МЛАД ФОРУМ
Механика Транспорт Комуникации
Научно списание http://www.mtc-aj.com
ISSN 2367-6558 (print)
ISSN 2367-6612 (online)
том 15, брой 1, 2026 г.
статия № 2806

ПРОЕКТИРАНЕ И ИЗРАБОТКА НА ТОКОВ ТРАНСФОРМАТОР 5/1 А С РАЗГЛОБЯЕМ МАГНИТОПРОВОД

Светослав Борисов, Благовест Павлов, Любомир Секулов,
svetlio.m2005@gmail.com, blagop792@gmail.com, l_sekulov@vtu.bg

ВТУ „Тодор Каблешков”
София, 1574, ул. „Гео Милев“ 158
БЪЛГАРИЯ

Ключови думи: *токов трансформатор, разглобяем магнитопровод, коефициент на трансформация, възбуждащ ток, измерване.*

Резюме: *Токовият трансформатор (ТТ) е измервателен трансформатор, който възпроизвежда първичния ток във вторичната верига с определен коефициент на трансформация и фазово отместване. Настоящата разработка разглежда проектирането и изработката на ТТ 5/1 А с разглобяем магнитопровод. Целта е да се избере конструкция на намотките и магнитопровода, която осигурява вторичен ток, близък до 1 А при първичен ток около 5 А, и експериментално да се оцени влиянието на броя навивки, проводниковото изпълнение и качеството на затваряне на магнитната верига. Представени са основните зависимости за идеален и реален ТТ, предварителна оценка на възбуждащия ток и резултати от технологични измервания при различни конфигурации. Най-близък до целевото отношение на токовете 0,2 е вариант 6, при който са измерени 5,17 А първичен и 1,10 А вторичен ток. Резултатите показват същественото влияние на магнитните параметри и съединението на разглобяемия магнитопровод. Получените данни се използват за избор на конфигурация за последваща оптимизация на броя навивки, вторичния товар и механичното затваряне на сърцевината. За метрологична оценка са необходими допълнителни изпитвания на токова и фазова грешка при зададени товар, честота и токови нива. Представените измервания са предварителни и не представляват изпитване за клас на точност по IEC 61869-2.*

УВОД

Токовите трансформатори (ТТ) се използват за преобразуване на първичен ток до стандартизирана вторична стойност и за галванично разделяне на измервателните и защитните вериги от силовата система. За индуктивните ТТ изискванията към номиналните величини, грешките и изпитванията са регламентирани в IEC 61869-2 [1]. При разглобяемите конструкции магнитопроводът може да се отвори и монтира около вече положен проводник или шина, без прекъсване на силовата верига, което е основно предимство при модернизация на съществуващи инсталации [2].

Целта на разработката е да се проектира, изработи и извърши предварителна експериментална оценка на токов трансформатор 5/1 А с разглобяем магнитопровод. Оценката е насочена към съгласуване на броя навивки с номиналното отношение 5/1, оценка на възбуждащия ток и сравнение на изпитаните намотъчни конфигурации чрез

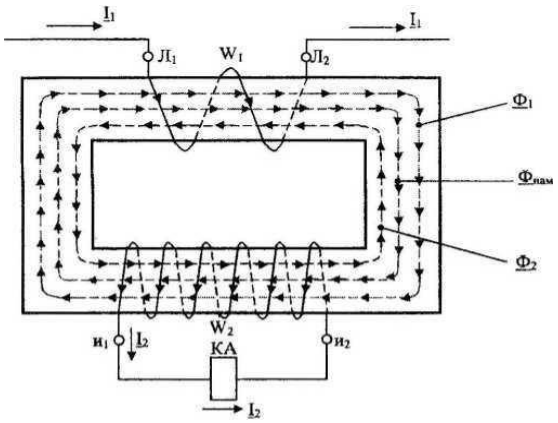
отношението на вторичния към първичния ток при първичен ток около 5 А. Получените данни се използват като етап от разработката, а не като сертификационно изпитване за клас на точност.

