

Міністерство освіти і науки України
Запорізький національний університет

Д. Г . Алексієвський, К. О. Туришев

ДЖЕРЕЛА ЖИВЛЕННЯ ПРОМИСЛОВИХ ОЗОНАТОРІВ

**Методичні рекомендації
до практичних занять
для здобувачів ступеня вищої освіти бакалавра
спеціальності «Електроніка»
освітньо-професійної програми «Електроніка»**

Затверджено
вченою радою ЗНУ
Протокол № ____ від _____ р.

Запоріжжя
2023

УДК : УДК 621.314.58

Алексієвський Д. Г., Туришев К. О. Методичні рекомендації до практичних занять з дисципліни «Джерела живлення промислових озонаторів» для здобувачів ступеня вищої освіти бакалавра спеціальності «Електроніка» освітньо-професійної програми «Електроніка» . Запоріжжя : Запорізький національний університет, 2023. 12 с.

У пропонованому виданні відповідно до робочої програми дисципліни «Джерела живлення промислових озонаторів» подано зміст практичних занять: теми та методичні рекомендації щодо їх опрацювання згідно з пунктами плану, питання й тести для самоконтролю, практичні завдання, перелік основної, додаткової літератури, інформаційні ресурси.

Навчально-методичне видання адресується здобувачам ступеня вищої освіти бакалавра спеціальності 171 «Електроніка», які навчаються за освітньо-професійною програмою «Електроніка» денної та заочної форм здобуття освіти.

Рецензент

П. Д. Андрієнко, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедру електричних та електронних апаратів Національний університет «Запорізька політехніка».

Відповідальний за випуск

Т. В. Критська, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедру електроніки, інформаційних систем та програмного забезпечення Запорізького національного університету.

1 ТЕМИ ПРАКТИЧНИХ ЗАНЯТЬ

1. Аналіз технічного завдання на розрахунок промислового озонатору.
2. Розробка електричної принципової схеми.
3. Розрахунок струмового навантаження та вибір обмоточних дротів трансформатору.
4. Розрахунок параметрів силового ключа.
- 5 Розрахунок параметрів трансформатору.
6. Розрахунок магнітної системи трансформатору.

2 РОЗРАХУНОК ЕЛЕМЕНТІВ СХЕМИ БОРТОВОЇ ОЗОНАТОРНОЇ СТАНЦІЇ

Живлення генератора озону здійснюється від імпульсного високочастотного одноктного зворотно ходового перетворювача. З метою забезпечення високих масогабаритних показників виробу приймається значення робочої частоти перетворювача $f_{\text{con}} = 44$ кГц.

Вихідні дані для розрахунку ВІП:

потужність перетворювача, P_{pow} , Вт	30,0
вхідна напруга, U_{pow} , В	24,0
робоча частота, f_{con} , кГц	44,0
коефіцієнт заповнення імпульсів управління, γ	0,33

2.1 Розрахунок основних енергетичних характеристик

Електрична принципова схема ВІП приведена на рисунку 2.1. Додатково на рисунку 2.1 зображені вхідний фільтр ВІП (C1, C2, C12, C14...C17, L1) і драйвер силового ключа (C9, C10, DD1).

Значення середнього струму, споживаного ВІП

$$I_{pow} = \frac{P_{pow}}{U_{pow}} = \frac{30}{24} = 1,25 \text{ A} \quad (2.1)$$

Амплітудне значення струму стоку VT2 або прирощення струму первинної обмотки трансформатора T1 за час включеного стану транзистора VT2 при $\gamma = 0,33$

$$\Delta I_1 = I_{D \max} = \frac{I_{pow}}{\gamma} = \frac{1,25}{0,33} = 3,79 \text{ A} \quad (2.2)$$

