

# МЭТОДЫКА ВЫКЛАДАННЯ

## МЕТОДЫКА ВЫКЛАДАННЯ ФІЗІКІ

Вестці БДПУ. Серыя 3. 2024. № 2. С. 10–15

УДК 537.8:519.87

UDC 537.8:519.87

### МЕТОДЫКА ВЫКАРЫСТАННЯ МАТЭМАТЫЧНАЙ МАДЭЛІ ФІЗІЧНЫХ ПРАЦЭСАЎ У LC-КОНТУРЫ

### THE METHOD OF USING THE MATHEMATICAL MODEL OF PHYSICAL PROCESSES IN LC-CIRCUITS

**А. А. Луцэвіч,**

*дацэнт кафедры агульнай  
і медыцынскай фізікі Міжнароднага  
дзяржаўнага экалагічнага інстытута  
імя А. Д. Сахарова Беларускага  
дзяржаўнага ўніверсітэта, кандыдат  
педагагічных навук, дацэнт*

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8653-8711>;

**С. У. Якавенка,**

*дацэнт кафедры фізікі і методыкі  
выкладання фізікі Беларускага  
дзяржаўнага педагагічнага ўніверсітэта  
імя Максіма Танка, кандыдат  
педагагічных навук, дацэнт*

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3175-9138>

**A. Lutsevich,**

*associate professor of the Department  
of General and Medical Physics of the  
International State Environmental Institute  
named after A. D. Sakharov Belarusian  
State University, candidate of pedagogical  
sciences, associate professor*

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8653-8711>;

**S. Yakovenko,**

*associate professor of the Department  
of Physics and Methods of Teaching Physics  
of the Belarusian State Pedagogical University  
named after Maxim Tank, candidate of  
pedagogical sciences, associate professor*

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3175-9138>

Паступіў у рэдакцыю 17.11.2023.

Received on 17.11.2023.

Артыкул прысвечаны аналізу фізічных працэсаў, якія адбываюцца ў вагальным контуры пры ўзнікненні ў ім электрамагнітных ваганьняў. Разгледжаны фізічны сэнс асноўных паняццяў тэмы «Электрамагнітныя ваганні і хвалі». Раскрыта макраструктура дзейнасці вучняў па рашэнні тыповых вучэбных задач па тэме, прыведзены канкрэтныя прыклады рашэння.

*Ключавыя словы:* вагальны контур, электрамагнітныя ваганні, кандэнсатар, шпуля індуктыўнасці, цыклічная частата, перыяд ваганьняў, дабротнасць контуру, максімальныя значэнні зараду, сілы току і напружання.

The article is devoted to the analysis of physical processes that occur in an oscillatory circuit when electromagnetic oscillations occur in it. The physical meaning of the basic concepts of the topic Electromagnetic oscillations and waves is considered. The macrostructure of students' activity in solving typical educational problems on the topic is revealed, specific examples of the solution are given.

*Keywords:* oscillatory circuit, electromagnetic oscillations, capacitor, inductor, cyclic frequency, oscillation period, quality factor of the circuit, maximum values of charge, current and voltage.

**Уводзіны.** Вучэбнай праграмай па фізіцы для XI класа ўстаноў агульнай сярэдняй адукацыі на вывучэнне раздзела «Ваганні і хвалі», які складаецца з чатырох тэм, прагледжана 46 гадзін на базавым узроўні і 95 гадзін на павышаным узроўні. Перад тым як прыступіць да вывучэння матэрыялу тэмы «Электрамагнітныя ваганні і хвалі», навучэнцы павінны засвоіць і навучыцца

прымяняць асноўныя паняцці, заканамернасці, матэматычныя мадэлі і формулы, якія даюць магчымасць колькасна апісаць працэсы ў механічных вагальных сістэмах.

Згодна з асноўнымі патрабаваннямі да вынікаў вучэбнай дзейнасці пасля вывучэння тэмы «Электрамагнітныя ваганні і хвалі» навучэнцы павінны: ведаць і разумець фізічны сэнс асноўных паняццяў тэмы (LC-контур,

электрамагнітныя ваганні, пераменны электрычны ток) і іх фізічных характарыстык; умець рашаць якасныя, графічныя, разліковыя задачы па тэме, выкарыстоўваючы формулы залежнасці зараду і сілы току ў ідэальным LC-контур ад часу, формулу Томсана, формулы: для разліку энергіі электрамагнітных ваганняў, дзеючых значэнняў сілы току і напружання, даўжыні і частоты электрамагнітнай хвалі [1].

