

С. О. ШИНДЕРУК

**ДЖЕРЕЛА ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ
НА ОСНОВІ РЕЗОНАНСНИХ КОНТУРІВ**

Монографія



Харків 2020

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ
АВТОМОБІЛЬНО-ДОРОЖНІЙ УНІВЕРСИТЕТ

С. О. ШИНДЕРУК

**ДЖЕРЕЛА ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ
НА ОСНОВІ РЕЗОНАНСНИХ КОНТУРІВ**

Монографія

**Присвячено 90-річчю
Харківського національного
автомобільно-дорожнього університету**

Харків
2020

Рецензенти:

В. Ф. Болюх, доктор технічних наук, професор
Національного технічного університету «Харківський
політехнічний інститут»,

В. П. Ольшанский, доктор фізико-математичних наук, професор
Харківського національного технічного університету сільського
господарства імені Петра Василенка,

А. В. Гнатов, доктор технічних наук, професор
Харківського національного автомобільно-дорожнього університету

*Дозволено до друку Вченою радою ХНАДУ,
протокол №30/20/5.10 від 27 листопада 2020 р.*

Шиндерук С. О.

Ш 62 Джерела електричної енергії на основі резонансних контурів : монографія / С. О. Шиндерук. – Харків: ФОП Бровін О.В., 2020. – 124 с.
ISBN 978-617-7912-79-7

Монографія містить теоретичний аналіз фізичних процесів у запропонованих схемах практичної реалізації різних варіантів виконання джерел електричної енергії, дієвість яких заснована на використанні явища резонансу. Розглянуто задачу збудження гармонічних сигналів за допомогою резонансних контурів при збудженні періодичними послідовностями імпульсів напруги з урахуванням перехідних процесів з передбачуваною оцінкою ефективності цих схем, як генераторів гармонічних сигналів.

Призначена для фахівців у галузі електромагнітних технологій.

Рис. 33. Табл. 3. Бібліограф. назв. 14.

Монография включает теоретический анализ физических процессов в предлагаемых схемах практической реализации различных вариантов выполнения источников электрической энергии, действенность которых основана на использовании явления резонанса. Рассмотрена задача возбуждения гармонических сигналов с помощью резонансных контуров при возбуждении периодическими последовательностями импульсов напряжения с учётом переходных процессов с предполагаемой оценкой эффективности этих схем, как генераторов гармонических сигналов.

Предназначена для специалистов в области электромагнитных технологий.

Рис. 33. Табл. 3. Библиограф. назв. 14.

ВВЕДЕННЯ

«Апарат для виробництва електричних струмів високої частоти і потенціалу» був запатентований 22 вересня 1896 року, а 18 квітня 1905 року Никола Тесла отримав патент на «Спосіб передачі електричної енергії через природне середовище». Пропозиції автора були реалізовані за допомогою пристрою, що отримав надалі назву «трансформатора Тесли».

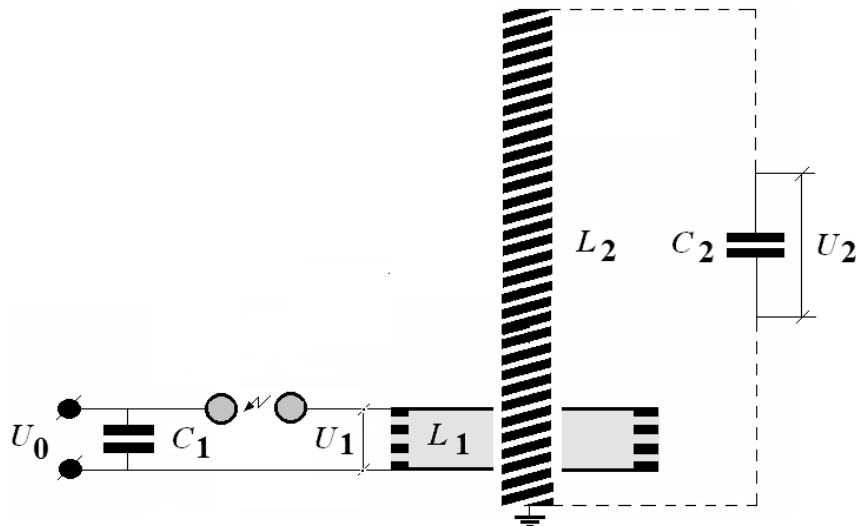


Рис. 1. Принципова схема трансформатора Тесли, L_1C_1 – первинний контур, L_2C_2 – вторинний контур, $U_{1,2}$ – напруги на первинній і вторинній обмотках, відповідно

Принцип його дії (рис. 1) був достатньо простий. Заздалегідь заряджений конденсатор розряджається в ланцюзі первинної обмотки, яка містить декілька витків дроту великого перерізу. Вторинна обмотка, у свою чергу, містить значно більшу кількість витків з дроту меншого діаметра, причому лише мала частина вторинної обмотки індуктивно пов'язана з первинною, в той час, як решта частини вторинної обмотки виступає в ролі незалежної індуктивності.

Відмітною особливістю трансформатора Тесли є надзвичайно високий коефіцієнт перетворення енергії $k > 1000$. Згідно з твердженням великого вченого, даний факт пояснюється вилученням додаткової енергії (крім енергії індукції) із зовнішньої субстанції, що пронизує весь навколишній простір. Н. Тесла вважав, що ми «купаємося в морі енергії», потоки якої це, зокрема, і є потоки електрики [1].

У зв'язку з цим трансформатор Тесли може розглядатися як один з варіантів ефективного джерела енергії, за допомогою якого можливо її отримання безпосередньо з навколишнього простору без будь-яких перетворювачів [2].

Теоретичному аналізу фізичних процесів у запропонованих схемах практичної реалізації різних варіантів виконання джерел енергії, дієвість яких заснована на використанні резонансних ефектів в контурах з реактивними елементами, присвячений нижченаведений виклад.

Підкреслимо, що першочергова увага буде зосереджена на трансформаторі Тесли, оскільки, саме тут сконцентрована фізика процесів вилучення електричної енергії навколишнього простору і саме цей електротехнічний пристрій був першим практично працездатним джерелом енергії з навколишнього простору.

РОЗДІЛ 1

КОРОТКИЙ ОГЛЯД, ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ДОСЛІДЖЕННЯ

Судячи з появи відповідної інформації, підвищений інтерес до трансформатора Тесли, як джерела енергії з навколишнього простору, відмічається, починаючи з кінця минулого сторіччя.

Серед вельми незначної кількості публікацій на цю тему в першу чергу слід виділити розробки, направлені на створення теоретичної бази для опису енергетики навколишнього світу за допомогою нових фізичних уявлень.

Вельми цікавим і перспективним представляється введення поняття «вільної» або «радіантної енергії», джерелом якої є енергія навколишнього простору.

Так, в своїй книзі «Секрети вільної енергії холодної електрики» доктор Пітер Ліндемани (США) описує, так звану, «холодну електрику», отриману з навколишнього простору американським інженером Едвіном Греєм. Епітет електрики як «холодної» пояснюється тим, що протікання її струму в провіднику не викликало виділення Ленц-Джоульового тепла [3].

Далі, на думку авторів енергодинаміки (наприклад, В. Еткін, Ізраїль), що описує зв'язок речовини з енергією навколишнього простору, останню слід розуміти як суцільну форму матерії, що заповнює весь простір всередині і зовні речовини. Це відповідає розподілу матеріального середовища на дискретну і континуальну форми (речовина і енергія навколишнього простору) [4,5].

Інша точка зору (наприклад, В. Ацюковський) стверджує, що енергія навколишнього простору є сукупністю украй малих елементарних частинок – амерів (з розмірами по відношенню до електрона такими ж, як електрон співвідноситься до сонячної системи), що хаотично рухаються з надсвітловими швидкостями [6].

В цілому ж, енергія навколишнього простору – це якась субстанція, що пронизує весь навколишній простір, має достатньо високу матеріальну густину і енергоємність (за оцінками $\sim 10^{36}$ Дж/м³, для порівняння $\sim 10^5$ Дж/м³ – річне споживання енергії Людством).

Всі поля, що є відомими людству, це прояв енергії навколишнього простору в тій або іншій формі. Наприклад, гравітація, елект-

ромагнетизм, хвильові процеси різної природи, біополя, біоенергетика і багато що ін. [6,7].

Згідно наступної точці зору (наприклад, А. Кондрашов) всі тіла нашого світу – це згустки матерії з у край низькою густиною речовини. Вони існують завдяки тиску ззовні зі сторони набагато більш щільної енергії навколишнього простору. І насправді сили планетарного тяжіння фізично обумовлені не власне планетами, як зосередженням великих мас, а, саме, силовою дією енергії навколишнього простору в околиці «розріджених згустків» матерії [8].

При прискоренні зовнішніми силами енергія навколишнього простору споживає енергію, але при умовному «гальмуванні» або «...при охолодженні... – термін Н.Тесли [1]» вона віддає її. Тобто, енергія навколишнього простору, що пронизує все навколо, може служити щонайпотужнішим джерелом енергії. І тут немає ніякої суперечності законам збереження, тому що енергія, як неодмінна субстанція матеріального світу, нікуди і ніколи не зникає і не з'являється. Вона просто переходить (трансформується) з одного виду в інший [7,8].

Розробки в області енергії навколишнього простору дозволили осмислити процеси в трансформаторі Тесли і запропонувати різні схеми практичної реалізації процесів вилучення енергії з навколишнього простору за його допомогою [7,8,9,10].

Не повторюючи принцип дії, слід підкреслити, що основною технічною проблемою в здійсненні проектів подібного роду є створення пристроїв знімання енергії, вилученої з енергії навколишнього простору.

В чому тут є проблема і чому Н.Тесла її проігнорував?

Тут відзначимо вельми важливу обставину. Першочерговою метою проекту великого винахідника було створення глобальної системи генерації і бездротової передачі електричної енергії в будь-яку точку планети Земля. Як представляється в даний час, саме досягненням цієї мети обумовлена «розімкнена конструкція» вторинної обмотки (подібно відомому випромінювачу Герца [11]) і відсутність вказівок автора проекту, щодо створення ефективних пристроїв знімання енергії, вилученої з навколишнього простору.

Якщо говорити про генератор, прийнятний для локальної практичної експлуатації, «розімкненість вторинної обмотки» трансформатора Тесли не дозволяє однозначно зафіксувати її ємність. Остання

залежатиме від розташування об'єктів в навколишньому просторі. Зміна їх конфігурації призводитиме до розстроювання робочої частоти від необхідного значення i , відповідно, до різкого падіння ефективності трансформатора в цілому.

У відомих пропозиціях сучасних послідовників Николи Тесли можна виділити два основні способи знімання енергії, що генерується.

1) Індуктивне підключення навантаження [7,8,9].

В цьому випадку присутня додаткова котушка. Остання замикається або безпосередньо на навантаження, або на ємність, вже з якої знімається сигнал, що генерується.

2) Пряме підключення навантаження до виходу вторинного контура [8,11].

Тут один дріт від навантаження під'єднується до високовольтного виводу вторинного контура, другий – повинен бути вільним, тобто, не замкненим ні на який додатковий об'єкт. Вочевидь, протікання струму через навантаження забезпечує ємнісний зв'язок вільного виводу із зовнішнім оточенням.

Як видно з джерел, що знаходяться у відкритому доступі, найцікавішими представляються наступні два способи індуктивного підключення навантаження.

- Додаткова котушка з малим числом витків, яка є аналогічною первинному контуру, розміщується поверх вторинного контура [7,8].
- Додаткова багатовиткова котушка, яка є ідентичною соленоїду вторинного контура, розміщується поряд з ним [9].

Повертаючись до основоположних робіт Николи Тесли, необхідно особливо виділити ключові феноменологічні рекомендації великого електрика, що визначають ефективну дієвість джерела енергії «холодної електрики».

1. Добротність вторинного контура – $Q_2 = \left(\frac{\omega \cdot L_2}{R_2} \right)$ повинна бути достатньо великою, тобто, $Q_2 \gg 1$.

2. Максимум ефективності генератора енергії, як припускав Н. Тесла, вимагає набагато більшої величини енергії у вторинному контурі по відношенню до енергії первинного збуджуючого контура.

3. Досягнення максимальної ефективності генератора вимагає виконання умови $Q_2 \gg Q_1$, Q_1 – добротність первинного контура.

4. Величина енергії, «що знімається в навантаження», повинна бути набагато менше енергії, що генерується вторинним контуром (на думку Н. Тесла $\leq 1\%$).

5. Максимальний ефект досягався тоді, коли довжина дроту вторинної обмотки від точки заземлення до верхнього її кінця складала рівно чверть довжини хвилі відповідно резонансній частоті трансформатора.

На закінчення цитата самого Н. Тесли: «...Після ретельної настройки...я знайшов, що у такий спосіб можна викликати рух електрики, що в тисячі разів перевищує початковий, і таким шляхом забезпечив рух або швидкість потоку електроенергії, що вимірюється багатьма десятками тисяч кінських сил...».

Переходячи до постановки задач, слід зазначити, що в цитованих роботах відсутні які-небудь гіпотези про умови доступу до енергії навколишнього простору. Остання обставина є вельми важливою, тому що розуміння цих умов дозволить одержувати електричну енергію не тільки для вирішення проблем прикладної електродинаміки, але і для створення високоефективних пристроїв у всіх сферах людської діяльності.

І, нарешті, резонанс. Що це таке і найголовніше чому? Звідки при резонансі з'являється додаткова енергія? Наприклад, при виконанні резонансних умов має місце добре відоме руйнування мостових конструкцій [11].

Ймовірно, саме при **РЕЗОНАНСІ** відкривається доступ до енергії з навколишнього простору, можливо саме **РЕЗОНАНС** є «КЛЮЧЕМ», що відкриває доступ до енергії в ньому. Вперше це зрозумів, використав і в цьому полягає секрет винаходів великого **НІКОЛИ ТЕСЛИ!**

Наявність «ключа», що відкриває доступ до енергії будь-якого виду, можна углядіти і в добре відомих аналогах. Так, «ключ» до теплової енергії палива – вогонь, «ключ» до електричної енергії хімічних з'єднань в гальванічних елементах – окислювально-відновні реакції, «ключ» до перетворення механічної енергії в електричну – явище електромагнітної індукції і ін.

До речі, зауваження про термінологію.

В спеціальній літературі енергію з навколишнього простору називають «вільною або «холодною» електричною енергією». Останнє визначення пояснюється не підтвердженими даними про експериме-

нти окремих авторів, де протікання струму, що генерується, через навантаження не призводило до відомого Ленц-Джоульового тепло-виділення [3].

З моєї точки зору найадекватнішою є назва за ознакою причинності. Тому енергія будь-яких фізичних систем (електричних, механічних і ін.) в резонансних режимах, що відкривають доступ до зовнішнього середовища або електричної енергії навколишнього простору, може називатися «резонансною енергією». В нашому випадку це **«резонансна електрична енергія»**. Проте, цей термін не виключає рівноправного використання інших визначень енергії в роботах інших авторів, зважаючи на відсутність остаточної наукової обґрунтованості її походження.

Отже, даний розгляд буде присвячений теоретичному аналізу засадних проблем вилучення енергії з навколишнього простору за допомогою «резонансних електротехнічних пристроїв»:

- обґрунтування дієвості трансформатора Н. Тесли, виходячи з умови резонансного збудження;
- оцінка зв'язку робочих частот з коефіцієнтами перетворення напруги в джерелах енергії на базі трансформатора Тесли;
- чисельні оцінки можливостей і формулювання зведених положень для проектування реально діючих джерел енергії на основі трансформатора Н. Тесли;
- пропозиція і обґрунтування дієвості інших «резонансних електричних схем», як базових, в джерелах енергії з навколишнього простору;
- оцінка коефіцієнтів перетворення напруги залежно від робочих частот джерел енергії, принцип дії яких заснований на явищі «резонансу напруг»;
- принципові схеми збудження і знімання вихідного сигналу в джерелах електричної енергії на базі резонансних контурів з послідовними активно-реактивними елементами.

РОЗДІЛ 2

ТРАНСФОРМАТОР ТЕСЛИ, ТЕОРІЯ, ЧИСЕЛЬНІ ОЦІНКИ

Цікаво, що сам Никола Тесла пояснював роботу свого резонансного трансформатора на прикладі механічного аналога – звичайних гойдалок. Якщо їх розгойдувати в режимі примусових коливань, то амплітуда, що максимально досягається, буде пропорційна лише прикладеному зусиллю. Але якщо розгойдувати в режимі вільних коливань, то при тих самих зусиллях максимальна амплітуда зростає у багато разів. Так і з резонансним трансформатором Н. Тесли, де в ролі гойдалок виступає вторинний коливальний контур, а в ролі «задаючого генератора» зусилля, що прикладається – первинний контур трансформатора. Їх узгодженість («підштовхування» строго в потрібні моменти часу) забезпечує резонансне зростання амплітуди сигналу у вторинному контурі.

2.1 Резонансне збудження вторинного контура

Аналіз процесів, що протікають в трансформаторі Тесли, можна провести за допомогою електричної схеми заміщення (рис. 1), представленої на рис. 2.

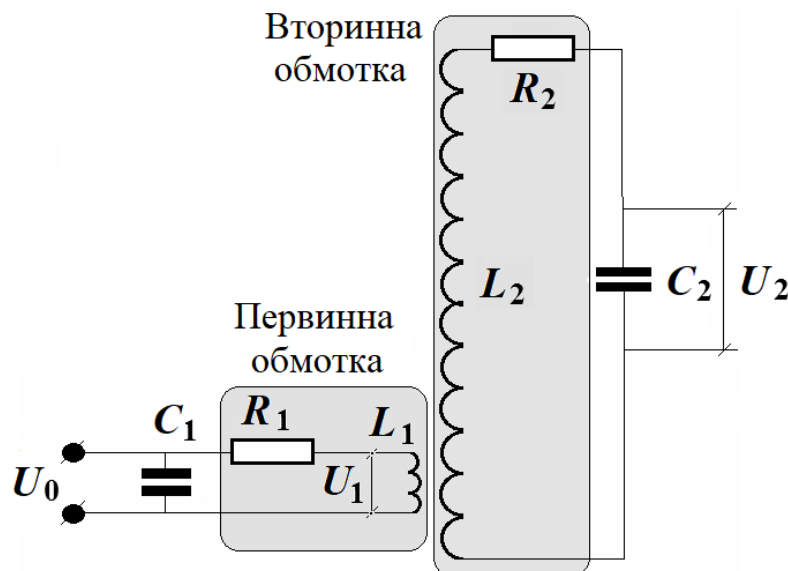


Рис. 2. Схема заміщення трансформатора Тесли,
 $L_{1,2}$ – індуктивності, $C_{1,2}$ – ємності, $R_{1,2}$ – активні опори контурів,
 $U_{0,1,2}$ – відповідні напруги

Особливо відзначимо, що розгляд проводиться за допомогою відомих методів теорії ланцюгів без залучення будь-яких гіпотетичних уявлень про природу матеріального світу [12].

Постановка задачі.

- В первинному контурі « L_1C_1 » на індуктивності збуджується напруга – $U_1(t) = U_{1m} \cdot (\sin \omega_1 \cdot t)$, U_{1m} – амплітуда, ω_1 – частота.
- Первинна обмотка індуктивно пов'язана з вторинною так, що її витки – w_1 частково покривають відповідне число витків вторинної обмотки – $w_2^{(1)}$. Коефіцієнт трансформації – $k_1 = \frac{w_2^{(1)}}{w_1}$.
- Вторинний контур – початкові умови: $U_2(0) = \frac{dU_2(0)}{dt} = 0$.
- Добротність вторинного контура відповідно рекомендації Н. Тесли повинна бути достатньо великою, тобто $Q_2 \gg 1$.

Розв'язання.

Рівняння для напруги на ємності вторинного контура, збуджуваного полем обмотки первинного контура, можна записати у вигляді [12]:

$$\frac{d^2U_2(t)}{dt^2} + 2\delta_2 \cdot \frac{dU_2(t)}{dt} + \omega_{20}^2 U_2(t) = (\omega_{20}^2 \cdot k_1) \cdot U_{1m} \cdot \sin(\omega_1 t), \quad (1)$$

де $\omega_{20} = \frac{1}{\sqrt{L_2 C_2}}$ та $\delta_2 = \frac{R_2}{2L_2}$ – власна частота і декремент згасання

контура вторинної обмотки трансформатора Тесла, відповідно.

Загальний інтеграл рівняння (1) можна представити у вигляді суми загального рішення однорідного – $U_{20}(t)$ та часного розв'язку відповідного неоднорідного рівняння – $U_{21}(t)$ [13]:

$$U_2(t) = U_{20}(t) + U_{21}(t), \quad (3)$$

де $U_{20}(t) = e^{-\delta_2 t} \cdot [C_1 \cdot \cos(\omega_2 t) + C_2 \cdot \sin(\omega_2 t)]$; $\omega_2 = \sqrt{\omega_{20}^2 - \delta_2^2}$;

$$U_{21}(t) = \frac{(\omega_{20}^2 \cdot k_1) U_{1m}}{(\omega_{20}^2 - \omega_1^2)^2 + (2\delta_2 \omega_1)^2} \times \\ \times \left[(\omega_{20}^2 - \omega_1^2) \sin(\omega_1 t) - (2\delta_2 \omega_1) \cos(\omega_1 t) \right].$$

Отриманий вираз (3) можна перевірити граничним переходом при $t \rightarrow \infty$ з подальшим припущенням $\delta_2 \rightarrow 0$. З фізичної точки зору йдеться про стаціонарний режим у відсутності активних втрат у вторинному контурі.

З (3) знаходимо, що

$$\lim_{\substack{t \rightarrow \infty, \\ \delta_2 \rightarrow 0}} U_2(t) = \frac{\omega_{20}^2 \cdot U_{1m}}{(\omega_{20}^2 - \omega_1^2)} \cdot \sin(\omega_1 t) \Bigg|_{\omega_1 \rightarrow \omega_{20}} = U_2(t) \rightarrow \infty. \quad (4)$$

Результат (4) – це добре відома залежність, перехід до якої свідчить про достовірність формули (3) [11].

Задовольняючи нульовим початковим умовам у виразі (3), знаходимо напругу на ємності вторинного контура трансформатора Тесли.

$$U_2(t) = \frac{(\omega_{20}^2 \cdot k_1) U_{1m}}{(\omega_{20}^2 - \omega_1^2)^2 + (2\delta_2 \omega_1)^2} \times \\ \times \left[e^{-\delta_2 t} \frac{\omega_1}{\omega_2} \left((2\delta_2 \omega_2) \cos(\omega_2 t) + \left(2\delta_2^2 - (\omega_{20}^2 - \omega_1^2) \right) \sin(\omega_2 t) \right) + \right. \\ \left. + (\omega_{20}^2 - \omega_1^2) \sin(\omega_1 t) - (2\delta_2 \omega_1) \cos(\omega_1 t) \right]. \quad (5)$$

Відповідно до постановки задачі повинна виконуватися рекомендація Н. Тесли: $Q_2 \gg 1$. Це означає, що

$$Q_2 = \left(\frac{\omega_{20} \cdot L_2}{R_2} \right) = 0,5 \cdot \left(\frac{\omega_{20}}{\delta_2} \right) \gg 1. \text{ Отже, } \left(\frac{\delta_2}{\omega_{20}} \right) \sim \frac{1}{Q_2} \ll 1 \text{ є нескінченно малою величиною [13].}$$

У виразі (5) нехтуватимемо нескінченно малими величинами другого порядку і вище відносно $\left(\frac{\delta_2}{\omega_{20}}\right)$. В цьому випадку можна вважати, що $\omega_2 \approx \omega_{20}$. Крім того, введемо умову резонансу і приймемо, що резонансна частота і частота збудження системи є рівними між собою $\omega_1 \approx \omega_{20}$.

Після виконання необхідних тотожних перетворень отримаємо часову залежність для резонансної напруги на ємності вторинного контура трансформатора Тесли.

$$U_2(t) \approx \left(\frac{k_1}{2}\right) \cdot U_{1m} \cdot \left[2Q_2 \cdot \cos(\omega_1 t) \cdot (1 - e^{-\delta_2 t})\right]. \quad (6)$$

В усталеному режимі, коли $t \gg \frac{1}{\delta_2} = \frac{2L_2}{R_2}$, нехтуючи величинами порядку $\left(\frac{1}{Q_2}\right)^2$ і вище, з виразу (6) находимо, що

$$U_2(t) \rightarrow -(k_1 \cdot Q_2) \cdot U_{1m} \cdot \cos(\omega_1 t). \quad (7)$$

З (7) одержуємо коефіцієнт перетворення напруги в трансформаторі Тесли.

$$K_{Tesla} \rightarrow k_1 \cdot Q_2 \gg 1. \quad (8)$$

Отриманий результат показує, що трансформація напруги при виконанні резонансних умов збудження і вимоги достатньо великої добротності вторинного контура відбувається з ефективністю, що набагато перевищує трансформацію за рахунок індуктивного зв'язку між первинним і вторинним контурами, так як $\frac{K_{Tesla}}{k_1} \rightarrow Q_2 \gg 1$, оскільки власне $Q_2 \gg 1$.

Підкреслимо, що отриманий результат (8) не тільки узгоджується з рекомендацією Н. Тесли, але і є кількісним показником його феноменологічної якісної вказівки про зв'язок добротності вторинного контура трансформатора з напругою, що збуджується на його виході.

Отриманий результат проілюструємо чисельною оцінкою для конкретної конструкції трансформатора Тесли.

Як початкові дані приймемо характерні (але усереднені) параметри схем в роботах [1,8,9,10].

Робоча (резонансна) частота: $f_1 = 300$ кГц, $\omega_1 = 2\pi \cdot f_1$.

Вторинний контур, параметри:

- діаметр каркаса для обмотки соленоїда: $D_2 = 0,075$ м;
- діаметр дроту обмотки з міді: $d_2 = 0,00075$ м;
- питома електропровідність міді: $\gamma_2 = 5,58 \cdot 10^7$ 1/Ом·м.

Обчислення:

- довжина дроту обмотки, $\zeta_2 = 249,886$ м;
- число витків: $w_2 \approx 1061$;
- довжина соленоїда: $l_2 \approx 0,8$ м;
- індуктивність соленоїда: $L_2 \approx 7850,4$ мкГн;
- величина скін-шару: $\Delta = 0,000093$ м = 93 мкм;
- активний опір з урахуванням скін-ефекту: $R_2 = 18,060$ м;
- величина ємності, знайденої за розрахованою індуктивністю і заданою робочою частотою: $C_2 = 35,85$ пФ;
- добротність: $Q_2 = 819,338$.

Первинний контур, параметри:

- діаметр каркаса для обмотки соленоїда: $D_1 = 0,125$ м;
- діаметр дроту обмотки з міді: $d_1 = 0,01$ м;
- число витків: $w_1 = 6$.

Обчислення:

- індуктивність соленоїда: $L_1 \approx 9,253$ мкГн;
- величина активного опору соленоїда з урахуванням скін-ефекту: $R_{1i} = 0,01$ Ом;
- величина додаткового активного опору для виконання рекомендації Н. Тесли про мінімізацію збуджувальної дії: $R_1 = 1,0$ Ом.
- величина ємності: $C_1 = 30417,7$ пФ;
- відносний декремент згасання: $\delta_1 = 0,03$;
- добротність: $Q_1 = 16,08$, $Q_1 \ll Q_2$.

Примітка. $w_1 = 6$ витків первинної обмотки, загальною шириною $\sim 0,06$ м, покривають $w_2^{(1)} \approx 80$ витків вторинної обмотки. Коефіцієнт трансформації за індуктивним зв'язком приймемо рівним – $k_1 = \frac{w_2^{(1)}}{w_1} \approx 14$.

Спираючись на результати обчислень характеристик прийнятої конкретної конструкції трансформатора Тесли, за допомогою формули (8) знаходимо, що коефіцієнт перетворення за напругою буде дорівнювати – $K_{Tesla} \approx k_1 \cdot Q_2 = 11466 \gg 1$.

У заключенні, виходячи з факту існування енергії навколишнього простору, фізику процесів в трансформаторі Тесли можна описати таким чином.

Магнітне поле його первинної котушки «виштовхує» енергію навколишнього простору (нагадаємо, що енергія навколишнього простору по Н. Тесла – це потік електрики), що прагне заповнити порожнину між її обмоткою та обмоткою вторинної котушки. Тобто, енергія навколишнього простору «гальмується» або «охолоджується», що супроводжується виділенням електричної енергії та генерацією потужного сигналу у вторинній котушці.

Висновки

1. За допомогою математичного апарату теорії електричних ланцюгів без залучення будь-яких гіпотез про будову матеріального світу проведений аналіз резонансних процесів в трансформаторі Тесли.
2. Отримана кількісна оцінка зв'язку добротності вторинного контура зі збуджувальною напругою, що відповідає феноменологічному якісному прогнозу Николи Тесли.
3. Показано, що при резонансі у вторинній обмотці збуджується е.р.с., що багато разів перевищує величину, яка обумовлена індуктивним зв'язком обмоток трансформатора (у рази, пропорційні значенню добротності вторинного контура).
4. Інтегральний коефіцієнт перетворення по напрузі дорівнює добутку коефіцієнта трансформації за рахунок індуктивного зв'язку обмоток на добротність вторинного контура.
5. Основним результатом аналізу і обчислень є твердження: явище резонансу – це дійсно «ключ» до електричної енергії навколишнього простору.

2.2 Вихідна напруга залежно від частоти задаючого струму

Як показали обчислення, при строгій рівності частот збуджуючого струму і струму вторинного контура трансформатора Тесли відбувається резонансне зростання амплітуди вихідного сигналу, яке не можна пояснити відомими індукційними ефектами. Його амплітуда на три – чотири порядки перевищує величину вхідної напруги.

Факт необхідності строгого збігу частот був відзначений і самим Н. Тесла: «...Після **ретельного** настроювання можна викликати рух електрики, що в тисячі разів перевищує вихідну...».

З практичної точки зору представляють інтерес відповіді на питання, наскільки є допустимим відхилення частоти задаючого струму від власної частоти резонансного контура і як це відхилення впливає на амплітуду збуджуваного сигналу?

Метою справжнього розгляду є визначення залежності напруги на виході вторинного ланцюга трансформатора Тесли від робочої частоти задаючого струму.

Розрахункові співвідношення

Розрахункова схема заміщення представлена на рис. 3.

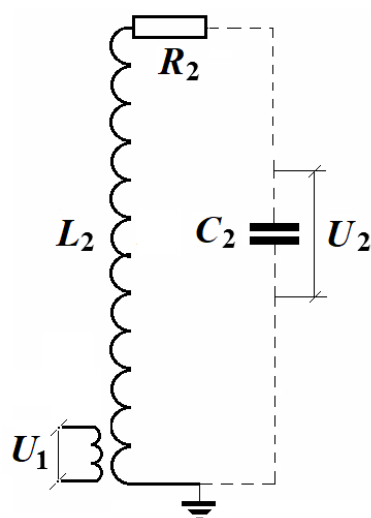


Рис. 3. Розрахункова схема заміщення трансформатора Тесли, U_1 – збуджуюча напруга в первинному контурі, R_2 , L_2 , C_2 – активний опір, індуктивність, ємність вторинного контура, U_2 – вихідна напруга вторинного контура

Слід зазначити, що при проведенні обчислень використовуються добре апробовані методи аналізу електричних ланцюгів з гармоні-

чними струмами і напругами без будь-яких додаткових фізичних гіпотез про матерію нашого світу [12].

Згідно прийнятій розрахунковій схемі вторинний контур трансформатора Тесли збуджується за рахунок електромагнітного зв'язку з первинним контуром.

Збуджуюча напруга – $U_1(t) = U_{1m} \cdot \sin(\omega_1 \cdot t)$, де U_{1m} – амплітуда, ω_1 – циклічна частота, t – час.

