

**РОЗРАХУНОК УСТАНОВОК НА ОСНОВІ ТРАНСФОРМАТОРІВ ТЕСЛА**

*Трансформатор Тесла, незважаючи на простоту його конструкції, можна назвати одним з найменш вивчених радіоелектронних пристроїв сучасності. В статті представлена спроба підвести під численні експериментальні результати загальну теоретичну базу, основою якої є методика точного розрахунку трансформатора Тесла. Саме такий розрахунок повинен стати відправною точкою у створенні пристроїв на його основі. Для розроблення такої методики були розглянуті загальні принципи побудови та конструювання трансформаторів Тесла, проведений огляд найбільш відомих математичних моделей його роботи, наведено формули розрахунку електричних параметрів трансформаторів Тесла та проведена експериментальна оцінка їх точності. Показано, що для розрахунку окремих електричних параметрів трансформатора Тесла краще використовувати емпіричні формули, оскільки точне моделювання суттєво утруднюється потребою враховувати велику кількість факторів. Наведена електрична принципова схема дослідної установки.*

**Ключові слова:** трансформатор Тесла; імпульсна висока напруга; імпульсна напруга.

**Постановка проблеми.** На сьогоднішній день з трансформатором Тесла (далі – ТТ) працюють тисячі дослідників, але внаслідок того, що кожен виготовляє робочий макет “для себе”, кожен ТТ – виріб з індивідуальними характеристиками, і, як наслідок, експерименти з ним мають доволі низьку відтворюваність. Загальноприйнятої математичної моделі роботи ТТ нині не існує. На практиці він, як правило, використовується для створення електричних полів з надвеликою напруженістю (десятки МВ/м). Такі електричні поля використовуються для контролю ізоляції у високоенергетичних установках [1, 2], для отримання холодної плазми [3], в слабкорелятивістських магнетронах [4], та дослідження лідерних розрядів і стійких плазмових утворень [5]. Також трансформатори Тесла знаходять застосування у пристроях для дарсонвалізації [6] і можуть бути використані в кірліанографії [7].

Раніше був досліджений розподіл електромагнітного поля навколо робочої моделі ТТ [8]. Методика розрахунку подібних пристроїв повністю ґрунтується на емпіричних формулах, внаслідок чого виникає потреба в складних і тривалих операціях налаштування робочих параметрів конструкції. Було поставлене завдання скласти таку методику розрахунку, завдяки якій можливо було б звести експериментальні налаштування до мінімуму.

**Конструкція трансформатора Тесла і класифікація схем накачки.** Конструкція ТТ доволі проста. Він складається з первинної обмотки, яка складається, як правило, не більше ніж з 10–20 витків товстого дроту, і мотається зі значними проміжками між витками; та вторинної обмотки, яка намотується тонким дротом щільно виток до витка в один шар на пустотіле осердя з діелектрику, що лише виконує роль каркаса для намотки. В окремих випадках ТТ може мати феромагнітне незамкнене осердя (подібна конструкція використовується в апаратах для кірліанографії, зокрема РЭК-1 та Корона-ТВ). Кількість витків у вторинній обмотці може сягати кількох тисяч. Первинна обмотка може бути трьох видів: циліндрична, конічна та плоска (біфілярна). Детально варіанти конструкції описано у [3, 6, 9, 10]. Варто зазначити, що дана система є резонансним трансформатором з сильно нелінійною амплітудно-частотною характеристикою. При роботі на резонансній частоті у ТТ не виконується звичне співвідношення кількості витків як коефіцієнта трансформації, а вихідна напруга може сягати десятків і сотень кіловольт.

Для запуску трансформатора використовуються різноманітні системи накачки, серед яких виділяють три групи: на розряднику (SGTC – Spark Gap Tesla Coil), лампові (VTTC – Vacuum Tube Tesla Coil) та напівпровідникові (SSTC – Solid State Tesla Coil).

