar asosidagi funksional o'zgartirgichlarning xatoliklarini tahlil qilish va tarkibiy jihatdan to'g'rilashning ilmiy asoslangan metodologiyasini ishlab chiqishdan iborat.

Usullar: tadqiqotda elektr zanjirlari nazariyasi, mantiq algebrasi, graflar nazariyasi hamda nochiqliq dinamik tizimlarni matematik modellashtirish usullarini o'z ichiga olgan majmuaviy analitik yondashuv qo'llanilgan. Asosiy vosita sifatida sabab va oqibat tamoyili bo'yicha zanjirning har bir qismida energiya o'zgarishi yo'nalganligiga asoslanib tuziladigan sabab-oqibat modeli (SOM) xizmat qiladi. Qo'shimcha ravishda, to'g'ri to'rtburchakli gisterezis sirtmog'iga ega bo'lgan ferromagnit o'zaklarning qayta magnitlanish elektromagnit jarayonlarini tavsiflash uchun differensial hisoblash usullaridan foydalanilgan.

Natijalar: bo'luvchi qurilmaning barcha xatolik manbalarini to'rtta kesishmaydigan to'plamga tasniflash imkonini beruvchi tarkibiy graf-modeli ishlab chiqilgan. O'zakdagi magnit maydonining dinamik kuchlanganligi chiziqli o'sib boruvchi multiplikativ xatolikni, tranzistorning to'yinish kuchlanishi esa doimiy additiv xatolikni keltirib chiqarishi matematik jihatdan isbotlangan. Aniqlangan xatoliklarni qurilma yordamida to'liq kompensatsiya qilishni ta'minlovchi qat'iy analitik shartlar ishlab chiqilgan hamda qo'shimcha zanjirlar parametrlarini hisoblash formulalari keltirib chiqarilgan, bu esa sxemaning umumiy xatoligi tajriba asosida 0,2% gacha pasaytirilishi bilan tasdiqlangan.

Kalit so'zlar: funksional o'zgartirgichlar, kenglik-impulsli modulyatsiya, sabab-oqibat modeli, tarkibiy modellashtirish, asbobga oid xatolik, additiv xatolik, multiplikativ xatolik, magnit gisterezisi, korreksiya zanjirlari.

Исследование и минимизация неточностей функциональных преобразователей методами структурного моделирования

Мохира У. Идрисходжаева¹, Холжан Э. Холбутаева^{1,a}, Молдагали Б. Пейсенов^{1,b}

¹ доц, Ташкентский государственный технический университет, Ташкент, 100095, Узбекистан; i.moxiraxon@gmail.com <https://orcid.org/0000-0001-7738-1671>

^{1,a} старший преподаватель. Ташкентский государственный технический университет, Ташкент, 100095, Узбекистан; xolbutayevatdu@gmail.com <https://orcid.org/0000-0001-7957-5664>

^{1,b} старший преподаватель. Ташкентский государственный технический университет, Ташкент, 100095, Узбекистан; peysenovmoldagali@gmail.com <https://orcid.org/0009-0006-8150-9408>

Актуальность: развитие современной электроники, силовой преобразовательной техники и систем автоматического управления неразрывно связано с необходимостью быстрой и точной обработки непрерывных сигналов. Несмотря на тотальную цифровизацию, аналоговые функциональные преобразователи (ФП) остаются незаменимыми в контурах обратной связи, системах реального времени и комплексах, работающих в условиях жестких электромагнитных помех и экстремальных температур, где применение преобразователей (АЦП/ЦАП) и микропроцессоров затруднено. Широотно-импульсные модуляторы (ШИМ) обла-

For citation: Idriskhodjaeva M.U., Xolbutaeva Kh.E., Peysenov M.B. Investigation and minimization of inaccuracies in functional converters using structural modeling methods. Scientific and technical journal of Problems of Energy and Sources Saving, 2026, no. 2, pp. 97-106.

<https://doi.org/10.5281/zenodo.21200562>

Received: 20.12.2025

Revised: 19.04.2026

Accepted: 14.06.2026

Published: 26.06.2026

Copyright: © Mokhira U. Idriskhodjaeva, Xoljan E. Xolbutaeva, Moldagali B. Peysenov, 2026. Submitted to Problems of Energy and Sources Saving for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

дают колоссальным потенциалом для построения надежных вычислительных узлов (умножителей, делителей). Однако в современной схемотехнике их использование ограничивается недостаточной проработанностью общей теории анализа инструментальных погрешностей. Традиционные методы расчета не позволяют наглядно связать физические несовершенства компонентов (гистерезис, остаточные напряжения) с итоговой ошибкой вычислений. Поэтому разработка методов структурного моделирования для выявления и устранения этих погрешностей является актуальной задачей, решение которой позволит многократно повысить уровень точности промышленной электроники.

Цель: целью данного исследования является разработка научно обоснованной методологии анализа и структурной коррекции погрешностей функциональных преобразователей на базе магнитно-транзисторных широтно-импульсных модуляторов с применением причинно-следственных граф-моделей.