Опускаючи громіздкі проміжні перетворення, запишемо вираз для напруги, збуджуваної на виході (ємність) вторинного контура:

$$U_2(t) = \frac{(\omega_{20}^2 \cdot k_1) U_{1m}}{(\omega_{20}^2 - \omega_1^2)^2 + (2\delta_2 \omega_1)^2} \times$$

$$\times \left[e^{-\delta_2 t} \frac{\omega_1}{\omega_2} \left((2\delta_2 \omega_2) \cos(\omega_2 t) + \left(2\delta_2^2 - (\omega_{20}^2 - \omega_1^2) \right) \sin(\omega_2 t) \right) + \right.$$

$$\left. + (\omega_{20}^2 - \omega_1^2) \sin(\omega_1 t) - (2\delta_2 \omega_1) \cos(\omega_1 t) \right], \quad (9)$$

де k_1 – коефіцієнт трансформації за рахунок індуктивного зв'язку первинного контура з вторинним, за визначенням $k_1 = \frac{w_2^{(1)}}{w_1}$, (w_1 – число

витків індуктивності первинного контура, $w_2^{(1)}$ – число витків індуктивності вторинного контура, розташованих безпосередньо під витками первинного контура);

$$\omega_{20} = \frac{1}{\sqrt{L_2 C_2}} - \text{власна частота вторинного контура};$$

$$\delta_2 = \frac{R_2}{2 \cdot L_2} - \text{декремент згасання, обумовлений активними втратами у вторинному контурі.}$$

Найбільший практичний інтерес представляє сталий режим, коли $t \gg \frac{1}{\delta_2}$. Нехтуючи доданками, що містять $e^{-\delta_2 \cdot t} \rightarrow 0$, вираз для

вихідної напруги перепишемо у вигляді, що є базовим для проведення подальшого аналізу.

$$U_2(t) = \frac{k_1 \cdot U_{1m}}{\left[\left(1 - \left(\frac{\omega_1}{\omega_{20}} \right)^2 \right)^2 + \left(2\delta_{20} \cdot \left(\frac{\omega_1}{\omega_{20}} \right) \right)^2 \right]} \times \\ \times \left[\left(1 - \left(\frac{\omega_1}{\omega_{02}} \right)^2 \right) \sin(\omega_1 t) - \left(2\delta_{20} \cdot \left(\frac{\omega_1}{\omega_{02}} \right) \right) \cdot \cos(\omega_1 t) \right]. \quad (10)$$

Вимога достатньо малих втрат є обов'язковою по відношенню до перетворювача енергії будь-якого вигляду. В зв'язку з цим подальший розгляд можна проводити, вважаючи, що відносний декремент згасання – $\delta_{20} = \left(\frac{\delta_2}{\omega_{20}} \right) \ll 1$ є нескінченно малою величиною [13].

За допомогою виразу (10) проаналізуємо залежність вихідної напруги трансформатора Тесли від частоти збуджуючого сигналу.

1. Низькочастотний режим.

Частота збуджуючої напруги є багато меншою власної частоти вторинного контура, тобто, $\left(\frac{\omega_1}{\omega_{20}} \right) \ll 1$.

Якщо знехтувати нескінченно малими величинами порядку $\left(\frac{\omega_1}{\omega_{20}} \right)^2$ та $\left(\delta_{20} \cdot \left(\frac{\omega_1}{\omega_{02}} \right) \right)$ вихідна напруга $U_2(t)$ буде представлена виразом:

$$U_2(t) \approx (k_1 \cdot U_{1m}) \cdot \sin(\omega_1 t). \quad (11)$$

Результат (11) свідчить про те, що при достатньо низьких робочих частотах трансформатор Тесла працює як звичайний перетворювач напруги з коефіцієнтом перетворення – K_{Tesla} , величина якого встановлюється виключно електромагнітним зв'язком первинної та вторинної обмоток, тобто, $K_{Tesla} \rightarrow k_1$.

2. Високочастотний режим.

Частота збуджуючої напруги порівнянна з власною частотою

вторинного контура: $\left(\frac{\omega_1}{\omega_{20}}\right) = (1 + \Delta)$, де Δ – варіація частоти

збуджуючого сигналу щодо власної частоти вторинного контура трансформатора Тесли.

Оскільки практичний інтерес представляє режим, близький до резонансного, прийmemo, що $\Delta \in [0, \pm 0,1]$.

В рамках прийнятого припущення, нехтуючи малими величинами другого порядку відносно Δ , після нескладних тотожних перетворень одержуємо вираз для вихідної напруги трансформатора Тесли.

$$U_2(t) \approx -\frac{(k_1 \cdot Q_2) \cdot U_{1m}}{\sqrt{1 + (2Q_2\Delta)^2}} \cdot \cos(\omega_1 t - \psi_\Delta), \quad (12)$$

де $\psi_\Delta = \text{arctg}(2Q_2 \cdot \Delta)$,

$$Q_2 = \left(\frac{\omega_{20} \cdot L_2}{R_2}\right) = \frac{1}{2 \cdot \delta_{20}} = \frac{Z_2}{R_2} \text{ – добротність,}$$

$$Z_2 = \sqrt{\frac{L_2}{C_2}} \text{ – хвильовий опір вторинного контура.}$$

Отриманий результат приводить до наступних висновків.

а) При $\Delta \ll \frac{1}{2Q_2}$, що виходить з $(2Q_2\Delta)^2 \ll 1$, $\psi_\Delta \rightarrow 0$ та вираз

(12) описує процес у випадку резонансу:

$$U_2(t) \approx -(k_1 \cdot Q_2) \cdot U_{1m} \cdot \cos(\omega_1 t). \quad (13)$$

З (13) отримуємо коефіцієнт перетворення напруги в трансформаторі Тесли.

$$K_{Tesla} \rightarrow (k_1 \cdot Q_2) \gg 1. \quad (14)$$

Результат показує, що трансформація напруги при виконанні резонансних умов збудження ($\omega_1 \approx \omega_{20}$) та вимоги достатньо великої добротності вторинного контура ($Q_2 \gg 1$) відбувається з ефективніс-

ттю, що набагато перевищує трансформацію за рахунок індуктивного зв'язку між первинним і вторинним контурами $\frac{K_{Tesla}}{k_1} \rightarrow Q_2 \gg 1$.

Підкреслимо, що отриманий результат (14) не тільки узгоджується з рекомендацією Н. Тесли, але і є кількісним показником його феноменологічної якісної вказівки про зв'язок добротності вторинного контура трансформатора з напругою, що збуджується на його виході [1].

б) При $\Delta \gg \frac{1}{2Q_2}$, що виходить з $(2Q_2\Delta)^2 \gg 1$, отримаємо, що

$\psi_\Delta = \arctg(2Q_2 \cdot \Delta) \rightarrow \frac{\pi}{2}$ та формула (12) приймає вигляд:

$$U_2(t) \approx -\left(\frac{k_1}{2 \cdot \Delta}\right) \cdot U_{1m} \cdot \sin(\omega_1 t). \quad (15)$$

Отриманий результат свідчить про деяке перевищення коефіцієнта перетворення над коефіцієнтом трансформації напруги, тобто, $K_{Tesla} \rightarrow \left(\frac{k_1}{2 \cdot \Delta}\right)$.

в) При $\Delta \approx \frac{1}{2Q_2}$, що виходить з, $(2Q_2\Delta)^2 \approx 1$, одержуємо, що

$\psi_\Delta = \arctg(2Q_2 \cdot \Delta) \rightarrow \frac{\pi}{4}$ і формула (12) приймає вигляд:

$$U_2(t) \approx -\frac{(k_1 \cdot Q_2)}{\sqrt{2}} \cdot U_{1m} \cdot \cos\left(\omega_1 t - \frac{\pi}{4}\right). \quad (16)$$

Коефіцієнт перетворення напруги в цьому випадку буде дорівнювати:

$$K_{Tesla} \rightarrow \left(\frac{k_1 \cdot Q_2}{\sqrt{2}}\right) \gg 1 \quad (17)$$

Результати проведеного аналізу зведені в табл. 1.

Таблиця 1

Значення коефіцієнта перетворення напруги в трансформаторі Тесла

№ з/п	$\Delta = \left 1 - \frac{\omega_1}{\omega_{20}} \right $	K_{Tesla}
1	$\Delta = 1 \left \frac{\omega_1 \ll 1}{\omega_{20}} \right $	k_1 (низькі частоти)
2	$\Delta \ll \frac{1}{2Q_2} \rightarrow 0$	$k_1 Q_2$ (резонанс)
3	$\Delta = \frac{1}{2Q_2} \leq 0,1$	$\frac{k_1 \cdot Q_2}{\sqrt{2}}$
4	$\Delta \gg \frac{1}{2Q_2} \leq 0,1$	$\frac{k_1}{2\Delta}$

Чисельний приклад

Ілюстрацію практичного застосування отриманих співвідношень для оцінки можливих коефіцієнтів перетворення енергії в трансформаторі Тесли можна провести для вихідних даних, близьких до рекомендацій автора винаходу [1]: власна частота і добротність вторинного контура – $f_{20} = 300$ кГц та $Q_2 \approx 1000$. Коефіцієнт трансформації за напругою за рахунок електромагнітного зв'язку між обмотками – $k_1 \approx 15$.

Оцінки.

1. Умовна ширина смуги частот в околиці, «достатньо близької» до резонансного значення, що забезпечує максимум коефіцієнта перетворення енергії – $K_{Tesla} \approx k_1 \cdot Q_2 = 15000$:

- а) відносна величина – $\Delta \ll \frac{1}{2Q_2} = 0,5 \cdot 10^{-3}$, для першого порядку малості відносно граничного значення [13] – $\Delta_{real} \approx 0,1 \cdot 0,5 \cdot 10^{-3} = 0,5 \cdot 10^{-4}$;
- б) абсолютне значення – $\Delta f_{20} \approx \pm 15,0$ Гц.

2. Умовна ширина смуги частот в «близькій околиці» її резонансного значення, що забезпечує найбільш близький до максимуму коефіцієнт перетворення енергії – $K_{Tesla} \approx \frac{k_1 \cdot Q_2}{\sqrt{2}} \approx 10606$:
- а) відносна величина – $\Delta \approx \frac{1}{2Q_2} = 0,5 \cdot 10^{-3}$;
- б) абсолютне значення – $\Delta f_{20} \approx \pm 150$ Гц.
3. Умовна ширина смуги частот в «дальній околиці» її резонансного значення, що забезпечує коефіцієнт перетворення енергії – $K_{Tesla} \approx \frac{k_1}{2 \cdot \Delta} \approx 1500$:
- а) відносна величина для першого порядку нескінченно великої величини відносно граничного значення [13] – $\Delta \approx 10 \cdot \frac{1}{2Q_2} = 0,5 \cdot 10^{-2}$;
- б) абсолютне значення – $\Delta f_{20} \approx \pm 1500$ Гц.
4. При частотах, на порядок менших резонансного значення (це власна частота вторинного контура), $f \leq 0,1 \cdot f_{20} = 30000$ Гц, коефіцієнт перетворення енергії – $K_{Tesla} \approx k_1 = 15$.

Висновки

- Отримані залежності вихідної напруги від робочих частот протікаючих процесів дозволяють оцінити ефективність трансформатора Тесли, як джерела енергії з навколишнього простору.
- Показано, що
 - межі діапазонів робочих частот, що визначають величини коефіцієнтів перетворення енергії, встановлюються значенням добротності вторинного контура трансформатора Тесли – Q_2 ;
 - максимум коефіцієнта перетворення енергії істотно перевищує величину ($y \sim Q_2$ разів), що обумовлена електромагнітним зв'язком між обмотками трансформатора Тесли, досягається у вельми вузькій смузі поблизу резонансної частоти (відносно відхилення $\sim \frac{1}{2Q_2} \rightarrow 0$);

- при незначному відхиленні робочої частоти від резонансного значення (не більш, ніж на $\sim \pm 10\%$) величина коефіцієнта перетворення енергії істотно падає (більш, ніж на порядок), і при низьких частотах збуджуючої напруги (в першому наближенні – на порядок нижче за резонансну частоту вторинного контура) трансформатор Тесли працює як звичайний підвищуючий перетворювач напруги з коефіцієнтом трансформації, величина якого встановлюється відомим явищем електромагнітної індукції.

2.3 Джерело електричної енергії з індуктивно зв'язаними резонансними контурами

Як впливає з доступної інформації, основною проблемою створення джерела електричної енергії з навколишнього простору є проблема її знімання з вторинної обмотки трансформатора Тесли.

Виходячи з феноменологічних міркувань, один з варіантів знімання енергії можна реалізувати за допомогою резонансного контура, налаштованого на робочу частоту і абсолютно ідентичного контуру первинної обмотки.

Джерело електричної енергії із запропонованим пристроєм її знімання буде представлено сукупністю трьох індуктивно зв'язаних замкнутих контурів, що працюють в режимі резонансу струмів на одній частоті [12,13]. Принципова схема такої конструкції представлена на рис. 4.

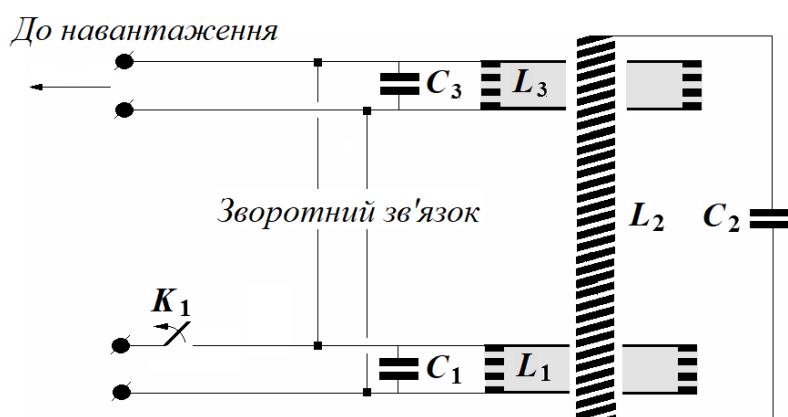


Рис. 4. Принципова схема джерела електричної енергії з трьох індуктивно зв'язаних резонансних контурів,

L_1C_1 – первинний та L_2C_2 – вторинний контури генератора електричної енергії, L_3C_3 – третій контур для знімання енергії, вилученої з навколишнього простору (можливий зворотний зв'язок забезпечує автономну роботу джерела)

Умовно, тут можна виділити три основні складові:

- «задаючий» генератор енергії, що включає первинний – « L_1C_1 » та вторинний – « L_2C_2 » контури трансформатора Тесли;
- пристрій знімання енергії – третій контур – « L_3C_3 », ідентичний первинному контуру – « L_1C_1 »;
- система забезпечення зворотнього зв'язку, що забезпечує автономну роботу джерела електричної енергії, при відключенні зовнішнього живлення за допомогою комутатора – K_1 .

Слід зазначити можливі переваги і недоліки такого пристрою порівняно з системою знімання енергії за допомогою соленоїдів, ідентичних вторинній обмотці в трансформаторі Тесла і тих, що розташовані поряд з нею [9].

Основні переваги:

- можливість оцінки рівня індуктивного зв'язку з вторинною обмоткою;
- визначеність рівня вилученої енергії навколишнього простору, що обумовлена строго фіксованим розташуванням соленоїда третього контура відносно вторинної обмотки трансформатора Тесли;
- визначеність і компактність конструктивного виконання джерела електричної енергії в цілому.

Основний недолік: можливий вплив індуктивних зв'язків на електромагнітні процеси, що протікають в схемі джерела, що приведе до відстройки робочої частоти від необхідного резонансного значення.

Але цей недолік можна нівелювати. Нагадаємо, що, за рекомендацією автора фундаментального винаходу, величина «відбираної енергії» повинна бути багато менше енергії вторинної обмотки трансформатора. Аналогічно, негативний вплив первинної обмотки може нівелюватися її достатньо малим рівнем енергії, що генерується.

Перейдемо до аналізу процесів, що протікають.

Відзначимо, що розгляд проводиться за допомогою методів теорії ланцюгів без введення будь-яких гіпотез про будову матеріального світу [12].

На рис. 5 представлена електрична схема заміщення запропонованого джерела з трьома індуктивно зв'язаними контурами.

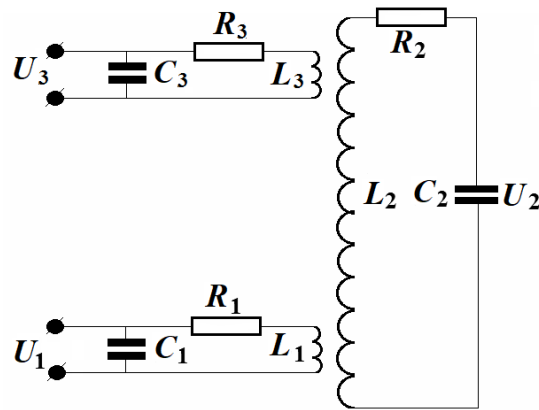


Рис. 5. Схема заміщення джерела електричної енергії з трьох індуктивно зв'язаних резонансних контурів, $R_{1,2,3}$ – активні опори, $U_{1,2,3}$ – напруги у виділених контурах, відповідно

Постановка задачі.

- В первинному контурі « $L_1 C_1$ » на індуктивності збуджується напруга – $U_1(t) = U_{1m} \cdot (\sin \omega_1 \cdot t)$, U_{1m} – амплітуда, ω_1 – частота, надалі це резонансна частота трансформатора Тесли.
- Первинна обмотка індуктивно зв'язана з вторинною таким чином, що її витки – w_1 частково покривають відповідне число витків вторинної обмотки – $w_2^{(1)}$. Коефіцієнт трансформації – $k_1 = \frac{w_2^{(1)}}{w_1}$.
- Вторинний контур – початкові умови: $U_2(0) = \frac{dU_2(0)}{dt} = 0$.
- Добротності всіх трьох контурів достатньо великі, тобто $Q_{1,2,3} \gg 1$.
- Третій контур ідентичний і за параметрами, і за конструктивним виконанням, первинному (збуджуючому) контуру джерела енергії.
- Обмотка третього контура індуктивно пов'язана з вторинною обмоткою так, що її витки – $w_3 = w_1$ частково покривають відповідне число витків вторинної обмотки – $w_2^{(1)}$. Коефіцієнт трансформації – $k_3 = \frac{w_3}{w_2^{(1)}} = \frac{w_1}{w_2^{(1)}} = \frac{1}{k_1}$.
- Третій контур – нульові початкові умови: $U_3(0) = \frac{dU_3(0)}{dt} = 0$.

Розв'язання.

Отже, на первинній обмотці трансформатора Тесли відповідно до постановки задачі напруга дорівнює – $U_1(t) = U_{1m} \cdot (\sin \omega_1 \cdot t)$.

На індуктивності вторинної обмотки трансформатора Тесли в резонансі збуджується напруга, амплітудно-тимчасова залежність якої була обчислена раніше:

$$U_2(t) = \left(\frac{k_1}{2}\right) \cdot U_{1m} \cdot \left[2Q_2 \cdot \cos(\omega_1 t) \cdot (1 - e^{-\delta_2 t}) - \sin(\omega_1 t) \right], \quad (18)$$

де U_{1m} – амплітуда збуджуючої напруги на індуктивності первинного контура,

Q_2 – добротність вторинного контура,

ω_1 – резонансна частота,

δ_2 – декремент згасання вторинного контура.

Рівняння для напруги на ємності третього контура, що збуджується полем обмотки вторинного контура (максимум, не враховуючий рівень електромагнітного зв'язку), беручи до уваги залежність (18), можна записати у вигляді [12]:

$$\begin{aligned} \frac{d^2 U_3(t)}{dt^2} + 2\delta_3 \cdot \frac{dU_3(t)}{dt} + \omega_{30}^2 U_3(t) &= (\omega_{30}^2 \cdot k_3) \times \\ &\times \left(\frac{k_1}{2}\right) \cdot U_{1m} \cdot \left[2Q_2 \cdot \cos(\omega_1 t) \cdot (1 - e^{-\delta_2 t}) - \sin(\omega_1 t) \right], \end{aligned} \quad (19)$$

де $\omega_{30} = \frac{1}{\sqrt{L_3 C_3}}$ и $\delta_3 = \frac{R_3}{2L_3}$ – власна частота і декремент згасання третього контура джерела енергії, відповідно.

Праву частину рівняння (19) перепишемо у вигляді, більш зручному для інтегрування.

$$\frac{d^2 U_3(t)}{dt^2} + 2\delta_3 \cdot \frac{dU_3(t)}{dt} + \omega_{30}^2 U_3(t) = F_1(t) + F_2(t), \quad (20)$$

де $F_1(t) = A \cdot \cos(\omega_1 t) - B \cdot \sin(\omega_1 t)$, $A = (\omega_{30}^2 \cdot U_{1m} \cdot Q_2)$,

$$B = (0.5 \cdot \omega_{30}^2 \cdot U_{1m}),$$

$$F_2(t) = -A \cdot e^{-\delta_2 t} \cdot \cos(\omega_1 t).$$

Загальний інтеграл – $U_3(t)$ неоднорідного диференціального рівняння (20) шукається у вигляді суми загального рішення відповідного однорідного – $U_3^{(g)}(t)$ та часного рішення відповідного неоднорідного рівнянь – $U_3^{(n)}(t)$ [13]:

$$U_3(t) = U_3^{(g)}(t) + U_3^{(n)}(t). \quad (21)$$

Спочатку загальне рішення – $U_3^{(g)}(t)$ [13]:

$$U_3^{(g)}(t) = e^{-\delta_3 t} \cdot [C_1 \cdot \cos(\omega_3 t) + C_2 \cdot \sin(\omega_3 t)], \quad (22)$$

де $C_{1,2}$ – довільні постійні інтегрування, $\omega_3 = \sqrt{\omega_{30}^2 - \delta_3^2}$.

Виходячи з постановки задачі –

$$\omega_3 = \omega_{30} \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{1}{2Q_3}\right)^2} \Bigg|_{Q_3 \gg 1} \approx \omega_{30} = \omega_1. \text{ Відповідно, загальне рішення}$$

(13) приймає вигляд:

$$U_3^{(g)}(t) = e^{-\delta_3 t} \cdot [C_1 \cdot \cos(\omega_1 t) + C_2 \cdot \sin(\omega_1 t)]. \quad (23)$$

Тепер часне рішення – $U_3^{(n)}(t)$.

Згідно принципу суперпозиції часне рішення неоднорідного рівняння (20) можна шукати у вигляді суми двох функцій, кожна з яких задовольняє рівнянню (20), але з правою частиною, де міститься тільки один з доданків в початковому диференціальному рівнянні [13]:

$$U_3^{(n)}(t) = U_3^{(1)}(t) + U_3^{(2)}(t). \quad (24)$$

Отже, з рівняння (20), розкриваючи функціональну залежність в правій частині, для кожного з доданків в сумі (24) в режимі резонансу, коли $\omega_{30} = \omega_1$, отримаємо, що

$$\frac{d^2 U_3^{(1)}(t)}{dt^2} + 2\delta_3 \cdot \frac{dU_3^{(1)}(t)}{dt} + \omega_1^2 U_3^{(1)}(t) = A \cdot \cos(\omega_1 t) - B \cdot \sin(\omega_1 t). \quad (25)$$

$$\frac{d^2 U_3^{(2)}(t)}{dt^2} + 2\delta_3 \cdot \frac{dU_3^{(2)}(t)}{dt} + \omega_1^2 U_3^{(2)}(t) = -A \cdot e^{-\delta_2 t} \cdot \cos(\omega_1 t). \quad (26)$$

Часне рішення рівняння (25) має вигляд [13]:

$$U_3^{(1)}(t) = \left(\frac{\omega_1}{\delta_3} \right) \cdot \frac{U_{1m}}{2} \cdot [0,5 \cdot \cos(\omega_1 t) + Q_2 \cdot \sin(\omega_1 t)]. \quad (27)$$

Знайдене аналогічним чином часне рішення рівняння (26) запишеться у вигляді:

$$U_3^{(2)}(t) = (U_{1m} \cdot Q_2) \cdot \frac{e^{-\delta_2 \cdot t}}{\left[\left(\frac{\delta_2}{\omega_1} \right)^2 \cdot (\delta_2 - 2\delta_3)^2 + 4 \cdot (\delta_3 - \delta_2)^2 \right]} \times \\ \times [\delta_2 \cdot (\delta_2 - 2\delta_3) \cdot \cos(\omega_1 \cdot t) + 2\omega_1 \cdot (\delta_3 - \delta_2) \cdot \sin(\omega_1 \cdot t)]. \quad (28)$$

Згідно (24) сума виразів (27) та (28) є часне рішення – $U_3^{(n)}(t)$ неоднорідного рівняння (20). Його загальний інтеграл, щоб уникнути громіздкості у викладі, перепишемо у вигляді:

$$U_3(t) = e^{-\delta_3 t} \cdot [C_1 \cdot \cos(\omega_3 t) + C_2 \cdot \sin(\omega_3 t)] + U_3^{(n)}(t). \quad (29)$$

Довільні постійні інтегрування – $C_{1,2}$ визначаються з нульових початкових умов поставленої задачі.

$$C_1 = -U_3^{(n)}(0), C_2 = -\frac{1}{\omega_3} \cdot \frac{dU_3^{(n)}(0)}{dt}. \quad (30)$$

Запис кінцевих результатів обчислень для довільних постійних, знайдених за допомогою співвідношень (30), опускаємо, зважаючи на їх громіздкість.

Зрештою нас цікавить напруга на виході третього контура в усталеному режимі, коли $t \gg \frac{1}{\delta_{2,3}}$. В зв'язку з цим доданками, що мі-

стять експоненціально затухаючі множники $\sim e^{-\delta_{2,3} \cdot t} \Big|_{t \gg \frac{1}{\delta_{2,3}}} \rightarrow 0$, як

показують оцінки, виконані за допомогою залежностей (27–30), можна знехтувати. Також у виразі для часного рішення – (28) слід

відкинути нескінченно малі величини порядку $\sim \left(\frac{1}{Q_{2,3}}\right)^2$ і вище.

Після виконання необхідних тотожних перетворень одержуємо, що

$$U_3(t) \approx U_{1m} \cdot \left(\frac{Q_3 \cdot Q_2}{2}\right) \cdot \sin(\omega_1 t). \quad (31)$$

Звідси коефіцієнт перетворення напруги буде дорівнювати:

$$K_U \approx \frac{U_3(t)}{U_1(t)} \approx 0,5 \cdot Q_2 \cdot Q_3. \quad (32)$$

Як слід з (32), в режимі резонансу на виході запропонованого джерела електричної енергії можна отримати напругу, перевищуючу вхідну напругу в число разів, що пропорційне добутку добротностей вторинного і третього контурів, $\sim 0,5 \cdot Q_2 \cdot Q_3$.

Як представляється з фізичних міркувань, такий високий рівень трансформації пояснюється вилученням енергії з навколишнього простору, ключем до отримання якої є дія резонансу в складових елементної бази джерела енергії з трансформатором Тесли.

Окремо підкреслимо, що наявність множника « Q_3 » у формулі (32) свідчить про те, що процес вилучення енергії з навколишнього простору відбувається і в третьому контурі джерела, хоча його пряме призначення полягає тільки в зніманні сигналу, збудженого у вторинному контурі.

Проведений аналіз доповнимо чисельними оцінками.

В якості початкові даних приймемо характерні (але усереднені) параметри схем в роботах [1,8,9,10].

Робоча (резонансна) частота: $f_1 = 300$ кГц, $\omega_1 = 2\pi \cdot f_1$.

Для наочності повторимо попередні розрахунки оцінок резонансного збудження трансформатора Тесли.

Вторинний контур, параметри:

- діаметр каркаса для обмотки соленоїда: $D_2 = 0,075$ м;
- діаметр дроту обмотки з міді: $d_2 = 0,00075$ м;
- питома електропровідність міді: $\gamma_2 = 5,58 \cdot 10^7$ 1/Ом·м.

Обчислення:

- довжина дроту обмотки, $\zeta_2 = 249,886$ м;
- число витків: $w_2 \approx 1061$;
- довжина соленоїда: $l_2 \approx 0,8$ м;
- індуктивність соленоїда: $L_2 \approx 7850,4$ мкГн;
- величина скін-шару: $\Delta = 0,000093$ м;
- активний опір з урахуванням скін-ефекту: $R_2 = 18,06$ Ом;
- величина ємності, що знайдена за розрахованою індуктивністю і заданою робочою частотою: $C_2 = 35,85$ пФ;
- добротність: $Q_2 = 819,338$.

Первинний контур, параметри:

- діаметр каркаса для обмотки соленоїда: $D_1 = 0,125$ м;
- діаметр дроту обмотки з міді: $d_1 = 0,01$ м;
- число витків: $w_1 = 6$.

Обчислення:

- індуктивність соленоїда: $L_1 \approx 9,253$ мкГн;
- величина активного опору соленоїда з урахуванням скін-ефекту: $R_{1i} = 0,01$ Ом;
- величина додаткового активного опору для виконання рекомендації Н. Тесли про мінімізацію збуджуючої дії: $R_1 = 1,0$ Ом.
- величина ємності: $C_1 = 30417,7$ пФ, $\frac{C_2}{C_1} = \frac{35,85}{30417,7} \approx 0,0012 \ll 1$;
- відносний декремент згасання: $\delta_1 = 0,03$;
- добротність: $Q_1 = 16,08$, $Q_1 \ll Q_2$.

Примітка. $w_1 = 6$ витків первинної обмотки, загальною шириною $\sim 0,06$ м, покривають $w_2^{(1)} \approx 80$ витків вторинної обмотки. Коефіцієнт трансформації з індуктивного зв'язку приймемо рівним – $k_1 = \frac{w_2^{(1)}}{w_1} \approx 14$.

Спираючись на результати обчислень характеристик прийнятої конкретної конструкції трансформатора Тесли, знаходимо, що коефіцієнт трансформації за напругою вторинного контура буде дорівнювати – $K_{Tesla} \approx k_1 \cdot Q_2 = 11466 \gg 1$.

Перейдемо до вихідної напруги третього контура.

Коефіцієнт перетворення напруги джерела електричної енергії: $K_U \approx Q_2 \cdot Q_3 \approx 13\,173$.

Приведені оцінки показують, що при вхідній напрузі в $U_{1m} = 0,1$ В на виході вторинної обмотки трансформатора Тесла можна отримати напругу $U_{2m} = 1,147$ кВ, а при зніманні енергії за допомогою резонансного третього контура вихідна напруга досягає величини $U_{3m} = 1,317$ кВ.

Далі, оцінки потужності.

Миттєва потужність визначається добутком миттєвих значень напруги і струму в контурі [12]. Для гармонічного процесу останній можна знаходити за формулою – $J_{1,2,3m} = U_{1,2,3m} \cdot \omega \cdot C_{1,2,3}$ відповідно індексам, що фіксують номер контура. Тоді співвідношення для обчислення миттєвої потужності приймає вигляд:

$$P_{1,2,3m} = U_{1,2,3m}^2 \cdot \omega \cdot C_{1,2,3} \text{ [12].}$$

Первинний контур:

$$J_{1m} = U_{1m} \cdot \omega \cdot C_1 = 0,0057 \text{ А, } P_{1m} = U_{1m}^2 \cdot \omega \cdot C_1 = 0,00057 \text{ Вар.}$$

Вторинний контур:

$$J_{2m} = U_{2m} \cdot \omega \cdot C_2 = 0,077 \text{ А, } P_{2m} = U_{2m}^2 \cdot \omega \cdot C_2 = 0,45 \text{ Вар,}$$

коефіцієнт перетворення за потужністю – $K_{P1-2} = \frac{P_{2m}}{P_{1m}} \approx 790$.

Третій контур:

$J_{3m} = U_{3m} \cdot \omega \cdot C_3 = 75,5 \text{ А, } P_{2m} = U_{2m}^2 \cdot \omega \cdot C_2 = 99497,6 \text{ Вар,}$ коефіцієнт перетворення за потужністю – $K_{P1-3} = \frac{P_{3m}}{P_{1m}} \approx 1,73 \cdot 10^8$.

Примітка. Результати для третього резонансного контура вимагають обережного осмислення з погляду рекомендації Н. Тесли про мінімум енергії, що «знімається», порівняно з енергією вторинної обмотки. Можливо, в реальних системах буде потрібне введення резистора істотно більшої величини для зниження добротності третього контура. Проте, якщо взяти до уваги резонансну настройку останнього, що дозволяє вилучати додаткову електричну енергію з навколишнього простору, то строгість відповідної рекомендації Н. Тесли може опинитися в якійсь мірі не визначною.

Висновки

1. Запропонована схема індуктивного знімання енергії зі вторинної обмотки трансформатора Тесли за допомогою третього резонансного контура з паралельних індуктивності і ємності і послідовним підключенням активного опору.
2. Показано, що настройка в резонанс всіх складових елементної бази джерела електричної енергії (первинного, вторинного і третього контурів) дозволяє ефективно вилучення енергії з навколишнього простору.
3. Отримано, що коефіцієнт перетворення напруги на виході джерела електричної енергії з трьома індуктивно зв'язаними резонансними контурами, визначений як відношення початкового вхідного і результуючого вихідного сигналів, прямо пропорційний добутку добротностей вторинного і третього контурів, що набагато більше добутків коефіцієнтів індуктивного зв'язку між ними.

2.4 Збудження первинного контура імпульсами струму

Один з можливих способів отримання гармонічних сигналів заснований на явищі резонансу струмів у LC – контурі з паралельних індуктивності та ємності. Як представляється з феноменологічних міркувань, його резонансне збудження можливе при подачі на вхід періодичної послідовності прямокутних струмових імпульсів з частотою, що дорівнює власній частоті контура [12].

Якісні міркування спробуємо обґрунтувати відповідними обчисленнями.

Метою даного розгляду є аналіз процесів в контурі з паралельних індуктивності і ємності в режимі резонансу струмів при його збудженні періодичною послідовністю прямокутних струмових імпульсів.

Постановка задачі.

- Електрична схема заміщення L_1C_1 – контура з урахуванням активного опору який завжди має місце – R_1 представлена на рис. 6.