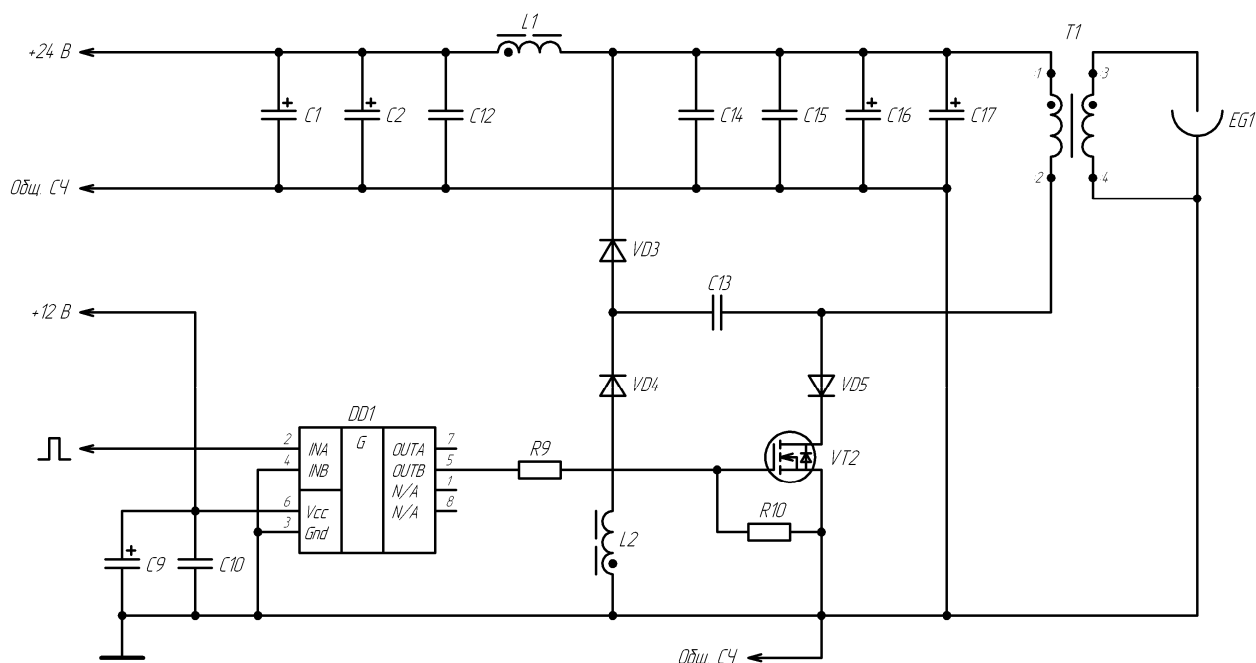


Рисунок 2.1 – Електрична принципова схема ВІІІ

Діюче значення струму первинної обмотки трансформатора T1

$$I_1 = \frac{I_{pow}}{\sqrt{\gamma}} = \frac{1,25}{\sqrt{0,33}} = 2,18 \text{ A} \quad (2.3)$$

Площа перерізу проводу первинної обмотки, при допустимій щільності струму $\rho = 5 \text{ А/мм}^2$

$$S_{ww1} = \frac{I_1}{\rho} = \frac{2.18}{5} = 0.436 \text{ мм}^2 \quad (2.4)$$

Діаметр дроту первинної обмотки

$$d_1 = \sqrt{\frac{4 \cdot S_{ww1}}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0.436}{3.14}} = 0.745 \text{ мм} \quad (2.5)$$

Глибина проникнення струму, що обумовлена скін-ефектом на робочій частоті перетворювача становить

$$\delta = \frac{64}{\sqrt{f_{con}}} = \frac{64}{\sqrt{44 \cdot 10^3}} = 0.305 \text{ мм} \quad (2.6)$$

Проводом первинної обмотки може бути використаний дріт діаметром менше, ніж $\delta = 0.305 \text{ мм}$.

Вибирається проводом первинної обмотки, провід ПТЭВ - 0,224 (діаметр дроту $d = 0.24 \text{ мм}$) з метою виготовлення з неї литцендрату перерізом $S_{litz} \geq S_{ww1} \geq 0.436 \text{ мм}^2$.