Методы: в работе применяется комплексный аналитический подход, включающий теорию электрических цепей, алгебру логики, теорию графов и методы математического моделирования нелинейных динамических систем. Основным инструментом является причинно-следственная модель (ПСМ), которая строится на основе направленности преобразования энергии на каждом участке цепи по принципу «причина — следствие». Дополнительно используются методы дифференциального исчисления для описания электромагнитных процессов перемагничивания ферромагнитных сердечников с прямоугольной петлей гистерезиса.

Результаты: разработана структурная граф-модель делительного устройства, позволившая классифицировать все источники погрешностей на четыре непересекающихся множества. Математически доказано, что динамическая напряженность магнитного поля сердечника вызывает линейно нарастающую мультипликативную ошибку, а напряжение насыщения транзистора — постоянную аддитивную ошибку. Разработаны строгие аналитические условия и выведены формулы расчета параметров дополнительных цепей, при которых происходит полная аппаратная компенсация выявленных погрешностей, что подтверждено экспериментальным снижением общей ошибки схемы до 0,2%.

Ключевые слова: функциональные преобразователи, широтно-импульсная модуляция, причинно-следственная модель, структурное моделирование, инструментальная погрешность, аддитивная погрешность, мультипликативная погрешность, магнитный гистерезис, цепи коррекции.

Investigation and minimization of inaccuracies in functional converters using structural modeling methods

Mokhira U. Idriskhodjaeva¹, Kholjan E. Kholbutaeva^{1,a}, Moldagali B. Peysenov^{1,b}

¹⁾ Assoc, Tashkent State Technical University, Tashkent, 100095, Uzbekistan; i.moxiraxon@gmail.com <https://orcid.org/0000-0001-7738-1671>

^{1,a} Assis. Tashkent State Technical University, Tashkent, 100095, Uzbekistan; xolbutayevatdtu@gmail.com <https://orcid.org/0000-0001-7957-566>

^{1,b} Assis. Tashkent State Technical University, Tashkent, 100095, Uzbekistan; peysenovmoldagali@gmail.com <https://orcid.org/0009-0006-8150-9408>

Relevance: the development of modern electronics, power conversion technology, and automatic control systems is inextricably linked to the need for fast and accurate processing of continuous signals. Despite comprehensive digitalization, analog functional converters remain indispensable in feedback loops, real-time systems, and complexes operating under severe electromagnetic interference and extreme temperatures, where the use of analog-to-digital/digital-to-analog converters and microprocessors is severely complicated. Pulse-width modulators possess enormous potential for building reliable computing nodes, such as multipliers and dividers. However, their application in modern circuit design is limited by the insufficient development of the general theory regarding instrumental error analysis. Traditional calculation methods fail to explicitly link the physical imperfections of components, such as hysteresis and residual voltages, to the final computational error. Therefore, developing structural modeling methods to identify and eliminate these errors is an urgent task; solving it will significantly increase the accuracy level of industrial electronics.

Aim: the purpose of this study is to develop a scientifically grounded methodology for the analysis and structural correction of errors in functional converters based on magnetic-transistor pulse-width modulators using causal-effect graph models.

Methods: the study employs a comprehensive analytical approach that includes electrical circuit theory, Boolean algebra, graph theory, and mathematical modeling methods for nonlinear dynamic systems. The primary analytical tool is the causal-effect model, constructed based on the directionality of energy conversion in each circuit section according to the cause-and-effect principle. Additionally, differential calculus methods are utilized to describe the electromagnetic processes of magnetization reversal in ferromagnetic cores exhibiting a rectangular hysteresis loop.

Results: a structural graph model of the dividing device was developed, enabling the classification of all error sources into four disjoint sets. It was mathematically proven that the dynamic magnetic field strength of the core induces a linearly increasing multiplicative error, whereas the transistor saturation voltage generates a constant additive error. Strict analytical conditions were established, and formulas for calculating the parameters of auxiliary circuits were derived to achieve complete hardware compensation of the identified errors. This approach was confirmed experimentally, demonstrating a reduction in the total circuit error to 0.2%.

Keywords: functional converters, pulse-width modulation, causal-effect model, structural modeling, instrumental error, additive error, multiplicative error, magnetic hysteresis, correction circuits.



1. Введение (Introduction)

В современной информационной и энергетической электронике, измерительной технике и системах автоматического регулирования важнейшую роль играют функциональные преобразователи (ФП). Данные устройства предназначены для выполнения математических операций над аналоговыми сигналами (умножение, деление, возведение в степень, извлечение корня) в реальном масштабе времени. Несмотря на стремительное развитие цифровых вычислительных средств, аналоговые ФП сохраняют свои позиции в ряде критических приложений, требующих нулевой латентности, непрерывности процесса управления, широкого динамического диапазона, а также высокой радиационной и температурной стойкости [1-5, 7, 20–24].

Особое место среди аналоговых вычислителей занимают устройства, построенные на основе широтно-импульсной модуляции (ШИМ), в частности, магнитно-транзисторные ШИМ (МТШИМ). В современной технике использование таких модуляторов не в полной мере соответствует их потенциальным возможностям. В значительной степени причиной этого является недостаточное развитие той части общей теории электрических цепей и систем, которая связана с детальным анализом погрешностей и чувствительности самих ШИМ, а также функциональных преобразователей, построенных на их базе [1-4, 5, 6, 13].