ТТ із системою накачки на розряднику історично були першими – саме з такими трансформаторами працював Н.Тесла. Переривання електричного струму в даній конструкції відбувається за допомогою розрядника, який може бути статичним або таким, що обертається. Конструюванню подібних пристроїв приділено достатньо багато уваги в літературі [3–6, 9, 10]. Конструкції на розрядниках дають чи не найдовший розрядний стример, оскільки в них власне на ТТ подається вже підвищена напруга з електричної мережі (підвищення відбувається за допомогою проміжного трансформатора на залізному осерді, яке працює на промисловій частоті 50 Гц – МОТ, НСТ, “Pole pig”, високвольтні вимірювальні трансформатори серій НОМ, ОМ, ОМГ, ОМП. Всі вони при необережному поводженні смертельно небезпечні). Розрядники можуть бути з системою живлення випрямленим або не випрямленим струмом.

ТТ з системою накачки на вакуумних лампах [3, 9] з’явилися у 50-х рр. ХХ ст. Вони дають можливість отримувати великі розрядні стримери внаслідок того, що лампи можуть комутувати значні

струми. На сьогоднішній день такі конструкції використовуються мало внаслідок того, що вакуумні лампи все швидше виходять з ужитку.

ТТ з системою накачки на напівпровідникових елементах [3, 10] на сьогоднішній день є, мабуть, найбільш поширеними внаслідок широкої доступності потужних польових транзисторів типів IRFP та IGBT, які дозволяють комутувати струми в сотні ампер (в імпульсному режимі).

**Короткий огляд існуючих математичних моделей роботи трансформатора Тесла.** Перші спроби описати роботу ТТ належать самому Н.Тесла [6]. Проте уважний аналіз цієї праці наводить на парадоксальний висновок: Тесла не користувався точними формулами для розрахунку ємності та індуктивності (лише приблизними) і не проводив електричні вимірювання параметрів вихідних сигналів. Скоріш за все, це обумовлено технічною неможливістю проводити точні вимірювання вказаних параметрів в ті часи, а також тим, що Тесла виготовляв гігантські (за сучасними мірками) конструкції – інакше вони просто не витримали б міжвиткової напруги (вежа в Колорадо-Спрінгс мала діаметр при основі 15 м, а висоту майже 50 м). Як наслідок, міжвиткова ємність вторинної обмотки становила десятки пФ і нею нехтували. Проте фундаментальні праці Н.Тесла стали відправною точкою у розумінні фізичних процесів у зв'язаних резонансних контурах.

Робота трансформатора, побудованого свого часу Н.Тесла в Колорадо-Спрінгс, була проаналізована з точки зору сучасної електротехніки у [5].

Наступна після Н.Тесла спроба була зроблена у 1930 р. П.Друде, Г.Брейтом і М.Тюве [11], але через складність широкого визнання не отримала. Тоді ж була опублікована праця Л.В. Мисовського [12], де робота ТТ розглянута через закони Кірхгофа. Проте сам автор також вказує на недосконалість його моделі внаслідок неврахування паразитних ємностей і слабку прив'язаність моделі до практики конструювання. З більш сучасних спроб побудови математичних моделей ТТ слід виокремити В.А. Ащоківського [13], проте його модель ґрунтується на спірній тезі існування ефіру і призводить до висновку, що ТТ може мати ККД понад 100 %, що експериментально не підтверджується.

Окремо слід згадати праці Г.Л. Джонсона [14, 15], де детально розглянуті коливальні процеси в ТТ і вплив активного опору вторинної котушки на них. Проте його моделі також мають опосередковане відношення до конструювання пристроїв на основі ТТ.

Модель С.А. Бердіна та співавторів [4, 16] в цілому подібна до моделі Л.В. Мисовського, але в ній враховується вплив опору іскрового проміжку на вихідну напругу, і тому дана модель може бути застосована лише до SGTC, але не до інших видів конструкцій установок на основі ТТ.