У вучэбным дапаможніку па фізіцы [2] для 11 класа прыведзеныя вышэй пытанні падрабязна разгледжаны з апорай на веды і ўменні, атрыманыя вучнямі раней. Так, напрыклад, формула Томсана атрымана на аснове сцвярджэння, што працэсы, якія адбываюцца ў вагальным контур, аналагічныя ваганням спружыннага маятніка пры адсутнасці трэння: аналагам каардынаты пры ваганнях спружыннага маятніка з'яўляецца зарад кандэнсатара, аналагам праекцыі скорасці грузу – сіла току ў вагальным контур і г. д.

З мэтай фарміравання ў навучэнцаў працэдур самастойнай пазнавальнай дзейнасці, вопыту прымянення навуковых метадаў пазнання, развіцця ўмення бачыць некалькі варыянтаў рашэнняў праблемы прывядзём вынікі аналізу фізічных працэсаў у вагальным контур (LC-контур), да якіх неабходна падвесці навучэнцаў, выкарыстоўваючы даступны ім матэматычны апарат [3; 5].

1. LC-контур называюць электрычны ланцуг, у склад якога ўваходзяць паслядоўна злучаныя кандэнсатар і шпуля індуктыўнасці. Вагальны контур, актыўнае супраціўленне якога можна прыняць роўным нулю, называюць ідэальным. Стан устойлівай раўнавагі LC-контур як вагальнай сістэмы адпавядае мінімуму патэнцыяльнай энергіі ( $q = 0$ ). Сістэма самаадвольна вяртаецца ў гэты стан (зарад кандэнсатара) і праходзіць яго па інерцыі дзякуючы з'яве самаіндукцыі. Менавіта таму ў контур могуць існаваць электрамагнітныя ваганні.
2. Змяненні сілы току ў контур абумоўлены існаваннем двух палёў: патэнцыяльнага электростатычнага поля кандэнсатара і віхравога электрычнага поля шпулі. Прычым змены гэтых палёў адбываюцца так, што ў любы момант часу модулі іх напружанасцей аднолькавыя, а напрамкі процілеглыя. Калі б гэта ўмова не выкон-

валася, то з прычыны роўнасці нулю актыўнага супраціўлення контур, ток у ім узрасаў бы неабмежавана (што супярэчыць закону захавання энергіі).

3. Поўная энергія ідэальнага LC-контур, у працэсе ваганняў захоўваецца:  $W(t) = W_{\text{мех}} + U + W_{\text{эм}}(t) = \text{const}$ . Калі ўлічыць, што электрамагнітныя ваганні ў ідэальным контур не суправаджаюцца змяненнямі яго механічнай і ўнутранай энергіі, то ў адвольны момант часу электрамагнітная энергія  $W_{\text{эм}}(t)$  ідэальнага LC-контур:

$$W_{\text{эм}}(t) = \frac{q^2(t)}{2C} + \frac{LI^2(t)}{2} = \frac{(q_0^2)}{2C} + \frac{(LI_0^2)}{2} = \text{const}.$$