Анализ современной научно-технической литературы показывает, что рекомендованные режимы работы и параметры ШИМ-преобразователей далеко не всегда являются оптимальными для достижения требуемой точности и высокой кратности регулирования входных сигналов. Существующие методы проектирования, основанные на классических законах Кирхгофа, методе контурных токов или узловых потенциалов, дают громоздкие математические выражения. Эти выражения, хотя и являются алгебраически точными, обладают низким уровнем наглядности: они скрывают реальные физические пути прохождения сигналов и «размывают» влияние конкретного нежелательного параметра (например, сопротивления обмотки или не идеальности транзисторного ключа) по всему уравнению передачи. В результате разработчику крайне сложно определить, какой именно элемент схемы вносит наибольший вклад в общую инструментальную погрешность и каким образом этот вклад можно нейтрализовать аппаратными средствами [6,7,18].

В связи с этим представляет значительный научный и практический интерес методика, использующая построение причинно-следственной модели (ПСМ) устройства по напряжениям участков его цепей. В отличие от традиционных графов (графов Мейсона) прохождения сигналов, причинно-следственный подход опирается на глубокое понимание физики процессов.

Научная новизна данного исследования заключается в систематизации инструментальных погрешностей аналоговых делительных устройств на базе магнитно-транзисторной широтно-импульсной модуляции (МТШИМ) с применением топологического графоаналитического метода, а также в синтезе строго обоснованных цепей местной коррекции, позволяющих устранять аддитивные и мультипликативные отклонения без применения дорогостоящей прецизионной элементной базы.

Объектом исследования является однополупериодное делительное устройство на базе ШИМ. Предмет исследования — инструментальные погрешности данного устройства и методы их структурной компенсации.

2. Методы и материалы (Methods and materials)

2.1. Концепция причинно-следственного моделирования. В качестве априорной информации для построения ПСМ устройства используются данные о топологической структуре многосвязных цепей, базирующиеся на фундаментальных законах электрических цепей и алгебре логики. При этом фундаментальное понятие «направление» в граф-модели жестко связано с физической направленностью преобразования энергии и информации на каждом отдельном участке цепи устройства в строгом соответствии с принципом «причина — следствие».

Например, приложение электрического напряжения к клеммам обмотки индуктивности является физической причиной, а возникающее в магнитопроводе изменение магнитного потока — следствием. Использование ПСМ позволяет не только визуально и математически выявить все основные источники погрешностей устройства, но и найти прямые пути их полного или частичного структурного устранения. Сочетание невероятной простоты и наглядности методики с возможностью алгоритмизированного синтеза схем ФП повышенной точности составляет основное ее преимущество перед чисто аналитическими методами исследования точностных характеристик.[5]

2.2. Анализ структурной схемы и категоризация погрешностей. Для демонстрации эффективности данного метода рассмотрим однополупериодное делительное устройство,



построенное на базе магнитно-транзисторного ШИМ. Принцип работы такого делителя, преобразующего входные напряжения U_1 (числитель) и U_2 (знаменатель) в выходное напряжение, пропорциональное их отношению, базируется на время-импульсном преобразовании.

Процесс анализа начинается с построения ПСМ делительного устройства. В модели вершины графа соответствуют электрическим потенциалам или падениям напряжений, а дуги — физическим операторам передачи. С помощью построенного графа осуществляется декомпозиция всех возможных отклонений на четыре функционально независимых множества:

Множество Π_1 : Погрешности, возникающие при прямой передаче информации. Их составляет множество вершин модели (исключая вершины, отображающие идеальные источники питания, входных и задающих сигналов):

$$\Pi_1 = \{U_{w_2}, U_{w_8}, U_{\text{вых}}\}. \quad (1)$$

Эти вершины являются полезными переносчиками информационного сигнала.

Множество Π_2 : погрешности, возникающие в неинформативных участках модели. Эти участки необходимы для поддержания физического функционирования схемы (смещение, намагничивание, коммутация), но они не должны участвовать в математической операции:

$$\Pi_2 = \{U_{K_1}, U_{R_2}, U_{R_8}, U_{\text{эkn}}\}. \quad (2)$$

Множество Π_3 : погрешности, возникающие из-за неидеальности самих источников входных и задающих сигналов, а также источников питания (пульсации, нестабильность амплитуды):

$$\Pi_3 = \{U_1, U_2, U_{\omega}\}. \quad (3)$$

Множество Π_4 : погрешности, возникающие за счет внешних дестабилизирующих возмущающих факторов (температурный дрейф параметров, электромагнитные наводки, старение элементов). Их составляет множество Π_4 вершин:

$$\Pi_4 = \{U_{B1}, U_{B2}, \dots, U_{B10}\}. \quad (4)$$

С точки зрения теории точности измерительных систем, первые два множества (Π_1 и Π_2) являются внутренними источниками фундаментальной инструментальной погрешности. Множество Π_3 выступает источником трансформированной погрешности, а Π_4 — источником дополнительной (эксплуатационной) погрешности делительного устройства.[21]

2.3. Математическое моделирование физических несовершенств. В рамках данного исследования фокус направлен на инструментальную погрешность, порождаемую неинформативными вершинами множества Π_2 , в частности, на параметры U_{R_2} и $U_{\text{эkn}}$.