Резюмуючи, слід зазначити, що всі існуючі на сьогоднішній день моделі ТТ припускають, що параметри індуктивності та міжвиткової ємності первинної та вторинної котушок відомі (саме вони відіграють визначальну роль в перехідних і коливальних процесах). З цим твердженням важко погодитись, оскільки на практиці розбіжність між вимірними параметрами і розрахованими за емпіричними формулами сягає 10–15 %, що, в свою чергу, призводить до різниці резонансних частот контурів на величину порядку кількох десятків кГц, і, відповідно, складнощі точного налаштування контурів у резонанс. Окремо слід підкреслити, що загальноприйнятого підходу до оцінки міжвиткової ємності взагалі не існує, а на практиці її оцінюють розрахунковим шляхом через попередньо виміряні добротність та індуктивність. Ще однією особливістю ТТ є те, що він, по суті, не має осердя, а тому є абсолютно безінерційною системою і в принципі може працювати на будь-якій частоті. Це робить його вельми привабливим для роботи в НВЧ-діапазоні, але за певних умов він може вести себе як відкритий хвилевід або резонатор. Такий режим його роботи на сьогоднішній день є зовсім невивченим.

**Розрахунок електричних параметрів трансформатора Тесла.** Головними параметрами ТТ є індуктивності та міжвиткові ємності первинної та вторинної котушок. Ці параметри однозначно визначають власну резонансну частоту. Вторинна котушка, як правило, має велику індуктивність і велику міжвиткову ємність, первинна ж навпаки – малу індуктивність і малу міжвиткову ємність (практично завжди міжвиткова ємність первинної котушки становить одиниці пФ, тому нею нехтують). Вторинна котушка являє собою прямий циліндр, а первинна може бути циліндричною, конічною або плоскою. Розрахунок відповідних індуктивностей потребує врахування крайових ефектів. Уважно аналізуючи літературні джерела, неможливо не звернути увагу на те, що індуктивності розраховуються за різними формулами. Наприклад, для циліндричної котушки (соленоїда) в широко відомому довіднику [17] знаходимо наступну формулу:

$$L = \frac{\mu_0}{4\pi} D w^2 \Phi, \quad (1)$$

де  $\mu_0 = 1,26 \cdot 10^{-6}$  Гн/м – магнітна стала;  $D$  – діаметр соленоїда;  $w$  – кількість витків;  $\Phi$  – величина, що враховує крайові ефекти, і значення якої обчислюється за формулою:

$$\Phi = \frac{4\pi}{3} \left( \sqrt{b^2 + 1} \left( K(\xi) + \frac{1 - \alpha^2}{\alpha^2} E(\xi) \right) - \frac{1}{\alpha^2} \right),$$

де  $b$  – довжина намотки;  $K(\xi)$  і  $E(\xi)$  – повні еліптичні інтеграли відповідно першого і другого роду [18] з модулем:

$$\xi = \frac{1}{\sqrt{\alpha^2 + 1}},$$

$\alpha = b/D$  – відношення довжини котушки до її діаметра.

У [19], на попередні видання якої часто посилаються конструктори-розробники пристроїв на основі трансформатора Тесла, для розрахунку індуктивності пропонується така формула:

$$L = \mu_0 w^2 \frac{8R^3}{3b^2} \left( \frac{2\xi^2 - 1}{\xi^3} E(\xi) + \frac{1 - \xi^2}{\xi^3} K(\xi) - 1 \right), \quad (2)$$

де  $R = D/2$  – радіус соленоїда;  $\xi$  – модуль еліптичних інтегралів першого і другого роду  $K(\xi)$  та  $E(\xi)$ , який дорівнює;

$$\xi = \frac{D}{\sqrt{D^2 + b^2}},$$

і важливо зазначити, що в загальному випадку  $\xi \neq \xi$ .