4. Цыклічная частата  $\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}$  і перыяд  $T = 2\pi\sqrt{LC}$  уласных электрамагнітных ваганняў у LC-контур не залежаць ад таго, якім спосабам контур атрымаў першапачатковы запас энергіі, і вызначаюцца толькі электраёмнасцю  $C$  кандэнсатара і індуктыўнасцю  $L$  шпулі.
5. Максімальныя значэнні зараду кандэнсатара і сілы току ў шпулі вызначаюцца першапачатковым запасам энергіі, перададзенай контур. Значэнні гэтых велічынь звязаны  $q_0 = \frac{I_0}{\omega} = I_0\sqrt{LC}$ . Калі ўлічыць, што па азначэнні  $C = \frac{q_0}{U_0}$ , максімальнае значэнне напружання на кандэнсатары  $U_0 = \frac{I_0}{\omega_c} = I_0\sqrt{\frac{L}{C}}$ .
6. Ваганні ў рэальным контур суправаджаюцца незваротнымі стратамі энергіі, атрыманай ім ад знешняй крыніцы энергіі (напрыклад у выніку зарадкі кандэнсатара ад крыніцы току), якія абумоўлены: награваннем праваднікоў, паколькі актыўнае супраціўленне рэальнага контур не роўна нулю; выпраменьваннем электрамагнітных хваль, перапалярызацыяй дыэлектрыка, які знаходзіцца паміж абкладкамі кандэнсатара, і перамагнічваннем стрыжня шпулі. Таму ўласныя ваганні ў рэальным контур з'яўляюцца затухаючымі.
7. Тэарэтычны разлік паказвае, што цыклічная частата ўласных электрамагнітных ваганняў у рэальным контур, актыўнае супраціўленне якога роўна  $R$ , вызначаецца па формуле  $\omega = \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}}$ . З гэтай формулы вынікае, што калі  $\frac{R^2}{4L^2} = \frac{1}{LC}$ ,

то цыклічная частата становіцца роўнай нулю, а перыяд ваганняў бясконца вялікім. Гэта азначае, што калі актыўнае супраціўленне контуру  $R \geq \sqrt{\frac{4L}{C}}$ , то ваганні ў контуры не ўзнікаюць, бо ўся энергія, назапашаная ў кандэнсатары, расейваецца пры адным яго разрадзе. Супраціўленне контуру, пры якім вагальны працэс пераходзіць у аперыядычны, называюць крытычным, гэта значыць  $R_k \geq 2\sqrt{\frac{L}{C}}$ , дзе  $\sqrt{\frac{L}{C}}$  – хвалевае супраціўленне контуру. Адносіна хвалевага супраціўлення контуру да яго актыўнага супраціўлення называецца дабротнасцю  $Q$  гэтага контуру:  $Q = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}}$ . Чым большая дабротнасць контуру, тым павольней ідзе ў ім працэс затухання электрамагнітных ваганняў.

8. Паколькі асноўным відам страт энергіі ў контуры з'яўляюцца цеплавыя, то затуханне можна не ўлічваць, калі цеплавыя

страты за перыяд у шмат разоў меншыя за энергію контуру ( $\frac{1}{2} I_0^2 RT \ll \frac{1}{2} \frac{L I_0^2}{2}$ ), адкуль вынікае, што гэта магчыма, калі актыўнае супраціўленне контуру  $R \ll \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{L}{C}}$ .

Фізічныя велічыні, якія характарызуюць механічныя ваганні, напрыклад, ваганні спружыннага маятніка, і электрамагнітныя ваганні ў ідэальным контуры прыведзены ў тэблiцы 1 [4].

Рашэнне задач па тэме «Вагальны контур. Свабодныя электрамагнітныя ваганні ў контуры. Формула Томсана. Ператварэнні энергіі ў вагальным контуры» грунтуецца на выкарыстанні формул для разліку перыяду (частаты) уласных электрамагнітных ваганняў і закону захавання і ператварэння энергіі ў ідэальным або рэальным вагальным контуры. Таму ў працэсе аналізу сітуацыі, прыведзенай у задачы, неабходна спачатку выявіць невядомыя параметры контура і магчымасць іх знаходжання зыходзячы з мадэлі «ідэальны вагальны контур».

