

## НАУКОВА РОБОТА

# **Розвиток теорії та принципів побудови енергоефективних високочастотних напівпровідникових перетворювачів модульної структури для потужних систем живлення електротехнологічного обладнання з нестаціонарним навантаженням (Джерело-4).**

**Мета роботи** – Розвиток теорії та принципів побудови енергоефективних високочастотних напівпровідникових перетворювачів модульної структури для потужних систем живлення електротехнологічного обладнання з нестаціонарним навантаженням, спрямований на покращення їх енергетичних та функціонально-технічних показників і розробку на цій основі спеціалізованих структурних схем, методів, алгоритмів та систем керування перетворювачами і їх силовими перемикаючими елементами, розробку інженерних методик розрахунку потужних перетворювачів з нестаціонарним навантаженням.

**Об'єкт досліджень:** системи електроживлення плазмового, іонно-плазмового та електронно-променевого обладнання

**Строки виконання роботи 01.01.2024 ---- 31.12.2028**

Науковий керівник НДР  
Відповідальний виконавець

Мартинів В.В. д.т.н., пров.н.с.  
Руденко Ю.В. д.т.н., пров.н.с.

Вакуумні іонно-плазмові, електронно-променеві, дугові, плазмові та інші технології розглядаються в даний час як найперспективніші технології в машинобудуванні, авіаційній техніці, в дорожньо-будівельній і сільськогосподарській техніці, видобувних галузях промисловості, в міському і комунальному господарстві. Основними перевагами плазмових технологій є висока густина потоків енергії, що дозволяє за час декількох мікросекунд досягати на оброблюваній поверхні потрібних високих температур. При цьому досягається відносна простота управління енергетичними характеристиками. Джерела електроживлення є найважливішим елементом у названих категоріях електротехнологічного обладнання. Плазма, індуктор або електронний промінь як елемент навантаження безпосередньо підключені до джерела живлення. Тому джерела електроживлення, як і ряд інших пристроїв технологічної установки, безпосередньо відповідальні за результати технологічного процесу. Такі системи електроживлення повинні максимально задовольняти спеціальним потребам технологічних процедур, забезпечуючи високу надійність та ефективно керування параметрами електроенергії. Тому проблема створення ефективних систем електроживлення сучасного електротехнологічного устаткування має актуальне значення. Тому актуальним є розвиток нових підходів і принципів побудови систем електроживлення, що в більш повній мірі задовольняють потребам нових технологій. У зв'язку з цим у новій темі основна увага буде приділена питанням розробки спеціалізованих джерел електроживлення, які будуть мати високі енергетичні та динамічні характеристики при використанні як навантаження електронно-променевих гармат, вакуумно-дугових випаровувачів, дугових та індукційних плазмотронів та ін.

### **Основні задачі:**

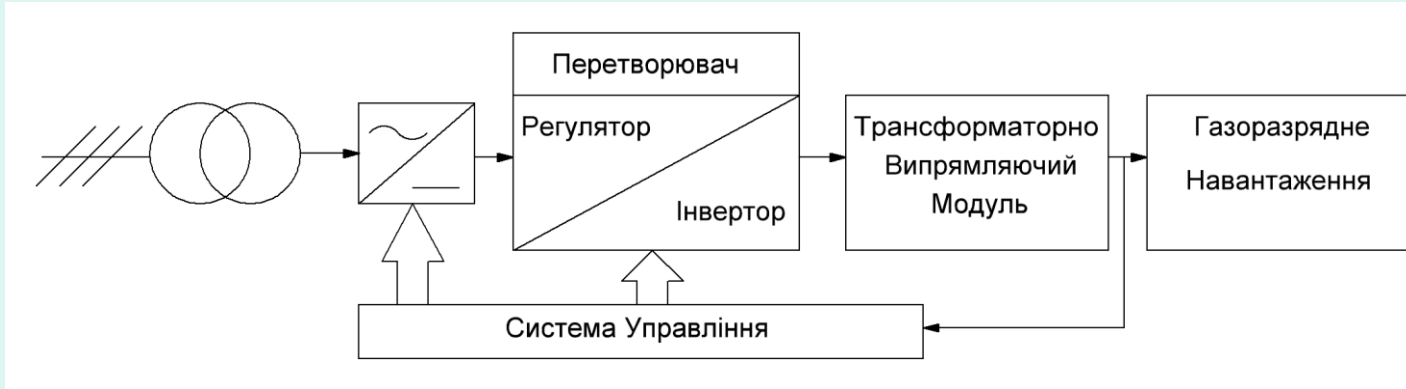
Аналіз електромагнітних процесів в напівпровідникових перетворювачах з нестационарним навантаженням;

Уточнення існуючих та вироблення нових методик аналізу та розрахунку режимів роботи перетворювачів з нестационарним навантаженням;

Розробка рекомендацій по вдосконаленню режимів роботи перетворювачів з нестационарним навантаженням.

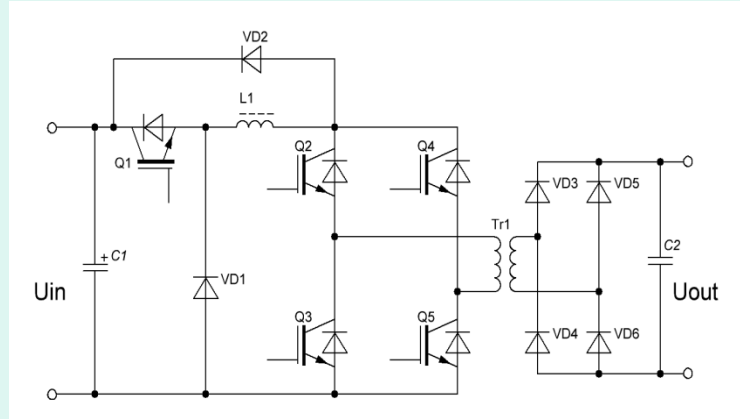
# Вплив режимів імпульсної модуляції та топології силових структур на енергетичні і динамічні характеристики напівпровідникових систем електроживлення газорозрядних установок.