Площа перерізу проводу ПТЭВ - 0,224

$$S_w = \frac{\pi \cdot d^2}{4} = \frac{3.14 \cdot 0.224^2}{4} = 0.0394 \text{ мм}^2 \quad (2.7)$$

Кількість жил (проводів) литцендрату

$$n_{lit} = \frac{S_{ww1}}{S_w} = \frac{0,436}{0,0394} = 11,06 \quad (2.8)$$

Кількість жил литцендрату первинної обмотки трансформатора приймається Т1 $n_{lit1} = 11$.

При діючому значенні напруги живлення генератора озону $U_{OG} = 3,0$ кВ, діюче значення струму вторинної обмотки трансформатора Т1

$$I_2 = \frac{P_{pow}}{U_{OG}} = \frac{30}{3000} = 0,01 \text{ A} \quad (2.9)$$

Площа перерізу проводу вторинної обмотки, при допустимій щільності струму $\rho = 5$ А/мм²

$$S_{ww2} = \frac{I_1}{\rho} = \frac{0,01}{5} = 0,002 \text{ мм}^2 \quad (2.10)$$

Діаметр дроту вторинної обмотки

$$d_2 = \sqrt{\frac{4 \cdot S_{ww1}}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,002}{3,14}} = 0,05 \text{ мм} \quad (2.11)$$

Виготовити трансформатор з товщиною дроту вторинної обмотки $d_2 = 0,05$ мм технологічно дуже складно. Приймається проводом вторинної обмотки провід ПТЭВ - 0,1 (діаметр дроту $d = 0,1$ мм).

З метою зниження напруги стік-витік транзистора VT2 приймається значення коефіцієнта трансформації Т1

$$k_T \leq \frac{U_1}{U_2} \leq 0,05 \quad (2.12)$$

де U_1 – напруга первинної обмотки трансформатора (індукована);

U_2 – напруга вторинної обмотки трансформатора.

Діюче значення напруги вторинної обмотки трансформатора дорівнює діючому значенню напруги живлення генератора озону $U_{OG} \geq 3,0$ кВ.

Амплітудне значення напруги стік-витік транзистора VT2 при $k_T = 0,05$ і $U_{OG} = 3.0$ кВ

$$U_{VT2 \max} = \sqrt{2} \cdot k_T \cdot U_2 = \sqrt{2} \cdot k_T \cdot U_{OG} = 1,41 \cdot 0,05 \cdot 3000 = 212 \text{ В} \quad (2.13)$$

На підставі результатів розрахунків $U_{VT2 \max} = 212$ В і $I_{D \max} = 3,79$ А, з урахуванням дворазового запасу, транзистором VT2 вибирається транзистор IRFB460 або його аналог SiHFP460 виробництва Vishay з наступними параметрами:

структура	N-канал
амплітудне значення струму стоку, $I_{D \max}$, А	80,0
номінальне значення струму стоку, при $t = 25$ °С, I_D , А	20,0
номінальне значення струму стоку, при $t = 100$ °С, I_D , А	13,0
максимальна напруга стік-витік, $U_{DS \max}$, В	500
напруга управління, U_{GS} , В	±20
опір каналу стік-витік, R_{DS} , Ом	0,27
час включення, t_{on} , нс	18
час вимикання, t_{off} , нс	110
вхідна ємність затвору, C_{GS} , пФ	4200
максимальна потужність, що розсіюється без охолоджувача, $P_{D \max}$, Вт	2,0
максимальна потужність, що розсіюється з охолоджувачем $P_{D \max}$, Вт	280

тип корпусу	ТО-247
робоча температура, °C	-55...+150

Діодом VD5 вибирається діод HFA15TB60 виробництва Vishay з наступними параметрами:

максимальне значення випрямленого струму, $I_{FS \max}$, А	150
амплітудне значення імпульсного прямого струму, I_F , А	15,0
максимальне пряме падіння напруги при $I_F = 4,0$ А, $U_{FM \max}$, В	1,38
пряме падіння напруги при $I_F = 0,1$ А, $U_{FM \min}$, В	0,7
максимальна зворотна напруга, U_{BR} , В	600
час відновлення, t_{rr} , нс	23
тип корпусу	ТО-220