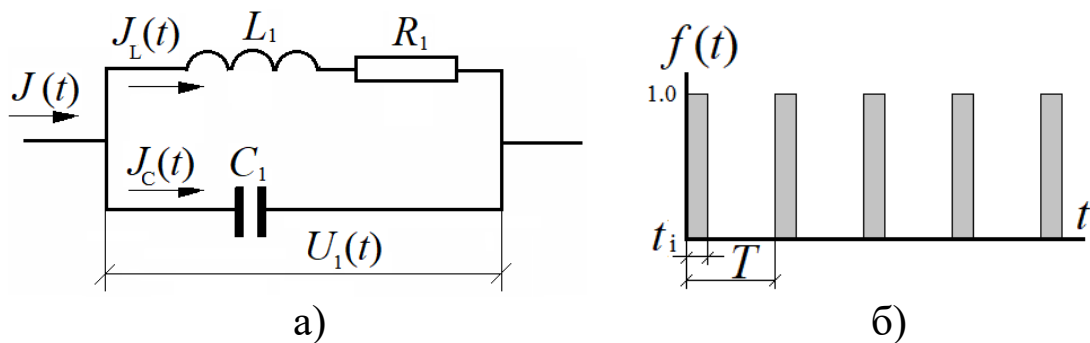


Рис. 6. Графічні ілюстрації для проведення обчислень,
 а) схема заміщення первинного контура;
 б) часова функція збуджуючого струму

Примітка. Схема і елементи контура відповідають первинному контуру в джерелі електричної енергії трансформатора Тесли

- На вхід контура подається періодична послідовність прямокутних імпульсів струму з амплітудою J_m , тривалістю – t_i та періодом проходження – T : $J(t) = J_m \cdot f(t)$, де $f(t)$ – часова залежність, $f(t) = \sum_{n=0}^{\infty} [\eta(t - n \cdot T) - \eta(t - (n \cdot T + t_i))]$, n – номер імпульсу в послідовності.
- Розкладання функції $f(t)$, що задовольняє умовам теореми Діріхле, в ряд Фур'є має вигляд [13]:

$$f(t) = \frac{1}{T} \left[t_i + 4 \cdot \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{\omega_k} \cdot \sin\left(\omega_k \frac{t_i}{2}\right) \cdot \cos\left(\omega_k \cdot \left(\frac{t_i}{2} - t\right)\right) \right] \cdot \eta(t), \quad (33)$$

де $\omega_k = \frac{2\pi k}{T}$ – частоти розкладання,

$\eta(t)$ – ступінчаста функція Хевісайда, що встановлює нуль функції для $t \leq 0$.

Розрахункові співвідношення.

Основні вирази для струмів і напруг в схемі на рис. ба, перетворені по Лапласу з урахуванням нульових початкових умов, можна представити залежностями [13]:

$$\begin{cases} U_1(p) = (pL_1 + R_1) \cdot J_L(p), \\ U_1(p) = \frac{1}{pC_1} \cdot J_C(p), \\ J(p) = J_L(p) + J_C(p). \end{cases}, \quad (34)$$

де p – параметр перетворення,

$$U_1(p) = L\{U_1(t)\}, J_L(p) = L\{J_L(t)\}, J_C(p) = L\{J_C(t)\},$$

$$J(p) = L\{J(t)\},$$

L – оператор інтегрального перетворення Лапласа.

З системи рівнянь (34) знаходимо L – образи напруги і струму в обмотці первинного контура.

$$\begin{cases} U_1(p) = \frac{(pL_1 + R_1)}{(p + \delta_1)^2 + \omega_1^2} \cdot \omega_{01}^2 \cdot J(p), \\ J_{L_1}(p) = \frac{1}{(p + \delta_1)^2 + \omega_1^2} \cdot \omega_{01}^2 \cdot J(p), \end{cases}, \quad (35)$$

де $\omega_1 = \sqrt{\omega_{01}^2 - \delta_1^2}$ – частота коливань,

$$\omega_{01} = \frac{1}{\sqrt{L_1 C_1}} \text{ – власна частота контура,}$$

$$\delta_1 = \frac{R_1}{2L_1} \text{ – декремент згасання.}$$

Здійснюючи зворотне перетворення Лапласа у виразах (35), після введення нових позначень отримаємо наступні розрахункові співвідношення [13]:

а) напруга на індуктивності обмотки первинного контура з урахуванням активного опору,

$$U_1(t) = J_m \cdot \omega_{01} \left[(\omega_{01} \cdot L_1) \cdot I_1(t) + \left(\frac{R_1}{2} \cdot \frac{\omega_{01}}{\omega_1} \right) \cdot I_2(t) \right], \quad (36)$$

де $I_1(t) = \left(e^{-\delta_1 \cdot t} \cos(\omega_1 \cdot t) \right) * f(t)$, $I_2(t) = \left(e^{-\delta_1 \cdot t} \sin(\omega_1 \cdot t) \right) * f(t)$;

б) струм в індуктивності,

$$J_{L_1}(t) = \left(\frac{\omega_{01}^2}{\omega_1} \right) \cdot J_m \cdot I_2(t). \quad (37)$$

Результати (36) та (37) перетворюємо до вигляду, зручному для обчислень та аналізу протікаючих процесів.

Перше, при достатньо малому активному опорі відносний декремент згасання є нескінченно малою величиною, $\delta_{01} = \frac{\delta_1}{\omega_1} \ll 1$. В

цьому випадку $\omega_1 = \omega_{01} \cdot \sqrt{1 - \delta_{01}^2} \Big|_{\delta_{01} \ll 1} \approx \omega_{01}$ та відносний декремент

буде дорівнювати $\delta_{01} = \frac{\delta_1}{\omega_{01}} \ll 1$.

Тепер вирази для напруги (36) і струму (37) приймають вигляд:
а) напруга,

$$U_1(\varphi) = J_m \cdot \left[Z_1 \cdot I_1(\varphi) + \left(\frac{R_1}{2} \right) \cdot I_2(\varphi) \right], \quad (38)$$

де $Z_1 = \sqrt{\frac{L_1}{C_1}}$ – хвильовий опір контура,

$\varphi = \omega_{01} \cdot t$ – фаза сигналу,

$$f(\varphi) = \frac{1}{(\omega_{01} \cdot T)} \left[\varphi_i + 4 \cdot \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{\omega_{0k}} \sin \left(\omega_{0k} \cdot \frac{\varphi_i}{2} \right) \cos \left(\omega_{0k} \cdot \left(\frac{\varphi_i}{2} - \varphi \right) \right) \right] \cdot \eta(\varphi),$$

$$I_1(\varphi) = \left(e^{-\delta_{01} \cdot \varphi} \cos(\varphi) \right) * f(\varphi) = \frac{1}{(\omega_{01} T)} \left[\varphi_i \int_0^{\varphi} e^{-\delta_{01} \psi} \cos(\psi) d\psi + \right.$$

$$+ 4 \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{\omega_{0k}} \sin \left(\omega_{0k} \frac{\varphi_i}{2} \right) \int_0^{\varphi} e^{-\delta_{01}\psi} \cos(\psi) \cos \left(\omega_{0k} \left(\frac{\varphi_i}{2} - (\varphi - \psi) \right) \right) d\psi \Bigg],$$

$$I_2(\varphi) = \left(e^{-\delta_{01} \cdot \varphi} \sin(\varphi) \right) * f(\varphi) = \frac{1}{(\omega_{01} T)} \left[\varphi_i \int_0^{\varphi} e^{-\delta_{01}\psi} \sin(\psi) d\psi + \right. \\ \left. + 4 \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{\omega_{0k}} \sin \left(\omega_{0k} \frac{\varphi_i}{2} \right) \int_0^{\varphi} e^{-\delta_{01}\psi} \sin(\psi) \cos \left(\omega_{0k} \left(\frac{\varphi_i}{2} - (\varphi - \psi) \right) \right) d\psi \right],$$

$$\omega_{0k} = \frac{\omega_k}{\omega_{01}} - \text{відносна частота спектру збуджуючого струму};$$

б) струм в індуктивності,

$$J_{L_1}(\varphi) = J_m \cdot I_2(\varphi). \quad (39)$$

Розкриємо згортки функцій у виразах для $I_1(\varphi)$, $I_2(\varphi)$.

При виконанні тотожних перетворень залишимо доданки, відповідні режиму, що тільки встановився, і знехтуємо доданками, що містять убиваючі експоненти і прагнуть до нуля при $\varphi \gg \frac{1}{\delta_{01}}$, що в

терминах часу відповідає умові: при $t \gg \frac{1}{\delta_1}$. Крім того, знехтуємо

нескінченно малими другого порядку $\sim \delta_{01}^2$ та вище.

Також, задамо, що має місце резонанс, коли основна частота спектру збуджуючого струму дорівнює власній частоті контура, тобто, $\omega_{0k}|_{k=1} = 1$. В цьому випадку період проходження струмових імпульсів в послідовності буде дорівнювати – $T = \frac{2\pi}{\omega_{01}} = 2\pi\sqrt{L_1 \cdot C_1}$.

$$T = \frac{2\pi}{\omega_{01}} = 2\pi\sqrt{L_1 \cdot C_1}.$$

Одже,
$$I_1 \approx \frac{1}{\pi} \times$$

$$\times \left[\left(\frac{\sin \left(\frac{\varphi_i}{2} \right)}{\delta_{01}} \right) \cos \left(\varphi - \frac{\varphi_i}{2} \right) + 2 \sum_{k=2}^{\infty} \left(\frac{\sin \left(\omega_{0k} \frac{\varphi_i}{2} \right)}{(\omega_{0k}^2 - 1)} \right) \sin \left(\omega_{0k} \left(\varphi - \frac{\varphi_i}{2} \right) \right) \right], \quad (40)$$

де $\omega_{0k} = 2, 3, 4, 5, 6, \dots$ – відносні власні частоти контура,

$\varphi = \omega_{01} \cdot t$ – поточна фаза, ω_{01} – основна частота контура, t – час,

φ_i – фазова тривалість імпульсу струму.

$$I_2 \approx \frac{1}{\pi} \left[\frac{\sin\left(\frac{\varphi_i}{2}\right)}{\delta_{01}} \cdot \sin\left(\varphi - \frac{\varphi_i}{2}\right) + 2 \sum_{k=2}^{\infty} \frac{\sin\left(\omega_{0k} \frac{\varphi_i}{2}\right)}{(\omega_{0k}^2 - 1)} \cdot \cos\left(\omega_{0k} \left(\varphi - \frac{\varphi_i}{2}\right)\right) \right]. \quad (41)$$

Формули (38), (39) перепишемо у вигляді відношень з нормуванням на фізичні максимуми, що більш зручно для проведення чисельних оцінок.

$$U_{10}(\varphi) = \frac{U_1(\varphi)}{Z_1 \cdot J_m} = \left[I_1(\varphi) + \left(\frac{R_1}{2Z_1} \right) \cdot I_2(\varphi) \right]. \quad (42)$$

$$J_{L_1 0}(\varphi) = \frac{J_{L_1}(\varphi)}{J_m} = I_2(\varphi). \quad (43)$$

Вирази (42), (43) із залученням залежностей (40) і (41) описують процеси збудження первинного контура періодичною послідовністю прямокутних струмових імпульсів в усталеному режимі, коли час – $t \gg 1/\delta_1$ (δ_1 – декремент згасання сигналу в контурі).

Чисельні оцінки.

Мета даних обчислень:

- визначення фазово-часової форми збуджуваних сигналів при різній тривалості збуджуючих імпульсів струму в послідовності, що подається на вхід первинного контура;
- оцінка амплітудних значень струмів і напруг в обмотці первинного контура, сигнал якої трансформується в обмотку вторинного контура трансформатора Тесли.

Вихідні дані:

- активний опір обмотки – $R_{L_1} = 0,01$ Ом,
- додатковий активний опір – $R_{add} = 1$ Ом,

- сумарний активний опір провідників контура –
 $R_1 = R_{L_1} + R_{add} = 1,01 \text{ Ом},$
- індуктивність обмотки – $L_1 = 9,25 \text{ мкГн},$
- ємність – $C_1 = 30417 \text{ пФ},$
- резонансна частота – $\omega_{01} = 300 \text{ кГц}.$

Примітка. Початкові дані відповідають попереднім розрахункам для північного контура.

Відповідно, хвильовий опір контура – Z_1 , декремент згасання – δ_1 , відносний декремент згасання – δ_{01} та час, коли процес можна вважати усталеним – t_0 , визначаються за допомогою відомих співвідношень:

$$Z_1 = \sqrt{\frac{L_1}{C_1}} \approx 17,483 \text{ Ом}, \quad \delta_1 = \frac{R_1}{2L_1} \approx 54494, \quad \delta_{01} = \frac{\delta_1}{\omega_{01}} \approx 0,028,$$

$t_0 \approx 10 \cdot 1/\delta_1 \approx 180 \text{ мкс}.$ Графічні ілюстрації результатів обчислень приведені нижче.

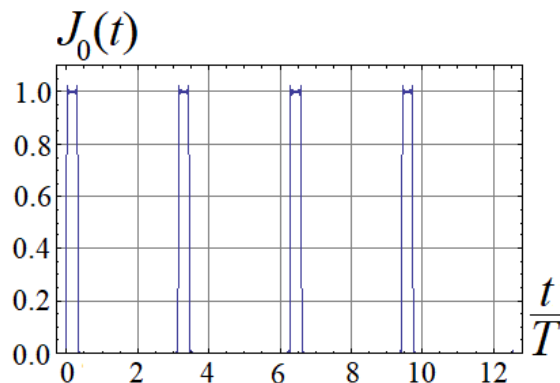


Рис. 7. Розкладання Фур'є для збуджуючого струму у відносних одиницях (нормування на максимум), тривалість імпульсу – $t_i = 0,1 \cdot T$, T – період проходження імпульсів

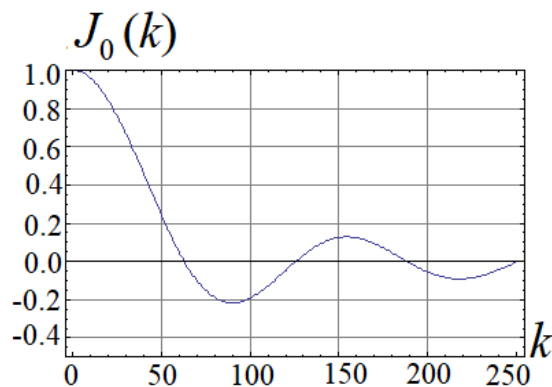


Рис. 8. Амплітудно-частотний спектр збуджуючого струму, k – номер гармоніки, тривалість імпульсу – $t_i = 0,1 \cdot T$, T – період проходження імпульсів

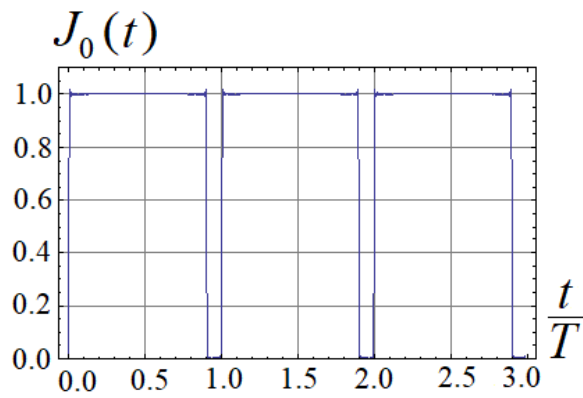


Рис. 9. Розкладання Фур'є для збуджуючого струму у відносних одиницях (нормування на максимум), тривалість імпульсу — $t_i = 0,9 \cdot T$, T — період проходження імпульсів

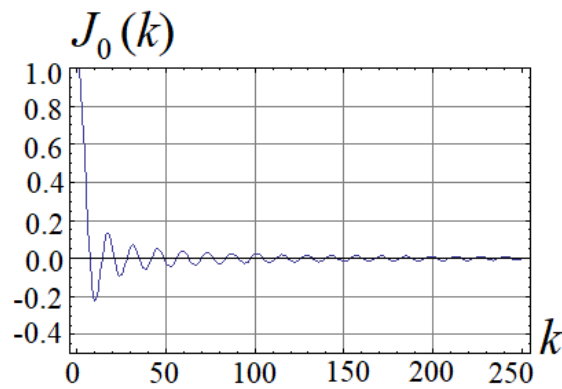


Рис. 10. Амплітудно-частотний спектр збуджуючого струму, k — номер гармоніки, тривалість імпульсу — $t_i = 0,9 \cdot T$, T — період проходження імпульсів

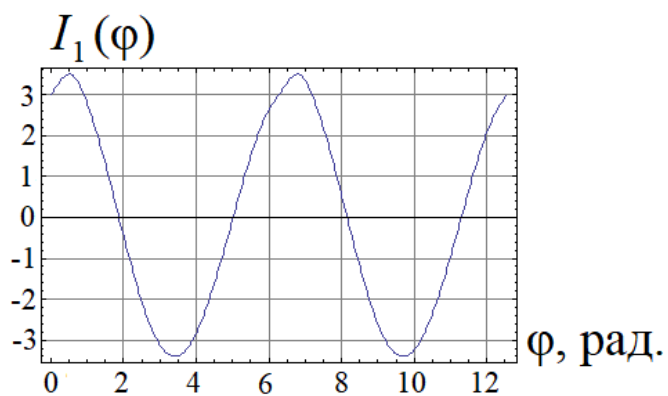


Рис. 11. Фазова залежність першої резонансної гармоніки функції — $I_1(\varphi)$, тривалість імпульсу — $t_i = 0,1 \cdot T$, T — період проходження імпульсів

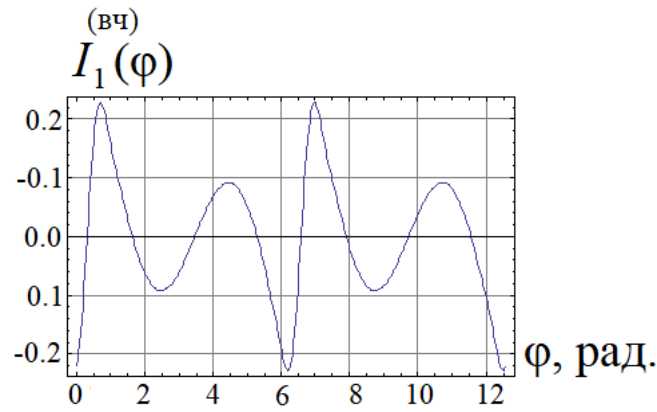


Рис. 12. Фазовая залежність суми вищих гармонік функції – $I_1(\varphi)$, тривалість імпульсу – $t_i = 0,1 \cdot T$, T – період проходження імпульсів

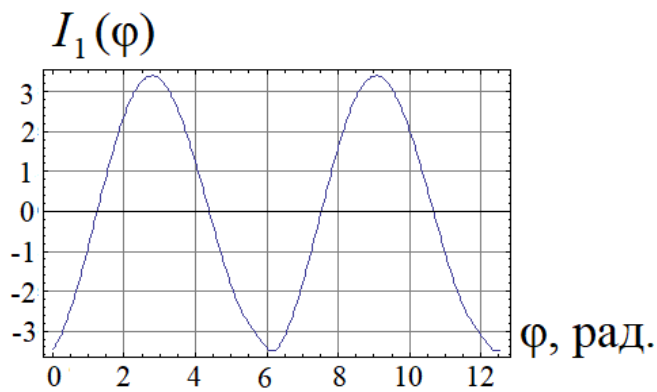


Рис. 13. Фазовая залежність першої резонансної гармоніки функції – $I_1(\varphi)$, тривалість імпульсу – $t_i = 0,9 \cdot T$, T – період проходження імпульсів

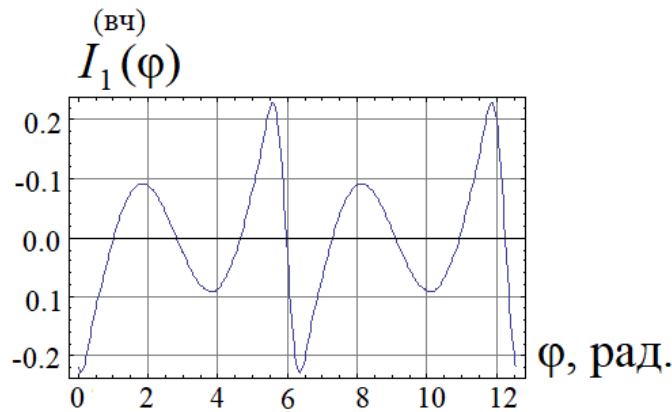


Рис. 14. Фазовая залежність суми вищих гармонік функції – $I_1(\varphi)$, тривалість імпульсу – $t_i = 0,9 \cdot T$, T – період проходження імпульсів

Графічні ілюстрації характеристик процесів збудження резонансної структури доповнимо чисельними оцінками амплітудних показників.

Струм в індуктивності: $J_{L_1 \max} = J_m \cdot I_{2 \max}(\varphi) \approx 3.2 \cdot J_m$. Вихідна напруга: $U_{1 \max}(\varphi) \approx Z_1 \cdot J_m \cdot I_1(\varphi) \approx Z_1 \cdot J_m \cdot I_{1 \max}(\varphi) \approx 57 \cdot J_m$. Оскільки $\left(\frac{R_1}{2Z_1}\right) < 0,03$, падінням напруги на активному опорі контура можна знехтувати.

Отже, збудити резонансні сигнали можна періодичною послідовністю прямокутних струмових імпульсів з частотою повторення, що дорівнює власній частоті контура ~ 300 кГц. Амплітуда вихідної напруги ~ 1 В забезпечується вхідним струмом $J_m \approx 17,5$ мА. Максимум струму в контурі ~ 56 мА.

Результати обчислень, висновки

1. Аналіз спектрального складу періодичної послідовності імпульсів різної тривалості показав, що її збільшення знижує амплітуди вищих гармонік і, відповідно, їх внесок у формування часової залежності збуджуючого струму.
2. Розрахунки функцій, що описують фазову залежність збуджуючих напруг і струмів в резонансі, коли частота проходження імпульсів струму на вході в первинний контур співпадає з його власною частотою, виявили наступні закономірності:
 - 2.1. Незалежно від тривалості імпульсів струму на вході в досліджувану резонансну структуру в її контурі збуджуються гармонічні сигнали (напруга і струм) з частотою, що дорівнює власній частоті резонансної структури.
 - 2.2. Фазові залежності – $I_{1,2}(\varphi)$ описуються гармонічними функціями з рівними амплітудами $I_{1,2m} \approx 3,2$. Вплив вищих гармонік спектру збуджуючого струму є нікчемно малим. Так $I_{1,2m}^{(64)} \approx 0,2$, що складає $\sim 6\%$ від максимуму першої резонансної гармоніки.
 - 2.3. Резонансне збудження вихідної напруги з амплітудою ~ 1 В забезпечується достатньо малим струмом ~ 56 мА.
3. Збудження резонансної структури періодичною послідовністю прямокутних імпульсів з частотою проходження, яка дорівнює її власній частоті, показало достатньо високу ефективність даного способу її запуску.

2.5 Оцінки параметрів джерела енергії на базі трансформатора Тесли

Мета даного викладення – ілюстрація результатів проведених досліджень, як приклад їх узагальнення для проектування реального джерела енергії з навколишнього простору, виконаного на базі резонансного трансформатора Тесли.

Принципова схема, основні функціональні складові.

Пропонована конструкція джерела представлена сукупністю трьох індуктивно зв'язаних замкнутих контурів, що працюють в режимі резонансу на одній і тій же частоті. Пропонована схема джерела енергії містить три основні складові:

- генератор енергії, що включає первинний задаючий – « L_1C_1 » і вторинний генерувальний – « L_2C_2 » контури трансформатора Тесли;
- пристрій знімання енергії – третій контур – « L_3C_3 », ідентичний первинному контуру – « L_1C_1 »;
- система зворотного зв'язку, що забезпечує автономну роботу джерела електричної енергії при відключенні зовнішнього живлення за допомогою комутатора – K_1 ;
- струмообмежуючі активні опори, призначення яких полягає забезпечити виконання вимоги про мінімізацію енергії, що знімається.

Її принципова електрична схема дана на рис. 15, де можливий зворотний зв'язок забезпечує автономну роботу джерела.

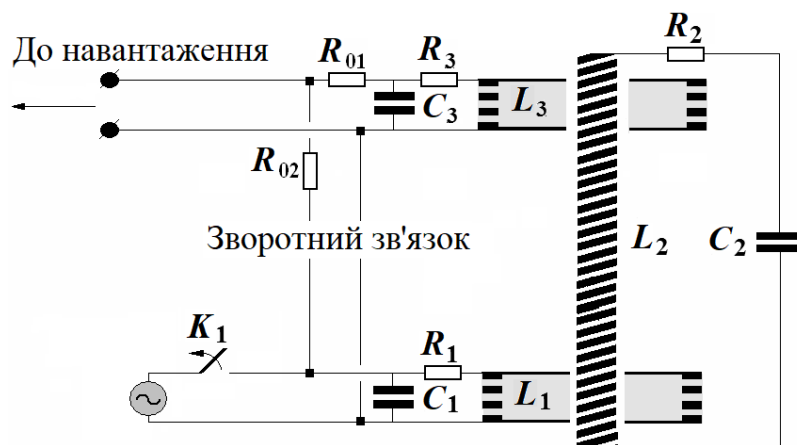


Рис. 15. Принципова схема джерела електричної енергії з трьох індуктивно зв'язаних резонансних контурів, L_1C_1 – первинний та L_2C_2 – вторинний контури генератора електричної енергії, L_3C_3 – третій контур для знімання енергії, вилученої з навколишнього простору, $R_{1,2,3}$ – активні опори відповідних контурів, $R_{01,2}$ – струмообмежуючі активні опори

Робота запропонованої схеми.

Принципово, первинний контур є генератором гармонічних коливань, що задає фіксовану частоту – f_1 , яка є робочою резонансною частотою всіх трьох індуктивно зв'язаних складових запропонованої схеми джерела. Їх дієвість заснована на відомому явищі «резонансу струмів».

Робота первинного задаючого контура реалізується при подачі на вхід ланцюга з паралельних ємності – C_1 , та індуктивності – L_1 періодичної послідовності імпульсів струму прямокутної форми. Рівність частоти їх проходження і резонансної частоти L_1C_1 – контура приводить до збудження гармонічного сигналу в обмотці соленоїда первинного контура з частотою – $f_1 = \frac{1}{\sqrt{L_1C_1}}$. Відзначимо, що гілка з

індуктивністю має власний активний опір дротів обмотки. Крім того, тут послідовно включається додатковий резистор для обмеження рівня добротності первинного контура і амплітуд збуджуваних напруги і струмів. Відзначимо, що дане обмеження необхідне у відповідності до рекомендації Н. Тесли.

Примітка. Як представляється з апіорних фізичних міркувань, резонансний спосіб збудження первинної обмотки дозволяє отримати найбільшу величину сигналу, що ініціює роботу трансформатора Тесли.

Гармонічний сигнал в первинному контурі за рахунок електромагнітного зв'язку збуджує у вторинному L_2C_2 – контурі гармонічну е.р.с. з резонансною частотою – f_1 . Як представляється апіорі, настрійку вторинного контура на резонансну частоту слід проводити варіацією реактивних параметрів первинного контура.

Отже, індуктивний зв'язок обмотки первинного контура забезпечує збудження в обмотці вторинного контура е.р.с. Її величина визначається не тільки індуктивним зв'язком з первинним контуром, але і енергією, що вилучається з навколишнього простору.

Знімання енергії, що генерується, здійснюється за допомогою третього резонансного L_3C_3 – контура. Конструктивно він ідентичний первинному задаючому контуру. Але його параметри повинні, в першу чергу, забезпечувати знімання не більше ніж $\sim 1\%$ енергії, що генерується у вторинному контурі.

Обмотки первинного – L_1 та третього – L_3 контурів відносно обмотки – L_2 вторинного генеруючого контура розташовуються симетрично на краях останньої.

Знімання електричної енергії за допомогою третього контура реалізує її подачу в навантаження і частково на вхід первинного контура.

Подача частини сигналу, що генерується, назад на вхід первинної обмотки трансформатора Тесли (позитивний зворотний зв'язок) повинна забезпечувати його роботу при відключеному джерелі живлення. Останній в цьому випадку необхідний тільки для запуску в роботу.

Взагалі кажучи, як показує аналіз сучасної інформації, питання знімання сигналу, що генерується, з вторинної обмотки вимагає окремого опрацювання у кожному окремому випадку з тим, щоб не порушити вимоги, сформульовані Н. Тесла.

Зокрема, знімання сигналу, що генерується у вторинній обмотці можна здійснити або безпосередньо з ємності C_2 (рис. 16а), або з додаткового резистора, що включений послідовно з нею (рис. 16б).

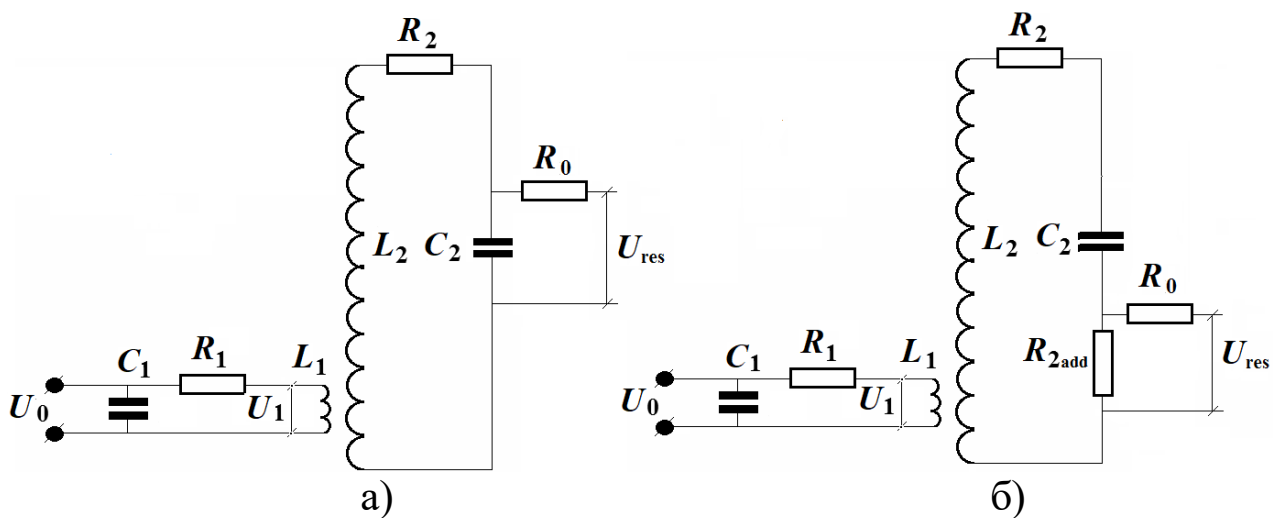


Рис. 16. Можливі принципові схеми знімання сигналу, що генерується у вторинній обмотці трансформатора Тесли,

U_{res} – вихідна напруга джерела,

R_0 – резистор, що забезпечує необхідний рівень сигналу, що знімається,

R_{2add} – додатковий резистор вторинного контура

Призначення резистора – R_0 полягає в забезпеченні рівня знімання енергії, що не перевищує, згідно рекомендації Н. Тесла $\sim 1\%$

енергії у вторинному контурі. Очевидно, що для схеми на рис. 16а повинне виконуватися: $R_0 \gg \frac{1}{(\omega_2 \cdot C_2)}$ або $R_0 \approx \frac{100,0}{(\omega_2 \cdot C_2)}$. Для схеми на рис. 16б необхідно, щоб $R_0 \gg R_{2add}$ або $R_0 \approx 100,0 \cdot R_{2add}$.

Розрахункові показники.

Перш, ніж перейти до конкретних розрахунків, нагадаємо всі додаткові вимоги, сформульовані самим Н. Тесла і його послідовниками.

1. Довжина дроту обмотки соленоїда вторинного контура – ζ_2 , повинна вибиратися такою, яка дорівнює чверті довжини хвилі – λ_2 , відповідній його резонансній частоті. Тобто, $\zeta = 0,25 \cdot \lambda_2 = \frac{0,25 \cdot c}{f_2}$,

де $c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}}$ – швидкість світла у вакуумі, μ_0, ϵ_0 – магнітна і діелектрична сталі, відповідно. Або, у зв'язку з параметрами вторинного контура, можна записати, що $\zeta_2 = \frac{1}{8\pi} \sqrt{\frac{L_2 \cdot C_2}{\mu_0 \cdot \epsilon_0}}$.

Примітка. Якщо товщина дроту соленоїда вторинної обмотки – d_2 та його діаметр дорівнює – D_2 , то висота обмотки соленоїда – l_2 і довжина дроту його обмотки – ζ_2 визначатимуться співвідношеннями: $l_2 = n_2 \cdot d_2$ та $\zeta_2 = \pi \cdot D_2 \cdot n_2$, n_2 – число витків обмотки соленоїда вторинного контура. Зв'язок між висотою обмотки і довжиною дроту запишеться у вигляді: $l_2 = \zeta_2 \cdot \frac{1}{\pi} \cdot \frac{d_2}{D_2}$.