Окрім того, в багатьох програмах для розрахунку індуктивностей використовується формула Р.Вівера [20], що була отримана чисельними методами шляхом інтегрування вздовж довжини намотки:

$$L = \frac{\mu_0 D w^2}{2} \left( \ln \left( 1 + \frac{\pi}{2\alpha} \right) + \frac{1}{2,3004 + 3,437\alpha + 1,7636\alpha^2 - \frac{0,47}{\left( 0,755 + \frac{1}{\alpha} \right)^{1,44}}} \right). \quad (3)$$

Також для розрахунку багатьох розробок використовується широковідома наближена формула індуктивності соленоїда, яка не враховує крайових ефектів:

$$L = \frac{\mu_0 \pi R^2 w^2}{b} = \frac{\mu_0 \pi D^2 w^2}{4b}. \quad (4)$$

Останньою формулою користувався і Н.Тесла [6].

Для первинних обмоток часто використовуються котушки плоскої (так звана біфілярна котушка) і конічної форми. Їх індуктивності, як правило, не розраховують, а вимірюють експериментально, добиваючись резонансу в первинному контурі підбором ємності конденсатора через відому формулу Томпсона:

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}. \quad (5)$$

Для індуктивності плоскої котушки (спіральної форми) відома формула [17]:

$$L = \frac{\mu_0}{8\pi} D' w^2 \Psi, \quad (6)$$

де  $D' = (D_{\min} + D_{\max})/2$  – середній діаметр котушки;  $\Psi$  – величина, яка враховує крайові ефекти, і залежить від параметра  $\rho = (D_{\max} - D_{\min})/D'$ , значення якої беруться з відповідних таблиць [17].

Щодо індуктивності конічної котушки, то питання залишається відкритим – загальної формули для неї на даний час не існує. Проте таку котушку можливо представити як послідовне з'єднання одиничних витків, сума індуктивностей яких буде дорівнювати загальній індуктивності котушки. Для величини індуктивності одиничного колового витка з суцільного дроту відома формула [17]:

$$L = \mu_0 R \left[ \left( 1 - \frac{r^2}{4R^2} \ln \frac{8R}{r} + \frac{r^2}{2R^2} \right) \ln \frac{8R}{r} - 2 - \frac{r^2}{16R^2} \right], \quad (7)$$

а для одиничного колового витка з пустотілої трубки –

$$L = \mu_0 R \left( \ln \frac{8R}{r} - 2 \right), \quad (8)$$

де  $R$  – радіус витка;  $r$  – радіус дроту (у (7)) або зовнішній радіус трубки (у (8)).

Простіший вигляд (8), порівняно з (7), обумовлений тим, що у випадку пустотілої трубки по ній протікають лише поверхневі струми, а внутрішня індуктивність дроту відсутня. Також важливо зазначити, що (7) і (8) використовуються на частотах понад 100 кГц. Відповідно для конічної котушки з суцільного дроту маємо:

$$L = \mu_0 \sum_{i=1}^w R_i \left[ \left( 1 - \frac{r^2}{4R_i^2} \ln \frac{8R_i}{r} + \frac{r^2}{2R_i^2} \right) \ln \frac{8R_i}{r} - 2 - \frac{r^2}{16R_i^2} \right], \quad (9)$$

а для конічної котушки з пустотілої трубки –

$$L = \mu_0 \sum_{i=1}^w R_i \left( \ln \frac{8R_i}{r} - 2 \right). \quad (10)$$

В останніх формулах від сум переходити до інтегралів не можна, оскільки первинні котушки мають, як правило, не більше 10–20 витків, і крок зміни радіуса витка не можна вважати нескінченно малим.