Для захисту від електромагнітних перешкод, перехід затвор-витік шунтується резистором R8 опором 1,0 кОм. Виходячи з того, що ємність затвора VT1 заряджається до величини напруги живлення $U_{CS} = 12$ В

$$I_{R8} = \frac{U_{CS}}{R8} = \frac{12}{1000} = 12 \text{ мА} \quad (2.14)$$

$$P = I_{R8}^2 \cdot R8 = (12 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 1000 = 0,144 \text{ Вт} \quad (2.15)$$

Резистором R8 застосується резистор R-1206 1,0 кОм $\pm 1\%$ muRata.

Драйвером силового ключа вибирається мікросхема IR4427 (DD1) виробництва International Rectifier

Максимальний вихідний струм DD1 становить $I_{OUT} = 1.5$ А

$$R7 = \frac{U_{CS}}{I_{OUT}} = \frac{12}{1,5} = 8 \text{ Ом} \quad (2.16)$$

Струм заряду/розряду імпульсний, тривалістю не більше 100 нс (ємність затвора 4200 пФ)

$$\tau = R7 \cdot C_{GS} = 8 \cdot 4200 \cdot 10^{-12} = 33,6 \cdot 10^{-9} \text{ c} \quad (2.17)$$

При тривалості імпульсу управління 5 мкс часом заряду/розряду можна знехтувати

Резистором R7 застосується резистор R-1206 8,2 Ом $\pm 1\%$ muRata.

3.2 Розрахунок параметрів трансформатора

Тривалість імпульсу управління, періоду і паузи при $f_{con} = 44,0$ кГц і коефіцієнті заповнення $\gamma = 0,33$

$$t_i = \frac{1}{f_{con}} \cdot \gamma = \frac{1}{44000} \cdot 0,33 = 7,5 \cdot 10^{-6} \text{ c} \quad (2.18)$$

$$T = \frac{1}{f_{con}} = \frac{1}{44000} = 22,73 \cdot 10^{-6} \text{ c} \quad (2.19)$$

$$t_p = T - t_i = 15,23 \cdot 10^{-6} \text{ c} \quad (2.20)$$

При тривалості імпульсу управління $t_i = 7,5$ мкс індуктивність первинної обмотки трансформатора T1 дорівнює

$$L_\mu = \frac{(U_{pow} - U_{DS\ on} - U_R) \cdot t_i}{I_{1\max}} = \frac{(24 - 0,51 - 1,04) \cdot 7,5 \cdot 10^{-6}}{3,79} = 44,4 \cdot 10^{-6} \text{ Гн} \quad (2.21)$$

де $U_{DS\ on}$ – середнє значення падіння напруги на переході стік-витік VT2;

U_R – середнє значення падіння напруги на діоді VD5

Середні значення падіння напруги на транзисторі VT2 і діоді VD5 при протіканні струму первинної обмотки трансформатора визначені за формулами:

$$U_{DSon} = \frac{R_{DS} \cdot I_{Dmax}}{2} = \frac{0,27 \cdot 3,79}{2} = 0,51 \text{ В} \quad (2.22)$$

$$U_{FM} = \frac{U_{FMmax} + U_{FMmin}}{2} = \frac{1,38 + 0,7}{2} = 1,04 \text{ В} \quad (2.23)$$

На підставі формули визначення потужності магнітопроводу для зворотно ходового перетворювача визначається об'єм магнітопроводу трансформатора для перетворювача потужністю через $P_{pow} = 30 \text{ Вт}$

$$P_{\mu} = \frac{S_{ST} \times B^2 \times l_{med}}{2 \times \mu \times \mu_0} \times f_{con} \quad (2.24)$$

$$V_{ST} = \frac{2 \cdot \mu \cdot \mu_0 \cdot P_{pow}}{B^2 \cdot f_{con}} \quad (2.25)$$

де μ_0 – абсолютна магнітна проникність вакууму, $\mu_0 = 1,257 \times 10^{-6} \text{ Гн/м}$;

μ – магнітна проникність магнітного осердя;

S_{ST} – площа перерізу магнітопроводу;

l_{med} – довжина середньої лінії магнітопроводу;

B – електромагнітна індукція в магнітопроводі.