Величина U_{R_2} представляет собой падение напряжения на активном сопротивлении обмотки, обусловленное током намагничивания. Оно всецело определяется значением динамической напряженности магнитного поля ферромагнитного сердечника (H). Величина $U_{\text{эkn}}$ представляет собой остаточное напряжение (напряжение насыщения) между эмиттером и коллектором открытого биполярного транзистора, находящегося в режиме глубокого насыщения.

В гипотетическом идеальном случае $U_{R_2} = U_{\text{эkn}} = 0$, и математическая информация без энергетических и спектральных потерь передается из входных вершин U_1 и U_2 на последующие каскады вычислителя. Однако в реальном устройстве они строго отличны от нуля и вносят значительную, порой критическую, погрешность в осуществляемое функциональное преобразование.

Для описания динамики перемагничивания сердечников с прямоугольной петлей гистерезиса (ППГ), выполненных из пермаллоев или специализированных ферритов, используются положения нелинейной электродинамики. Теоретические и экспериментальные исследования показывают, что зависимость скорости изменения магнитной индукции от напряженности поля при перемагничивании источником прямоугольного переменного напряжения в широком частотном и амплитудном диапазоне можно с достаточной инженерной точностью аппроксимировать линейным дифференциальным уравнением:

$$\frac{dB}{d\tau} = \frac{\mu_{\text{э}}}{\pi} (H \mp H_c); \quad (5)$$

где $\frac{dB}{d\tau}$ — производная магнитной индукции по безразмерному времени; $\tau = \omega t$;

знак «-» соответствует процессу увеличению индукции в сердечнике;

знак «+» соответствует процессу её уменьшения;

H_c — коэрцитивная сила, определяемая по квазистатической прямоугольной петле гистерезиса;

$\mu_{\text{э}}$ — эквивалентная динамическая магнитная проницаемость, определяемая из динамической кривой размагничивания конкретного магнитного материала.

3. Результаты (Results)

Структурно-топологический анализ. Для наглядной демонстрации механизмов передачи сигналов рассмотрим принципиальную схему исследуемого делительного устройства.

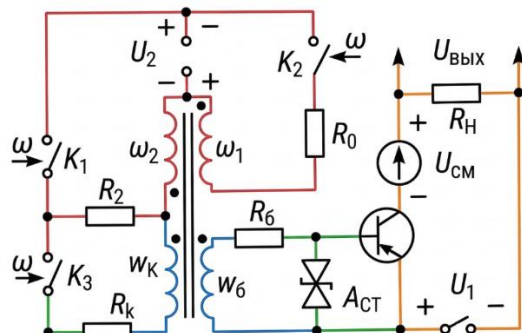


Рис.1. Принципиальная электрическая схема однополупериодного делительного устройства на базе магнитно-транзисторного ШИМ [5, 20]

Fig.1. Schematic circuit diagram of a single-half-cycle dividing device based on magnetic-transistor PWM [5, 20]

На базе представленной схемы формируется причинно-следственная модель без учета пунктирных (корректирующих) участков цепи.

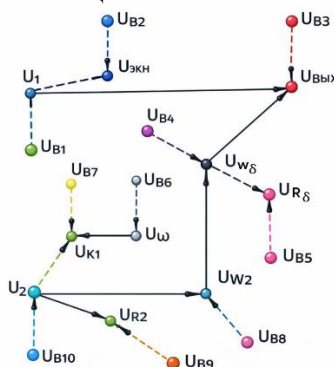


Рис.2. Базовая причинно-следственная модель (PCM) делительного устройства, отражающая распространение погрешностей [7, 25].

Fig.2. Base causal-effect model (CEM) of the dividing device reflecting error propagation [7, 25].

Анализ мультипликативных и аддитивных погрешностей. Анализ PCM представленный на рис.2 позволяет проследить влияние каждой неинформативной вершины на конечный результат.

Мультипликативная ошибка (U_{R_2}). Нетрудно убедиться в том, что с увеличением входного аналогового сигнала знаменателя U_2 , напряженность поля H изменяется, что ведет к линейному увеличению тока намагничивания. Следовательно, величина падения напряжения U_{R_2} увеличивается практически линейно пропорционально входному сигналу. Поскольку ошибка масштабируется вместе с сигналом, она вызывает на выходе устройства погрешность строго мультипликативного характера (ошибка масштаба или крутизны преобразования) при идеальности других вершин модели.

Аддитивная ошибка ($U_{ЭКН}$). Величину $U_{ЭКН}$ (напряжение насыщения эмиттер-коллектор) в режиме переключения транзистора в первом инженерном приближении можно считать постоянной (обычно порядка 0.1–0.3 В для маломощных кремниевых транзисторов), зависящей в основном от температуры кристалла и базового тока, но не от коммутируемого сигнала. Учитывая прямой характер передачи информации из вершины числителя U_1 на транзисторную вершину $U_{ЭКН}$, математически доказывается, что погрешность, вызванная $U_{ЭКН}$, имеет аддитивный характер (смещение нуля). Она прибавляется к полезному сигналу и не зависит от текущей величины входных напряжений.