**Табліца 1 – Аналогія паміж механічнымі і электрамагнітнымі характарыстыкамі вагальных сістэм**

Фізічныя характарыстыкі вагальнай сістэмы	Механічныя ваганні «Спружынны маятнік»	Электрамагнітныя ваганні «LC-контур»
Параметры вагальнай сістэмы	Маса грузу $m$ . Жорсткасць спружыны $k$	Індуктыўнасць шпулі $L$ Велічыня, адваротная ёмістасці кандэнсатара $\frac{1}{C}$
Функцыі стану вагальнай сістэмы	Кінетычная энергія грузу $W_k = \frac{mv_x^2}{2}$ , Патэнцыяльная энергія спружыны $W_n = \frac{kx^2}{2}$	Энергія магнітнага поля шпулі $W_L = \frac{LI^2}{2}$ , Энергія электростатычнага поля кандэнсатара $W_C = \frac{q^2}{2C}$
Раўнанне вагальнага працэсу	$x'' + \omega^2 x = 0$ $\omega^2 = \frac{k}{m}$	$q'' + \omega^2 q = 0$ $\omega^2 = \frac{1}{LC}$
Велічыні, якія характарызуюць адхіленні ад стану раўнавагі	Паскарэнне $a_x = x'' = -\omega^2 x$ Каардыната $x = x_0 \cos \omega t$	Заряд $q = q_0 \cos \omega t$ $q_0 = CU_0$
Велічыні, якія выражаюць скорасць змянення стану вагальнай сістэмы	$v_x = v_{0x} \cos(\omega t + \frac{\pi}{2})$ $a_x = a_{0x} \cos(\omega t + \pi)$	$I_x = I_{0x} \cos(\omega t + \frac{\pi}{2})$ $I_0 = q_0 \omega$ $\mathcal{E} = \mathcal{E}_0 \cos(\omega t + \pi)$

Пасля гэтага неабходна запісаць формулы для разліку імгненнага значэння зараду і напружання на кандэнсатары і сілы току ў шпулі індуктыўнасці. Для разліку энергетычных характарыстык неабходна дадаткова запісаць формулу для поўнай энергіі контура ў адвольны момант часу. Заўважым, што максімальныя значэнні зараду і напружання на кандэнсатары і сілы току ў шпулі звязаны суадносінамі:  $q_0 = CU_0$ ,  $I_0 = q_0\omega$ .

Калі стратамі энергіі ў контуры нельга пагрэбаваць, то для разліку частаты (перыяду) уласных ваганняў неабходна карыстацца формулай:

$$\nu = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}}.$$

Пры рашэнні некаторых больш складаных задач па гэтай тэме дадаткова неабходна карыстацца формуламі для разліку ёмістасці плоскага кандэнсатара  $C = \frac{\epsilon\epsilon_0 S}{d}$ , індуктыўнасці шпулі  $L = \mu_0 \mu \frac{N^2}{l} S$  і даўжыні электрамагнітнай хвалі  $\lambda = \nu T = 2\pi\nu\sqrt{LC}$ , на якую рэзаніруе вагальны контур.

Разгледзім мажарструктуру дзейнасці па рашэнні тыпавых вучэбных задач азначанай тэмы на канкрэтных прыкладах.

**Прыклад 1.** Вагальны контур складаецца з кандэнсатара ёмістасцю  $C = 10$  мкФ і шпулі індуктыўнасцю  $L = 4,0$  мГн. Амплітуда ваганняў зарада кандэнсатара  $q_0 = 100$  мкКл. Вызначце, як залежаць ад часу: зарад кандэнсатара  $q = q(t)$ , сіла току ў контуры  $I = I(t)$ , напружанне на кандэнсатары  $U = U(t)$ . Знайдзіце цыклічную частату электрамагнітных ваганняў у контуры, амплітудныя значэнні сілы току  $I_0$  і напружання  $U_0$ .

Дадзена:	Знайсі:
$C = 10$ мкФ	$q(t) - ?$ , $I(t) - ?$ , $I_0 - ?$
$L = 4,0$ мГн	$U(t) - ?$ , $U_0 - ?$
$q_0 = 100$ мкКл	

**Рашэнне.** Сістэму адліку звязам з лабараторыяй і будзем лічыць яе інерцыяльнай. У якасці фізічнай сістэмы разгледзім закрыты вагальны контур, які знаходзіцца ў спакой адносна лабараторыі, і будзем лічыць яго ідэальным. Калі ў момант часу  $t_0 = 0$  зарад

кандэнсатара  $q = q_0$ , то залежнасць  $q = q(t)$  мае выгляд:  $q(t) = q_0 \cos \omega t$ , дзе  $\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}$  – цыклічная частата ваганняў.