Магнітопроводом вибирається тороїдальне альсіферове осердя з наступними параметрами:

– магнітна проникність матеріалу $\mu = 125$;

– індукція насичення магнітопроводу $B_S = 1,05 \text{ Тл}$.

По каталогу DMEGC вибирається найближчий більший по потужності магнітопровід DS572125, що відповідає наступним параметрам:

індукція насичення, B_s , Тл	1,0
магнітна проникність матеріалу, μ	125
зовнішній діаметр, D_1 , мм	57,2
внутрішній діаметр, D_2 , мм	35,6
товщина, H , мм	14,0
зовнішній діаметр, з урахуванням ізоляції, D_{1ins} , мм	58,0
внутрішній діаметр, з урахуванням ізоляції, D_{2ins} , мм	34,74
товщина, з урахуванням ізоляції, H_{ins} , мм	14,86
довжина середньої лінії, l_{med} , мм	143
площа перерізу, S_{ST} , мм ²	144,4

Тороїдальне осердя приведено на рисунку 2.2.

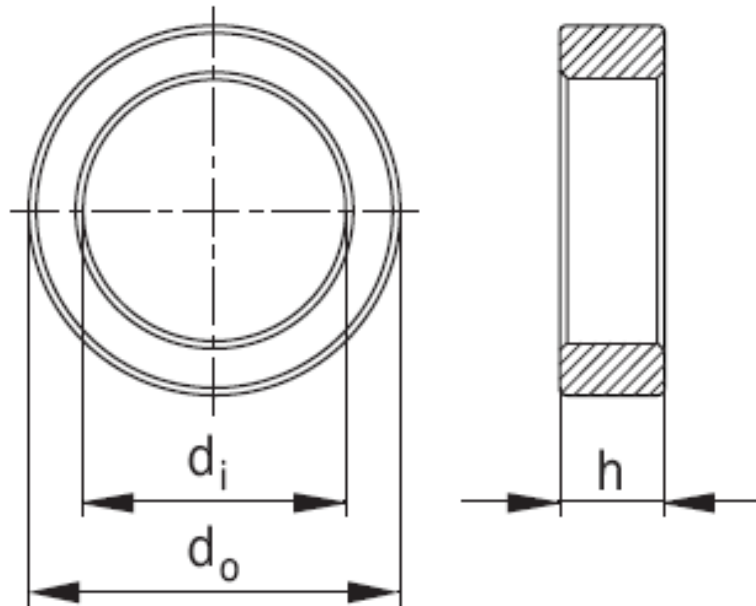


Рисунок 2.2 – Тороїдальне осердя

Кількість витків первинної обмотки, для вибраного осердя

$$W_1 = \sqrt{\frac{L_\mu \times I_{med}}{\mu \times \mu_0 \times S_{ST}}} = \sqrt{\frac{44,4 \times 10^{-6} \times 143 \times 10^{-3}}{125 \times 1,257 \times 10^{-6} \times 144,4 \times 10^{-6}}} = 16,7 \text{ витка} \quad (2.26)$$

Приймається $W_1 = 17$ витків.

Кількість витків вторинної обмотки при $k_T = 0,05$

$$W_2 = \frac{W_1}{k_T} = \frac{17}{0,05} = 340 \text{ витков} \quad (2.27)$$

Довжина окружності внутрішнього діаметру магнітопроводу становить

$$l_{D2} = \pi \cdot D_{2ins} = 3,14 \cdot 34,74 = 109 \text{ мм} \quad (2.28)$$

Довжина сектора, займана вторинною обмоткою на внутрішній поверхні магнітопроводу, складає

$$l_{sec} = W_2 \cdot d_2 = 340 \cdot 0,1 = 34 \text{ мм} \quad (2.29)$$