2. Величина добротності вторинного контура – повинна бути максимальною, $Q_2 = \frac{\omega_2 L_2}{R_2} \rightarrow Q_{2max}$, де $\omega_2 = 2\pi \cdot f_2$, R_2 – активний опір вторинного контура. Якщо активний опір вторинного контура дорівнює опорі обмотки соленоїда, то $R_2 = \frac{1}{\gamma_2} \cdot \frac{\zeta_2}{S_2}$, γ_2 та S_2 – пито-

ма електропровідність і площа поперечного перетину дроту, по якому протікає індукований струм. З урахуванням скін-ефекту

$$S_2 = \frac{\pi}{4} \cdot \Delta \cdot (d_2 - \Delta), \quad \Delta = \sqrt{\frac{2}{\omega_2 \cdot \mu_0 \cdot \gamma_2}}.$$

3. Величина енергії, що подається у вторинний контур, так само, як і її величина, «що знімається в навантаження», повинна бути набагато менше енергії, що генерується вторинним контуром (на думку Н. Тесли $\leq 1\%$). Як представляється з апріорних фізичних міркувань, виконання цих вимог забезпечує стійкість роботи всієї схеми в цілому. Йдеться про дієвість генерувального вторинного контура незалежно від процесів в зв'язаних первинному і третьому резонансних контурах (фіксація резонансної робочої частоти).
4. Ємність вторинного контура повинна бути набагато менше ємності первинного контура, тобто, $\frac{C_2}{C_1} \ll 1$. В цьому випадку, як стверджують автори пропозиції, має місце додаткове підживлення первинного контура енергією навколишнього простору.

Підкреслимо, що всі подальші розрахунки проведені в ракурсі вище сформульованих вимог.

Первинний контур (збудження джерела електричної енергії).

Початкові дані.

- Робоча (резонансна) частота: $f_1 = 300$ кГц.
- Діаметр каркаса для обмотки соленоїда: $D_1 = 0,125$ м.
- Діаметр дроту обмотки: $d_2 = 0,01$ м.
- Питома електропровідність (мідь): $\gamma_2 = 5,58 \cdot 10^7$ 1/Ом·м.
- Число витків: $n_1 = 6$.
- Період повторення прямокутних імпульсів струму на вході і їх амплітуда: $T = \frac{1}{f_1} \approx 3,3$ мкс та $J_m = 17,5$ мА.
- Додатковий активний опір: $R_{add} = 1$ Ом.

Обчислення:

- індуктивність соленоїда: $L_1 \approx \pi \mu_0 n_1 \frac{1}{d_1} \cdot \left(\frac{D_1}{2} \right)^2 = 9,253$ мкГн;
- величина ємності: $C_1 = 30417,7$ пФ;
- відносний декремент згасання: $\delta_1 = 0,03$;
- величина скін-шару: $\Delta = 0,000093$ м;
- величина активного опору обмотки плюс додаткового резистора: $R_1 = 1,01$ Ом;

- добротність: $Q_1 = 17,27$;
- хвильовий опір: $Z_1 = \sqrt{\frac{L_1}{C_1}} = 17,44 \text{ Ом}$;
- напруга і струм в обмотці соленоїда: $U_{1\max} = 1,0 \text{ В}$;
 $J_{1\max} \approx U_{1\max} \cdot \omega_1 \cdot C_1 = 0,56 \text{ А}$;
- Потужність сигналу в контурі: $P_{1\max} \approx U_{1\max} \cdot J_{1\max} = 0,56 \text{ Вт}$.

Вторинний контур (генерація електричної енергії).

Початкові дані.

- Робоча (резонансна) частота: $f_2 = 300 \text{ кГц}$.
- Діаметр каркаса для обмотки соленоїда: $D_2 = 0,075 \text{ м}$.
- Діаметр дроту обмотки: $d_2 = 0,00075 \text{ м}$.
- Питома електропровідність (мідь): $\gamma_2 = 5,58 \cdot 10^7 \text{ 1/Ом}\cdot\text{м}$.

Обчислення:

- довжина дроту обмотки, $\zeta_2 = 249,886 \text{ м}$;
- число витків: $n_2 \approx 1061$;
- коефіцієнт трансформації за індуктивним зв'язком: $k_1 = 14$;
- довжина соленоїда: $l_2 \approx 0,8 \text{ м}$;
- індуктивність соленоїда: $L_2 \approx \pi \mu_0 n_2 \cdot \frac{1}{d_2} \cdot \left(\frac{D_2}{2}\right)^2 = 7850,4 \text{ мкГн}$;
- величина скін-шару: $\Delta = 0,000093 \text{ м}$;
- величина активного опору: $R_2 = 18,06 \text{ Ом}$;
- величина фіксованої ємності, що обчислена за індуктивністю та прийнятою робочою частотою: $C_2 = 35,85 \text{ пФ}$;
- добротність: $Q_2 = 819,338$;
- хвильовий опір: $Z_2 = \sqrt{\frac{L_2}{C_2}} = 14797,7 \text{ Ом}$;
- напруга і струм в обмотці соленоїда:
 $U_{2\max} \approx k_1 \cdot Q_2 \cdot U_{1\max} = 11456 \text{ В}$; $J_{2\max} \approx U_{2\max} \cdot \omega_2 \cdot C_2 = 0,56 \text{ А}$;
- Потужність сигналу в контурі: $P_{1\max} \approx U_{1\max} \cdot J_{1\max} = 8 \text{ 866 Вт}$.

Оцінимо виконання вимог до рівня показників первинного і вторинного контурів: відношення добротностей – $\frac{Q_2}{Q_1} \approx 47 \gg 1$ і

відношення енергетичних параметрів – $\frac{P_{2\max}}{P_{1\max}} \approx 15832 \gg 1$.

Резюме: вибрані і розраховані параметри первинного і вторинного контурів задовольняють умовам ефективної дієвості трансформатора Тесли.

Третій резонансний контур (знімання електричної енергії, що генерується).

Вихідні дані.

- Резонансна частота: $f_1 = 300$ кГц.
- Діаметр каркаса для обмотки соленоїда: $D_1 = 0,125$ м.
- Діаметр дроту обмотки: $d_2 = 0,01$ м.
- Питома електропровідність (мідь): $\gamma_2 = 5,58 \cdot 10^7$ 1/Ом·м.
- Число витків: $n_1 = 6$.

Обчислення:

- індуктивність соленоїда: $L_3 \approx \pi \mu_0 n_1 \frac{1}{d_1} \cdot \left(\frac{D_1}{2}\right)^2 = 9,253$ мкГн;
- величина ємності: $C_1 = 30417,7$ пФ;
- величина скін-шару: $\Delta = 0,000093$ м;
- величина активного опору обмотки і додаткового резистора (ідентично первинному контуру): $R_1 = 1,01$ Ом;
- напруга, трансформована в обмотку третього контура і обчислена в допущенні про рівномірний розподіл потенціалу уздовж обмотки вторинного контура: $U_{20} \approx U_2 \cdot \frac{0,06}{0,8} \approx 859$ В;
- коефіцієнт трансформації за індуктивним зв'язком: $k_3 = \frac{1}{k_1} = \frac{1}{14}$;
- напруга, що збуджується в обмотці соленоїда третього контура за рахунок індуктивного зв'язку: $U_{3\max} = k_3 \cdot U_{20} = 61,36$ В,
 $\left(\frac{U_{3\max}}{U_{2\max}} \approx 0,0053 \ll 1 \right)$;

- додатковий резистор для зниження рівня потужності, що знімається – $R_{add} \approx 1,5$ Ом, тоді сумарний активний опір – $R_3 = 1,51$;
- добротність – $Q_3 = \left(\frac{\omega_3 \cdot L_3}{R_3} \right) = 11,55$;
- напруга на виході обмотки: $U_3 \approx 354,37$ В (підкреслимо, що дане збільшення напруги обумовлено не індуктивним зв'язком, а вилученням енергії з навколишнього простору в резонансі, коли $\frac{1}{\omega_1 \cdot C_1} = \omega_1 \cdot L_1 \approx 17,44$ Ом);
- хвильовий опір: $Z_1 = \sqrt{\frac{L_1}{C_1}} = 17,44$ Ом;
- $J_{3\max} \approx U_{3\max} \cdot \omega_3 \cdot C_3 = 20,32$ А;
- Потужність сигналу в контурі: $P_{3\max} \approx U_{3\max} \cdot J_{3\max} = 7200$ Вт.

Як показують апріорні фізичні міркування, для знімання сигналу з третього контура, з амплітудою, що не порушуючої дієвість всього джерела в цілому, необхідно включити додаткові струмообмежуючі опори, які повинні знизити інтегральний рівень потужності, що знімається, до ~ 72 Вт ($R_{01,2}$, див. рис. 15).

Якщо опір ємності контура складає $\sim 17,44$ Ом, величину першого додаткового резистора можна вибрати – $R_{01} \approx 1744$ Ом. Величина другого струмообмежуючого резистора в ланцюзі зворотного зв'язку повинна забезпечувати струм, необхідний для запуску первинного задаючого контура (не менше $\sim 17,5$ мА).

Зрештою, величини, струмообмежуючих резисторів на виході запропонованої схеми, що забезпечують ефективну дієвість джерела енергії, повинні підбиратися експериментально.

Закінчуючи, вкажемо орієнтовні величини струмообмежуючих резисторів при зніманні потужності способами на рис. 16.

Вихід безпосередньо з ємності вторинного контура – $R_0 \gg X_c = \frac{1}{\omega_2 \cdot C_2}$, $R_0 \approx 1744$ Ом (рис. 16а).

Вихід з додаткового резистора, включеного послідовно в ланцюг ємності і не впливаючого на процеси, що протікають – $R_{2add} \ll R_2 \approx 18,06$; $R_{2add} \approx 0,18$ Ом.

В цій схемі знімання сигналу величина додаткового резистора з міркувань мінімального впливу на дієвість вторинного контура повинна складати $\sim R_0 \gg R_{2add}$, $R_0 \approx 18 \div 20 \text{ Ом}$.

Висновки

1. Узагальнені і зведені воєдино результати проведених досліджень.

2. Запропонована схема практичного виконання модельного варіанту джерела електричної енергії на базі трансформатора Тесли.

2. Сформульовані основні положення для проектування реальної конструкції моделі джерела електричної енергії з навколишнього простору.

3. Отримані конкретні чисельні оцінки вхідних і вихідних параметрів запропонованої схеми модельного варіанту джерела електричної енергії, так при вихідній потужності первинного задаючого контура $\sim 0,56 \text{ Вт}$ потужність сигналу на виході джерела повинна складати $\sim 72 \text{ Вт}$.

2.6 Можливі принципові схеми джерел енергії з трансформатором Тесли

В даному розділі описані різні схемні рішення і відповідні чисельні оцінки характеристик джерел електричної енергії, базовим елементом яких є трансформатор Тесли.

Підкреслимо, що представлений матеріал не слід розглядати як конкретні вказівки до практичного виконання технічних пристроїв відповідного призначення. Представлені схеми пропонують лише можливі варіанти для роздумів про вибір тієї або іншої, але вже конкретної, конструкції джерела резонансної енергії з трансформатором Тесли.

Вхідна напруга – гармонічний сигнал:

$$U_1(t) = U_{1m} \cdot \sin(\omega_0 \cdot t), \omega_0 = 1 / \sqrt{L_1 \cdot C_1}.$$

Вторинна обмотка «не замкнена».
Первинний і вторинний контури в режимі «резонансу струмів».

Принципові оцінки.

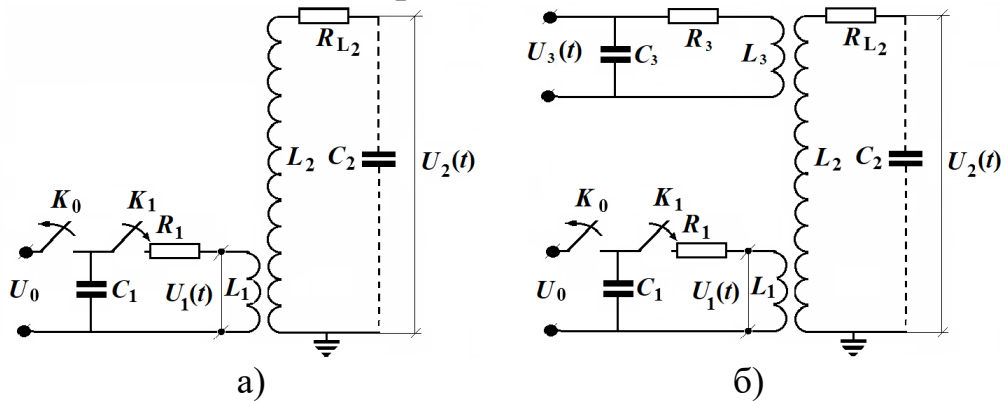


Рис. 17. Трансформатор Тесли:

а) вихідний варіант; б) з індуктивним зніманням енергії, що генерується

Вихідні напруги (відповідно схемам):

$$U_2(t) \approx U_{2m} \cdot \cos(\omega_0 \cdot t); \quad U_3(t) \approx U_{3m} \cdot \sin(\omega_0 \cdot t);$$

$$U_{2m} \approx U_{1m} \cdot K_{1-2}; \quad U_{3m} \approx U_{1m} \cdot K_{2-3}.$$

Коефіцієнти посилення (перетворення):

$$K_{1-2} \approx (k_{1-2} \cdot Q_2); \quad K_{2-3} \approx K_{1-2} \cdot \left(\frac{k_{2-3} \cdot Q_3}{2} \right).$$

Коефіцієнти трансформації (за рахунок індуктивного зв'язку):

$$k_{1-2} - \text{зв'язок} - L_{1-2}, \quad k_{2-3} - \text{зв'язок} - L_{2-3}.$$

Добротності та хвильові опори контурів:

$$Q_2 = \left(\frac{\omega_0 \cdot L_2}{R_2} \right) = \frac{Z_2}{R_2}, \quad Z_2 = \sqrt{\frac{L_2}{C_2}}; \quad Q_3 = \left(\frac{\omega_0 \cdot L_3}{R_3} \right) = \frac{Z_3}{R_3}, \quad Z_3 = \sqrt{\frac{L_3}{C_3}}.$$

Чисельні оцінки:

Параметри «RLC» контурів (згідно рекомендаціям Н. Тесла):

$$1. w_1 = 6. \quad 2. w_2 \approx 1061. \quad 3. w_3 = 6.$$

Резонансна робоча частота – $f_1 = 300$ кГц.

$$K_{1-2} \approx 11476 \quad (k_{1-2} \approx 14) \quad K_{2-3} \approx 13173 \quad (k_{2-3} \approx 1/14)$$

Амплітуда вхідної напруги: $U_{1m} = 1,0$ В.

Амплітуди вихідної напруги:

$$U_{2m} \approx 11476 \text{ В.} \quad U_{3m} \approx 13173 \text{ В.}$$

Вторинна обмотка «замкнена».

Первинний і вторинний контури в режимі «резонансу струмів».

Основні співвідношення.

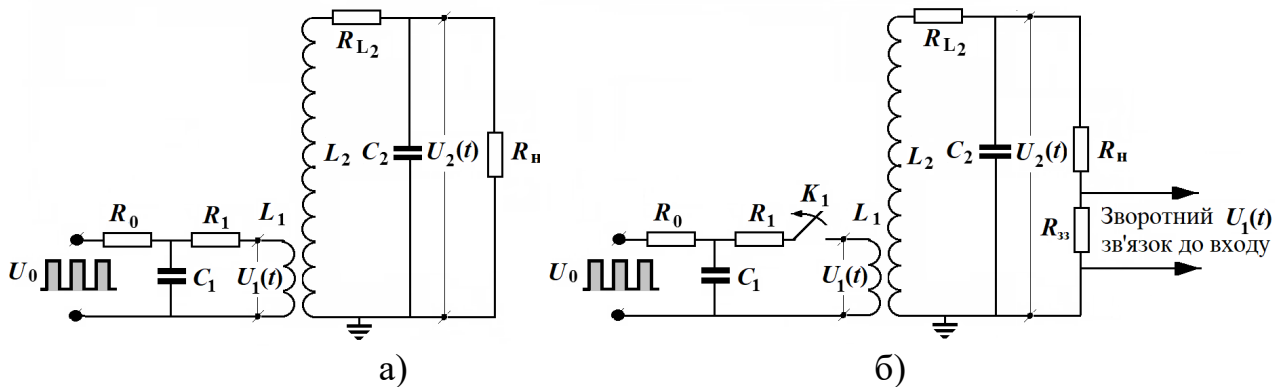


Рис. 18. Трансформатор Тесли:

- а) з безпосереднім зніманням енергії, що генерується;
- б) зі зворотним зв'язком для роботи в автономному режимі.

ЗАГАЛЬНЕ в представлених схемах:

- вхідна напруга – U_0 – послідовність імпульсів з частотою проходження, яка дорівнює резонансній частоті контура « $R_1L_1C_1$ », генерує гармонічний сигнал:

$$U_1(t) = U_{1m} \cdot \sin(\omega_0 \cdot t), \quad \omega_0 = 1 / \sqrt{L_1 \cdot C_1};$$

- резонанс струмів в контурі « $R_2L_2C_2$ » призводить до протікання струму – $J_2(t)$ в активному опорі навантаження – R_n під дією напруги, що генерується – $U_2(t)$, амплітуда струму в навантаженні – $J_{2m} = \frac{U_{2m}}{R_n}$;

$$U_{2m} \approx U_{1m} \cdot K_{1-2};$$

$$K_{1-2} \approx (k_{1-2} \cdot Q_2) - \text{коефіцієнт посилення,}$$

$$k_{1-2} - \text{коефіцієнт трансформації: } L_{1-2},$$

$$Q_2 = \left(\frac{\omega_0 \cdot L_2}{R_2} \right) = \frac{Z_2}{R_2} - \text{добротність,}$$

$$Z_2 = \sqrt{\frac{L_2}{C_2}} - \text{хвильовий опір.}$$

ВІДМІННОСТІ схеми зі зворотним зв'язком:

- наявність зворотного зв'язку в схемі джерела енергії означає подачу частини гармонічного сигналу, що генерується, на вхід первинної обмотки – $U_1(t)$;
- включення зворотного зв'язку повинне дозволити роботу генератора електричної енергії в автономному режимі при відключеному зовнішньому джерелі потужності;
- джерело потужності за наявності зворотного зв'язку необхідно виключно для запуску схеми, після чого генератор повинен працювати на енергії із зовнішнього простору.

РОЗДІЛ 3

ЗБУДЖЕННЯ КОНТУРІВ

З РЕАКТИВНИМИ ЕЛЕМЕНТАМИ

ІМПУЛЬСАМИ НАПРУГИ

Задача збудження гармонічних сигналів може розв'язуватися за допомогою резонансних контурів з реактивними елементами [12].

Перший варіант – це контур з паралельних індуктивності і ємності, на вхід якого подається періодична послідовність прямокутних струмових імпульсів. При рівності частоти їх проходження власній частоті контура має місце відомий резонанс струмів. В іншому випадку слід врахувати, що амплітудно-часові характеристики струму в схемі залежать від її параметрів. І в зв'язку з цим, як впливає з апріорних фізичних міркувань, вплив цих параметрів на форму струму повинен бути нехтовно малим, і на виході джерела повинен бути сигнал, не спотворюваний при підключенні навантаження.

Безпосереднє паралельне підключення напруги до такого контура не призводить до резонансного збудження останнього незалежно від часової форми сигналу, що підключається. Даний факт пояснюється тим, що зовнішня вимушена дія, на кожний з паралельних реактивних елементів просто не дозволяє створити умови для коливального процесу.

Проте, як впливає з апріорних фізичних міркувань, збудження імпульсами напруги з частотою проходження, рівній власній частоті LC – контура, можна перетворити в збудження струмом, якщо ввести додатковий послідовно включений активний опір. Його вибір повинен забезпечити генерацію гармонічного сигналу і реалізацію, відповідно, режиму резонансу струмів.

Другий варіант полягає у використанні контура з послідовно з'єднаними індуктивністю і ємністю. Тут слід обов'язково враховувати наявність і роль активного опору, який визначається або власним опором струмопроводів, або додатковим резистором, що включається послідовно в ланцюг з реактивними елементами контура.

Даний контур підключається до джерела потужності, що генерує періодичну послідовність прямокутних імпульсів напруги, що слідує з частотою, яка забезпечує резонансний режим. В цьому випадку, якщо звернутися до ідеалізації гармонічним процесом, на-

пруга на індуктивності буде пропорційна напрузі джерела з коефіцієнтом пропорційності, який дорівнює добротності контура – $Q_1 \approx \left(\frac{\omega \cdot L_1}{R_1} \right)$, де ω – резонансна частота, L_1 – індуктивність, R_1 – активний опір.

Дослідження різних резонансних схем (паралельні або послідовні реактивності), при збудженні періодичними послідовностями імпульсів напруги з урахуванням перехідних процесів, припускають оцінки ефективності цих схем, як генераторів гармонічних сигналів. Підкреслимо, що врахування перехідних процесів означає врахування процесів комутації при «відключенні-підключенні» зовнішнього джерела потужності, що забезпечують подачу на вхід контура періодичної послідовності прямокутних імпульсів напруги.

Слід зазначити, що такі джерела гармонічних сигналів можуть використовуватися не тільки як задаючі генератори в схемах трансформаторів Тесли, але і як базові елементи в інших типах пристроїв отримання енергії з навколишнього простору в наслідок явища резонансу.

Почнемо розгляд в наступному підрозділі зі схеми, де повинен реалізуватися режим резонансу струмів.

3.1 Резонансний контур с паралельними індуктивністю та ємністю

Мета даного розгляду – аналіз процесів в контурі з паралельних індуктивності і ємності в режимі резонансу струмів при його збудженні періодичною послідовністю прямокутних імпульсів напруги, коли контур підключається до зовнішнього джерела потужності через додатковий активний опір.

Постановка задачі.

- Електрична схема заміщення L_1C_1 – контура з урахуванням власного активного опору, що завжди має місце – R_1 , підключеного до джерела напруги через додатковий активний опір – R представлена на рис. 18.

Примітка. Схема і елементи контура відповідають первинному контуру в джерелі електричної енергії з трансформатором Тесли.

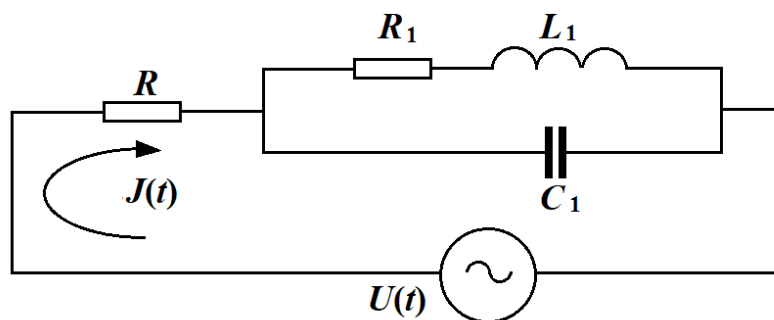


Рис. 18. Електрична схема заміщення резонансного збудження L_1C_1 – контура при паралельному підключенні генератора напруги через додатковий активний опір – R

- Зовнішнє джерело потужності генерує періодичну послідовність прямокутних імпульсів напруги з амплітудою U_m , тривалістю – t_i та періодом проходження – T : $U(t) = U_m \cdot f(t)$, де $f(t)$ – часова залежність, $f(t) = \sum_{n=0}^{\infty} [\eta(t - n \cdot T) - \eta(t - (n \cdot T + t_i))]$, n – номер імпульса в послідовності.
- Власна частота контура – « L_1C_1 » що дорівнює частоті проходження імпульсів напруги, тобто, $\omega_1 = \frac{1}{\sqrt{L_1C_1}} = \frac{2\pi}{T}$
- Розкладання функції $f(t)$, що задовольняє умовам теореми Діріхле, в ряд Фур'є має вигляд [13]:

$$f(t) = \frac{t_i}{T} \left[1 + 2 \cdot \sum_{k=1}^{\infty} S_k \left(\omega_k \frac{t_i}{2} \right) \cdot \cos \left(\omega_k \cdot \left(\frac{t_i}{2} - t \right) \right) \right] \cdot \eta(t), \quad (43)$$

$$\text{де } S_k \left(\omega_k \frac{t_i}{2} \right) = \frac{\sin \left(\omega_k \frac{t_i}{2} \right)}{\left(\omega_k \frac{t_i}{2} \right)};$$

$\omega_k = \frac{2\pi k}{T}$ – частоти розкладання, причому перша частота при $k = 1$ дорівнює власній частоті контура – « L_1C_1 »;

$$\eta(t) - \text{ступінчаста функція Хевісайда, } \eta(t) = \begin{cases} 1, & t > 0; \\ 0, & t \leq 0. \end{cases}$$

Розрахункові співвідношення.

Струм в схемі на рис. 18 в просторі зображень за Лапласом за нульових початкових умов можна представити наступною залежністю [13]:

$$J(p) = \frac{U(p)}{R + \left(\frac{pL_1}{1 + p^2 \cdot L_1 C_1} \right)}, \quad (44)$$

де p – параметр перетворення,

$$U(p) = L\{U(t)\}, J(p) = L\{J(t)\},$$

$L\{ \}$ – оператор інтегрального перетворення Лапласа.

Вираз (44) перетворимо до вигляду, зручного для переходу в простір оригіналів.

Після тотожних перетворень отримаємо, що

$$J(p) = \frac{1}{R} \left[U(p) - 2\delta \cdot U(p) \cdot \left(\frac{(p+\delta)}{(p+\delta)^2 + \omega^2} - \left(\frac{\delta}{\omega} \right) \cdot \frac{\omega}{(p+\delta)^2 + \omega^2} \right) \right], \quad (45)$$

де $\omega = \sqrt{\omega_{01}^2 - \delta^2}$ – частота коливань струму в ланцюзі « $R - L_1 C_1$ »,

$$\omega_{01} = \frac{1}{\sqrt{L_1 C_1}} \text{ – власна частота контура – «} L_1 C_1 \text{»,}$$

$$\delta = \frac{1}{2(R \cdot C_1)} \text{ – «умовний» декремент згасання, що визначається}$$

сталюю – $\tau = (R \cdot C_1)$ для гілки « RC_1 ».

Здійснюючи зворотне перетворення Лапласа у виразі (45), отримаємо аналітичну часову залежність для струму, що збуджується в схемі на рис. 18 [13]:

$$J(t) = \frac{U_m}{R} \cdot \left[f(t) - 2\delta \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{\delta}{\omega} \right)^2} \cdot f(t) * \left[e^{-\delta \cdot t} \cdot \cos(\omega \cdot t + \varphi_0) \right] \right], \quad (46)$$

де $\varphi_0 = \text{arctg}\left(\frac{\delta}{\omega}\right)$.

Напруга на реактивних елементах схеми буде дорівнювати:

$$\begin{aligned} U_{L,C}(t) &= U_m \cdot f(t) - J(t) \cdot R = \\ &= U_m \cdot 2\delta \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{\delta}{\omega}\right)^2} \cdot f(t) * \left[e^{-\delta \cdot t} \cdot \cos(\omega \cdot t + \varphi_0) \right]. \end{aligned} \quad (47)$$

Отриманий результат перетворемо до вигляду, зручного для обчислень.

Перше. Введемо залежність від відносного часу, вираженого в термінах періоду повторення прямокутних імпульсів напруги, розкриємо вираз для згортки функцій і результат запишемо з нормуванням на максимум напруги джерела.

$$\begin{aligned} U_0(t_0) &= \frac{U_{L,C}(t_0)}{U_m} = 2\delta_0 \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{\delta_0}{\omega \cdot T}\right)^2} \times \\ &\times \int_0^{t_0} f(x) \cdot \left[e^{-\delta_0 \cdot (t_0 - x)} \cos((\omega \cdot T) \cdot (t_0 - x) + \varphi_0) \right] dx, \end{aligned} \quad (48)$$

де $t_0 = \frac{t}{T}$ – відносний час,

$\delta_0 = (\delta \cdot T)$ – «умовний» відносний декремент згасання сигналу,

$$f(t_0) = t_{i0} \left[1 + 2 \cdot \sum_{k=1}^{\infty} S_k(\pi k \cdot t_{i0}) \cdot \cos(\pi k \cdot (t_{i0} - 2t_0)) \right] \cdot \eta(t_0),$$

$t_{i0} = \frac{t_i}{T}$ – відносна тривалість одиничного струмового імпульсу,

$$S_k(\pi k \cdot t_{i0}) = \frac{\sin(\pi k \cdot t_{i0})}{(\pi k \cdot t_{i0})}.$$

Друге. З очевидних фізичних міркувань виходить, що «умовний» відносний декремент згасання повинен бути достатньо малим (забезпечується вибором додаткового активного опору), тобто,

$\delta_0 = (\delta \cdot T) \ll 1$. Так, що величинами порядку малості $\sim \delta_0$ та вище можна знехтувати.

Третє. Згортку функцій у виразі (48) обчислимо для усталеного стану даної схеми, тобто, для $(\delta_0 \cdot t_0) \gg 1$.

Четверте. Частота проходження збуджуючих імпульсів напруги яка дорівнює власній частоті контура.

Після необхідних тотожних перетворень з виразу (40) отримаємо, що

$$U_0(t_0) = \frac{U_{L,C}(t_0)}{U_m} \approx \frac{2}{\pi} \cdot \sin\left(\omega \cdot \frac{t_i}{2}\right) \cdot \cos\left(\omega \cdot \left(\frac{t_i}{2} - t\right)\right), \quad (49)$$

де $\omega \approx \frac{1}{\sqrt{L_1 C_1}}$ – власна частота контура,

t_i – тривалість імпульсу напруги,

t – час.

З результату (49) слідує, що

- амплітуда напруги на індуктивності резонансного контура з паралельних індуктивності і ємності, що збуджується через додатковий активний опір, в істотній мірі залежить від тривалості імпульсів напруги джерела потужності;
- максимум сигналу на індуктивності досягається при тривалості імпульсу напруги джерела, що дорівнює половині періоду їх повторення в послідовності, коли $t_i = \frac{1}{2} \cdot T$;
- щодо амплітуди збуджуючого сигналу величина максимуму складає $\sim \frac{2}{\pi}$.

І остання оцінка. Йдеться про вибір додаткового активного опору – R , що забезпечує достатню малість відносного «умовного» де-

кремента – $\delta_0 = \frac{1}{RC_1} \cdot T$.

Як приклад візьмемо резонансну частоту – $f = 300$ кГц ($\omega = 2\pi f$), період – $T = \frac{1}{3} \cdot 10^{-5}$ с та відповідну ємність $C_1 = 30417$ пФ.

Очевидно, что для задоволення нерівності $\delta_0 \ll 1$ у першому наближенні достатньо взяти $R \approx 1000$ Ом.

3.2 Резонансний контур з послідовно включеними резистором, індуктивністю і ємністю

Мета даного розгляду – аналіз процесів в контурі з послідовно включених активного опору, індуктивності і ємності в режимі резонансу напруг, збуджуваного періодичною послідовністю прямокутних імпульсів напруги.

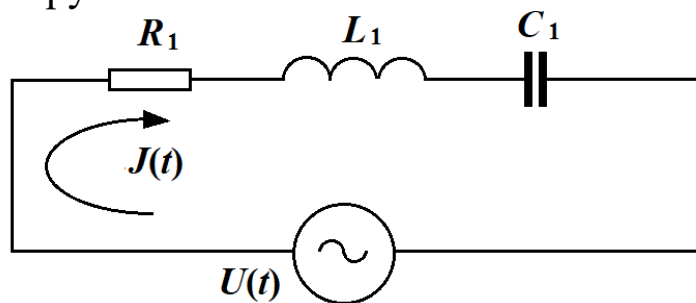


Рис. 19. Електрична схема заміщення резонансного збудження контура з послідовними « L_1C_1 »

Постановка задачі.

- Електрична схема заміщення L_1C_1 – контура з активним опором – R_1 при підключенні до джерела напруги представлена на рис. 19.

Примітки. Схема і її елементи можуть виконувати роль

- первинного контура, де індуктивність забезпечує зв'язок з вторинним контуром в джерелі електричної енергії на базі трансформатора Тесли;
- базової складової в джерелі електричної енергії, заснованої на явищі резонансу напруг в ланцюзі з послідовними активно-реактивними елементами.
- Зовнішнє джерело потужності генерує періодичну послідовність прямокутних імпульсів напруги з амплітудою U_m , тривалістю – t_i і періодом проходження – T : $U(t) = U_m \cdot f(t)$, де $f(t)$ – часова залежність, $f(t) = \sum_{n=0}^{\infty} [\eta(t - n \cdot T) - \eta(t - (n \cdot T + t_i))]$, n – номер імпульса в послідовності.