Таму  $q(t) = q_0 \cos \omega t = q_0 \cos \frac{t}{\sqrt{LC}}$ . Імгненнае значэнне сілы току ў контуры  $I = I(t)$  з'яўляецца першай вытворнай па часе ад зарада:

$$I(t) = (q_0 \cos \omega t)' = -q_0 \omega \sin \omega t = -I_0 \sin \frac{t}{\sqrt{LC}} = I_0 \cos \left( \frac{t}{\sqrt{LC}} + \frac{\pi}{2} \right), \quad I_0 = \frac{q_0}{\sqrt{LC}}.$$

Таму максімальнае значэнне зарада кандэнсатара  $q_0 = \frac{I_0}{\omega}$ .

З улікам таго, што па азначэнні  $C = \frac{q}{U} = \frac{q_0}{U_0}$ , атрымаем:  $U = \frac{1}{\omega C} = I \sqrt{\frac{L}{C}}$ ,  $U_0 = \frac{I_0}{\omega C} = I_0 \sqrt{\frac{L}{C}}$ .

Калі ў апошнія формулы падставіць значэнне цыклічнай частаты ваганняў, імгненнае і амплітуднае значэнні сілы тока, атрымаем:

$$U(t) = \frac{q_0}{C} \cos \left( \frac{t}{\sqrt{LC}} + \frac{\pi}{2} \right) = U_0 \cos \left( \frac{t}{\sqrt{LC}} + \frac{\pi}{2} \right).$$

Падлікі даюць наступныя вынікі:

$$\omega = 5 \cdot 10^3 \text{ с}^{-1};$$

$$q(t) = q_0 \cos \frac{t}{\sqrt{LC}} = 1,0 \cdot 10^{-4} \cos(5 \cdot 10^3)t \text{ (Кл)};$$

$$I(t) = 0,5 \cos(5 \cdot 10^3 t + \frac{\pi}{2}) \text{ (А)}; \quad I_0 = 0,5 \text{ (А)};$$

$$U(t) = 10 \cos(5 \cdot 10^3 t + \frac{\pi}{2}) \text{ (В)}; \quad U_0 = 10 \text{ (В)}.$$

Адзначым, што амплітуднае значэнне напружання на кандэнсатары можна знайсці зыходзячы з закона захавання поўнай энергіі вагальнага контура, згодна з якім поўная энергія ў працэсе ваганняў захоўваецца:  $W(t) = W_{\text{мех}} + U + W_{\text{ЭМ}}(t) = \text{const}$ . Таму змяненне поўнай энергіі сістэмы роўна нулю:  $\Delta W(t) = (\Delta W_{\text{мех}} + \Delta U + \Delta W_{\text{ЭМ}}(t)) = 0$ . Калі ўлічыць, што электрамагнітныя ваганні ў ідэальным контуры не суправаджаюцца змяненнямі яго механічнай і ўнутранай энергіі, атрымаем:  $\Delta W_{\text{ЭМ}} = \Delta W_L + \Delta W_C = 0$ . Калі ў пачатковым стане максімальнае значэнне мае сіла току, а ў канечным – напружанне, то  $(\frac{LI_0^2}{2} + 0) - (0 + \frac{CU_0^2}{2}) = 0$ . Адсюль:

$$U_0 = I_0 \sqrt{\frac{L}{C}} = \frac{I_0}{\omega C}.$$

**Прыклад 2.** Электрычная ёмістасць кандэнсатара вагальнага контура  $C = 1,0$  мкФ, а індуктыўнасць яго шпулі  $L = 40$  мГн.

Знайдіть максимальне значення сили току  $I_0$  у контури, калі ў пачатковы момант часу напружанне на кандэнсатары контура  $U_0 = 10$  В, а ток у контуры  $I = 0$ .