Синтез цепей коррекции. Согласно принципам граф-моделирования, мультипликативные погрешности могут быть устранены введением местной параметрической коррекции (обратной связи), а аддитивные — введением дополнительных изолированных вершин (источников смещения).

На базе этих выводов синтезирована скорректированная модель.

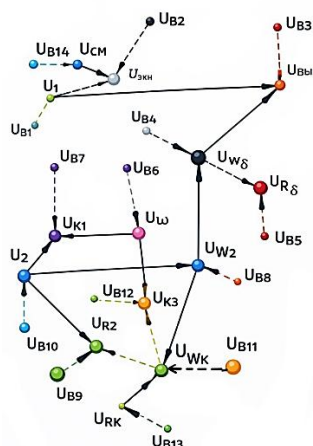


Рис.3. Скорректированная причинно-следственная модель с внедренными контурами компенсации

Fig.3. Corrected causal-effect model with implemented compensation loops

Реализовать данные коррекции (пунктирные участки цепей на рис.1) по неинформативным инструментальным погрешностям можно схемотехнически:

1. Мультипликативная ошибка устраняется компенсирующим контуром из вершины первичной обмотки U_{w_1} через специальную компенсационную обмотку w_k на вершину U_{R_2} . Данная обмотка генерирует противоЭДС, точно компенсирующую потери на намагничивание.

2. Аддитивная ошибка $U_{ЭКН}$ компенсируется введением последовательной вершины U_{CM} , представляющей собой термостабилизированный источник напряжения смещения.

Условия полной математической компенсации погрешностей нетрудно получить из совместного решения системы дифференциальных и алгебраических уравнений, описывающих физические процессы в схеме, с учетом допущения о линейности изменения индукции.

Для компенсации аддитивной погрешности должно выполняться условие равенства напряжений:

$$U_{ЭКН} = U_{CM}. \quad (6)$$

При этом сопротивление цепи коррекции в цепи базы транзистора рассчитывается по формуле:

$$R_{\delta} = \frac{U_{CT} w_{\delta}}{H_c l}; \quad (7)$$

где U_{CT} — стабилизированное напряжение источника питания.

Для полной параметрической компенсации мультипликативной погрешности сопротивление корректирующего контура вычисляется по следующему точному выражению:

$$R_k = \frac{S \omega \mu_3 U_{CT} (w_k^2 - w_2 w_k)}{l (\pi U_{CT} - w_{\delta} S \omega \mu_3 H_c)}; \quad (8)$$

Где S — площадь поперечного сечения ферромагнитного сердечника;

l — средняя геометрическая длина магнитных силовых линий сердечника;

w_2, w_k, w_{δ} — число витков соответствующих обмоток трансформатора.

При идеальном выполнении синтезированных условий коррекции, преобразование информации на остальных вершинах модели происходит без искажений. Тогда среднее значение выходного напряжения описывается классической формулой идеального аналогового делителя:

$$U_{tвых} = \frac{U_s}{2} \cdot \frac{U_1}{U_2}. \quad (9)$$

Данное соотношение физически реализуемо в диапазоне, где знаменатель превышает пороговое значение перемагничивания:

$$U_2 > U_s = 4 f w_2 S B_s; \quad (10)$$

где f — частота переключения транзисторных ключей (тактовая частота ШИМ), а B_s — предельная индукция насыщения материала сердечника.

4. Обсуждение (Discussion)

Анализ полученных результатов и их инженерная значимость. Как видно из аналитических выкладок, при принятых допущениях введение соответствующих топологических коррекций по погрешностям, вызванным вершинами U_{R_2} и $U_{ЭКН}$, превращает реальную физическую модель рассматриваемого устройства в практически идеальное вычислительное (делительное) устройство.



Ключевым инженерным преимуществом предложенного метода является то, что коррекция осуществляется не за счет применения высокоточных и дорогостоящих компонентов (например, операционных усилителей с нулевым дрейфом или транзисторов с ультранизким $V_{CE(sat)}$), а за счет интеллектуального перераспределения энергетических потоков внутри самой магнитно-транзисторной структуры. Введение компенсационной обмотки w_k и резистора R_k формирует локальную положительную или отрицательную (в зависимости от фазировки) обратную связь по магнитному потоку, которая динамически «подкачивает» необходимую энергию в сердечник, делая его для внешнего сигнала математически «прозрачным» и безгистерезисным.

Сравнение с существующими методами. В сравнении с методами цифровой компенсации (табличный метод, feed-forward коррекция на базе микроконтроллеров), структурная компенсация внутри аналогового тракта работает с нулевым запаздыванием, что критически важно в контурах импульсных источников питания и скоростных электроприводов. Кроме того, цифровые методы часто требуют АЦП высокой разрядности для оцифровки самого напряжения насыщения, что экономически неэффективно.

Экспериментальное подтверждение и ограничения метода. В действительности, из-за наличия других, более тонких источников погрешностей (например, из множества P_4 — тепловой дрейф H_c , межвитковые емкости, эффект Миллера в коммутирующем транзисторе на высоких частотах), абсолютная идеальность недостижима. Однако экспериментальная верификация созданного макета делительного устройства с внедренными корректирующими цепями R_k и U_{cm} показала блестящие результаты: относительная погрешность функционального преобразования во всем динамическом диапазоне не превышала 0,2%. Для аналоговых вычислителей разомкнутого типа (без глобальной ООС) этот показатель классифицируется как прецизионный.