Через величезну різницю між індуктивностями первинної та вторинної котушок систему складно налаштувати в резонанс. На практиці діють двома способами. Перший полягає в тому, що вторинний контур робиться таким, що має високу добротність, а первинний – малу. Як наслідок, це призводить до того, що резонансна крива первинного контуру сильно розтягнута і не має чітко вираженої резонансної частоти – тоді в принципі байдуже, на якій частоті працює первинний контур, оскільки ширина його резонансної кривої перекидає резонансну криву вторинного в десятки разів. Істотним недоліком даного способу є те, що він має суттєво занижений ККД. Другий спосіб полягає в обчисленні (а на практиці частіше – підборі) додаткової ємності, що ставиться паралельно первинній котушці. Завдяки цьому різко зростає добротність первинного контуру і в ньому відбувається резонанс струмів. ККД такої системи максимальний, але на практиці це означає, що цей додатковий конденсатор працює в дуже жорстких умовах: він повинен витримувати струми в десятки-сотні ампер при частотах в сотні кілогерц. Серед усього різноманіття існуючих конденсаторів з цим завданням справляються лише К15У і КВИ-3, які мають чималі габарити і дорого коштують. Але головною проблемою цього способу є саме точність розрахунку, оскільки похибка в 1–2 % при розрахунку індуктивностей в даному випадку дає розбіжність резонансних частот порядку 5–10 %. Єдиним виходом з ситуації є розрахунок міжвиткової ємності вторинної котушки, що на практиці, як правило, не робиться.

Для розрахунку міжвиткової ємності котушок індуктивності, намотаних в один шар без каркаса або на гладкому циліндричному каркасі з невеликою діелектричною проникністю відома напівемпірична формула [21]:

$$\tilde{N} = \frac{\pi D}{8,31 \lg \left( \frac{\tau}{d} + \sqrt{\left( \frac{\tau}{d} \right)^2 - 1} \right)}, \quad (11)$$

де  $D$  – діаметр котушки;  $d$  – діаметр дроту;  $\tau$  – відстань між витками.

В літературі не вдалося знайти даних про точність цієї формули, проте очевидно, що в ній не враховується матеріал ізоляції дроту.

Також з 1934 р. відома формула італійського інженера А.Палермо [22]:

$$\tilde{N} = \frac{2\pi D}{\arccos \left( \frac{\tau}{d} \right)}, \quad (12)$$

яка була отримана в припущенні, що власна ємність котушки складається з суми послідовно з'єднаних ємностей між сусідніми витками, проте практичні дослідження на високих частотах цю тезу заперечують [23].

Формула Р.Медхерста (1947 р.) [24] дає значно кращу точність, проте також є емпіричною:

$$\tilde{N} = D \left( 0,08 + 0,1126 \frac{b}{D} + 0,27 \sqrt{\frac{b}{D}} \right). \quad (13)$$

На основі цієї формули у 2013 р. була виведена уточнена формула Д.Найта [23]:

$$\tilde{N} = \frac{4\epsilon_0 \epsilon_{out} \cdot b \left( 1 + \frac{k_c}{2} \left( 1 + \frac{\epsilon_{in}}{\epsilon_{out}} \right) \right)}{\cos^2 \psi}, \quad (14)$$

де  $\epsilon_{out}$  та  $\epsilon_{in}$  – діелектричні проникності відповідно зовні та всередині котушки;  $\psi$  – кут намотки;  $k_c$  – емпіричний поправочний коефіцієнт, який враховує крайові ефекти і значення якого становить:

$$k_c = 0,4634 \frac{D}{b} + 1,3084 \left( \frac{D}{b} \right)^{\frac{3}{2}}. \quad (15)$$

Важливо зазначити, що різні дослідження (зокрема [23] і [24]) вказують на парадоксальний факт: міжвиткова ємність слабо залежить від кроку намотки, що спонукає до подальшого вивчення цього явища.

Останнім важливим конструктивним параметром трансформатора Тесла є довжина дроту вторинної обмотки:

$$l = \frac{2\pi R w}{\cos \psi} \quad (16)$$

Нижче наведений аналіз однієї з практичних розробок на основі трансформатора Тесла за даними формулами.