ТЕОРЕТИЧНИ ОСНОВИ И ПРИНЦИП НА ДЕЙСТВИЕ

При токовия трансформатор първичната верига е включена последователно към измервания ток. При прозоречна конструкция преминаващият през отвора проводник може да изпълнява ролята на еднонавивкова първична намотка. В идеализиран режим възбуждащият ток се пренебрегва и преобразуването се определя от баланса на ампер-навивките [3, 4].

(1) $$N_1 \cdot I_1 = N_2 \cdot I_2$$

където N_1 и N_2 са броят навивки на първичната и вторичната намотка, а I_1 и I_2 са съответните ефективни стойности на токовете. Номиналният коефициент на трансформация е [1, 3]:



Фиг. 1.

(2) $$K_{\text{n}} = \frac{I_{1\text{n}}}{I_{2\text{n}}} = \frac{N_2}{N_1}$$

За ТТ 5/1 А $K_{\text{n}} = 5$. В реален трансформатор възбуждащият ток не може да бъде пренебрегнат. При привеждане към вторичната страна токовият баланс се записва [3]:

(3) $$\frac{N_1}{N_2} \cdot I_1 = I_2 + I_{\text{e}}$$

I_{e} е възбуждащият ток, включващ намагнитваща съставка и съставка, свързана със загубите в магнитопровода. Той е причината реалният вторичен ток да се отличава по големина и фаза от идеално приведената стойност. Магнитодвижещата сила на вторичния ток противодейства на изменението на потока, породено от първичния ток, съгласно закона на Ленц; процесът не следва да се описва като размагнитване на сърцевината [3].

Токовата грешка се определя от действителните токове и номиналния коефициент на трансформация [1, 3]:

(4) $$\varepsilon_{\text{i}} = \frac{K_{\text{n}} \cdot I_2 - I_1}{I_1} \cdot 100\ \%$$

При разглобяем магнитопровод механичното съединение неизбежно създава остатъчна въздушна междина. Тя увеличава магнитното съпротивление, намалява ефективната магнитна проницаемост и може да увеличи възбуждащия ток и грешките. Поради това контактните повърхности трябва да прилягат плътно и да се поддържат

чисти; производителите на split-core ТТ изрично поставят това условие за запазване на характеристиките [5].

Токовият трансформатор с разглобяема сърцевина позволява монтаж около вече положен проводник или шина без разкачване на силовата верига. Това е особено подходящо при модернизация, временни измервания и монтаж в табла с ограничено пространство [2].

Конструктивното предимство е съпроводено с повишени изисквания към съединението на магнитопровода. Дори малка въздушна междина, замърсяване или непълно прилепване променя магнитната верига; затова качеството и повторяемостта на затваряне са съществени фактори при оценката на разработвания ТТ [5].

Джуджев и съавт. изследват структурата и състава на феромагнитни материали чрез автоматизирано безразрушително изпитване [6]. Публикацията е относима към подбора на материал за магнитопровода.

ИЗЧИСЛЕНИЯ И ИЗРАБОТКА

За предварителната магнитна оценка са използвани стандартните зависимости за магнитна верига. Те се прилагат като първо приближение при приемане на равномерен поток и постоянна относителна магнитна проницаемост. При реален феромагнитен материал, особено при разглобяем магнитопровод, магнитната проницаемост зависи от работната точка и от въздушната междина, поради което окончателната оценка трябва да се основава на възбуждащата характеристика и измерване [3].

(5) $$B = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot H$$

(6) $$H \cdot l_{Fe} = N \cdot I_e$$

(7) $$I_e = \frac{B \cdot l_{Fe}}{\mu_0 \cdot \mu_r \cdot N}$$

В (5)–(7) B е магнитната индукция, H – интензитетът на магнитното поле, l_{Fe} – средната дължина на магнитния път, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ H/m – магнитната константа, μ_r – относителната магнитна проницаемост, N – броят навивки, а I_e – възбуждащият ток. Зависимостите и използването на B–H характеристиката при оценка на ТТ са описани в [3].

При номинална вторична мощност S_n = 5 VA и номинален вторичен ток I_{2n} = 1 A модулът на номиналния товар е приблизително:

(8) $$Z_b = \frac{S_n}{I_{2n}^2} = 5\ \Omega$$

Следователно при 1 A вторичен ток падът върху товар 5 Ω е приблизително 5 V, към който в реалния ТТ се добавя падът върху съпротивлението на вторичната намотка. Това показва защо товарът и съпротивлението на намотката трябва да бъдат зададени при оценка на точността [3].