Ограничением предложенного аналитического подхода является гипотеза о линейной аппроксимации кривой динамического перемагничивания. При работе устройства в условиях сильных внешних магнитных полей или экстремальных температур (вызывающих значительную нелинейную деградацию μ_z), расчетные значения R_k и R_δ могут потребовать адаптивной подстройки (например, с применением терморезисторов в цепях компенсации).

Таким образом, предложенная методика исследования точности ФП на базе МТШИМ с помощью причинно-следственной модели позволяет для каждого конкретного схемного решения и жестких условий эксплуатации выделить наиболее существенные источники погрешностей (провести ранжирование) и найти математически точные пути их схемотехнического устранения.

5. Заключение (Conclusion)

В результате проведенного исследования была решена важная научно-техническая задача повышения точности аналоговых функциональных преобразователей, функционирующих на основе широтно-импульсной модуляции.

Основные научные выводы:

1. Доказана высокая эффективность применения причинно-следственных структурных моделей (ПСМ) для топологического анализа измерительных и вычислительных электронных цепей. ПСМ позволяет алгоритмизировать процесс поиска источников ошибок путем разделения графа цепи на информативные и неинформативные множества.

2. Математически обосновано и структурно подтверждено, что паразитное падение напряжения на намагничивание сердечника порождает мультипликативную ошибку масштаба, в то время как падение напряжения на насыщенном транзисторном ключе генерирует аддитивную ошибку смещения.

3. Разработан метод параметрического синтеза контуров локальной магнитной и электрической обратной связи. Выведенные аналитические уравнения для резисторов R_k и R_δ позволяют на этапе проектирования рассчитать номиналы компонентов, обеспечивающих полную теоретическую нейтрализацию влияния магнитных потерь и полупроводниковых неидеальностей.

Теоретическая и практическая ценность: Теоретический вклад заключается в развитии графоаналитических методов расчета нелинейных магнитно-полупроводниковых цепей с учетом их динамических свойств. Практическая ценность результатов подтверждается созданием аппаратного прототипа, инструментальная погрешность которого не превышает 0,2%.

Перспективы дальнейших исследований: Разработанная методология закладывает фундамент для создания специализированных систем автоматизированного проектирования



(САПР), способных в автоматическом режиме генерировать топологии высокоточных аналоговых модулей. Дальнейшие исследования целесообразно направить на интеграцию в ПСМ вершин множества P_4 (тепловые и частотные возмущения) с целью разработки алгоритмов многопараметрической адаптивной самокоррекции преобразователей в режиме реального времени.