- Власна частота контура – « L_1C_1 » дорівнює частоті проходження імпульсів напруги, тобто, $\omega_1 = \frac{1}{\sqrt{L_1C_1}} = \frac{2\pi}{T}$.
- Розкладання функції $f(t)$, що задовольняє умовам теореми Діріхле, в ряд Фур'є має вигляд [13]:

$$f(t) = \frac{t_i}{T} \left[1 + 2 \cdot \sum_{k=1}^{\infty} S_k \left(\omega_k \frac{t_i}{2} \right) \cdot \cos \left(\omega_k \cdot \left(\frac{t_i}{2} - t \right) \right) \right] \cdot \eta(t), \quad (50)$$

$$\text{де } S_k \left(\omega_k \frac{t_i}{2} \right) = \frac{\sin \left(\omega_k \frac{t_i}{2} \right)}{\left(\omega_k \frac{t_i}{2} \right)};$$

$\omega_k = \frac{2\pi k}{T}$ – частоти розкладання, причому перша частота при $k = 1$ дорівнює власній частоті контура – « L_1C_1 »;

$$\eta(t) \text{ – ступінчаста функція Хевісайда, } \eta(t) = \begin{cases} 1, & t > 0; \\ 0, & t \leq 0. \end{cases}$$

Розрахункові співвідношення.

L – зображення струму в схемі на рис. 19 за нульових початкових умов можна представити наступною залежністю [13]:

$$J(p) = \frac{U(p)}{R_1 + pL_1 + \frac{1}{pC_1}}, \quad (51)$$

де p – параметр перетворення, $U(p) = L\{U(t)\}$, $J(p) = L\{J(t)\}$,
 L – оператор інтегрального перетворення Лапласа.

Вираз (51) перетворимо до вигляду, зручного для переходу в простір оригіналів.

Після тотожних перетворень отримаємо, що

$$J(p) = \frac{U(p)}{L_1} \cdot \left(\frac{(p + \delta)}{(p + \delta)^2 + \omega^2} - \left(\frac{\delta}{\omega} \right) \cdot \frac{\omega}{(p + \delta)^2 + \omega^2} \right), \quad (52)$$

де $\omega = \sqrt{\omega_{01}^2 - \delta^2}$ – частота коливань струму в ланцюзі послідовних « $R_1L_1C_1$ »,

$$\omega_{01} = \frac{1}{\sqrt{L_1C_1}} \text{ – власна частота контура – «}L_1C_1\text{»,}$$

$$\delta = \frac{R_1}{2L_1} \text{ – декремент згасання.}$$

L – образ напруги на індуктивності буде дорівнювати:

$$U_{L_1}(p) = U(p) \cdot \left[1 - \omega \left[2 \left(\frac{\delta}{\omega} \right) \frac{(p + \delta)}{(p + \delta)^2 + \omega^2} + \left(1 - \left(\frac{\delta}{\omega} \right)^2 \right) \frac{\omega}{(p + \delta)^2 + \omega^2} \right] \right]. \quad (53)$$

Вираз (53) можна істотно спростити, якщо врахувати вимогу малості активного опору – R_1 , що забезпечує ефективність даного генератора гармонічних сигналів. Дана вимога означає, що

$$\omega = \omega_{01} \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{\delta}{\omega_{01}} \right)^2} \Bigg|_{\left(\frac{\delta}{\omega_{01}} \right) \ll 1} \approx \omega_{01}.$$

Нехтуючи величинами порядку $\left(\frac{\delta}{\omega_{01}} \right) \ll 1$ з формули (53), одержуємо, що

$$U_{L_1}(p) \approx U(p) \cdot \left(1 - \omega \cdot \frac{\omega}{(p + \delta)^2 + \omega^2} \right). \quad (54)$$

Переходячи в простір оригіналів, з виразу (54) знаходимо амплітудно-часову залежність для напруги, збуджуваної на індуктивності.

$$U_{L_1}(t) \approx U_m \cdot \left[f(t) - \omega_{01} \cdot f(t) * \left(e^{-\delta_0 \cdot (\omega_{01}t)} \cdot \sin(\omega_{01}t) \right) \right]. \quad (55)$$

Отриманий результат перетворимо до вигляду, зручного для подальшого аналізу. Введемо залежність від відносного часу, вираженого в термінах періоду повторення прямокутних імпульсів напру-

ги, розкриємо вираз для згортки функцій і результат запишемо з нормуванням на максимум напруги джерела.

$$U_{L_1 0}(t_0) = \frac{U_{L_1}(t_0)}{U_m} \approx \left[f(t_0) - 2\pi \cdot f(t_0) * \left(e^{-\delta_0 \cdot t_0} \cdot \sin(2\pi \cdot t_0) \right) \right], \quad (56)$$

де $t_0 = \frac{t}{T}$ – відносний час, T – період проходження імпульсів збуджуючої напруги;

$\delta_0 = (\delta \cdot T)$ – відносний декремент згасання.

Виконуючи необхідні тотожні перетворення в (56) і нехтуючи малими величинами порядку $\sim \{\delta_0 \text{ та } \omega_{01}^{-1}\}$, знаходимо амплітудно-часову залежність для напруги на індуктивності при збудженні періодичними імпульсами з частотою проходження, що дорівнює власній резонансній частоті досліджуваного $R_1 L_1 C_1$ – контура.

$$U_{L_1 0}(t) = \frac{U_{L_1}(t)}{U_m} \approx \left(\frac{2}{\pi} \right) \cdot Q \cdot \sin\left(\omega_{01} \cdot \frac{t_{i0}}{2} \right) \cdot \sin\left(\omega_{01} \cdot \left(t - \frac{t_{0i}}{2} \right) \right), \quad (57)$$

де $Q = \left(\frac{\omega_{01} \cdot L_1}{R_1} \right)$ – добротність контура.

Заздалегідь відзначимо, що в прийнятих умовах резонансу

- напруги на реактивних елементах рівні за величиною, $U_{C_1 0}(t) = U_{L_1 0}(t)$, але протилежно напрямлені;
- добротність можна представити у вигляді відношення хвильового опору резонансного контура – $Z_1 = \sqrt{\frac{L_1}{C_1}}$ до опору ре-

зистора, тобто, $Q = \left(\frac{\omega_{01} \cdot L_1}{R_1} \right) = \frac{Z_1}{R_1}$.

Тепер основні висновки, що слідують з (57).

- У резонансному контурі з послідовних резистора, індуктивності і ємності при подачі періодичної послідовності прямокутних імпульсів напруги з частотою проходження, що дорівнює власній частоті контура, збуджуються гармонічні струм і напруга тієї ж частоти.
- Амплітуда напруги на індуктивності істотно залежить від тривалості збуджуючих імпульсів джерела потужності. Максимум сигналу на індуктивності досягається при тривалості імпульсу напруги джерела, що дорівнює половині періоду їх повторення в послідовності, коли $t_i = \frac{1}{2} \cdot T$.
- Амплітуда збуджуючого сигналу пропорційна добротності резонансного контура – $Q = \left(\frac{\omega_{01} \cdot L_1}{R_1} \right)$ або, що є те ж саме, відношенню його хвильового опору до опору резистора, оскільки $Q = \left(\frac{\omega_{01} \cdot L_1}{R_1} \right) = \frac{Z_1}{R_1}$.

На заключення зауваження про перспективність схеми з резонансом напруг.

- Данна схема в резонансному режимі може працювати не тільки як первинний контур трансформатора Тесли, але і як підсилювач або трансформатор напруги з коефіцієнтом посилення або трансформації, пропорційним відношенню хвильового і активного опору схеми, що можна інтерпретувати як аналог відношення числа витків у відомій схемі трансформатора напруги.
- На відміну від перетворювачів, де індуктивний зв'язок між обмотками дозволяє трансформацію напруг або струмів при збереженні передаваної потужності, схема з послідовними активним опором, індуктивністю і ємністю в режимі резонансу дозволяє реалізувати набагато більш ефективну трансформацію не тільки напруги, але і потужності, що в принципі неможливо в системах з індукційними ефектами.
- Фізично, відзначений ефект посилення напруги можна пояснити явищем резонансу, який відкриває доступ до енергії навколишнього простору.

Нарешті, чисельні оцінки. Йдеться про вибір параметрів схеми як первинного контура трансформатора Тесли.

Як приклад візьмемо резонансну частоту – $f = 300$ кГц ($\omega = 2\pi f$), період – $T = \frac{1}{3} \cdot 10^{-5}$ с, ємність – $C_1 = 30417 \cdot 10^{-12}$ Ф, індуктивність – $L_1 = 9,25 \cdot 10^{-6}$ Гн, активний опір – $R_1 \approx 1$ Ом.

Перше. Відносний декремент згасання – $\delta_0 = \frac{R_1}{2L_1} \cdot \frac{1}{\omega} = 0.028 \ll 1$.

Друге. Добротність – $Q_1 = \frac{\omega \cdot L_1}{R_1} = 17,45$.

Третє. Тривалість збуджуючих імпульсів напруги – $t_i = \frac{T}{2} = \frac{1}{6} \cdot 10^{-5}$ с $\approx 1,63$ мкс.

З формули (57) знаходимо амплітуду напруги джерела, необхідну для збудження напруги на індуктивності величиною ~ 1 В: $U_m \approx 0,09$ В.

Узагальнення результатів проведеного аналізу процесів в резонансних контурах з паралельними або послідовними реактивними елементами при їх збудженні періодичними послідовностями імпульсів напруги з резонансною частотою проходження і мінімально можливим рівнем релаксації збуджуваних сигналів приводять до наступних висновків.

1. В елементах резонансних контурів будь-якого вигляду збуджуються гармонічні струм і напруга з частотою власних коливань контурів.

2. Амплітуда резонансної напруги на реактивних елементах контурів будь-якого вигляду в істотній мірі залежить від тривалості імпульсів напруги джерела потужності, так, максимум сигналу досягається при тривалості імпульсу напруги джерела, який дорівнює половині періоду їх повторення в послідовності, коли $t_i = \left(\frac{1}{2} \cdot T \right)$.

3. В режимі резонансу струмів в схемі з паралельними індуктивністю і ємністю величина максимуму напруги індуктивності щодо амплітуди збуджуючого сигналу складає $\sim \frac{2}{\pi}$, тобто, $U_{L \max} = \frac{2}{\pi} \cdot U_m$.

4. В режимі резонансу напруг в схемі з послідовних резистора, індуктивності і ємності амплітуда збуджуваного сигналу пропорційна добротності контура або відношенню хвильового його опору – Z_1

опору резистора – R_1 , тобто, $U_{L\max} = Q \cdot \left(\frac{2}{\pi} \cdot U_m \right) = \frac{Z_1}{R_1} \cdot \left(\frac{2}{\pi} \cdot U_m \right)$.

5. Схема з резонансом напруг може працювати не тільки як первинний контур трансформатора Тесли, але і як підсилювач або трансформатор напруги з коефіцієнтом посилення або трансформації, пропорційним відношенню хвильового і активного опору схеми, що можна інтерпретувати як аналог відношення числа витків у відомій схемі трансформатора напруги.

6. На відміну від перетворювачів, де індуктивний зв'язок між обмотками дозволяє трансформацію напруг або струмів при збереженні передаваної потужності, схема з послідовними активним опором, індуктивністю і ємністю в режимі резонансу дозволяє реалізувати набагато більш ефективну трансформацію не тільки напруги, але і потужності, що у принципі неможливо в системах з індукційними ефектами.

7. Гіпотетично, відзначений ефект посилення сигналу в режимі резонансу напруг можна пояснити явищем резонансу, відкриваючому доступ до енергії навколишнього простору.

3.3 Амплітудно-частотна залежність вихідної напруги в контурі з послідовними активно-реактивними елементами

Базовій ідеї використовувати трансформатор Тесли як джерело електричної енергії з навколишнього простору можна протиставити альтернативну пропозицію по створенню аналогічного пристрою, але заснованого на явищі резонансу напруг в контурі з послідовно з'єднаними RLC – елементами.

Тут так само, як і в базовій ідеї з трансформатором Тесла, електричні напруги на реактивних елементах повинні набагато перевищувати амплітуди збуджуючих сигналів [11,12]. Не зупиняючись на порівнянні всіх можливих переваг та недоліків сформульованих пропозицій, слід підкреслити очевидне: практичне виконання джерела енергії з навколишнього простору на базі контура з резонансом на-

пруг багато простіше і, ймовірно, надійніше і дешевше, ніж використання для цієї ж мети трансформатора Тесли.

Проте, до феноменології за пропозицією з RLC – контуром необхідно прикласти дослідження часових характеристик явища резонансу, яке, на думку великого вченого, є ключем доступу до електричної енергії в навколишньому просторі.

Метою даного розгляду є визначення залежності вихідної напруги в резонансному контурі з послідовно з'єднаними RLC –елементами від робочих частот збуджуючого сигналу.

Розрахункові співвідношення.

Так само, як і для контура з паралельними індуктивністю і ємністю, при проведенні справжніх обчислень використовуються добре апробовані методи теорії електричних ланцюгів без залучення фізичних гіпотез про будову матеріального світу [12].

Для наочності продублюємо електричну схему на рис. 19 та необхідні вихідні умови.

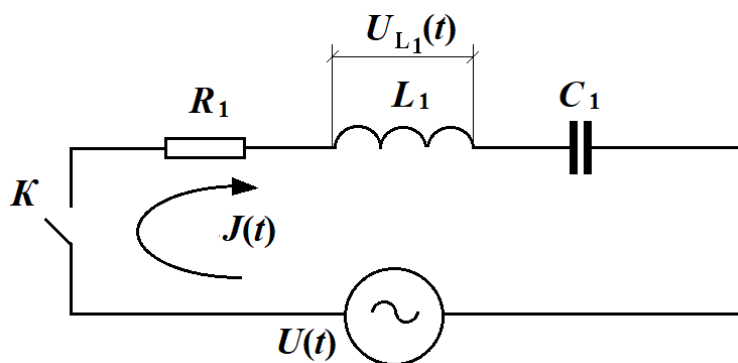


Рис. 20. Схема заміщення контура з послідовними « $R_1L_1C_1$ »,
 $U(t)$ – збуджуюча напруга зовнішнього джерела,
 $U_{L_1}(t)$ – вихідна напруга,
 R_1, L_1, C_1 – активний опір, індуктивність, ємність

Отримання узагальнених результатів згідно поставленої мети, з погляду їх прийнятності незалежно від якої або конкретики в технічному виконанні прийнятої розрахункової моделі, припускає аналіз протікаючих процесів при збудженні контура напругою $U(t) = U_m \cdot f(t)$ з різними часовими функціями – $f(t)$ (U_m – амплітуда, t – час).

1) Збудження напругою з часовою залежністю – $f(t)$:

- а) з урахуванням перехідного процесу при підключенні джерела;
- б) в стаціонарному режимі.

2) Збудження напругою з часовою залежністю – $f(t)$, представленою періодичною послідовністю прямокутних імпульсів тривалістю – t_i з періодом проходження – T .

Розкладання функції $f(t)$, що задовольняє умовам теореми Ді-ріхле, в ряд Фур'є має вигляд [13]:

$$f(t) = \frac{t_i}{T} \left[1 + 2 \cdot \sum_{k=1}^{\infty} S_k \left(\omega_k \cdot \frac{t_i}{2} \right) \cdot \cos \left(\omega_k \cdot \left(\frac{t_i}{2} - t \right) \right) \right] \cdot \eta(t), \quad (58)$$

де $S_k \left(\omega_k \cdot \frac{t_i}{2} \right) = \frac{\sin \left(\omega_k \cdot \frac{t_i}{2} \right)}{\left(\omega_k \cdot \frac{t_i}{2} \right)}$, $\omega_k = \frac{2\pi k}{T}$ – частоти розкладання.

Опускаючи математичні перетворення, запишемо остаточний вираз для напруги на індуктивності при довільній часовій функції збуджуючого сигналу і достатньо малому активному опорі контура.

$$U_{L_1}(t) \approx U_m \cdot \left[f(t) - \omega_{01} \cdot f(t) * \left(e^{-\delta_0 \cdot (\omega_{01} t)} \cdot \sin(\omega_{01} t) \right) \right], \quad (59)$$

де $\omega_{01} = \frac{1}{\sqrt{L_1 C_1}}$ – власна частота контура,

$$\delta_0 = \left(\frac{1}{\omega_{01}} \cdot \frac{R_1}{2L_1} \right) - \text{відносний декремент згасання.}$$

За допомогою формули (59) проаналізуємо амплітуди вихідних напруг при допущеннях, адекватних характеру реальних процесів:

- вважаємо величини порядку $\sim \{ \delta_0 \text{ та } \omega_{01}^{-1} \}$ нехтовно малими в математичних операціях алгебраїчного підсумовування [13];
- вважаємо, що устанені режими мають місце для $t \gg \frac{\omega_{01}}{\delta_0}$ [11,12];

- як кількісна характеристика можливого відхилення характерної частоти збуджуючої напруги – ω від власної частоти контура приймаємо величину – $\Delta \leq 0,1$ таку, що $\frac{\omega}{\omega_{01}} = 1 + \Delta$.

З урахуванням прийнятих допущень, з формули (59) отримаємо вирази амплітуд вихідної напруги – $U_{L_1}^{(\max)}$ залежно від величини відхилення – Δ .

1) Збудження гармонічним сигналом, $f(t) = \sin(\omega \cdot t)$, ω – частота.

а) З урахуванням перехідного процесу при підключенні джерела,

$$U_{L_1}^{(\max)} \approx \frac{0,5 \cdot U_m}{\sqrt{\left(\Delta^2 + \left(\frac{1}{2Q_1}\right)^2\right)}}, \quad (60)$$

де $Q_1 = \left(\frac{\omega \cdot L_1}{R_1}\right)$ – добротність контура, що розглядається.

У разі резонансу, коли $\Delta \ll \frac{1}{2Q_1}$, має місце максимум вихідної напруги, що генерується:

$$U_{L_1}^{(\max)} \approx Q_1 \cdot U_m. \quad (61)$$

В протилежній ситуації, коли $\Delta \gg \frac{1}{2Q_1}$, амплітуда вихідного сигналу істотно падає:

$$U_{L_1}^{(\max)} \approx \frac{1}{2\Delta} \cdot U_m. \quad (62)$$

Нарешті, для «умовно проміжного випадку», коли $\Delta \approx \frac{1}{2Q_1}$, одержуємо, що

$$U_{L_1}^{(\max)} \approx \frac{Q_1}{\sqrt{2}} \cdot U_m. \quad (63)$$

б) В стаціонарному режимі скористаємося виразом для модуля комплексного опору ланцюга з послідовними « R_1, L_1, C_1 » [12]:

$$Z_{(R_1 L_1 C_1)} = \sqrt{R_1^2 + \left(\omega \cdot L_1 - \frac{1}{\omega \cdot C_1} \right)^2}. \quad (64)$$

За допомогою виразу (64) і загальної залежності для напруги на індуктивності – $U_{L_1}^{(\max)} \approx (\omega \cdot L_1) \cdot \frac{U_m}{Z_{(R_1 L_1 C_1)}}$ [12] знаходимо, що

$$U_{L_1}^{(\max)} \approx \frac{U_m}{2 \cdot \sqrt{\frac{1}{(2Q_1)^2} + \Delta^2}} \approx \begin{cases} Q_1 \cdot U_m, \Delta \ll \frac{1}{(2Q_1)}; \\ \frac{U_m}{2\Delta}, \Delta \gg \frac{1}{(2Q_1)}; \\ \frac{Q_1 \cdot U_m}{\sqrt{2}}, \Delta \approx \frac{1}{(2Q_1)}. \end{cases} \quad (65)$$

Порівняння залежностей (61–63) з результатами в (65) показує їх абсолютну ідентичність, що, зрештою, є свідомством достовірності отриманих оцінок.

Примітка. Для достатньо низьких частот збуджуючого сигналу, коли, $\left(\frac{\omega}{\omega_{01}} \right) \ll 1$, можна отримати, що напруга на індуктивності – $U_{L_1}^{(\max)} \approx \left(\frac{\omega}{\omega_{01}} \right)^2 \cdot U_m$ є нескінченно малою величиною другого порядку та

$U_{L_1}^{(\max)} \left| \left(\frac{\omega}{\omega_{01}} \right) \ll 1 \right. \rightarrow 0$ [13]. Тобто, подалі від резонансу падіння напруги на індуктивності повинно бути відсутнім.

2) Збудження періодичною послідовністю прямокутних імпульсів напруги тривалістю – t_i з періодом проходження – T .

Згідно розкладанню (58), на вхід контура подається лінійна комбінація часових гармонік з кратними частотами. Але як впливає з аналізу процесів, що відбуваються і відповідних чисельних оцінок, найефективніше збудження повинне мати місце, коли основна частота розкладання – $\omega_1 = \frac{2\pi}{T}$ з точністю до малої величини Δ близька до власної частоти досліджуваного « $R_1L_1C_1$ » – контура.

Опускаючи подробиці алгоритму рішення, запишемо остаточний вираз для амплітуди вихідної напруги на індуктивності.

$$U_{L_1}^{(\max)}(t) \approx \left(\frac{1}{\pi} \right) \cdot \sin \left(\omega_{01} \cdot (1 + \Delta) \cdot \frac{t_{i0}}{2} \right) \cdot \frac{U_m}{\sqrt{\left(\frac{1}{2Q_1} \right)^2 + \Delta^2}}. \quad (66)$$

Для тривалості імпульсів, що забезпечують найбільшу величину збуджуваного сигналу – $t_{i0} \approx \frac{\pi}{\omega_{01} \cdot (1 + \Delta)}$, вираз (66) перетвориться до вигляду:

$$U_{L_1}^{(\max)}(t) \approx \left(\frac{1}{\pi} \right) \cdot \frac{U_m}{\sqrt{\left(\frac{1}{2Q_1} \right)^2 + \Delta^2}}. \quad (67)$$

З (67) слідують залежності:

$$U_{L_1}^{(\max)} \approx \begin{cases} \frac{2}{\pi} \cdot Q_1 \cdot U_m, \Delta \ll \frac{1}{(2Q_1)}; \\ \frac{1}{\pi} \cdot \frac{U_m}{\Delta}, \Delta \gg \frac{1}{(2Q_1)}; \\ \frac{\sqrt{2}}{\pi} \cdot Q_2 \cdot U_m, \Delta \approx \frac{1}{(2Q_1)}. \end{cases} \quad (68)$$

Отримані співвідношення проілюструємо чисельними оцінками для різних конструктивних компонент дослідженого $R_1L_1C_1$ – контура, як джерела резонансної енергії з навколишнього простору.

Чисельні оцінки.

Приклад 1.

Вихідні дані:

- робоча (резонансна) частота: $f_1 = 300$ кГц;
- діаметр каркаса для обмотки соленоїда: $D_2 = 0,075$ м;
- діаметр дроту обмотки з міді: $d_2 = 0,00075$ м;
- питома електропровідність міді: $\gamma_2 = 5,58 \cdot 10^7$ 1/Ом·м.

Обчислення:

- довжина дроту обмотки, $\zeta_2 = 249,886$ м;
- число витків: $w_2 \approx 1061$;
- довжина соленоїда: $l_2 \approx 0,8$ м;
- індуктивність соленоїда: $L_2 \approx 7850,4$ мкГн;
- величина скін-шару: $\Delta = 0,000093$ м;
- активний опір з урахуванням скін-ефекту: $R_2 = 18,06$ Ом;
- величина ємності, знайденої за розрахованою індуктивністю та заданою робочою частотою: $C_2 = 35,85$ пФ;
- добротність: $Q_2 = 819,338$;
- основні характеристики системи, як генератора електричної енергії з резонансною частотою $\sim 300\,000$ Гц;

Таблиця 2

Коефіцієнт перетворення при резонансній частоті: $f_1 = 300$ кГц

№ з/п	Частотний діапазон, Гц	Коефіцієнт перетворення – K	
		Збудження гармонічним сигналом	Збудження послідовністю імпульсів
1	$ \Delta f \ll 183$	819,4	521,6
2	$ \Delta f = 183$	579,4	368,8
3	$30000 > \Delta f \gg 183$	$5,0 \ll K \ll 1630$	$1,6 \ll K \ll 521$

Приклад 2.

Вихідні дані:

- робоча (резонансна) частота – $f = 100$ кГц;
- індуктивний елемент – соленоїд завдовжки $\lambda = 0,25$ м, радіусом $r_1 = 0,0125$ м, числом витків $n_1 = 250$ (товщина дроту обмотки $d_1 = 0,001$ м), метал – $\gamma_1 = 5,85 \cdot 10^7$ 1/ Ом·м – мідь.

Обчислення:

- індуктивність соленоїда: $L_1 \approx 0,000154$ Гн;
- величина скін-шару: $\Delta = 0,000093$ м;
- активний опір з урахуванням скін-ефекту: $R_{L1} \approx 0,65$ Ом;
- величина ємності, знайденої за розрахованою індуктивністю та заданою робочою частотою: $C_1 \approx 16,4$ нФ;
- добротність: $Q_1 \approx 149,5$;
- основні характеристики системи, як генератора електричної енергії з резонансною частотою $\sim 100\ 000$ Гц:

Таблиця 3

Коефіцієнт перетворення при резонансній частоті: $f_1 = 100$ кГц

№ з/п	Частотний діапазон, Гц	Коефіцієнт перетворення – K	
		Збудження Гармонічним сигналом	Збудження послідовністю імпульсів
1	$ \Delta f \ll 333,5$	190	95,4
2	$ \Delta f = 333,5$	112,4	67,5
3	$30000 > \Delta f \gg 183$	$5,0 \ll K \ll 300$	$1,6 \ll K \ll 96,5$

Перш, ніж сформулювати висновки проведених досліджень, необхідно виділити найістотніші особливості джерела електричної енергії на базі контура з послідовними активно-реактивними елементами:

- визначеність у виборі величини ємності (при заданій індуктивності), що забезпечує створення резонансних умов;
- відсутність вхідного і вихідного контурів з індуктивним зв'язком (як в трансформаторі Тесли);
- базовий резонансний контур один, і зовнішня напруга необхідної частоти подається безпосередньо на його вхідні клеми.

Висновки

1. Знайдені залежності вихідної напруги від робочих частот протікаючих процесів дозволяють оцінити ефективність контура з послідовними активно-реактивними елементами в режимі резонансу напруг, як джерела електричної енергії з навколишнього простору.

2. Показано, що

- границі діапазонів робочих частот і відповідні величини коефіцієнтів перетворення енергії встановлюються значенням добротності контура – Q_1 , причому граничні значення частот обернено пропорційні, а коефіцієнти прямо пропорційні відзначеній добротності резонансного контура;

- максимум коефіцієнта перетворення енергії залежить від способу збудження контура і так само, як для трансформатора Тесли, досягається у вельми вузькій смузі поблизу точки резонансної частоти з околицею у вигляді відносного відхилення – $|\epsilon| \sim \frac{1}{2Q_2} \rightarrow 0$;

$$|\epsilon| \sim \frac{1}{2Q_2} \rightarrow 0;$$

- величина максимального коефіцієнта перетворення енергії при збудженні контура гармонічним сигналом перевищує максимум коефіцієнта при збудженні періодичною послідовністю імпульсів напруги в $\sim \frac{\pi}{2}$ разів;
- при незначному відхиленні робочої частоти від резонансного значення (не більш, ніж на $\sim \pm 10\%$) так само, як і в трансфо-

рматорі Тесли, величина коефіцієнта перетворення енергії істотно падає;

- пониження резонансної частоти призводить до розширення частотних діапазонів з відповідними коефіцієнтами перетворення енергії, але разом з тим, значно знижує їх величини.

3.4 Контури з послідовними активно-реактивними елементами в схемах джерел резонансної енергії

Розділ присвячений можливим схемам джерел резонансної електричної енергії з контурами з послідовних активно-реактивних елементів. Як анонс відзначимо, що базовими елементами представлених схем вибрані або трансформатор Тесли, або безпосередньо ланцюг з послідовних активно-реактивних елементів.

Підкреслимо, що даний матеріал не претендує на технічну завершеність в значенні прийнятності для практичного виконання пристроїв відповідного призначення. Представлені схеми – це можливі варіанти для обґрунтування вибору тієї або іншої, але вже конкретної, конструкції джерела резонансної електричної енергії.

Кажучи про гіпотетичний характер представлених схем можна також вказати, як на задачу, що вимагає окремого розгляду, можливу проблему в запропонованій системі зворотного зв'язку для роботи в автономному режимі (рекуперація потужності, що генерується). Йдеться про стабілізацію вхідної напруги. Як представляється апріорі, навіть незначні плюс-мінус флуктуації його рівня можуть істотно вплинути на стійку роботу джерела резонансної електричної енергії в цілому.

БАЗОВИЙ БЛОК – ТРАНСФОРМАТОР ТЕСЛИ.

Первинна обмотка – контур з послідовних активно-реактивних елементів, вторинна обмотка – «замкнений» контур з паралельними активно-реактивними елементами.

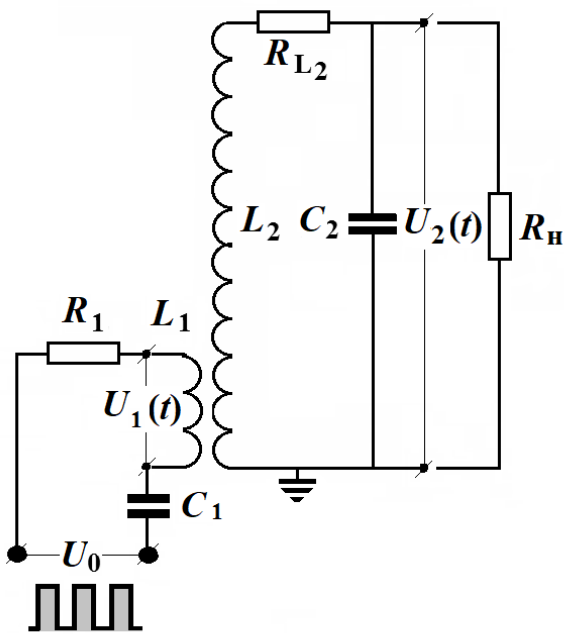


Рис. 21 Трансформатор Тесли з безпосереднім зніманням енергії, що генерується

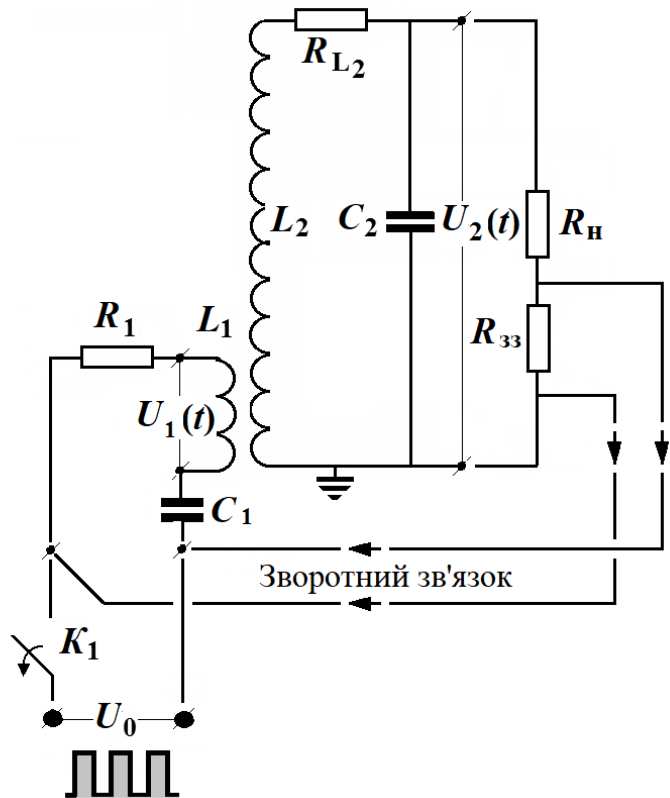


Рис. 22 Трансформатор Тесли зі зворотним зв'язком для роботи в автономному режимі

«Резонанс напруг» в первинному контурі, особливості:

- В найпростішому варіанті виконання первинний контур містить ланцюг послідовно з'єднаних елементів « $R_1L_1C_1$ », на вхід якого подається періодична послідовність імпульсів напруги зовнішнього джерела з амплітудою – U_0 .
- При «резонансі напруг» в контурі збуджується гармонічний сигнал з частотою, яка дорівнює частоті проходження імпульсів напруги зовнішнього джерела.
- Індуктивність контура є первинною обмоткою, напруга на індуктивності є первинною напругою трансформатора Тесли.
- Величина первинної напруги пропорційна вхідній напрузі зовнішнього джерела, $U_1 \sim Q_1 \cdot U_0$, де коефіцієнт пропорційності рівний добротності первинного контура $Q_1 = \frac{Z_1}{R_1}$, $Z_1 = \sqrt{\frac{L_1}{C_1}}$ – хвильовий опір.

- При заданих реактивностях, що забезпечують явище резонансу, амплітуда первинної напруги може регулюватися варіацією величини активного опору контура.
- Включення зворотного зв'язку з виходу трансформатора Тесли дозволить генератору електричної енергії в резонансному контурі працювати в автономному режимі при відключеному зовнішньому джерелі потужності.