Като ориентировъчен пример за възбуждащия ток са приети $B = 0{,}8$ T, $l_{Fe} = 0{,}20$ m, $\mu_r = 10000$ и $N = 100$ навивки. По (7) се получава:

(9) $$I_e = \frac{0{,}8 \cdot 0{,}20}{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 10000 \cdot 100} \approx 0{,}127\ \text{A}$$

Стойността 0,127 A е 12,7 % от 1 A, но този процент не трябва да се отъждествява директно с токовата грешка: възбуждащият ток е векторна величина и включва намагнитваща и загубна съставка. Той служи само като ориентир за натоварването на магнитната верига [3].

При същите допускания, но при относителна магнитна проницаемост 50000, оценката дава приблизително 0,025 А. Сравнението показва чувствителността на възбуждащия ток към магнитните свойства, но при split-core конструкция реалната ефективна проницаемост се влияе и от съединителната междина [5].

Отделно от магнитната оценка трябва да се спази и токовото отношение. За номинален ТТ 5/1 А от (1) и (2) следва $\frac{N_2}{N_1} \approx 5$. Следователно стойност $N_2 = 100$ би съответствала на $N_1 \approx 20$; при еднонавивкова първична намотка номинално са необходими около 5 вторични навивки. Така броят навивки в магнитната оценка не трябва да се смесва с номиналното отношение на токовете [3, 4].

ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИ ИЗМЕРВАНИЯ ПРИ ИЗРАБОТКАТА

Целта на измерванията е да се сравнят изработените намотъчни конфигурации и да се определи коя от тях се доближава най-много до целевото отношение $k_{ц} = \frac{1}{5} = 0{,}2$ при първичен ток около 5 А. За всяка конфигурация са отчетени първичният ток I_1, вторичният ток I_2, броят навивки N_1 и N_2 и броят проводникови нишки. Експерименталното отношение се изчислява като:

Таблица 1. Резултати от технологичните измервания

№	I_1, А	N_1, нав.	I_2, А	N_2, нав.	$k_{exp} = \frac{I_2}{I_1}$	$n_{ж}$, бр.
1	**6,14**	**1**	**0,43**	**2**	**0,070**	**190**
2	**5,26**	**1**	**2,36**	**2**	**0,449**	**38**
3	**5,28**	**1**	**2,48**	**1**	**0,470**	**19**
4	**5,16**	**1**	**2,04**	**2**	**0,395**	**76**
5	**5,08**	**1**	**1,58**	**2**	**0,311**	**38**
6	**5,17**	**1**	**1,10**	**2**	**0,213**	**35**
7	**5,11**	**1**	**1,68**	**2**	**0,329**	**31**
8	**5,05**	**1**	**1,46**	**2**	**0,289**	**19**
9	**5,11**	**1**	**0,64**	**2**	**0,125**	**19**
10	**5,44**	**1**	**0,82**	**2**	**0,151**	**38**
11	**5,30**	**1**	**0,43**	**2**	**0,081**	**19**

Забележка: една проводникова нишка е с медно сечение 0,138 mm². Последната колона съдържа броя паралелни нишки в изпитваното проводниково изпълнение.

От таблицата най-близо до целевото отношение 0,2 е вариант 6: $k_{exp} = \frac{1{,}10}{5{,}17} = 0{,}213$, което е отклонение около +6,4 % спрямо целевата стойност. Останалите конфигурации показват по-големи отклонения, което потвърждава необходимостта броят навивки и проводниковото изпълнение да се разглеждат съвместно.

В наличния протокол не са посочени класът на точност на използваните амперметри, точната честота и действителният вторичен товар при всяко измерване. Поради това данните са използвани само за сравнителна технологична оценка. Определянето на клас на точност изисква стандартизирано изпитване на токова и фазова грешка при зададени токови нива и товар съгласно IEC 61869-2 [1].