**Апробація отриманих результатів.** З метою перевірки розрахункових співвідношень, наведених вище, був виготовлений експериментальний зразок імпульсного високовольтного генератора на основі трансформатора Тесла. За прототип було обрано SSTC внаслідок простоти конструкції та доступності елементної бази. Електрична принципова схема установки показана на рисунку 1. Система накачки трансформатора Тесла (в схемі – T2) зібрана за класичною схемою блокінг-генератора на польовому IGFET-транзисторі типу IRFP350. Вихідна напруга мережевого трансформатора становить 24 В, потужність, яка споживається установкою – 80 Вт.

Трансформатор Тесла має наступні конструктивні параметри:

- первинна обмотка: мідна трубка діаметром 9,5 мм і товщиною стінки 1 мм; кінчна обмотка: мінімальний діаметр 150 мм (нижній, перший виток), максимальний діаметр 300 мм (верхній, останній виток), кількість витків – 10; висота намотки 350 мм;

- вторинна обмотка: дріт ПЭВ-2 діаметром 0,3 мм; прямий циліндр з поліпропілену (відносна діелектрична проникність  $\epsilon_{in} \approx 5$ ), діаметр 110 мм; кількість витків 1800; висота намотки 550 мм.

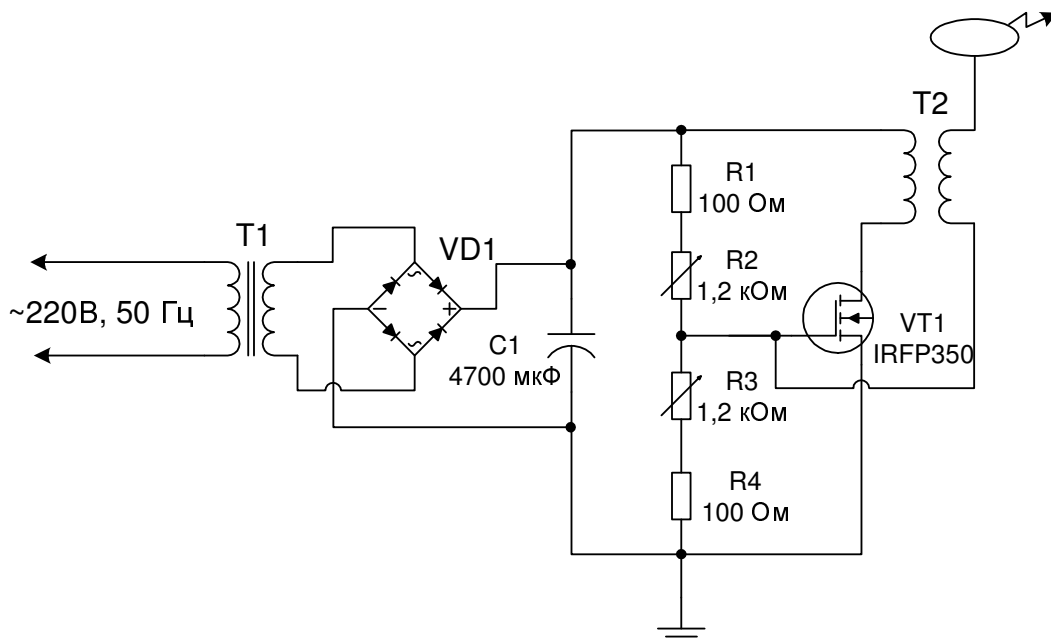


Рис. 1. Електрична принципова схема експериментальної установки на основі трансформатора Тесла

Електричні параметри:

- індуктивність первинної обмотки: 96 нГн;
- добротність первинної обмотки: 4;
- активний опір первинної обмотки: 0,6 Ом;
- індуктивність вторинної обмотки: 32400 мкГн;
- добротність вторинної обмотки: 120;
- активний опір вторинної обмотки: 104 Ом.

Індуктивності та добротності котушок були виміряні за допомогою вимірювача індуктивності та добротності Е9-4, відносна похибка вимірювання становить 2 %.