БАЗОВИЙ БЛОК – КОНТУР С ПОСЛІДОВНИМИ *RLC* – ЕЛЕМЕНТАМИ.

Безпосереднє знімання напруги, що генерується.

Кількісні показники схеми.

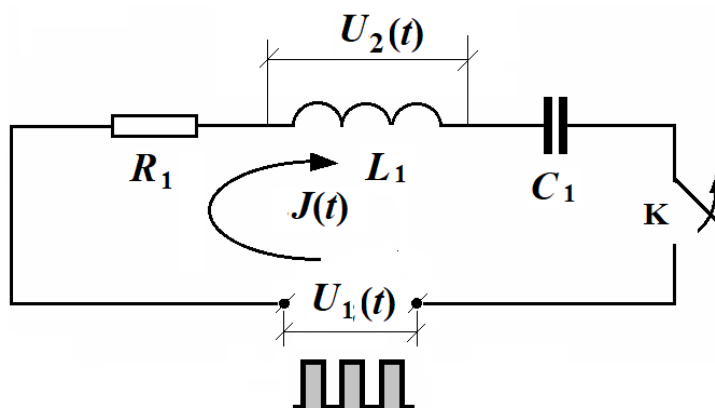


Рис. 23 Безпосереднє знімання напруги, що генерується в контурі з послідовними *RLC* – елементами

Вхідна напруга:

періодична послідовність прямокутних імпульсів – $U_1(t)$ з амплітудою – U_{1m} та частотою проходження, що дорівнює власній частоті контура, що забезпечує «резонанс напруг» в схемі.

Вихідна напруга:

$$U_2(t) \approx U_{2m} \cdot \sin(\omega_0 \cdot t);$$

$$U_{2m} \approx \frac{2}{\pi} \cdot U_{1m} \cdot Q_1, \quad Q_1 \text{ – добротність контура};$$

$$Q_1 = \left(\frac{\omega_0 \cdot L_1}{R_1} \right) = \frac{Z_1}{R_1}, \quad Z_1 = \sqrt{\frac{L_1}{C_1}} \text{ – хвильовий опір.}$$

Кількісні показники:

- резонансна робоча частота – $f_1 = 100$ кГц;
- параметри контура:
число витків – $n_{L_1} = 250$, індуктивність $L_1 = 0,000154$ Гн,
ємність – $C_1 = 1,64 \cdot 10^{-8}$ Ф, активний опір – $R_1 = R_{L_1} \approx 0,65$ Ом,
хвильовий опір – $Z_1 \approx 96,89$ Ом, добротність – $Q_1 = \frac{Z_1}{R_1} \approx 149,5$;
- коефіцієнт посилення: $K_1 = \frac{2}{\pi} \cdot Q_1 \approx 95,14$;
- параметри вхідного сигналу: $U_{вх} = 2,55$ В, $P_{вх} = 10$ Вт;
- параметри вихідного сигналу: $U_{вих} = 242,26$ В, $P_{вих} = 951,43$ Вт.

Ілюстрації можливих способів знімання «резонансної» електричної енергії, що генерується.

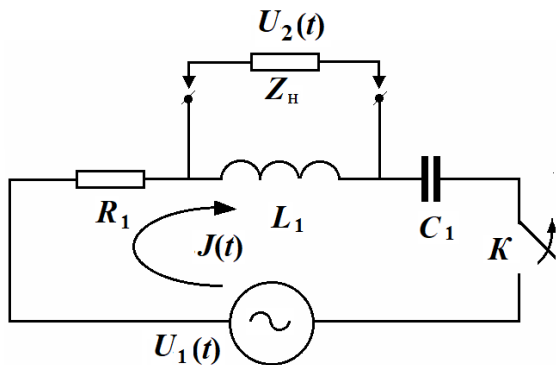


Рис. 24 Безпосереднє знімання енергії в навантаження,
умова дієвості:

$$Z_{н} \ll (\omega_0 \cdot L_1) \Rightarrow Z_{н} \approx 0,01 \cdot (\omega_0 \cdot L_1)$$

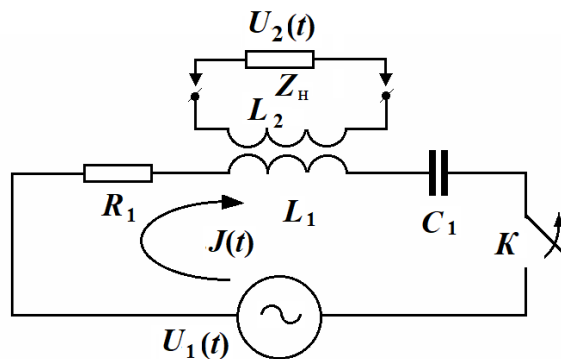


Рис. 25 Знімання енергії через індуктивний зв'язок (ВЧ трансформатор),
умова дієвості:

$$\text{резонансна частота} - \omega_0 = 1 / \sqrt{L_T \cdot C_1},$$

L_T – індуктивність ВЧ трансформатора

Ілюстрації способів знімання «резонансної» електричної енергії з включенням зворотного зв'язку, що забезпечує автономну роботу при відключеному зовнішньому джерелі потужності.

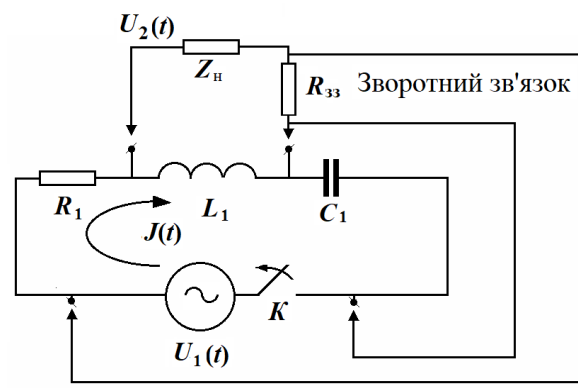


Рис. 26 Безпосереднє знімання енергії в навантаження зворотний зв'язок реалізується зніманням сигналу з додаткового резистора, що включається послідовно з навантаженням

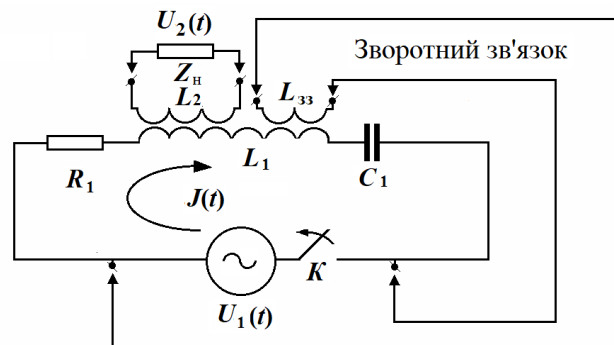


Рис. 27 Знімання енергії через індуктивний зв'язок (ВЧ трансформатор) зворотний зв'язок реалізується зніманням сигналу з додаткової обмотки ВЧ трансформатора

Висновки

1. Представлені можливі схемні рішення для джерел резонансної електричної енергії з різними базовими блоками, що містять контури, з послідовними активно-реактивними елементами.
2. Приведені схеми, що дозволяють принципове здійснення рекуперації потужності, що генерується, за допомогою зворотного зв'язку між вихідним і вхідним контурами джерела резонансної електричної енергії.
3. Запропоновані схеми рекуперації можуть забезпечити роботу джерела енергії в автономному режимі при відключенні зовнішнього живлення.

3.5 Активне навантаження джерела резонансної енергії на базі контура з послідовними RLC -елементами

Інтерес до процесів в джерелах резонансної електричної енергії, де вихідний сигнал подається в активне навантаження, підключене паралельно індуктивності базового контура з послідовними RLC -елементами, є суто практичним. Очевидно, що введення в схему додаткового резистора повинне привести до порушення резонансних умов і, відповідно, до падіння величини вихідного сигналу [11,12]. Питання полягає в тому, наскільки і чи можлива в цьому випадку реалізація «резонансу напруг» взагалі?

Метою даного розгляду є дослідження процесів в схемі генератора резонансної електричної енергії з послідовно включеними зовнішнім джерелом напруги, накопичувачем ємності, активним опором і соленоїдом, вихідна напруга з обмотки якого подається на паралельно підключене активне навантаження.

Розрахункові співвідношення, аналіз процесів.

Схема заміщення досліджуваного контура представлена на рис.20.

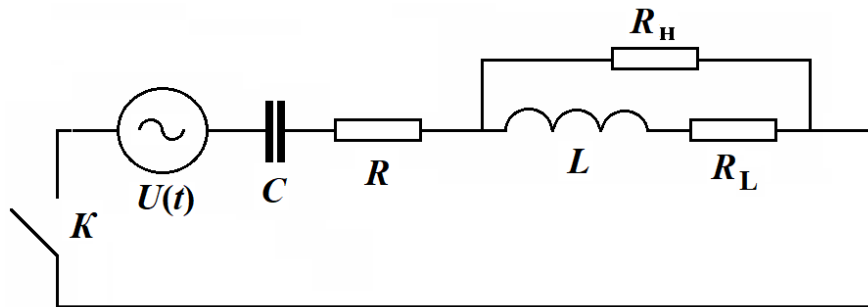


Рис. 28. Базовий блок джерела резонансної енергії – контур з послідовними RLC -елементами, $U(t)$ – зовнішнє джерело гармонічної напруги, C – ємнісний накопичувач, R – активний опір, R_H – активне навантаження $\{L, R_L\}$ – індуктивність та активний опір обмотки соленоїда

Постановка задачі.

- Контур с послідовно зв'язаними ємністю – C , активним опором – R , індуктивністю – L , виконаної з дроту з активним опором – R_L , підключений до зовнішнього джерела гармонічної напруги – $U(t) = U_m \cdot \sin(\omega \cdot t)$, де U_m, ω, t – амплітуда, циклічна частота, час, відповідно.
- Сигнал, збуджуваний в індуктивності, подається в навантаження з активним опором – R_H .
- Схема працює в усталеному резонансному режимі, коли сумарний опір всієї сукупності елементів буде мінімальним.

Примітка. Як представляється апріорі, для з'ясування основних закономірностей цілком достатньо обмежитися розглядом усталеного режиму і гармонічною залежністю зовнішнього живлення схеми.

Знайти.

- Напругу на опорі активного навантаження як функцію частоти живлячого сигналу і елементів контура

$$- U_{R_H \max} = F(\omega, C, R, L, R_L, R_H).$$

- Встановити зв'язки між елементами схеми, що забезпечують найефективніше збудження вихідного сигналу.

Особливо підкреслимо, що при рішенні поставленої задачі використовується добре відомий символічний метод розрахунку електричних ланцюгів без залучення будь-яких гіпотетичних уявлень про матерію навколишнього простору [12].

Модуль повного опору схеми на рис. 28, знайдений за допомогою тотожних перетворень з відповідного виразу в комплексній формі, запишеться у вигляді [13]:

$$Z_S(\omega) = \sqrt{\left(R + \frac{R_H \cdot (R_L (R_H + R_L) + (\omega L)^2)}{(R_H + R_L)^2 + (\omega L)^2} \right)^2 + \left(\frac{\omega L R_H^2}{(R_H + R_L)^2 + (\omega L)^2} - \frac{1}{\omega C} \right)^2}. \quad (69)$$

Очевидно, що якнайменша величина $Z_S(\omega)$ забезпечується нульовим значенням другого алгебраїчного доданку в підкорінному виразі формули (69). Звідси слідує залежність для резонансної частоти даного контура.

$$\omega_{res} = \frac{(R_H + R_L)}{\sqrt{L(C \cdot R_H^2 + L)}}. \quad (70)$$

У разі, коли частота збуджуючої гармонічної напруги і власна частота контура рівні між собою, тобто, $\omega \approx \omega_{res}$, модуль повного опору буде дорівнювати:

$$Z_{S-res}(\omega) = \left(R + \frac{R_H \cdot (R_L (R_H + R_L) + (\omega L)^2)}{(R_H + R_L)^2 + (\omega L)^2} \right). \quad (71)$$

Модуль інтегрального опору паралельних гілок що складається з індуктивності з власним активним опором і опору навантаження ви-

значається з відповідного виразу з комплексними змінними і описується залежністю [13]:

$$Z_{L-R_H}(\omega) = \frac{R_H \cdot \sqrt{\left[\left(R_L (R_H + R_L) + (\omega L)^2 \right)^2 + (\omega L R_H)^2 \right]}}{(R_H + R_L)^2 + (\omega L)^2}. \quad (72)$$

Далі слід знайти амплітуду вихідної напруги даного генератора електричної енергії. Із залученням співвідношень (71) і (72) одержуємо, що

$$\begin{aligned} U_{R_H \max} &= \frac{U_m}{Z_{S-res}(\omega)} \cdot Z_{L-R_H}(\omega) = \\ &= U_m \cdot \frac{R_H \cdot \sqrt{\left[\left(R_L (R_H + R_L) + (\omega L)^2 \right)^2 + (\omega L R_H)^2 \right]}}{\left(R \cdot \left((R_H + R_L)^2 + (\omega L)^2 \right) + R_H \cdot \left(R_L (R_H + R_L) + (\omega L)^2 \right) \right)}. \end{aligned} \quad (74)$$

З очевидних фізичних міркувань про дієвість електричної схеми можна задати, що $\frac{R_L}{R_H} \ll 1$ та $\frac{\omega L}{R_H} \ll 1$.

В цьому випадку вираз (74) після тотожних перетворень перетвориться до вигляду [13]:

$$\frac{U_{R_H \max}}{U_m} \approx \frac{\sqrt{\left[\left(\left(\frac{R_L}{R_H} \right) + \left(\frac{\omega L}{R_H} \right)^2 \right)^2 + \left(\frac{\omega L}{R_H} \right)^2 \right]}}{\left(\left(\frac{R + R_L}{R_H} \right) + \left(\frac{\omega L}{R_H} \right)^2 \right)}. \quad (75)$$

Проаналізуємо отримані результати і протікаючі процеси.

1. Достовірність знайденої залежності легко встановлюється граничними переходами до добре відомих положень з теорії електричних ланцюгів.

Так, у відсутності навантаження, $R_H \rightarrow \infty$, та ідеальної провідності обмотки індуктивності, $R_L \rightarrow 0$, відповідні математичні перетворення призводять до наступних результатів [13].

- Формула для резонансної частоти – (70) трансформується до виду відомого співвідношення для схеми з «резонансом напруг»: $\omega_{res} \Big|_{R_H \rightarrow \infty} = \frac{1}{\sqrt{LC}}$.

- Вихідна напруга в (75) переходить в напругу на індуктивності – $U_{R_H \max} \Big|_{R_H \rightarrow \infty} \approx U_{\omega L \max} = U_m \cdot \left(\frac{\omega L}{R} \right)$, що повністю узгоджується з відповідним висновком для ідеального контура з послідовно з'єднаних активно-реактивних елементів.

2. Нехай $\frac{R}{R_L} \ll 1$, тобто, активний опір резонансного контура є

достатньо малим. В цьому випадку можливі наступні ситуації:

- $\omega L \gg \sqrt{R_L \cdot R_H}$. Тоді $\frac{U_{R_H \max}}{U_m} \approx \left(\frac{R_H}{\omega L} \right)$ та коефіцієнт посилення напруги визначається тим, наскільки опір навантаження перевищує індуктивний опір соленоїда (діапазон від 10... та вище).
- $\omega L \ll \sqrt{R_L \cdot R_H}$. Тоді $\frac{U_{R_H \max}}{U_m} \approx 1$, тобто, посилення напруги відсутнє.
- $\omega L \approx \sqrt{R_L \cdot R_H}$. Тоді $\frac{U_{R_H \max}}{U_m} \approx \frac{\sqrt{5}}{2}$, має місце незначне посилення напруги.

Висновки

В цілому, не дивлячись на можливе посилення напруги в схемі з активним навантаженням, що підключене паралельно індуктивності в RLC -контурі, відповідна величина струму падає. Цей факт представляється істотним недоліком розглянутої схеми джерела електричної енергії, оскільки найбільший інтерес для практики викликає можливість посилення потужності, тобто, одночасного зростання напруги, що генерується, і струму в навантаженні. До недоліків можна віднести також можливість підключення тільки високоомного навантаження.

3.6 Індуктивне навантаження джерела резонансної енергії на базі контура з послідовними RLC -елементами

Альтернативою безпосередньому підключенню активного навантаження (активного опору) до джерела резонансної електричної енергії є її включення в ланцюг соленоїда, обмотка якого індуктивно пов'язана з обмоткою соленоїда базового RLC -контура джерела. В такій схемі соленоїд з опором буде вже індуктивним навантаженням. З фізичної точки зору обмотки обох соленоїдів можна розглядати як обмотки повітряного трансформатора (базового – це первинна, а навантаження – вторинна). Очевидно, що тут можлива ефективна передача електричної енергії, що генерується, з базового контура в контур індуктивного навантаження. Крім того, при певному виборі параметрів її вплив на основоположні резонансні процеси може бути вельми неістотним [11,12].

Метою даного розгляду є дослідження процесів в схемі генератора резонансної електричної енергії з послідовно включеними зовнішнім джерелом напруги, накопичувачем ємності, активним опором і соленоїдом, обмотка якого індуктивно пов'язана з ланцюгом включення активного навантаження.

Розрахункові співвідношення, аналіз процесів.

Постановка задачі.

- Згідно розрахунковій схемі заміщення на рис. 29, базовий RLC -контур джерела резонансної електричної енергії складається з послідовно з'єднаних зовнішнього джерела гармонічної напруги – $U(t) = U_m \cdot \sin(\omega \cdot t)$ (U_m, ω, t – амплітуда, частота та час), ємності – C , активного опору – R , обмотки соленоїда з індуктивністю – L , виконаної з дроту з активним опором – R_L .
- Індуктивне навантаження складається з соленоїда (індуктивністю обмотки – L_H , активного опору – R_{LH}), розміщеного коаксиально соленоїду базового контура, з підключеним активним опором – R_H .

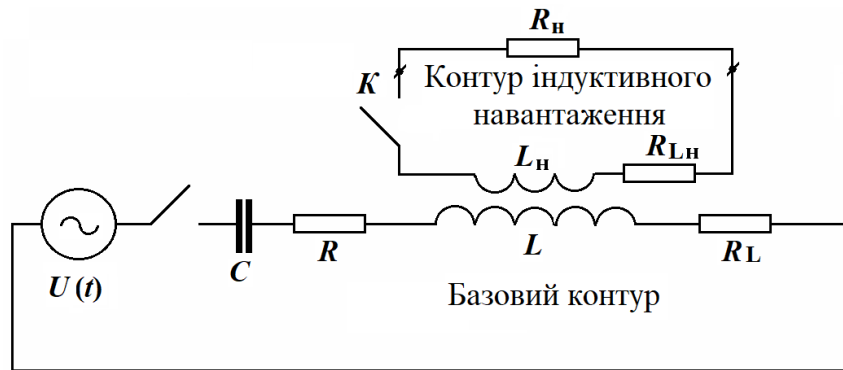


Рис. 29. Принципова схема джерела резонансної електричної енергії.

Базовий контур: $U(t)$ – зовнішнє джерело гармонічної напруги,

C – ємнісний накопичувач, R – активний опір,

$\{L, R_L\}$ – індуктивність і активний опір обмотки соленоїда.

Контур індуктивного навантаження: R_H – активний опір навантаження,

$\{L_H, R_{LH}\}$ – індуктивність і активний опір обмотки соленоїда

- Схема працює в усталеному резонансному режимі, коли сумарний опір всієї сукупності елементів базового контура буде мінімальним. В спеціальній літературі даний режим отримав назву «резонансу напруг» [11,12].

Примітка. Як представляється з феноменологічних міркувань, для з'ясування основних закономірностей цілком достатньо обмежитися розглядом усталеного режиму при гармонічній залежності зовнішнього живлення схеми.

- Коаксіальні соленоїди базового контура і контура індуктивного навантаження розглядаються як первинна і вторинна обмотки повітряного трансформатора, розрахункова модель якого представлена на рис. 30.

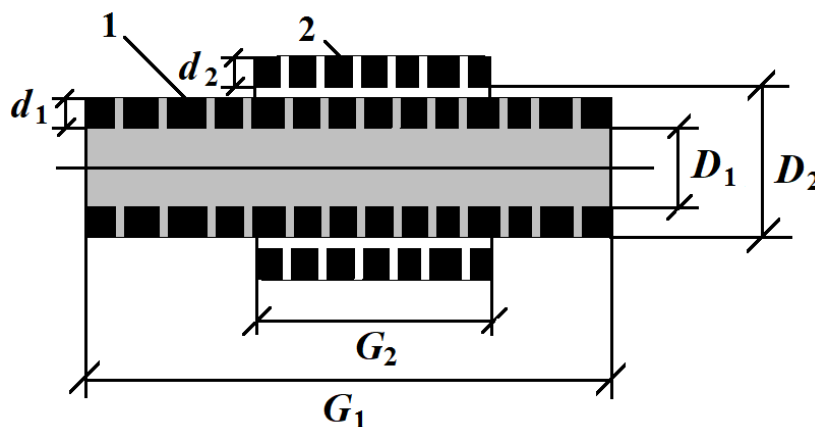


Рис. 30. Модельне представлення коаксіальних соленоїдів в схемі джерела резонансної електричної енергії, 1 – соленоїд базового контура,

2 – соленоїд контура індуктивного навантаження

- При рішенні поставленої задачі використовується добре відомий символічний метод розрахунку електричних ланцюгів без залучення будь-яких гіпотетичних уявлень про матерію навколишнього простору [12].

Знайти.

- Напругу на активному опорі індуктивного навантаження як функцію частоти живлячого сигналу і елементів контура –

$$U_{R_H \max} = F(\omega, C, R, L, R_L, L_H, R_{LH}, R_H).$$

- Встановити зв'язки між елементами схеми, які забезпечують найефективніше збудження вихідного сигналу.

Розв'язок.

Модуль повного опору схеми на рис. 29, знайдений за допомогою тотожних перетворень з відповідного виразу в комплексній формі, запишеться у вигляді [13]:

$$Z_S(\omega) = \sqrt{(R + R_L)^2 + \left(\omega L_e - \frac{1}{\omega C}\right)^2}, \quad (76)$$

де L_e – еквівалентна індуктивність базового контура, що враховує вплив обмотки соленоїда контура навантаження.

Як відомо, $Z_S(\omega)$ досягає мінімуму в «резонансі напруг» при прагненні до нуля другого алгебраїчного доданку в підкорінному виразі формули (76). Звідси слідує залежність для резонансної частоти даного контура..

$$\omega_{res} = \frac{1}{\sqrt{L_e \cdot C}}. \quad (77)$$

Фізично, відзначений резонанс має місце, коли частота збудливого гармонічного сигналу – ω та резонансна частота контура – ω_{res} є рівними між собою, тобто, $\omega \approx \omega_{res}$.

В цьому випадку амплітуда вихідної напруги базового контура, що знімається з індуктивності, буде описуватися залежністю:

$$U_{(\omega \cdot L_e)}^{\max} = \frac{U_m}{(R + R_L)} \cdot (\omega \cdot L_e). \quad (78)$$

Цікаво відзначити наступну обставину.

В резонансному режимі вхідна потужність (P_{ex}) визначається падінням напруги тільки на активному опорі контура, а вихідна ($P_{вих}$) – на його індуктивності.

Відношення цих потужностей призводить до співвідношення:

$$\frac{P_{вих}}{P_{ex}} = \frac{\left(\frac{U_m}{(R + R_L)} \cdot (\omega \cdot L_3) \right)^2}{\frac{(\omega \cdot L_3)}{U_m^2} (R + R_L)} = \left(\frac{(\omega \cdot L_3)}{(R + R_L)} \right) = Q, \quad (79)$$

де Q – добротність контура.

З результату (79) виходить, що в режимі «резонансу напруг» має місце посилення потужності, яке у відсутності будь-яких додаткових джерел, фізично, можна пояснити тільки енергією навколишнього простору. Причому коефіцієнт її перетворення, так само, як і в трансформаторі Тесли, визначається добротністю резонансного контура $\sim \left(\frac{(\omega \cdot L_3)}{(R + R_L)} \right)$ [1,2].

Далі, згідно представленню коаксіальних соленоїдів в схемі на рис. 30 обмотками повітряного трансформатора, проаналізуємо процеси перетворення енергії в «граничних режимах»: холостий хід і коротке замикання вторинної обмотки.

В порівнянні між собою ці режими представляють найбільший практичний інтерес.

Режим холостого ходу.

Практично, режим холостого ходу реалізується, якщо активний опір навантаження – R_H набагато більше опору обмотки соленоїда –

$$Z_{coil}(\omega) = \sqrt{(\omega \cdot L_H)^2 + R_{LH}^2},$$

$$R_H \gg Z_{coil}(\omega). \quad (80)$$

З урахуванням тільки ближньої електромагнітної взаємодії між обмотками соленоїдів, напругу на вході індуктивного навантаження можна представити виразом [11,12]:

$$U_{LH}^{\max} = U_{(L_3 - G_2)}^{\max} \cdot \left(\frac{N_2}{n_1} \right), \quad (81)$$

де $U_{(L_3 - G_2)}^{\max}$ та n_1 – напруга і число витків на ділянці обмотки базового соленоїда, розташованого безпосередньо під обмоткою соленоїда контура індуктивного навантаження,

$$U_{(L_3 - G_2)}^{\max} = U_{(\omega \cdot L_3)}^{\max} \cdot \left(\frac{G_2}{G_1} \right) \cdot \left(\frac{N_2 \cdot d_1}{G_2} \right), \quad n_1 \approx \left(\frac{G_2}{d_1} \right) = \left(N_2 \cdot \frac{d_2}{d_1} \right).$$

Розкриваючи залежність (81), одержуємо, що

$$U_{LH}^{\max} = U_{(\omega \cdot L_3)}^{\max} \cdot \left(\frac{N_2}{N_1} \right) = U_m \cdot \frac{(\omega \cdot L_3)}{(R + R_L)} \cdot \left(\frac{N_2}{N_1} \right). \quad (82)$$

Із співвідношення (82) виходить, що коефіцієнт перетворення напруг в повітряному трансформаторі з двох коаксіальних соленоїдів не залежить від їх геометрії і взаємного розташування. В режимі холостого ходу даний коефіцієнт дорівнює відношенню числа витків в їх обмотках.

З урахуванням залежності (82) вихідна потужність в навантаженні генератора електричної енергії описуватиметься співвідношенням:

$$P_{(вих-R_H)} = \frac{\left(U_m \cdot \frac{(\omega \cdot L_3)}{(R + R_L)} \cdot \left(\frac{N_2}{N_1} \right) \right)^2}{R_H}. \quad (83)$$

Відношення вихідної потужності в навантаженні до вхідної потужності зовнішнього джерела буде дорівнювати

$$\frac{P_{(вих-R_H)}}{P_{вх}} = \frac{\left((\omega \cdot L_3) \cdot \left(\frac{N_2}{N_1} \right) \right)^2}{(R + R_L) \cdot R_H}. \quad (84)$$

Ефективність генерації енергії означає задоволення нерівності: $\frac{P_{(вих-R_H)}}{P_{вх}} \gg 1$. Звідси з використанням співвідношення (84) можна отримати оцінку для необхідної величини активного опору навантаження:

$$R_H \ll \frac{\left((\omega \cdot L_3) \cdot \left(\frac{N_2}{N_1} \right) \right)^2}{(R + R_L)}. \quad (85)$$

Об'єднуючи (80) і (85), при достатньо малому активному опорі обмотки соленоїда, коли $R_{LH} \ll (\omega \cdot L_H)$ можна записати вираз, що визначає діапазон допустимих опорів навантаження, для яких має місце посилення потужності.

$$(\omega \cdot L_H) \ll R_H \ll \frac{\left((\omega \cdot L_3) \cdot \left(\frac{N_2}{N_1} \right) \right)^2}{(R + R_L)}. \quad (86)$$

Режим короткого замикання.

Режим короткого замикання реалізується, якщо активний опір навантаження – R_H набагато менший опору обмотки соленоїда

$$- Z_{coil}(\omega) = \sqrt{(\omega \cdot L_H)^2 + R_{LH}^2},$$

$$R_H \gg Z_{coil}(\omega). \quad (87)$$

Е.р.с. на вході індуктивного навантаження визначається виразом (86). В наближенні до умови (87) протікання струму призводить до падіння напруги тільки на опорі обмотки соленоїда.

В цьому випадку вихідна потужність генератора електричної енергії описуватиметься співвідношенням:

$$P_{(вих-Z_{coil}(\omega))} = \frac{\left(U_m \cdot \frac{(\omega \cdot L_3)}{(R + R_L)} \cdot \left(\frac{N_2}{N_1} \right) \right)^2}{Z_{coil}(\omega)}. \quad (88)$$

Відношення вихідної потужності до вхідної потужності зовнішнього джерела буде дорівнювати

$$\frac{P_{(вих-Z_{coil}(\omega))}}{P_{вх}} = \frac{\left((\omega \cdot L_3) \cdot \left(\frac{N_2}{N_1} \right) \right)^2}{(R + R_L) \cdot Z_{coil}(\omega)}. \quad (89)$$

Ефективність генерації енергії означає задоволення нерівності:

$$\frac{P_{(вих-Z_{coil}(\omega))}}{P_{вх}} \gg 1. \text{ Звідси з використанням співвідношення (89) мож-$$

на отримати оцінку для необхідної величини модуля повного опору обмотки соленоїда в контурі індуктивного навантаження:

$$Z_{coil}(\omega) \ll \frac{\left((\omega \cdot L_3) \cdot \left(\frac{N_2}{N_1} \right) \right)^2}{(R + R_L)}. \quad (90)$$

Об'єднуючи (87) і (90), одержуємо вираз, що визначає діапазон допустимих опорів, для яких має місце посилення потужності.

$$\begin{cases} Z_{coil}(\omega) \ll R_n; \\ Z_{coil}(\omega) \ll \frac{\left((\omega \cdot L_3) \cdot \left(\frac{N_2}{N_1} \right) \right)^2}{(R + R_L)}. \end{cases} \quad (91)$$

Висновки за «граничними» режимами.

Резюмуючи проаналізовані режими, слід вказати, що розгляд «короткого замикання» має сенс тільки як теоретичне зіставлення «холостому ходу». Для практики представляє інтерес виділення потужності саме в активному навантаженні, що підключається, а не в

елементі перетворення електромагнітної енергії. З цієї точки зору оцінки для режиму «холостого ходу» набагато цікавіші і ближчі до практичних рекомендацій з вибору параметрів схеми джерела електричної енергії на базі RLC – контура з індуктивним навантаженням.

Крім того, безперечною перевагою режиму «холостого ходу» є незалежність роботи схеми генератора електричної енергії від параметрів активного опору, де виділяється вихідна потужність в ланцюзі індуктивного навантаження. Але не можна і не відзначити недолік: реалізація «холостого ходу» можлива тільки з високоомним активним опором в контурі навантаження.

Режим довільного активного навантаження.

В режимі довільного активного навантаження при обчисленні вихідної напруги – $U_{R_H}^{\max}$ необхідно враховувати повний опір контура

індуктивного навантаження – $Z_i(\omega) = \sqrt{(\omega \cdot L_H)^2 + (R_{L_H} + R_H)^2}$.

З урахуванням залежності (86) в цьому випадку вихідна потужність в навантаженні генератора електричної енергії описуватиметься співвідношенням:

$$P_{(вих-R_H)} = \frac{\left(U_m \cdot \frac{(\omega \cdot L_3)}{(R + R_L)} \cdot \left(\frac{N_2}{N_1} \right) \cdot \frac{R_H}{\sqrt{(\omega \cdot L_H)^2 + (R_{L_H} + R_H)^2}} \right)^2}{R_H}. \quad (92)$$

Після деяких тотожних перетворень відношення вихідної потужності в навантаженні до вхідної потужності зовнішнього джерела –

$P_{вх} = \frac{U_m^2}{(R + R_L)}$ буде дорівнювати

$$\frac{P_{(вих-R_H)}}{P_{вх}} = \frac{R_H}{(R + R_L)} \cdot \frac{\left((\omega \cdot L_3) \cdot \left(\frac{N_2}{N_1} \right) \right)^2}{\left((\omega \cdot L_H)^2 + (R_{L_H} + R_H)^2 \right)}. \quad (93)$$

Для практичного орієнтування при виборі оптимальної величини активного опору навантаження доцільно розглянути цілком реальну ситуацію, коли $\left(\frac{\omega \cdot L_H}{R_H}\right) \gg 1$ та $\left(\frac{R_{LH}}{R_H}\right) \ll 1$.

В цьому випадку співвідношення (93) приймає вигляд:

$$\frac{P_{(вих-R_H)}}{P_{вх}} \Bigg|_{\left(\frac{\omega \cdot L_e}{R_H}\right) \gg 1, \left(\frac{R_{LH}}{R_H}\right) \ll 1} = \frac{R_H}{(R + R_L)} \cdot \left(\left(\frac{L_e}{L_H}\right) \cdot \left(\frac{N_2}{N_1}\right) \right)^2. \quad (94)$$

Ефективність генерації енергії можна визначити вже введеним відношенням: $\frac{P_{(вих-R_H)}}{P_{вх}} = K$, де K – коефіцієнт посилення потужності.