<b>Дадзена:</b> $C = 1,0$ мкФ $L = 40$ мГн $U_0 = 10$ В	<b>Знайсі:</b> $I_0 - ?$
--	-----------------------------

**Рашэнне.** У якасці фізічнай сістэмы разгледзім замкнёны электрычны ланцуг, які складаецца з кандэнсатара і шпулі індуктыўнасці, злучаных паслядоўна. У якасці мадэлі сістэмы можна выбраць ідэальны вагальны контур. Электрамагнітныя ваганні ў ідэальным контуры не суправаджаюцца змяненнямі яго механічнай і ўнутранай энергіі, таму выбраную фізічную сістэму можна лічыць ізаляванай і для яе апісання прымяніць закон захавання энергіі, згодна з якім:  $W_M + U + W_L + W_C = \text{const}$ , або  $\Delta W_L + \Delta W_C = 0$ , дзе  $\Delta W_C$  і  $\Delta W_L$  – змяненні энергіі электростатычнага поля кандэнсатара і магнітнага поля шпулі ў выніку пераходу сістэмы з аднаго стану ў другі.

Калі ў якасці пачатковага выбраць стан сістэмы ў момант часу, калі сіла току ў шпулі роўна нулю, а ў якасці канечнага – стан, калі сіла току максімальная, то  $\Delta W_L = \frac{LI_0^2}{2} - 0$ .

З улікам таго, што энергія электростатычнага поля кандэнсатара ў пачатковым стане

$W_C = 0 - \frac{CU_0^2}{2}$ , а ў канечным стане яна роўна нулю, атрымаем  $\Delta W_C = 0 - \frac{CU_0^2}{2}$ .

Такім чынам:  $\frac{LI_0^2}{2} - \frac{CU_0^2}{2} = 0$ . Адкуль  $I_0 = U_0 \sqrt{\frac{C}{L}}$ . Калі падставіць лікавыя значэнні фізічных велічынь, атрымаем:  $I_0 = 0,05$  А.

**Адказ:**  $I_0 = 0,05$  А.

**Прыклад 3.** Для падтрымання гарманічных электрамагнітных ваганняў у электрамагнітным вагальным контуры, які складаецца з кандэнсатара ёмістасцю  $C = 48$  мкФ і шпулі індуктыўнасцю  $L = 24$  мГн, яму неабходна штосекундна перадаваць ад знешняй крыніцы энергію  $W = 0,2$  мДж. Вызначце амплітуднае значэнне сілы току і частату ўласных ваганняў у контуры, калі яго актыўнае супраціўленне  $R = 20$  Ом.

<b>Дадзена:</b> $W = 0,20$ мДж $R = 20$ Ом $C = 48$ мкФ $L = 24$ мГн $\Delta t = 1,0$ с	<b>Знайсі:</b> $I_0 - ?$ , $\nu - ?$
--	---

**Рашэнне.** У якасці фізічнай сістэмы разгледзім вагальны контур, які будзем лічыць закрытым. Гэта фізічная сістэма з'яўляецца не ізаляванай, паколькі згодна з умовай задачы яна абменьваецца энергіяй са знешняй крыніцай. Шпуля і кандэнсатар знаходзяцца ў стане спакою адносна сістэмы адліку «лабараторыя», таму механічная энергія сістэмы не мяняецца. Электрамагнітная энергія сістэмы таксама не павінна змяняцца, паколькі ў контуры падтрымліваюцца незатухаючыя ваганні.

Калі дапусціць, што страты энергіі абумоўлены толькі награваннем дроту, наматанага на шпулю, і дроту, які злучае шпулю з абкладкамі кандэнсатара, то змяненне поўнай энергіі сістэмы абумоўлена толькі змяненнем яе ўнутранай энергіі:  $\Delta W = \Delta U$ . Калі ўлічыць, што  $\Delta U = Q$ , дзе  $Q$  – колькасць цеплыні, якая выдзяляецца электрычным токам у контуры за прамежак часу  $\Delta t$ , атрымаем, што  $\Delta W = Q$ .

Залежнасць сілы току ў контуры ад часу мае выгляд:  $I = I_0 \sin(\omega t + \varphi_0)$ , дзе  $I$  – імгненнае значэнне сілы току ў контуры,  $I_0$  – яго амплітуднае значэнне,  $\omega$  – цыклічная частата электрамагнітных ваганняў у контуры,  $\varphi_0$  – рознасць фаз паміж ваганнямі сілы току ў шпулі і напружання на кандэнсатары.