При променливо натоварване от променливотокови зарядни станции Томчева изследва енергетичните показатели на понизителен трансформатор [7]. Ръководството на Павлов и Димитров [8] е обща литература по електрообзавеждане; оценката на точността на ТТ се основава на IEC 61869-2 [1].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Поставената цел е изпълнена на ниво проектна и технологична оценка: формулирани са условията за токовото отношение 5/1, оценено е влиянието на възбуждащия ток и са сравнени реално измерени намотъчни конфигурации. От наличните измервания вариант 6 е най-близък до целевото отношение $\frac{I_2}{I_1} = 0{,}2$, като получената стойност е 0,213. Данните показват, че свойствата на магнитопровода, въздушната междина при разглобяемата сърцевина, броят навивки и вторичният товар са взаимно свързани фактори. Представените измервания не са достатъчни за присвояване на клас на точност; следващ етап е оптимизиране на избраната конфигурация и изпитване на токова и фазова грешка при регламентирани товар и токови нива по IEC 61869-2.

ЛИТЕРАТУРА:

[1] IEC, IEC 61869-2:2012, Instrument transformers – Part 2: Additional requirements for current transformers. Geneva, Switzerland: International Electrotechnical Commission, 2012.

[2] Schneider Electric, “What is a Split Core Current Transformer?,” FAQ FA107472, updated Dec. 15, 2025. [Online]. Available: https://www.se.com/us/en/faqs/FA107472/. [Accessed: Sep. 22, 2026].

[3] ABB AB, Instrument Transformers: Application Guide, Publication 1HSM 9543 40-00en, 4th ed. Ludvika, Sweden, Feb. 2015.

[4] Schneider Electric, Electrical Distribution Fundamentals Design Guide, Data Bulletin 0100DB2301, ver. 2.0, Mar. 2025.

[5] LEM International SA, Split Core Current Transformer – ATO Series, ver. 3, Nov. 5, 2019. [Online]. Available: https://www.lem.com/sites/default/files/products_datasheets/ato-xxx-b225-d16.pdf. [Accessed: Sep. 22, 2026].

[6] B. Dzhudzhev, B. Velev, M. Zlatkov, and P. Kostadinov, “Study on the Structure and Composition of New Ferromagnetic Materials with an Automated System for Complex Non-destructive Testing,” in Proc. 2020 XXX Int. Sci. Symp. Metrology and Metrology Assurance (MMA), 2020, doi: 10.1109/MMA49863.2020.9254265.

[7] М. Томчева, „Изследване влиянието на променливотокови зарядни станции върху работата на понизителни трансформатори,“ Механика, транспорт, комуникации, том 22, бр. 3/2, с. X-31–X-36, статия № 2503, 2024. [Онлайн]. Достъпно: https://mtc-aj.com/library/2503.pdf. [Посетен: 22.09.2026 г.].

[8] Г. Павлов и В. Димитров, Ръководство за проектиране по електрообзавеждане. София, 2010.

DESIGN AND DEVELOPMENT OF A 5/1 A CURRENT TRANSFORMER WITH A SPLIT CORE

Svetoslav Borisov, Blagovest Pavlov, Lyubomir Sekulov,
svetlio.m2005@gmail.com, blagop792@gmail.com, l_sekulov@vtu.bg

Todor Kableshkov University of Transport
Sofia, 1574, 158 Geo Milev Street
BULGARIA

Key words: *current transformer, split core, transformation ratio, excitation current, measurement.*

Abstract: *A current transformer (CT) reproduces the primary current in its secondary circuit with a defined transformation ratio and phase displacement. This study presents the design and construction of a 5/1 A split-core CT. The objective is to select a winding and magnetic-core configuration that provides a secondary current close to 1 A at a primary current of approximately 5 A and to perform a preliminary experimental assessment of the influence of the number of turns, conductor arrangement, and split-core closing quality. The paper clarifies the basic relationships for ideal and practical CTs, provides a first-order estimate of the excitation current, and compares technological measurements obtained for several winding configurations. Configuration 6 gives the closest value to the target current ratio of 0.2, with measured currents of 5.17 A on the primary side and 1.10 A on the secondary side. Magnetic properties, secondary burden, and split-core closure remain important for further optimization. Accuracy-class verification under IEC 61869-2 requires additional ratio and phase tests at specified burden, frequency, and current levels; these development measurements do not establish an accuracy class.*