З використанням залежності (94) легко отримати оцінку для величини активного опору навантаження, що забезпечує заданий рівень потужності:

$$R_H \approx K \cdot \frac{(R + R_L)}{\left(\left(\frac{L_e}{L_H}\right) \cdot \left(\frac{N_2}{N_1}\right) \right)^2}. \quad (95)$$

Алгоритмічно, після орієнтовної оцінки – R_H для бажаної величини – K реальне значення коефіцієнта посилення потужності можна визначити за допомогою формули (93).

Закінчуючи даний розгляд, можна вказати на можливі спрощення у формулах (94) і (95), що дозволяють виконання наближених, але вельми корисних оцінок.

Якщо поперечні розміри соленоїдів в базовій схемі і ланцюзі індуктивного навантаження однакові і їх індуктивності визначаються відомими співвідношеннями для одношарових багатоговиткових соленоїдів, то

$$\left(\frac{L_e}{L_H}\right) \cdot \left(\frac{N_2}{N_1}\right) \approx \left(\frac{d_1}{d_2}\right). \quad (96)$$

З урахуванням (96) виразу (94) і (95) приймають вигляд:

$$\left\{ \begin{array}{l} \left| \frac{P_{(вих-R_H)}}{P_{вх}} \right| \left(\frac{\omega \cdot L_2}{R_H} \right) \gg 1, \left(\frac{R_{LH}}{R_H} \right) \ll 1 \\ R_H \approx K \cdot (R + R_L) \cdot \left(\frac{d_1}{d_2} \right)^2 \end{array} \right. = \frac{R_H}{(R + R_L)} \cdot \left(\frac{d_2}{d_1} \right)^2, \quad (97)$$

Із залежності (97) виходить, що основний внесок у формування основних показників ефективності вносять активні опори базового контура і поперечні розміри дротів в обмотках соленоїдів.

Висновки за режимом довільного активного навантаження.

Проаналізований робочий режим, що є проміжним між «холостим ходом» і «коротким замиканням». Його основна перевага полягає в можливості широкого вибору величини активного навантаження, не знижуючи показників ефективності процесу генерації електричної енергії. Недолік – залежність роботи електричної схеми від параметрів навантаження.

Еквівалентна індуктивність.

Перейдемо до еквівалентної індуктивності базового контура. Її формування обумовлено впливом електромагнітних полів струму, збуджуваного в ланцюзі індуктивного навантаження.

Відзначимо, що наближені якісні оцінки даного параметра можна отримати із загальних фізичних міркувань для достатньо довгого соленоїда, магнітне поле якого формується в його внутрішній полості.

Згідно конструкції на рис. 30 найілюстративнішими є дві можливі ідеалізації.

Якщо обмотка соленоїда базового контура – 1 забезпечує максимум екранування (близька до «ідеально провідної»), впливом соленоїда контура індуктивного навантаження – 2 на формування еквівалентної індуктивності – L_e можна нехтувати і вважати, що $L_e \approx L$.

В протилежному випадку, якщо обмотка соленоїда базового контура – 1 «прозора» і не екранує збуджувані поля, вплив соленоїда контура індуктивного навантаження – 2 на формування еквівалентної індуктивності – L_e , стає вельми істотним. при однаковій довжині соленоїдів, унаслідок протилежної спрямованості однакових збудливо-

го і індукованого струмів, магнітне поле у внутрішній порожнині соленоїдів буде відсутнє та $L_e \rightarrow 0$.

Оцінити приблизний рівень проникнення магнітного поля в центральну порожнину системи і ступінь впливу на еквівалентну індуктивність базового контура можна за допомогою найпростішої експоненціальної залежності [11]:

$$\eta \sim \exp\left(-\frac{d}{\Delta}\right), \quad (98)$$

де d – «умовна» товщина металу обмотки, усереднена з урахуванням густини розміщення витків, Δ – ефективна глибина проникнення,

$$\Delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \cdot \gamma \cdot \mu_0}},$$

ω – частота поля, γ – питома електропровідність металу обмотки, μ_0 – магнітна стала.

Так, при $\eta = 1$ має місце повне проникнення (обмотка «прозора»), $\frac{d}{\Delta} \ll 1$, $\eta = 0$ – проникнення відсутнє («ідеально провідна» обмотка, $\frac{d}{\Delta} \gg 1$).

Слід зазначити, що більш строгу оцінку показника проникнення магнітного поля в циліндричну полость, екрановану металом обмотки базового соленоїда, можна отримати з використанням результатів роботи [14].

Отже, нехай

- число витків щільної обмотки соленоїда базового контура – N_1 , діаметр дроту – d_1 , довжина обмотки – G_1 (відповідно, $G_1 = d_1 \cdot N_1$), діаметр – D_1 ;
- число витків щільної обмотки соленоїда контура індуктивного навантаження – N_2 , діаметр дроту – d_2 , довжина обмотки – G_2 (відповідно, $G_2 = d_2 \cdot N_2$), діаметр – D_2 ;
- контур індуктивного навантаження вважається замкнутим накоротко, що дозволяє оцінити за максимумом вплив індукованого струму на електромагнітні процеси в центральній частині системи;

- обидва соленоїди вважаються достатньо довгими;
- поперечні розміри власне обмоток соленоїдів достатньо малі, так що діаметри і площі поперечних перетинів їх внутрішніх полостей є однаковими, $D_1 \approx D_2 \approx D$ та $S \approx \pi \cdot \frac{D^2}{4}$.

Зв'язок між амплітудою гармонічного струму в обмотці базового соленоїда – $J_{L_e}^{\max}$ і амплітудою протилежно направленою струму в обмотці соленоїда контура індуктивного навантаження – $J_{L_H}^{\max}$ з урахуванням тільки ближніх взаємодій (витки – n_1 розташовані строго під витками – N_2) визначається за допомогою співвідношення:

$$J_{L_H}^{\max} = J_{L_e}^{\max} \cdot \frac{N_2}{n_1} = J_{L_e}^{\max} \cdot \frac{d_1}{d_2}. \quad (99)$$

У внутрішній порожнині системи збуджуються протилежно направлені магнітні потоки:

$$\begin{cases} \Phi_{L_e}^{\max} = \mu_0 \cdot J_{L_e}^{\max} \cdot \frac{N_1^2 \cdot S}{G_1}; \\ \Phi_{L_H}^{\max} = -\mu_0 \cdot J_{L_H}^{\max} \cdot \frac{N_2^2 \cdot S}{G_2} \cdot \eta = -\mu_0 \cdot J_{L_e}^{\max} \cdot \frac{d_1}{d_2} \cdot \frac{N_2^2 \cdot S}{G_2} \cdot \eta, \end{cases} \quad (100)$$

де $S \approx \frac{\pi \cdot D^2}{4}$ – площа поперечного перетину внутрішньої порожнини базового соленоїда.

Сумарний магнітний потік згідно принципу суперпозиції буде рівний сумі алгебраїчних виразів (100).

$$\Phi_{(L_e-Sum)}^{\max} = \Phi_{L_e}^{\max} + \Phi_{L_H}^{\max} = \mu_0 \cdot J_{L_e}^{\max} \cdot S \cdot \left(\frac{N_1^2}{G_1} - \frac{d_1}{d_2} \cdot \frac{N_2^2}{G_2} \cdot \eta \right). \quad (101)$$

Очевидно, і це витікає із залежності (101), у разі однакових соленоїдів при мінімумі екранування магнітне поле у внутрішній поло-

сті системи перетворюється в нуль. Фізично, в прийнятій ідеалізації, це означає, що сумарний потік, збуджуваний двома однаковими, але протилежно направленими струмами, буде дорівнювати нулю.

Із співвідношення (101) легко знайти формулу для еквівалентної індуктивності в базовому RLC – контурі джерела електричної енергії.

$$L_e = \frac{\Phi_{(L_e\text{-Sum})}^{\max}}{J_{L_e}^{\max}} \approx \mu_0 \cdot S \cdot \left(\frac{N_1^2}{G_1} - \frac{d_1}{d_2} \cdot \frac{N_2^2}{G_2} \cdot \eta \right). \quad (102)$$

З отриманого результату виходить, що вплив електромагнітних полів струму, що збуджується в ланцюзі навантаження, має призводити до зниження величини – L_e .

Підкреслимо, що залежність (102) дає максимальну оцінку еквівалентній індуктивності, оскільки отримана в ідеалізації максимуму індукованого струму.

Приклад розрахунку експериментальної моделі джерела електричної енергії.

Параметри експериментальної моделі джерела електричної енергії розрахуємо для випадку довільного активного навантаження в ланцюзі вторинного індуктивного контура.

Дано:

1. Зовнішнє джерело потужності – генератор напруги:
 - діапазон частот – $f \in [30, 3 \cdot 10^6]$ Гц;
 - діапазон амплітуд напруги – $U_{1m} \in [1, 20]$ В;
 - вихідний струмообмежуючий резистор – $R = 50$ Ом;
 - максимальна вихідна потужність ~ 8 Вт.
2. Активний опір в індуктивному контурі навантаження – $R_n \approx 806,67$ Ом (реально, це може бути лампочка розжарювання на напругу ~ 220 В, потужність ~ 60 Вт).
3. Робоча частота – $f = 1,5$ МГц, $\omega = 9,425 \cdot 10^6$ Гц.
4. Активний опір базового контура, рівний струмообмежуючому резистору зовнішнього джерела потужності – $R = 50$ Ом.
5. Параметри соленоїда базового контура:
 - довжина обмотки – $G_1 = 0,43$ м;
 - число витків в обмотці – $N_1 = 1100$;

- діаметр витків – $d_1 = 0,00035$ м;
 - метал дроту обмотки – мідь, $\gamma_{cu} \approx 6,0 \cdot 10^7$ 1/Ом·м;
 - діаметр внутрішньої порожнини – $D = 0,07$ м.
6. Параметри соленоїда контура індуктивного навантаження:
- довжина обмотки – $G_2 = 0,25 \cdot G_1 \approx 0,1075$ м;
 - число витків в обмотці – $N_2 \approx 36$;
 - діаметр витків – $d_1 = 0,003$ м;
 - метал дроту обмотки – мідь, $\gamma_{cu} \approx 6,0 \cdot 10^7$ 1/Ом·м;
 - діаметр внутрішньої порожнини вважаємо приблизно рівним діаметру внутрішньої порожнини соленоїда базового контура – $D = 0,07$ м.

Обчислення.

1. Базовий контур:

- глибина проникнення поля в мідь – $\Delta = 0,000093$ м;
- активний опір обмотки соленоїда з урахуванням скін-ефекту – $R_L = 82,68$ Ом;
- сумарний активний опір контура – $R_S = R + R_L \approx 132$ Ом;
- показник рівня проникнення поля крізь метал обмотки базового контура – $\eta = 0,0014$;
- індуктивність обмотки соленоїда – $L \approx L_e = 0,0136$ Гн;
- індуктивний опір обмотки соленоїда – $\omega \cdot L_s \approx 128258$ Ом;
- добротність контура – $Q \approx 966,6$;
- ємність – $C \approx 0,83 \cdot 10^{-12}$ Ф.

2. Контур індуктивного навантаження:

- індуктивність соленоїда – $L_n = 0,0000577$ Гн;
- індуктивний опір обмотки соленоїда – $\omega \cdot L_n \approx 544,42$ Ом;
- активний опір обмотки соленоїда з урахуванням скін-ефекту – $R_n \approx 0,27$ Ом.

3. Коефіцієнт посилення потужності – $K \approx 112$.

4. Показники ефективності генератора в діючих величинах.

4.1. Вхідні дані:

- напруга $\sim 8,48$ В;

- струм $\sim 0,064$ А;
- потужність $\sim 0,54$ Вт.

4.2. Вихідні дані:

- напруга $\sim 221,414$ В;
- струм $\sim 0,274$ А;
- потужність $\sim 60,77$ Вт.

Висновки.

Результати обчислень, проведених для експериментальної моделі джерела електричної енергії, показали практичну можливість її реалізації з достатньо високими показниками ефективності.

В цілому, індуктивне підключення навантаження до джерела електричної енергії є набагато переважним над активним навантаженням, що підключається в паралель до індуктивності базового контура.

Очевидні переваги:

- відсутні обмеження на величину опору навантаження, вона може бути як і низько-, так і високоомною;
- напруга і струм, що генеруються збільшуються одночасно;
- має місце вельми значуще посилення потужності вхідного сигналу, що свідчить про реальне отримання енергії з навколишнього простору, ключем доступу до якої є явище резонансу.

Основний недолік – залежність вихідних показників від параметрів схеми індуктивного навантаження генератора електричної енергії.

3.7 Принципові можливості роботи джерела електричної енергії в автономному режимі

Якщо слідувати відомим визначенням [12,13], джерело резонансної електричної енергії із зовнішнім джерелом напруги, що живить ланцюг послідовно з'єднаних активно-реактивних елементів, можна розглядати як стаціонарний підсилювач потужності вхідного електричного сигналу. Обчислення показали, що при відповідному виборі параметрів схеми величина коефіцієнта посилення може досягати декількох сотень.

Цей факт дозволяє припустити можливість роботи генератора резонансної електричної енергії в автономному режимі взагалі без зовнішнього джерела потужності.

Останній буде необхідний тільки для запуску, після чого схема збуджуватиметься за рахунок часткової рекуперації електроенергії, що подається з виходу на вхід через спеціальний ланцюг зворотного зв'язку. Потужність, що генерується, в цьому випадку витягуватиметься з навколишнього простору.

Принципово, часткову рекуперацію електроенергії можна здійснити двома способами.

Перший припускає безпосередній електричний зв'язок між базовим контуром і контуром індуктивного навантаження. Для чого в ланцюг останнього включається додатковий резистор. З нього знімається частина вихідної напруги генератора і подається на вхід базового контура.

Другий спосіб можна реалізувати за допомогою окремого індуктивного зв'язку. В цьому варіанті рекуперації напруга для зворотного зв'язку збуджується в обмотці додаткового соленоїда. Індукований сигнал подається безпосередньо на вхід базового контура.

Метою даного розгляду є дослідження процесів в схемі генератора резонансної електричної енергії з базовим контуром з послідовних активно-реактивних елементів при різних способах часткової рекуперації електроенергії, коли зовнішнє джерело потужності служить тільки для первинного збудження електромагнітних процесів.

Як показали чисельні оцінки, найефективніше знімання вихідної електроенергії реалізується в схемі з індуктивним навантаженням. В зв'язку з цим подальший розгляд буде присвячений саме цій схемі з вищезгаданими способами рекуперації.

Розрахункові співвідношення, чисельні оцінки.

Часткова рекуперація за допомогою електричного зв'язку.

Принципова реалізація зворотного зв'язку, коли напруга, що подається на вхід базового контура, знімається з активного опору в ланцюзі індуктивного навантаження, ілюструється рис. 31.

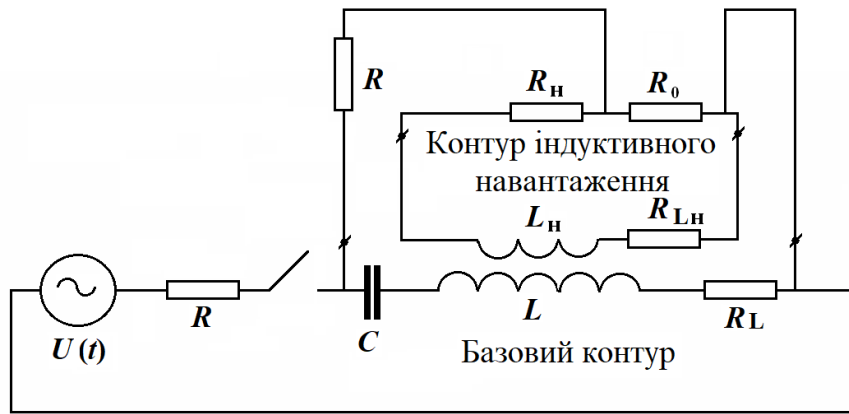


Рис. 31. Принципова схема джерела резонансної енергії з електричним зворотним зв'язком

Як впливає з фізичних міркувань, внесення електричного зв'язку між контурами в схемі джерела резонансної енергії може привести до порушення його практичної дієвості.

В ідеалі, опір для знімання рекуперованого сигналу – R_0 необхідно вибрати багато меншим ніж опори навантаження – R_H , де знімається енергія, що генерується, тобто $\frac{R_0}{R_H} \ll 1$. Разом з тим, з практичної точки зору представляє інтерес оцінка величини R_0 , що задовольняє не тільки вищезгаданій вимозі, але і забезпечуючої подачу на вхід базового контура напруги з амплітудою, що дозволяє працювати без зовнішнього джерела потужності.

При проведенні обчислень приймемо розрахункову схему заміщення, представлену на рис. 32.

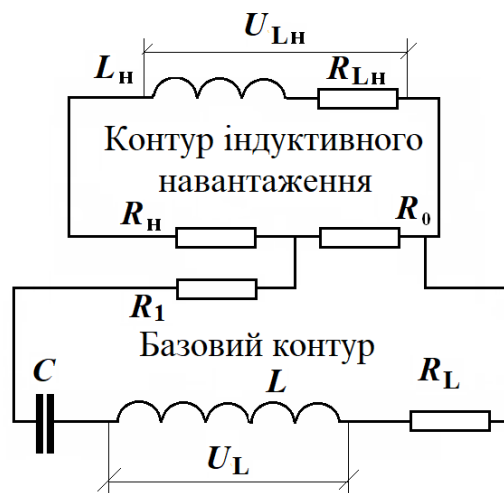


Рис. 32. Схема заміщення для розрахунку процесів при включенні електричного зворотного зв'язку між базовим контуром і контуром індуктивного навантаження

Згідно розрахункової схеми заміщення в контурі індуктивного навантаження має місце послідовне з'єднання активного опору навантаження – R_H , індуктивності – L_H , активного опору її дроту – R_{LH} та еквівалентного опору двох паралельних гілок. Перша з них представлена резистором для знімання сигналу рекуперації – R_0 . Друга складається з послідовно сполучених активно-реактивних елементів базового контура.

Зрештою модуль сумарного опору ланцюга в контурі індуктивного навантаження можна представити виразом вигляду:

$$Z_{(S-in)}(\omega) = \sqrt{\left(R_H + R_{LH} + \frac{R_0 \cdot (R + R_L)}{(R_0 + R + R_L)}\right)^2 + (\omega \cdot L_H)^2}, \quad (103)$$

де $R = R_1 + R_0$, ω – частота.

Напруга на опорі R_0 в контурі індуктивного навантаження визначається таким чином:

$$U_{R_0} = \frac{\left(U_L \cdot \frac{N_2}{N_1}\right)}{Z_{(S-in)}(\omega)} \cdot R_0, \quad (104)$$

де U_L – напруга на індуктивності базового контура.

Вважаючи, що напруга на опорі R_0 є напруга електричного сигналу, який збуджує базовий контур і дозволяє працювати без зовнішнього джерела потужності, запишемо, що

$$U_L = \frac{U_{R_0}}{(R + R_L)} \cdot (\omega \cdot L_e), \quad (105)$$

де L_e – еквівалентна індуктивність, що враховує вплив соленоїда в ланцюзі індуктивного навантаження на процеси в базовому контурі.

Підставляючи залежність (105) у вираз (104), одержуємо наступне співвідношення:

$$1 = \frac{1}{Z_S(\omega)} \cdot \frac{R_0}{(R + R_L)} \cdot (\omega \cdot L_3) \cdot \frac{N_2}{N_1}. \quad (106)$$

Вираз (106) при заданих параметрах схеми генератора резонансної електричної енергії, фактично, є алгебраїчним рівнянням щодо опору – R_0 , забезпечуючого подачу напруги тієї ж амплітуди, що і при живленні від зовнішнього джерела потужності.

За допомогою необхідних тотожних перетворень вираз (106) можна перетворити до виду рівняння, зручного в практичних обчисленнях:

$$\left(R_{SH} + \frac{X \cdot R_{S\bar{0}}}{(X + 1)} \right)^2 - \left(X \cdot (\omega \cdot L_e) \cdot \frac{N_2}{N_1} \right)^2 + (\omega \cdot L_H)^2 = 0, \quad (107)$$

де $R_{S\bar{0}} \approx R_1 + R_L$ – сумарний активний опір базового контура,

$R_{SH} = R_H + R_{LH}$ – сумарний активний опір контура індуктивного навантаження,

$X = \left(\frac{R_0}{R_{S\bar{0}}} \right)$ – невідома змінна, $X < 1$.

Отримане рівняння для розрахунку величини опору, за допомогою якого можна реалізувати часткову рекуперацію вихідного сигналу і забезпечити автономну роботу генератора електричної енергії проілюструємо чисельним прикладом.

Приклад розрахунку.

Як початкові дані приведемо раніше розраховані параметри експериментальної моделі джерела електричної енергії для випадку довільного активного навантаження в ланцюзі вторинного індуктивного контура у відсутності електричного зв'язку з базовим контуром для часткової рекуперації сигналу, що генерується.

Дано:

1. Базовий контур:

- число витків в обмотці – $N_1 = 1100$;
- діаметр витків – $d_1 = 0,00035$ м;

- діаметр внутрішньої порожнини – $D = 0,07$ м.
 - робоча частота – $f = 1,5$ МГц, $\omega = 9,425 \cdot 10^6$ Гц;
 - активний опір базового контура, що дорівнює струмообмежуючому резистору зовнішнього джерела потужності – $R_1 = 50$ Ом;
 - сумарний активний опір контура, без урахування – $R_S = R_1 + R_L \approx 132$ Ом;
 - індуктивність обмотки соленоїда – $L \approx L_3 = 0,0136$ Гн;
 - індуктивний опір обмотки – $\omega \cdot L_3 \approx 128258$ Ом.
5. Контур індуктивного навантаження:
- число витків в обмотці – $N_2 \approx 36$;
 - діаметр витків – $d_1 = 0,003$ м;
 - діаметр внутрішньої порожнини приблизно рівний діаметру внутрішньої порожнини соленоїда базового контура – $D = 0,07$ м.
 - активний опір в індуктивному контурі навантаження – $R_n \approx 806,67$ Ом (реально, це може бути лампочка розжарювання на напругу ~ 220 В, потужність ~ 60 Вт);
 - індуктивність обмотки соленоїда – $L_n = 0,0000577$ Гн;
 - індуктивний опір соленоїда – $\omega \cdot L_n \approx 544,42$ Ом;
 - активний опір обмотки соленоїда з урахуванням скін-ефекту – $R_n \approx 0,27$ Ом.
6. Показники дієвості генератора в діючих величинах.
- 3.1. Вхідні дані:
- напруга $\sim 8,48$ В;
 - струм $\sim 0,064$ А;
 - потужність $\sim 0,54$ Вт.
- 3.2. Вихідні дані:
- напруга $\sim 221,414$ В;
 - струм $\sim 0,274$ А;
 - потужність $\sim 60,77$ Вт.
- Обчислення:
- рішення рівняння_(107): $X = 0,24$;

- опір для знімання напруги зворотного зв'язку:
 $R_0 \approx 31,5 \text{ Ом}$;
- активний опір базового контура, що дорівнює струмообмежуючому резистору зовнішнього джерела потужності
– $R_1 = 50 \text{ Ом}$, необхідно зменшити до величини
 $\sim (R_1 - R_0) = 18,5 \text{ Ом}$.

Примітка.

Враховуючи характер обчислень, що ідеалізується, в експериментах з генератором електричної енергії при роботі в автономному режимі необхідне коригування розрахункових величин опору для знімання сигналу – R_0 та, відповідно, струмообмежуючого опору базового контура – R_1 .

Часткова рекуперація за допомогою індуктивного зв'язку.

Принципова реалізація зворотного зв'язку, коли напруга, що подається на вхід базового контура, знімається з обмотки додаткового соленоїда, розміщеного коаксіально поверх базового соленоїда, показана на рис. 33.

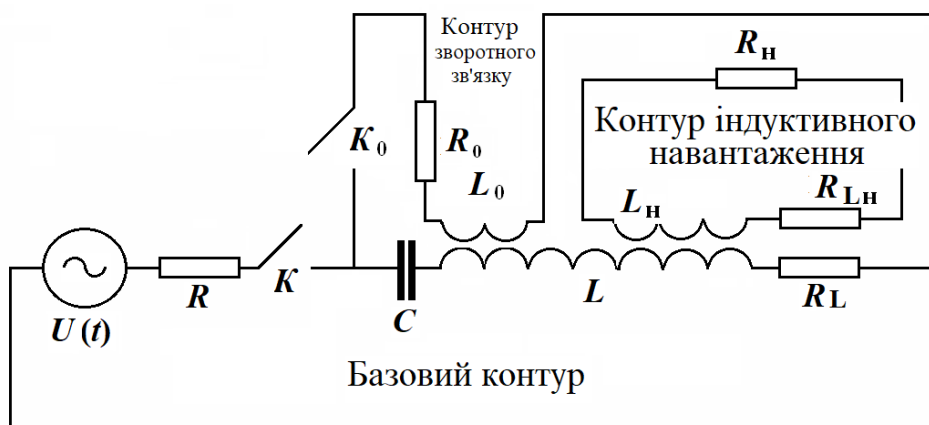


Рис. 33. Принципова схема джерела резонансної енергії з індуктивним зворотним зв'язком

З фізичних міркувань очевидно, що обмотка соленоїда в контурі зворотного зв'язку повинна містити достатньо мале число витків. В цьому випадку його власний опір повинен бути нехтовно малим порівняно зі струмообмежуючим опором – $R_0 = R$, і роботу системи «базовий соленоїд-соленоїд зворотного зв'язку» можна розглядати як роботу звичайного трансформатора в режимі холостого ходу.

Формально, дані якісні міркування можна зафіксувати наступними співвідношеннями:

$$\left\{ \begin{array}{l} N_0 \ll N_1, \\ \sqrt{R_{L0}^2 + (\omega L_0)^2} \ll R_0, \end{array} \right. \quad (108)$$

де N_0 – число витків обмотки соленоїда в контурі зворотного зв'язку,
 N_1 – число витків обмотки соленоїда в базовому контурі,
 $R_{L0}, (\omega \cdot L_0)$ – активний та індуктивний опір обмотки соленоїда в контурі зворотного зв'язку,
 R_0 – струмообмежуючий опір в контурі зворотного зв'язку.

Примітка. Рівність опорів $R_0 = R$ повинна забезпечити еквівалентність протікання електромагнітних процесів в базовому контурі як при живленні зовнішнім джерелом потужності, так і при живленні енергією вихідного сигналу.

Напруга, що збуджується в обмотці соленоїда контура зворотного зв'язку за рахунок індуктивного зв'язку з обмоткою соленоїда базового контура, буде дорівнювати:

$$U_{L0} = U_L \cdot \frac{N_0}{N_1}, \quad (108)$$

де U_L – напруга на обмотці соленоїда базового контура.

В режимі резонансу, коли живляча напруга дорівнює напрузі зворотного зв'язку – U_{L0} , можна записати, що

$$U_L = U_{L0} \cdot Q, \quad (109)$$

де $Q = \left(\frac{\omega \cdot L_e}{R_{S\delta}} \right)$ – добротність базового контура, ω – частота,

L_e – еквівалентна індуктивність базового контура, що враховує вплив інших індуктивностей в схемі генератора,

$R_{S\delta} = R + R_L$ – активний опір базового контура.

Підставляючи (109) в (108), знаходимо необхідне число витків обмотки соленоїда в контурі зворотного зв'язку.

$$N_0 = \frac{N_1}{Q_0}. \quad (110)$$

Приклад розрахунку.

Для чисельної ілюстрації результатів візьмемо необхідні параметри експериментальної моделі джерела електричної енергії для випадку довільного активного навантаження в ланцюзі вторинного індуктивного контура у відсутності рекуперації сигналу, що генерується.

Дано:

1. Базовий контур:

- число витків в обмотці – $N_1 = 1100$;
- робоча частота – $f = 1,5$ МГц, $\omega = 9,425 \cdot 10^6$ Гц;
- активний опір базового контура, що дорівнює струмообмежуючому резистору зовнішнього джерела потужності – $R_1 = 50$ Ом;
сумарний активний опір контура, без урахування – $R_S = R + R_L \approx 132$ Ом;
- індуктивність обмотки соленоїда – $L_e = 0,0136$ Гн;
- індуктивний опір обмотки – $\omega \cdot L_e \approx 128258$ Ом;
- добротність базового контура – $Q \approx 966,6$.

2. Обчислення:

- за допомогою співвідношення (110) визначаємо необхідне число витків обмотки соленоїда в контурі зворотного зв'язку $N_0 = \frac{N_1}{Q_0} = 1,13 \approx 1 \div 2$ витка;
- приймаємо, що $R_0 = R = 50$ Ом.

Примітка. Невизначеність в строгому числі витків обмотки соленоїда контура вторинної обмотки можна нівелювати експериментальним підбором в експериментах з генератором електричної енергії.

Висновки.

1. Запропоновані і теоретично обгрунтовані різні схеми часткової рекуперації вихідного сигналу для роботи джерел резонансної

електричної енергії в автономному режимі без живлення від зовнішнього джерела потужності.

2. Запропоновані схеми припускають або електричний, або індуктивний зворотний зв'язок виходу генератора з входом його базового контура.

- Електричний зворотний зв'язок реалізується за допомогою активного опору, що включається послідовно в ланцюг індуктивного навантаження. Напряга з даного опору подається на вхід базового контура генератора. Недоліком такого типу зворотного зв'язку є можливість взаємного спотворення процесів протікання струмів в контурах схеми за рахунок безпосереднього електричного зв'язку між ними.

- Індуктивний зворотний зв'язок в схемі генератора резонансної електричної енергії реалізується за допомогою додаткового соленоїда (розміщеного коаксіально поверх базового аналогічно соленоїду індуктивного навантаження). Сигнал, індукований в його обмотці, подається на вхід базового контура. Перевагою такого типу зворотного зв'язку є відсутність безпосереднього електричного зв'язку між базовим і навантажним контурами, що виключає взаємне спотворення процесів протікання в них струмів. Вплив електромагнітного зв'язку, як випливає з найпростіших оцінок незначний.

ЗАКЛЮЧЕННЯ

Відповідно до поставлених задач досліджень була отримана аналітична залежність і чисельні оцінки, що дозволяють провести не тільки якісне, але і кількісне осмислення протікаючих фізичних процесів. Отримані результати успішно узгоджуються з основними положеннями, висунутими автором найбільшого винаходу 20-го сторіччя – ВЕЛИКИМ НІКОЛОЮ ТЕСЛА.

Нижче узагальнені висновки по розділах проведених досліджень.

Резонансне збудження трансформатора Тесли.

1. За допомогою математичного апарату теорії електричних ланцюгів проведений аналіз процесів в трансформаторі Тесла.

2. Отримана кількісна оцінка зв'язку добротності вторинного контура зі збуджуваною напругою, відповідно якісному прогнозу Ніколи Тесли.

3. Показано, що при резонансі у вторинній обмотці збуджується е.р.с., що набагато перевищує величину обумовлену індуктивним зв'язком обмоток трансформатора (у рази, пропорційні значенню добротності вторинного контура).

4. Інтегральний коефіцієнт перетворення за напругою дорівнює добутку коефіцієнта трансформації за рахунок індуктивного зв'язку обмоток на добротність вторинного контура.

5. Основним результатом аналізу і обчислень є твердження: явище резонансу – це «ключ» до енергії навколишнього простору.

Джерело електричної енергії трьох індуктивно зв'язаних резонансних контурів на базі трансформатора Тесли.

1. Запропонована схема індуктивного знімання енергії з вторинної обмотки трансформатора Тесли за допомогою резонансного третього контура з паралельних індуктивності (з послідовним активним опором) і ємності.

2. Показано, що настройка в резонанс всіх складових елементної бази джерела електричної енергії (первинного, вторинного і третього контурів) дозволяє ефективно видалення енергії з навколишнього простору.

3. Отримано, що коефіцієнт перетворення напруги в джерелі з трьома індуктивно зв'язаними резонансними контурами, визначений як відношення початкового вхідного і результуючого вихідного сиг-

налів, який прямо пропорційний добутку добротностей вторинного і третього контурів, що набагато більше добутку коефіцієнтів індуктивного зв'язку між контурами в схемі джерела електричної енергії з навколишнього простору.

Збудження первинного контура трансформатора Тесли періодичною послідовністю струмових імпульсів.

1. Аналіз спектрального складу періодичної послідовності імпульсів різної тривалості показав, що її збільшення знижує амплітуди вищих гармонік і, відповідно, їх внесок у формування часової залежності збуджуючого струму.

2. Розрахунки функцій, що описують фазову залежність збуджуваних напруг і струмів в резонансі, коли частота проходження імпульсів струму на вході в первинний контур співпадає з його власною частотою, виявили наступні закономірності.