ЛИТЕРАТУРА

1. Закон Республики Узбекистан «О внесении изменений и дополнений в Закон Республики Узбекистан «О рациональном использовании энергии»», 14.07. 2020, № ЗРУ-628.
2. Указ Президента РУз № УП-6079 от 05.10.2020 «Об утверждении стратегии "Цифровой Узбекистан-2030" и мерах по её эффективной реализации».
3. Постановление Президента Республики Узбекистан от 22 августа 2019 г. № ПП-4422 «Об ускоренных мерах по повышению энергоэффективности отраслей экономики и социальной сферы, внедрению энергосберегающих технологий и развитию возобновляемых источников энергии».
4. B.A. Abdullaev, X. Xolbutayeva, M. Idrisxodjayeva. Elektr zanjirlari va tizimlaridagi nochiziqli passiv elementlarining umumlashtirilgan modellari. Monografiya. Toshkent – “TDTU nashriyoti” - 2020, 10,75 b.t.
5. Абдуллаев Б.А. Обобщенные модели и параметры пассивных нелинейных элементов электроэнергетических систем // Журнал Проблемы энерго- и ресурсосбережения - Т., 2013. № 3-4. – С. 161-167.
6. B.A. Abdullaev, A.A. Alimov, D.A. Xalmanov. To the problem of the calculation capacity of the nonlinear inductance // Seventh World Conference on Intelligent Systems.
7. Абдуллаев В., Холбутаева Х.Э., Идрисходжаева М.У. О методах коррекции качественных показателей преобразователей и элементов электрических цепей и систем. Электронный журнал «Инновации в нефтегазовой отрасли» №1/2020. -С.39-43.
8. Бегматов Ш.Э., Холбутаева Х.Э., Идрисходжаева М.У. Графоаналитический способ построения статических характеристик вторичного источника электропитания. Евразийский союз ученых (ЕСУ) (ежемесячный научный журнал) №5(62). 2019. – С.36-39. DOI: 1031618ESU.2413-9335.2019.1.62.
9. Абдуллаев Б., Холбутаева Х.Э., Идрисходжаева М.У. Улучшения качества сигнала в блоках управления при использовании быстродействующего магнитно-транзисторного квадратора. Журнал “Инновации в нефтегазовой отрасли” № 1/2022.
10. А.А.Алимов, Х.Э.Холбутаева, М.У.Идрисходжаева. Анализ базовой схемы феррорезонансно-транзисторных параметрических стабилизаторов постоянного напряжения с встроенным функциональным преобразователем. Журнал «Энергия ва ресурс тежаш муаммолари». Махсус сон (№84) 2023. С.187-192.
11. Абдуллаев Б., Х.Э.Холбутаева, Идрисходжаева М.У. Методика определения источников погрешностей устройств. Журнал «Энергия ва ресурс тежаш муаммолари» 2022, № 4. -С. 51-56.
12. Begmatov, S.; Dushmanmedova, S.; Holbutayeva, K. Study of ferro resonance using generalized models of Passive nonlinear elements. E3S Web of Conferences 2020. DOI: 10.1051/e3sconf/202021601115.
13. Burkhonhodjaev, A., Iksar, E., Idriskhodjayeva M.U. An algorithm for controlling a traction asynchronous drive that minimizes electrical power losses (2020) E3S Web of Conferences, 216, статья № 01107, 1) Тип документа: Conference Paper Стадия публикации: Final Источник: Scopus<https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57221167017&eid=2-s2.0-85098453474>.
14. Abidov K.G., Zaripov O.O., Idriskhodjayeva M.U., Khamudkhanova N.B., and others. Specific Features of Operating Pumping Units and the Tasks of Ensuring Energy-Saving Modes of Operation by Controlling Them. (AIP Conference Proceedings, 2552, **030022**, 2022), <https://doi.org/10.1063/5.0112384>.
15. N.Khamudkhanova, M.Idriskhodjaeva, Kh.Kholbutayeva. E3S Web of Conf., 384, 01057, (2023), <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202338401057>.
16. A.Burkhonhodjaev, B.Nurmatov, and others. AIP Conference Proceedings, 2552, 030024, (2022), <https://doi.org/10.1063/5.0133920>.
17. Идрисходжаева М.У., Холбутаева Х.Э., Зайниева О.Э. Энергоэффективность при применении энергосберегающего устройства на основе управляемого преобразователя “Energetika kompleksining dolzarb muammolari: uzatish va ekologiya” xalqaro ilmiy-texnik anjumani, Qarshi, 25-26 aprel 2024 yil, 262-266 betlar.
18. Абдуллаев Б., Х.Э.Холбутаева, Идрисходжаева М.У. Пейсенев М.Б. Анализ устройств на основе магнитного транзисторного усилителя. Журнал «Энергия ва ресурс тежаш муаммолари» 2024, № 4. Стр. 27-35. <https://doi.org/10.5281/zenodo.14562787>.

19. Abdullaev B., Kh.E. Kholbutaeva, Idriskhodzhaeva M.U. Peysenov M.B. Tez ta'sir qiluvchi magnit tranzistor kvadratori (ttqmtk). "Energetikaning innavasion rivojlanish muommalari va istiqbol-lari" respublika ilmiy-texnik anjumani, Navoi, 21-22 oktyabr 2024 yil, 158-160 betlar.
20. Hoyos Velasco C.I., Candelo-Becerra J.E. Nonlinear dynamics of DC-DC converters // Computation, 2021.
21. Abdullaev B., Kh.E. Kholbutaeva, Idriskhodzhaeva M.U. Peysenov M.B. Analysis of the basic diagram of magnetic-transistor converters. AIP Conference Proceedings, AIP Conf. Proc. 3331, 040037 (2025) <https://doi.org/10.1063/5.0305803>.
22. A. Rakhmatullaev, B. Abdullayev, S. Rahmatullayev, M. Idriskhodjaeva. Analysis of High-Speed Controlled Magnetic-Transistor DC Voltage Stabilizers. AIP Conference Proceedings 3152 (1) Выпуск 117 June 2024 Номер статьи 0500223rd International Scientific and Technical Conference on Actual Issues of Power Supply Systems, ICAIPSS 2023.
23. Nguyen-Van T., Abe R. Adaptive hysteresis control in power electronics // Energies, 2018.
24. Klarmann K. PWM control strategies in power converters // Applied Sciences, 2021.
25. Dwivedi A., Tiwari A.N. PWM rectifier analysis using hysteresis methods // IJPELEC, 2017.