Результати чисельної оцінки електричних параметрів трансформатора Тесла виявилися наступними:

- індуктивність первинної обмотки за (10): 92 нГн;
- індуктивність вторинної обмотки за (1): 33624 мкГн;
- індуктивність вторинної обмотки за (2): 32387 мкГн;

- індуктивність вторинної обмотки за (3): 33158 мкГн;
- індуктивність вторинної обмотки за (4): 35139 мкГн;
- паразитна ємність вторинної обмотки за (11): 430 пФ;
- паразитна ємність вторинної обмотки за (12): 346пФ;
- паразитна ємність вторинної обмотки за (13): 362 пФ;
- паразитна ємність вторинної обмотки за (14): 381 пФ.

Виміряна за допомогою приладу Е9-4 власна резонансна частота вторинного контуру становить 282 кГц. Найближчу оцінку значення резонансної частоти за (5) можливо отримати, взявши значення індуктивності, розраховані за (2) і міжвиткової ємності, розрахованої за (14), – 284,7 кГц. Виміряна робоча частота становить 280,5 кГц, невелике зменшення можливо пояснити впливом первинного контуру.

Найбільше відхилення частоти від отриманого експериментально значення дають (4) і (11): вони дають частоту 257,2 кГц.

Значення вихідної напруги експериментальної установки на холостому ході становить приблизно оцінена приблизно 120 кВ.

**Висновки.** Результати проведеного аналітичного огляду формул для розрахунку основних електричних параметрів трансформаторів Тесла свідчать про те, що враховувати крайові ефекти та паразитну міжвиткову ємність котушок в подібних пристроях необхідно. Точне обчислення цих параметрів дає можливість значно звужити робочий частотний діапазон схем накачки, збільшивши тим самим ефективність їх роботи і зменшити втрати на струм в первинному контурі.

Встановлено, що найкращу точність при розрахунку резонансної частоти трансформатора Тесла дають формули Д.Найта (2) і (14) – відхилення частоти, оціненої через формулу Томпсона з використанням формул Найта дають похибку в межах 1,5 %.

#### Список використаної літератури:

1. *Важов В.Ф.* Техника высоких напряжений / *В.Ф. Важов, В.А. Лавринович.* – Томск : Изд-во ТГУ, 2008. – 166 с.
2. *Базуткин В.В.* Техника высоких напряжений: изоляция и перенапряжения в электрических системах / *В.В. Базуткин, В.П. Ларионов, Ю.С. Пинталь.* – М. : Энергоатомиздат, 1986. – 464 с.
3. *Tilbury M.* The Ultimate Tesla Coil Design and Construction Guide / *M.Tilbury.* – New York ; Mc Graw Hill, 2008. —444 p.
4. Многосекционный трансформатор Тесла / *С.А. Бердин, Д.А. Гальченко* и др. // «КрыМиКо'2011» : 21 Междунар. Крымская конф. «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (12–16 сент. 2011 г.) : тезисы докл. – Севастополь, 2011. – С. 852–853.
5. *Верютин В.И.* Расчёт резонансного высоковольтного генератора / *В.И. Верютин, Д.С. Стребков* // Матер. IX Симпозиума «Электротехника 2030» / доклад 2.24 (29–31 мая 2007 г.).
6. *Тесла Н.* Колорадо-Спрингс. Дневники / *Н.Тесла.* – Самара : Агни, 2008. – 460 с.
7. *Коломиец Р.А.* О принципиальной возможности использования трансформатора Тесла в устройствах для газоразрядной визуализации / *Р.А. Коломиец* // «КрыМиКо'2009» : 19 Междунар. Крымская конф. „СВЧ техника в биологии и медицине” (14–18 сент. 2009 г.) : тезисы докл. – Севастополь, 2009. – С. 869–870.
8. Дослідження електромагнітного поля імпульсного генератора на основі трансформатора Тесла / *В.Б. Бенедицький, О.А. Горобець, Р.О. Коломієць* та ін. // Тези міжвуз. науково-практ. конф., присв. Дню науки. – Житомир : ЖДТУ. – Т. 1. – С. 97–98.
9. *Trinkaus G.* Tesla Coil Portland / *G.Trinkaus.* – OR : High Voltage Press, 1989. —26 p.
10. *Янини Б.* Удивительные электронные устройства / *Б.Янини.* – М. : НТ Пресс, 2009. – 400 с.
11. *G.Breit, M.A.Tuve and O.Dahi* Phis. – Rev. 35, 51. – 1930.
12. *Мысовский Л.В.* Лабораторный метод получения высоких потенциалов / *Л.В. Мысовский* // Успехи физических наук. – 1930. – Т. X, Вып. 4. – С. 545–569.
13. *Ацюковский В.А.* Трансформатор Тесла: энергия из эфира / *В.А. Ацюковский.* – Жуковский : Петит, 2004. – 24 с.
14. *Johnson G.L.* Solid State Tesla Coil / *G.L.Johnson.* – 2001 [Електронний ресурс]. – Режим доступу : [http://www.g3ynh.info/zdocs/refs/Tesla/Johnson2001\\_ssTeslacoil.pdf](http://www.g3ynh.info/zdocs/refs/Tesla/Johnson2001_ssTeslacoil.pdf).
15. *Johnson G.L.* Tesla Coil Impedance / *G.L.Johnson.* – 2001 [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://ece.k-state.edu/people/faculty/gjohnson/files/TeslaCoilImpedance.pdf>.
16. Влияние сопротивления искры на эффективность трансформатора Тесла / *С.А. Бердин, Д.А. Гальченко* и др. // «КрыМиКо'2011» : 21 Междунар. Крымская конф. «СВЧ-техника и