Згодна з законам Джоуля – Ленца:  $Q = \langle I^2 \rangle R \Delta t = \langle I_0^2 \sin^2(\omega t + \varphi_0) \rangle R \Delta t$ . Калі ўлічыць, што  $\langle \sin^2(\omega t + \varphi_0) \rangle = \frac{1}{2}$ ,  $\langle I_0^2 \rangle = I_0^2$ , атрымаем  $Q = \frac{1}{2} I_0^2 R \Delta t$ . Адкуль,  $I_0 = \sqrt{\frac{2W}{R \Delta t}}$ .

Электрамагнітныя ваганні не будуць затухаць, калі страты энергіі ў контуры за прамежак часу  $\Delta t$  будуць скампенсаваны за кошт энергіі, якую знешняя крыніца энергіі перадае контуру.

Частата ўласных электрамагнітных ваганняў у контуры:  $\nu = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{LC} + \frac{R^2}{4L^2}}$ .

Калі падставіць лікавыя значэнні фізічных велічынь, атрымаем:

$I_0 = 4,47$  мА,  $\nu = 132$  Гц.

**Адказ:**  $I_0$  мА,  $\nu = 132$  Гц.

**Заклучэнне.** Прымяненне разгледжанага ў артыкуле метада рашэння задач у вучэбным працэсе будзе садзейнічаць: фарміраванню навуковага стылю мыслення; засваенню працэдур дзейнасці інварыянтных адносна рашэння стандартных задач; развіццю ўменняў апісваць механізмы і вы-

дзяляць істотныя прыкметы фізічных з'яў з апорай на іх рабочыя мадэлі; паглыбленню і сістэматызацыі ведаў навучэнцаў аб метадах і спосабах рашэння стандартных і нестандартных вучэбных задач на вызначэнне перыяду і энергетычных характарыстык электрамагнітных ваганняў.

#### ЛІТАРАТУРА

1. Фізіка. XI клас // Вучэбная праграма па вучэбным прадмеце «Фізіка» для XI класа ўстаноў адукацыі, якія рэалізуюць адукацыйныя праграмы агульнай сярэдняй адукацыі з беларускай мовай навучання і адукацыі. – Пастанова МА РБ ад 21.06.2021 №131.
2. Жылко, В. У. Фізіка: вучэб. дапаможнік для 11-га кл. устаноў агульнай. сярэд. адукацыі з бел. мовай навучання / В. У. Жылко, Л. Р. Марковіч, А. А. Сакольскі. – Мінск : Народная асвета, 2021. – 287 с.
3. Луцевіч, А. А. Фізика / А. А. Луцевіч, С. В. Яковенко. – Мінск : Вышшая школа, 2000. – 495 с.
4. Малишевский, В. Ф. Основы электродинамики / В. Ф. Малишевский, А. А. Луцевич. – Минск : ИВЦ Минфина, 2018. – 143 с.
5. Фізика. Теория и технология решения задач / В. А. Бондарь [и др.] ; под ред. В. А. Яковенко. – Минск : ТетраСистемс, 2003. – 560 с.

#### REFERENCES

1. Fizika. XI klas // Vuchebnaya pragrama pa vuchebnym pradmecе «Fizika» dlya XI klasa ўстаноў adukacyi, yakiya realizuyuc' adukacyjnyya pragramy agul'naj syarednyaj adukacyi z belaruskaj movaj navuchannya i adukacyi. – Pastanova MA RB ad 21.06.2021 №131.
2. Zhylko, V. U. Fizika: vucheb. dapamozhnik dlya 11-ga kl. ustanoy agul'naj. syared. adukacyi z bel. movaj navuchannya / V. U. Zhylko, L. R. Markovich, A. A. Sakol'ski. – Minsk : Narodnaya asveta, 2021. – 287 s.
3. Lucevich, A. A. Fizika / A. A. Lucevich, S. V. Yakovenko. – Minsk : Vysshaya shkola, 2000. – 495 s.
4. Malishevskij, V. F. Osnovy elektrodinamiki / V. F. Malishevskij, A. A. Lucevich. – Minsk : IVC Minfina, 2018. – 143 s.
5. Fizika. Teoriya i tekhnologiya resheniya zadach / V. A. Bondar' [i dr.] ; pod red. V. A. Yakovenko. – Minsk : TetraSistems, 2003. – 560 s.