2.1. Незалежно від тривалості імпульсів струму на вході в досліджувану резонансну структуру в її контурі збуджуються гармонічні сигнали (напряга і струм) з частотою, що дорівнює власній частоті резонансної структури.

2.2. Фазова залежність збуджуваних сигналів описується гармонічними функціями з рівними амплітудами. Вплив вищих гармонік спектру збуджуючого струму є нікчемно малим і складає $\sim 6\%$ від максимуму першої резонансної гармоніки.

2.3. Резонансне збудження вихідної напруги первинного контура з амплітудою ~ 1 В забезпечується достатньо малим струмом ~ 56 мА.

3. Збудження резонансної структури періодичною послідовністю прямокутних імпульсів з частотою проходження, яка дорівнює її власній частоті, показало достатньо високу ефективність даного способу її запуску.

Оцінки параметрів джерела енергії на базі трансформатора Тесли з первинним контуром в резонансі струмів.

1. Узагальнені і зведені воедино результати проведених досліджень.

2. Запропонована схема практичного виконання модельного варіанту джерела енергії на базі трансформатора Тесли.

3. Сформульовані основні положення для проектування реальної конструкції моделі джерела енергії з навколишнього простору.

4. Отримані конкретні чисельні оцінки вхідних і вихідних параметрів запропонованої схеми модельного варіанту джерела енергії, так при вихідній потужності первинного задаючого контура потужність сигналу на виході джерела повинна складати ~ 72 Вт.

Збудження контурів з реактивними елементами періодичними послідовностями імпульсів напруги.

1. В елементах резонансних контурів будь-якого вигляду (як з паралельними, так і послідовними реактивними елементами) збуджуються гармонічні струм і напруга з частотою власних коливань контурів.

2. Амплітуда резонансної напруги на реактивних елементах контурів будь-якого вигляду в істотній мірі залежить від тривалості імпульсів напруги джерела потужності. Максимум сигналу досягається при тривалості імпульсу напруги джерела, який дорівнює половині періоду їх повторення в послідовності.

3. В режимі резонансу струмів в схемі з паралельними індуктивністю і ємністю величина максимуму на напруги індуктивності щодо амплітуди збуджуючого сигналу складає $\sim \frac{2}{\pi}$, тобто то

$$U_{L \max} = \frac{2}{\pi} \cdot U_m.$$

4. В режимі резонансу напруг в схемі з послідовних резистора, індуктивності і ємності амплітуда збуджуваного сигналу пропорційна добротності контура або відношенню хвильового його опору і опору резистора.

5. Схема з резонансом напруг може працювати не тільки як первинний контур трансформатора Тесли, але і як підсилювач або трансформатор напруги з коефіцієнтом посилення або трансформації, пропорційним відношенню хвильового і активного опору схеми, що можна інтерпретувати як аналог відношення числа витків у відомій схемі трансформатора напруги.

6. На відміну від перетворювачів, де індуктивний зв'язок між обмотками дозволяє трансформацію напруг або струмів при збереженні передаваної потужності, схема з послідовними активним опором, індуктивністю і ємністю в режимі резонансу дозволяє реалізувати набагато більш ефективну трансформацію не тільки напруги, але і потужності, що у принципі неможливо в системах з індукційними ефектами.

7. Гіпотетично, відзначений ефект посилення сигналу в режимі резонансу напруг можна пояснити явищем резонансу, відкриваючому доступ до електричної енергії навколишнього простору.

Принципова схема джерела електричної енергії на базі контура в резонансі напруг.

1. Простотою технічної реалізації обґрунтована доцільність використання резонансу напруг в схемі джерела «резонансної» енергії.

2. Проаналізовані процеси при різних способах підключення навантаження: подача вихідної напруги безпосередньо в навантаження і підключенні навантаження через індуктивний зв'язок у вигляді вторинної обмотки повітряного трансформатора.

2.1. При безпосередньому підключенні навантаження

а) працездатність генератора вимагає значного перевищення опору навантаження над вихідним опором генератора;

б) знімання сигналу можливе або тільки з індуктивності, або з двох реактивних елементів одночасно, в другому випадку споживана потужність збільшується удвічі;

в) перелік допустимих навантажень і величина коефіцієнта посилення потужності обмежені вимогою до опору навантаження.

2.2. При індуктивному підключенні навантаження

а) працездатність генератора не вимагає яких-небудь обмежень на опір навантаження;

б) значно збільшується величина споживаної потужності і розширяється перелік допустимих навантажень;

в) гранична величина споживаної потужності обмежена величиною вихідної потужності генератора;

г) слід враховувати залежність вихідних показників від параметрів електричної схеми генератора.

Примечание. Під «індуктивним підключенням» мається на увазі система типу повітряного трансформатора, первинна обмотка якого – це індуктивність (соленоїд) резонансного контура, а його вторинна обмотка служить для підключення навантаження.

2.3. При будь-якому способі підключення навантажень можлива автономна робота генератора при відключеному зовнішньому джерелі потужності. Автономія забезпечується зворотним зв'язком,

що подає частину вихідного сигналу на вхід схеми генератора «резонансної електричної енергії».

2.4. Запропоновані і теоретично обґрунтовані схеми часткової рекуперації вихідного сигналу для роботи джерел резонансної електричної енергії в автономному режимі без живлення від зовнішнього джерела потужності.

2.5. Запропоновані схеми припускають або електричний, або індуктивний зворотний зв'язок виходу генератора з входом його базового контура.

- Електричний зворотний зв'язок реалізується за допомогою активного опору, що включається послідовно в ланцюг індуктивного навантаження. Напруга з даного опору подається на вхід базового контура генератора. Недоліком такого типу зворотного зв'язку є можливість взаємного спотворення процесів протікання струмів в контурах схеми за рахунок безпосереднього електричного зв'язку між ними.

- Індуктивний зворотний зв'язок реалізується за допомогою додаткового соленоїда в схемі генератора резонансної електричної енергії. Сигнал, індукований в його обмотці, подається на вхід базового контура. Перевагою такого типу зворотного зв'язку є відсутність безпосереднього електричного зв'язку між базовим контуром і контуром навантаженням, що виключає взаємне спотворення процесів протікання в них струмів. Вплив електромагнітного зв'язку, як випливає з найпростіших оцінок є незначним.

Закінчуючи виклад основних результатів проведених досліджень, ще раз підкреслимо засадну думку, що ініціювала їх проведення.

«Ймовірно, саме при резонансі відкривається доступ до електричної енергії навколишнього простору. Вперше це зрозумів, використав і в цьому полягає секрет винаходів **ВЕЛИКОГО НІКОЛИ ТЕСЛА!**»

ЛІТЕРАТУРА

1. Тесла, Н. (2003). *Лекции и статьи*. Москва: Tesla Print.
2. Яворский, В. (1998). Энергия из ниоткуда. *Наука и жизнь*, 10, 78–79.
3. Lindemann, P., (2000). *The Free Energy Secrets of Cold Electricity*. Publishing House: Clear Tech Inc.
4. Эткин, В. А. (2008). *Энергодинамика (синтез теорий переноса и преобразования энергии)*. СПб: Наука.
5. Эткин, В. А. (2010). О потенциале и движущей силе лучистого энергообмена. *Вестник Дома Учёных Хайфы*, 2, 2–6.
6. Ацюковский, В. А. (2001). *Физические основы электромагнетизма и электромагнитных явлений. Эфиродинамическая интерпретация*. Москва: Эдиториал.
7. Ацюковский, В. А. (2004). *Трансформатор Тесла: энергия из эфира*. Жуковский: ООО «Петит».
8. Кондрашов, А. А. о трансформаторе Тесла (<http://truba.com/video/199866/>)
9. Катаргин, Р. К. Наследие Теслы (http://forum.lah.ru/_fr/21/Tesla-Kap.pdf)
10. Дудышев, В. Д., Трансформатор Тесла в качестве источника дармовой электроэнергии (<http://www.energy21.ru>)
11. Яворский, Б. М., Детлаф, А. А., Лебедев, А. К. (2006). *Справочник по физике для инженеров и студентов ВУЗов*. Москва: «Оникс».
12. Атабеков, Г. И., (1969). *Основы теории цепей*. Москва: Энергия.

13. Корн, Г., Корн, Т., (1973). *Справочник по математике*. Москва: «Наука».

14. Батыгин, Ю. В., Лавинский, В. И. (2005). Особенности магнитно-импульсной "раздачи" тонкостенных трубчатых заготовок. *Электричество*, 11, 62–68.

ЗМІСТ

ВВЕДЕННЯ.....	3
РОЗДІЛ 1. КОРОТКИЙ ОГЛЯД, ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ДОСЛІДЖЕННЯ.....	5
РОЗДІЛ 2. ТРАНСФОРМАТОР ТЕСЛА, ТЕОРІЯ, ЧИСЕЛЬНІ ОЦІНКИ.....	10
2.1. Резонансне збудження вторинного контура	10
2.2. Вихідна напруга залежно від частоти задаючого струму	16
2.3. Джерело електричної енергії з індуктивно зв'язаними резонансними контурами.....	23
2.4. Збудження первинного контура імпульсами струму	32
2.5. Оцінки параметрів джерела енергії на базі трансформатора Тесли.....	42
2.6. Можливі принципові схеми джерел енергії з трансформатором Тесли.....	50
РОЗДІЛ 3. ЗБУДЖЕННЯ КОНТУРІВ З РЕАКТИВНИМИ ЕЛЕМЕНТАМИ ІМПУЛЬСАМИ НАПРУГИ.....	54
3.1. Резонансний контур с паралельними індуктивністю та ємністю.....	55
3.2. Резонансний контур з послідовно включеними резистором, інду- ктивністю і ємністю	60
3.3. Амплітудно-частотна залежність вихідної напруги в контурі з послідовними активно-реактивними елементами.....	66
3.4. Контури з послідовними активно-реактивними елементами в схемах джерел резонансної енергії	75
3.5. Активне навантаження джерела резонансної енергії на базі кон- тура з послідовними RLC – елементами	79
3.6. Індуктивне навантаження джерела резонансної енергії на базі ко- нтура з послідовними RLC –елементами	84
3.7. Принципові можливості роботи джерела електричної енергії в автономному режимі	98
ЗАКЛЮЧЕННЯ.....	108
ЛІТЕРАТУРА.....	113
ДОДАТКИ.....	116

ДОДАТКИ

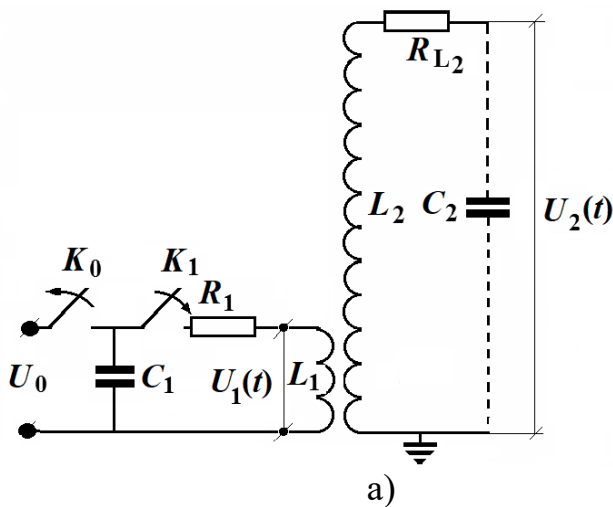
Представлений матеріал включає раніше описані схеми джерел енергії з трансформатором Тесла (розділ 2.6). Даний повтор дозволяє в порівнянні відтінити особливості інших варіантів виконання джерел енергії, принцип дії яких також заснований на резонансних явищах в електричних ланцюгах з активно-реактивними елементами.

Додаток 1. Схеми джерел енергії з трансформатором Тесли.

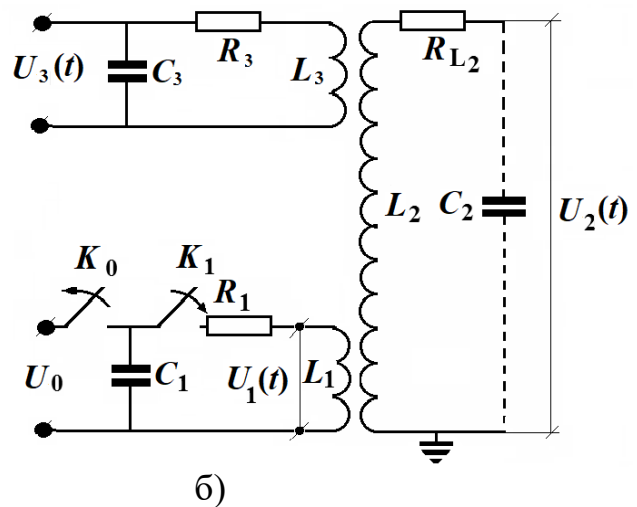
1.1. Вторинна обмотка «не замкнена». Первинний та вторинний контури в режимі «резонансу струмів». Принципові оцінки.

Вхідна напруга – гармонічний сигнал:

$$U_1(t) = U_{1m} \cdot \sin(\omega_0 \cdot t), \quad \omega_0 = 1 / \sqrt{L_1 \cdot C_1}.$$



а)



б)

Трансформатор Тесли:

а) вихідний варіант;

б) з індуктивним зніманням енергії, що генерується

Вихідні напруги (відповідно схемам):

$$U_2(t) \approx U_{2m} \cdot \cos(\omega_0 \cdot t);$$

$$U_{2m} \approx U_{1m} \cdot K_{1-2};$$

$$U_3(t) \approx U_{3m} \cdot \sin(\omega_0 \cdot t);$$

$$U_{3m} \approx U_{1m} \cdot K_{2-3}.$$

Коефіцієнти посилення (перетворення):

$$K_{1-2} \approx (k_{1-2} \cdot Q_2); \quad K_{2-3} \approx K_{1-2} \cdot \left(\frac{k_{2-3} \cdot Q_3}{2} \right).$$

Коефіцієнти трансформації (за рахунок індуктивного зв'язку):

k_{1-2} – зв'язок – L_{1-2} ,

k_{2-3} – зв'язок – L_{2-3} .

Добротності та хвильові опори контурів:

$$Q_2 = \left(\frac{\omega_0 \cdot L_2}{R_2} \right) = \frac{Z_2}{R_2}, \quad Z_2 = \sqrt{\frac{L_2}{C_2}}; \quad Q_3 = \left(\frac{\omega_0 \cdot L_3}{R_3} \right) = \frac{Z_3}{R_3}, \quad Z_3 = \sqrt{\frac{L_3}{C_3}}.$$

Чисельні оцінки:

Параметри «RLC» контурів (згідно рекомендаціям Н. Тесли):

1. $\omega_1 = 6$.

2. $\omega_2 \approx 1061$.

3. $\omega_3 = 6$.

Резонансна робоча частота – $f_1 = 300$ кГц.

$K_{1-2} \approx 11476$ ($k_{1-2} \approx 14$)

$K_{2-3} \approx 13173$ ($k_{2-3} \approx 1/14$)

Амплітуда вхідної напруги: $U_{1m} = 1,0$ В.

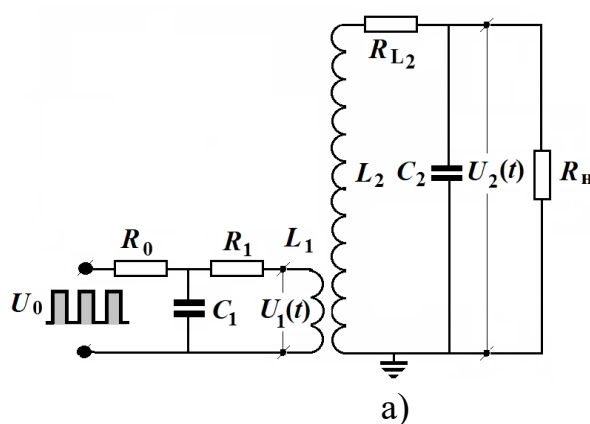
Амплітуди вихідної напруги:

$U_{2m} \approx 11476$ В.

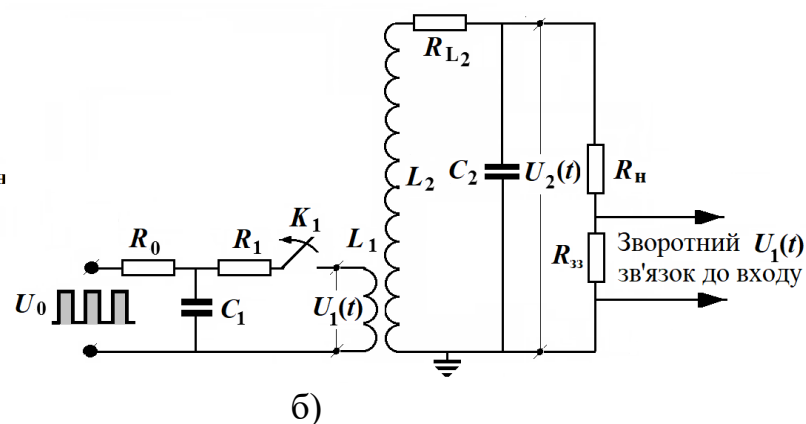
$U_{3m} \approx 13173$ В.

1.2. Вторинна обмотка «замкнена».

Первинний і вторинний контури в режимі «резонансу струмів».



а)



б)

Трансформатор Тесли:

а) з безпосереднім зніманням енергії, що генерується;

б) зі зворотним зв'язком для роботи в автономному режимі.

ЗАГАЛЬНЕ в представлених схемах:

- вхідна напруга – U_0 – послідовність імпульсів з частотою проходження, яка дорівнює резонансній частоті контура « $R_1L_1C_1$ », генерує гармонічний сигнал:

$$U_1(t) = U_{1m} \cdot \sin(\omega_0 \cdot t), \omega_0 = 1 / \sqrt{L_1 \cdot C_1};$$

- резонанс струмів в контурі « $R_2L_2C_2$ » приводить до протікання струму – $J_2(t)$ в активному опорі навантаження – R_H під дією напруги, що генерується – $U_2(t)$, амплітуда струму в навантаженні – $J_{2m} = \frac{U_{2m}}{R_H}$;

$$U_{2m} \approx U_{1m} \cdot K_{1-2};$$

$K_{1-2} \approx (k_{1-2} \cdot Q_2)$ – коефіцієнт посилення,

k_{1-2} – коефіцієнт трансформації: L_{1-2} ,

$$Q_2 = \left(\frac{\omega_0 \cdot L_2}{R_2} \right) = \frac{Z_2}{R_2} \text{ – добротність,}$$

$$Z_2 = \sqrt{\frac{L_2}{C_2}} \text{ – хвильовий опір.}$$

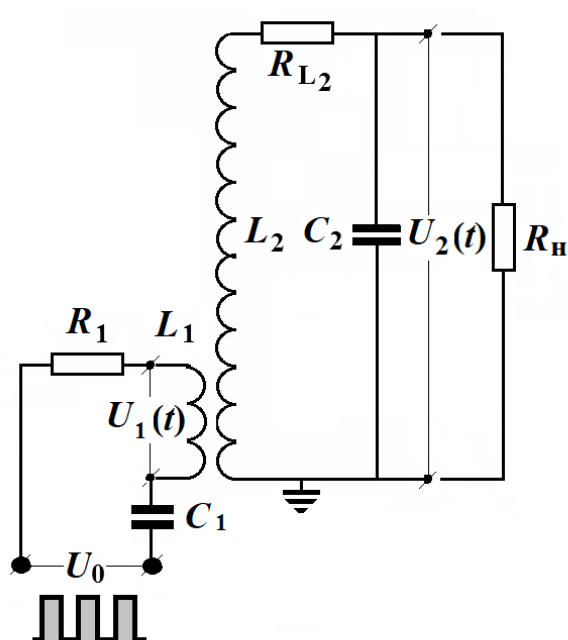
ВІДМІННОСТІ схеми зі зворотним зв'язком:

- наявність зворотного зв'язку в схемі джерела енергії (рис. 18б) означає подачу частини гармонічного сигналу, що генерується, на вхід первинної обмотки – $U_1(t)$;
- включення зворотного зв'язку повинне дозволити роботу генератора електричної енергії в автономному режимі при відключеному зовнішньому джерелі потужності;

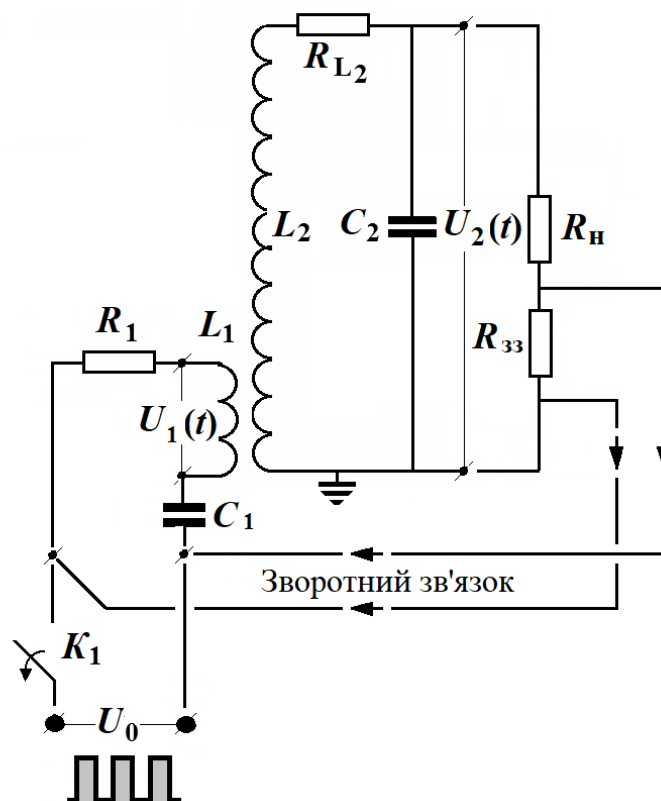
джерело потужності за наявності зворотного зв'язку необхідне виключно для запуску схеми, після чого генератор повинен працювати на енергії із зовнішнього простору.

1.3. Вторинна обмотка «замкнена».

Первинний контур в режимі «резонансу напруг»,
вторинний – в режимі «резонансу струмів».



Трансформатор Тесли
з безпосереднім
зніманням енергії,
що генерується



Трансформатор Тесли
зі зворотним зв'язком
для роботи в автономному
режимі

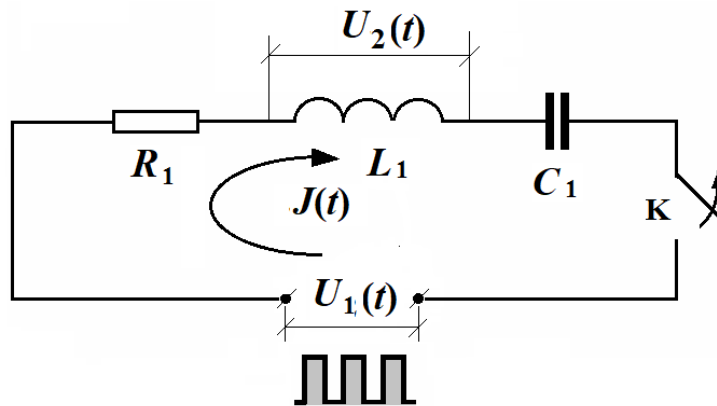
«Резонанс напруг» в первинному контурі, особливості:

- В найпростішому варіанті виконання первинний контур містить ланцюг послідовно з'єднаних елементів « $R_1L_1C_1$ », на вхід якого подається періодична послідовність імпульсів напруги зовнішнього джерела з амплітудою – U_0 .
- При «резонансі напруг» в контурі збуджується гармонічний сигнал з частотою, рівній частоті проходження імпульсів напруги зовнішнього джерела.
- Індуктивність контура є первинною обмоткою, напруга на індуктивності є первинною напругою трансформатора Тесли.

- Величина первинної напруги пропорційна вхідній напрузі зовнішнього джерела, $U_1 \sim Q_1 \cdot U_0$, де коефіцієнт пропорційності рівний добротності первинного контура $Q_1 = \frac{Z_1}{R_1}$, $Z_1 = \sqrt{\frac{L_1}{C_1}}$ – хвильовий опір.
- При заданих реактивностях, що забезпечують явище резонансу, амплітуда первинної напруги може регулюватися варіацією величини активного опору контура.
- Включення зворотного зв'язку з виходу трансформатора Тесла дозволить генератору електричної енергії в резонансному контурі працювати в автономному режимі при відключеному зовнішньому джерелі потужності.

Додаток 2. Схеми джерел енергії на базі контура з послідовно з'єднаними елементами «RLC» в режимі резонансу напруг.

2.1. Принципові можливості, чисельні оцінки.



Вхідна напруга:

періодична послідовність прямокутних імпульсів – $U_1(t)$ з амплітудою $-U_{1m}$ та частотою проходження, що дорівнює власній частоті контура, що забезпечує «резонанс напруг» в схемі.

Вихідна напруга:

$$U_2(t) \approx U_{2m} \cdot \sin(\omega_0 \cdot t);$$

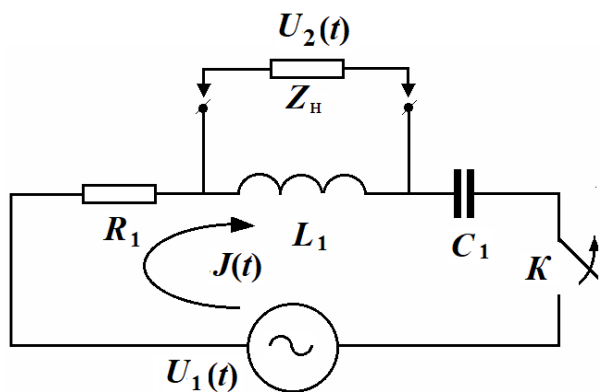
$$U_{2m} \approx \frac{2}{\pi} \cdot U_{1m} \cdot Q_1, \quad Q_1 - \text{добротність контура};$$

$$Q_1 = \left(\frac{\omega_0 \cdot L_1}{R_1} \right) = \frac{Z_1}{R_1}, Z_1 = \sqrt{\frac{L_1}{C_1}} - \text{хвильовий опір.}$$

Кількісні показники:

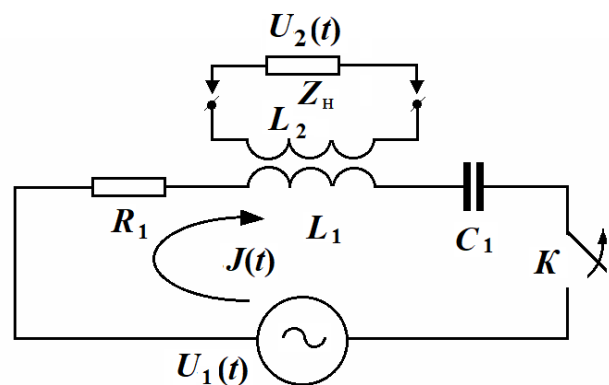
- резонансна робоча частота – $f_1 = 100$ кГц;
- параметри контура:
число витків – $n_{L_1} = 250$, індуктивність $L_1 = 0,000154$ Гн,
ємність – $C_1 = 1,64 \cdot 10^{-8}$ Ф, активний опір – $R_1 = R_{L_1} \approx 0,65$ Ом,
хвильовий опір – $Z_1 \approx 96,89$ Ом, добротність – $Q_1 = \frac{Z_1}{R_1} \approx 149,5$;
- коефіцієнт посилення: $K_1 = \frac{2}{\pi} \cdot Q_1 \approx 95,14$;
- параметри вхідного сигналу: $U_{ex} = 2,55$ В, $P_{ex} = 10$ Вт;
- параметри вихідного сигналу: $U_{вих} = 242,26$ В, $P_{вих} = 951,43$ Вт.

2.2 Ілюстрації можливих способів знімання «резонансної електричної енергії», що генерується.



Безпосереднє знімання енергії
в навантаження,
умова дієвості:

$$Z_H \ll (\omega_0 \cdot L_1) \Rightarrow Z_H \approx 0,01 \cdot (\omega_0 \cdot L_1)$$



Знімання енергії через
індуктивний зв'язок
(ВЧ трансформатор),
умова дієвості:

резонансна частота – $\omega_0 = 1 / \sqrt{L_T \cdot C_1}$,
 L_T – індуктивність ВЧ трансформатора

2.3. Ілюстрації способів знімання «резонансної» електричної енергії з включенням зворотного зв'язку, що забезпечує автономну роботу при відключеному зовнішньому джерелі потужності.

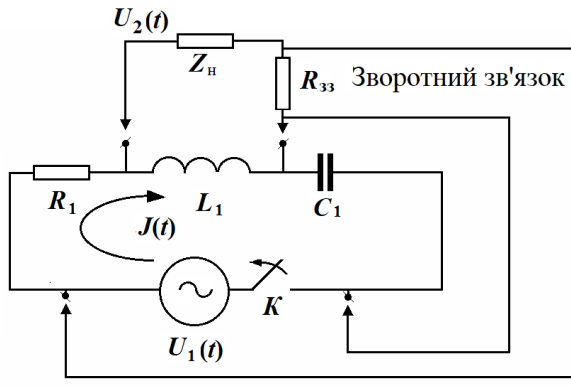


Рис. 26 Безпосереднє знімання енергії в навантаження зворотний зв'язок реалізується зніманням сигналу з додаткового резистора, що включається послідовно з навантаженням

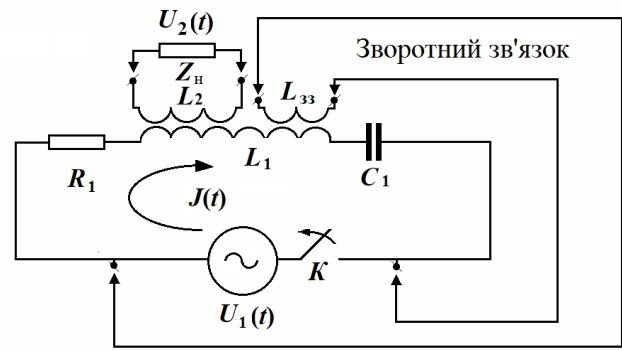


Рис. 27 Знімання енергії через індуктивний зв'язок (ВЧ трансформатор) зворотний зв'язок реалізується зніманням сигналу з додаткової обмотки ВЧ трансформатора

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРА

Шиндерук Світлана Олександрівна – кандидат технічних наук за спеціальністю 05.22.20 – «Експлуатація та ремонт засобів транспорту», доцент кафедри фізики, науковий співробітник Лабораторії електромагнітних технологій Харківського національного автомобільно-дорожнього університету, Україна.

Основний напрямок наукової діяльності – вирішення теоретичних та практичних завдань:

- вдосконалення технічних засобів магнітно-імпульсного рихтування у новому науковому напрямку магнітно-імпульсної обробки металів (деформування листових ферромагнетиків з використанням індукторних систем з притягуючим екраном);
- дослідження резонансних ефектів в електротехнічних та електромагнітних системах, спрямованих на створення принципово нових підсилювачів електричної реактивної потужності.

В даний час число опублікованих робіт – понад 65 наукових публікацій, з них 55 опубліковано у вітчизняних і міжнародних рецензованих фахових виданнях, у т.ч. 7 у періодичних виданнях, що включені до наукометричної бази даних Web of Science та Scopus, 13 патентів на корисну модель.

Шиндерук Светлана Александровна – кандидат технических наук по специальности 05.22.20 – «Эксплуатация и ремонт средств транспорта», доцент кафедры физики, научный сотрудник Лаборатории электромагнитных технологий Харьковского национального автомобильно-дорожного университета, Украина.

Основное направление научной деятельности – решение теоретических и практических задач:

- совершенствование технических средств магнитно-импульсной рихтовки в новом научном направлении магнитно-импульсной обработки металлов (деформирование листовых ферромагнетиков с использованием индукторных систем с притягивающим экраном);
- исследование резонансных эффектов в электротехнических и электромагнитных системах, направленных на создание принципиально новых усилителей электрической реактивной мощности.

В данный момент число опубликованных работ – более 65 научных публикаций, из них 55 опубликовано в отечественных и международных рецензированных специализированных изданиях, в т.ч. 7 в периодических изданиях, которые включены в наукометрические базы данных Web of Science и Scopus, 13 патентов на полезную модель.

Наукове видання

ШИНДЕРУК Світлана Олександрівна

**ДЖЕРЕЛА ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ
НА ОСНОВІ РЕЗОНАНСНИХ КОНТУРІВ**

(українською мовою)

Монографія

В авторській редакції

Формат 60x84/16. Ум. друк. арк. 7,21. Тир. 100 прим. Зам. 785-20.

Видавець та виготовлювач ФОП Бровін О.В.
61022, м. Харків, вул. Трінклера, 2, корпус 1, к.19. Т. (057) 758-01-08, (066) 822-71-30
Свідоцтво про внесення суб'єкта до Державного реєстру
видавців та виготовників видавничої продукції серія ДК 3587 від 23.03.09 р.

СТИЛЬ [®]
ИЗДАТ
г о т о в л я є м о
www.stil-izdat.com