- телекоммуникационные технологии» (12–16 сент. 2011 г.) : тезисы докл. – Севастополь, 2011. – С. 842–843.
17. *Калантаров П.Л.* Расчёт индуктивностей. Справочная книга / *П.Л. Калантаров, Л.А. Цейтлин.* – Л. : Энергоатомиздат, 1986. – 488 с.
  18. *Градиштейн И.С.* Таблицы интегралов, рядов, сумм и произведений / *И.С. Градиштейн, И.М. Рыжик.* – М. : Гос. изд-во физико-математической лит-ры, 1963. – 1108 с.
  19. *Knight D.W.* Solenoid Inductance Calculation / *D.W. Knight.* – 2013 [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www.g3ynh.info/zdocs/magnetics/Solenoids.pdf>.
  20. *Weaver R.* Numerical Methods for Inductance Calculation / *R. Weaver* [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://electronbunker.ca/eb/CalcMethods3b.html>.
  21. Радиодетали, радиокомпоненты и их расчёт. Справочник / Под. ред. *В.А. Коваля.* – М. : Советское радио, 1977. – 368 с.
  22. *Palermo A.J.* Distributed Capacity of Single-Layers Coils / *A.J. Palermo* // Proc. IRE. – Vol. 22, № 7. – 1934. – Pp. 897–905.
  23. *Knight D.W.* The Self-Resonance and Self-Capacitance of Solenoid Coils / *D.W. Knight.* – 2013 [Электронный ресурс]. – Режим доступа : [http://www.g3ynh.info/zdocs/magnetics/appendix/self\\_res/self-res.pdf](http://www.g3ynh.info/zdocs/magnetics/appendix/self_res/self-res.pdf).
  24. *Medhurst R.G., H.F.* Resistance and Self-Capacitance of Single-Layer Solenoids // Wireless Engineer. – Feb. 1947. – Pp. 35–43. – Mar. 1947. – Pp. 80–92. – June 1947. – P. 185. – Sept. 1947. – P. 281.

КОЛОМІЄЦЬ Роман Олександрович – кандидат технічних наук, старший викладач кафедри радіотехніки, радіоелектронних апаратів та телекомунікацій Житомирського державного технологічного університету.

Наукові інтереси:

- застосування методу кірліанографії в медицині та інших галузях;
- фізика і техніка високих напруг;
- фізика живого.

Стаття надійшла до редакції 01.08.2015