REFERENCES

1. Law of the Republic of Uzbekistan "On Amendments and Additions to the Law of the Republic of Uzbekistan "On Rational Use of Energy", 14.07. 2020, No. ZRU-628.
2. Decree of the President of the Republic of Uzbekistan No. UP-6079 dated 05.10.2020 "On Approval of the Strategy "Digital Uzbekistan-2030" and Measures for its Effective Implementation".
3. Resolution of the President of the Republic of Uzbekistan dated August 22, 2019 No. PP-4422 "On accelerated measures to improve the energy efficiency of economic and social sectors, the introduction of energy-saving technologies and the development of renewable energy sources".
4. B.A. Abdullaev, H.Kholbutayeva, M.Idriskhodjaeva. Generalized models of nonlinear passive elements in electrical circuits and systems. Monograph. Tashkent - "TDTU Publishing House" - 2020. 10.75 p.t.
5. Abdullaev B.A. Generalized models and parameters of passive nonlinear elements of electric power systems // Journal of Problems of Energy and Resource Saving - T., 2013. No. 3-4 – pp. 161-167.
6. B.A. Abdullaev, A.A. Alimov, D.A. Xalmanov. To the problem of the calculation capacity of the nonlinear inductance // Seventh World Conference on Intelligent Systems.
7. Abdullaev V., Kholbutaeva Kh.E., Idriskhodzhaeva M.U. On methods for correcting the quality indicators of converters and elements of electrical circuits and systems. Electronic journal "Innovations in the Oil and Gas Industry" No. 1 / 2020.-P.39-43.
8. Begmatov Sh.E., Kholbutaeva Kh.E., Idriskhodzhaeva M.U. Graph-analytical method for constructing static characteristics of a secondary power source. Eurasian Union of Scientists (ESU) (monthly scientific journal) No. 5 (62). 2019. - P. 36-39. DOI: 1031618ESU.2413-9335.2019.1.62.
9. Abdullaev B., Kholbutaeva H.E., Idriskhodjaeva M.U. Improving the signal quality in control units using a high-speed magnetic-transistor squarer. Journal "Innovations in the Oil and Gas Industry" No. 1/2022.
10. A.A. Alimov, H.E. Kholbutaeva, M.U. Idriskhodjaeva. Analysis of the basic circuit of ferroresonance-transistor parametric constant voltage stabilizers with a built-in functional converter. Journal of Energy and Natural Resources. Mahsus son (No. 84) 2023. Pp. 187-192.
11. Abdullaev B., Kh.E. Kholbutaeva, Idriskhodzhaeva M.U. Methodology for determining sources of device errors. Journal of Energy and Natural Resources 2022, No. 4. Pp. 51-56.
12. Begmatov, S.; Dushmanamedova, S.; Kholbutaeva, K. Study of ferro resonance using generalized models of Passive nonlinear elements. E3S Web of Conferences 2020. DOI: 10.1051/e3sconf/202021601115.
13. Burkhonhodjaev, A., Iksar, E., Idriskhodjayeva M.U. An algorithm for controlling a traction asynchronous drive that minimizes electrical power losses (2020) E3S Web of Conferences, 216, article No. 01107, 1) Document type: Conference Paper Publication stage: Final Source: Scopus <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57221167017&eid=2-s2.0-85098453474>.
14. Abidov K.G., Zaripov O.O., Idriskhodjayeva M.U., Khamudkhanova N.B., and others. Specific Features of Operating Pumping Units and the Tasks of Ensuring Energy-Saving Modes of Operation by Controlling Them. (AIP Conference Proceedings, 2552, 030022, 2022), <https://doi.org/10.1063/5.0112384>.
15. N.Khamudkhanova, M.Idriskhodjaeva, Kh.Kholbutayeva. E3S Web of Conf., 384, 01057, (2023), <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202338401057>.

16. A.Burkhankhodjaev, B.Nurmatov, and others. AIP Conference Proceedings, 2552, 030024, (2022), <https://doi.org/10.1063/5.0133920>.
17. Idriskhodzhaeva M.U., Kholbutaeva H.E., Zaynieva O.E. Energy efficiency in the use of an energy-saving device based on a controlled converter “Energy efficiency in the production of electricity: results and ecology” scientific journal, Qarshi, 25-26 April 2024, pp. 262-266.
18. Abdullaev B., Kh.E. Kholbutaeva, Idriskhodzhaeva M.U., Peysenov M.B. Analysis of Devices Based on a Magnetic-Transistor Amplifier. Journal *Energy and Resource Saving Problems*, 2024, No. 4, pp. 27–35. <https://doi.org/10.5281/zenodo.14562787>.
19. Abdullaev B., Kh.E. Kholbutaeva, Idriskhodzhaeva M.U., Peysenov M.B. Fast-Acting Magnetic-Transistor Squarer. In: *Problems and Prospects of Innovative Development of Energy* – Republican Scientific and Technical Conference, Navoi, October 21–22, 2024, pp. 158–160.
20. Hoyos Velasco C.I., Candelo-Becerra J.E. Nonlinear dynamics of DC-DC converters // *Computation*, 2021.
21. Abdullaev B., Kh.E. Kholbutaeva, Idriskhodzhaeva M.U., Peysenov M.B. Analysis of the Basic Diagram of Magnetic-Transistor Converters. *AIP Conference Proceedings*, AIP Conf. Proc. 3331, 040037 (2025). <https://doi.org/10.1063/5.0305803>.
22. A. Rakhmatullaev, B. Abdullayev, S. Rahmatullayev, M. Idriskhodjaeva. Analysis of High-Speed Controlled Magnetic-Transistor DC Voltage Stabilizers. AIP Conference Proceedings 3152 (1) Выпуск 117 June 2024 Номер статьи 0500223rd International Scientific and Technical Conference on Actual Issues of Power Supply Systems, ICAIPSS 2023.
23. Nguyen-Van T., Abe R. Adaptive hysteresis control in power electronics // *Energies*, 2018.
24. Klarmann K. PWM control strategies in power converters // *Applied Sciences*, 2021.
25. Dwivedi A., Tiwari A.N. PWM rectifier analysis using hysteresis methods // *IJPELEC*, 2017.