В більшості випадків для стабілізації вихідної напруги використовується структура з регулятором по низьковольтній стороні перетворювача і зворотними зв'язками з боку високої напруги.

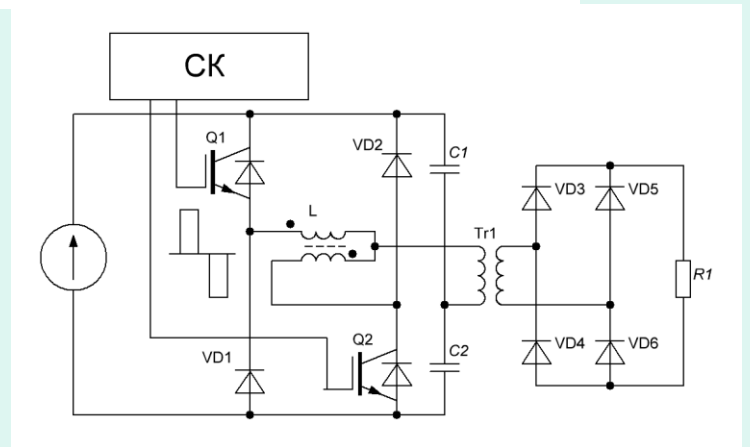
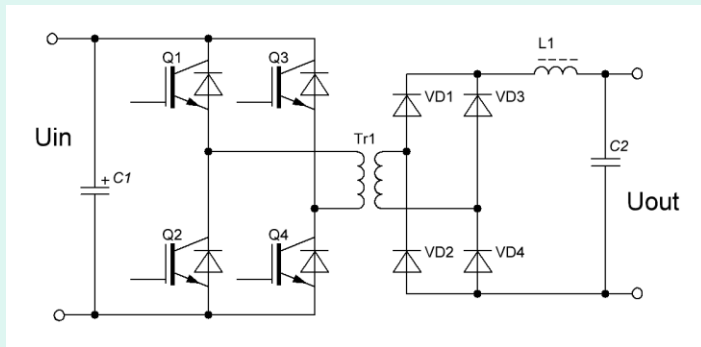


Технологічна та енергетична ефективність електронно-променевого, плазмового, іонно-плазмового устаткування визначаються енергетичними і динамічними характеристиками джерела електроживлення, тому набуває особливого значення раціональний вибір структури імпульсного перетворювача.

Інвертори струму



Перетворювачі з живленням від джерела напруги



# Методика розрахунку напівпровідникових перетворювачів методом усереднення в просторі станів

Система диференціальних рівнянь,  
що описують процеси в  
перетворювачі на  $n$  інтервалах  
постійності структури

Математична модель з  
усередненими змінними

$$\begin{cases} \mathbf{x}'_1 = \mathbf{A}_1 \mathbf{x}_1 + \mathbf{B}_1 \mathbf{u}_1 \\ \mathbf{x}'_2 = \mathbf{A}_2 \mathbf{x}_2 + \mathbf{B}_2 \mathbf{u}_2 \\ \dots \\ \mathbf{x}'_n = \mathbf{A}_n \mathbf{x}_n + \mathbf{B}_n \mathbf{u}_n \end{cases}$$

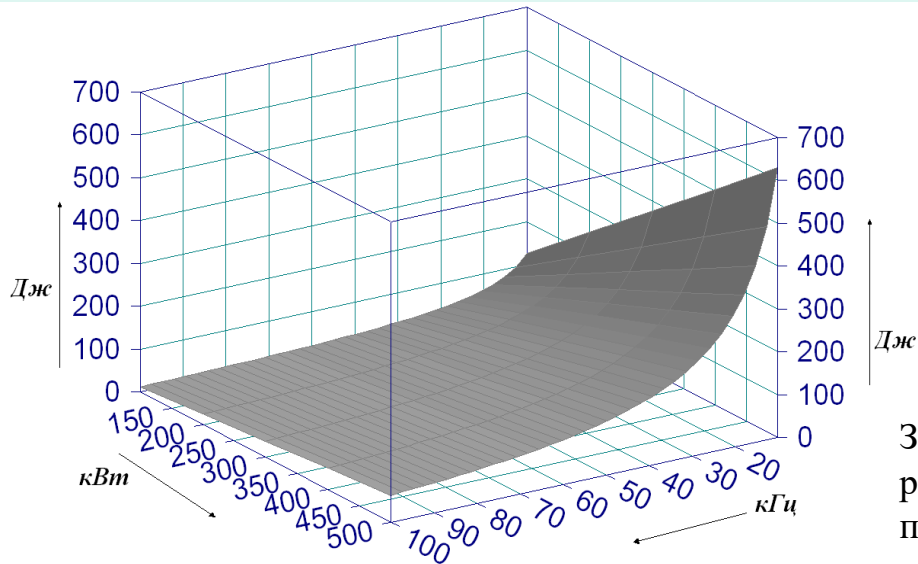
$$\begin{cases} \mathbf{x}'_{1cp} = \mathbf{A}_1 \mathbf{x}_{1cp} + \mathbf{B}_1 \mathbf{u}_1 \\ \mathbf{x}'_{2cp} = \mathbf{A}_2 \mathbf{x}_{2cp} + \mathbf{B}_2 \mathbf{u}_2 \\ \dots \\ \mathbf{x}'_{ncp} = \mathbf{A}_n \mathbf{x}_{ncp} + \mathbf{B}_n \mathbf{u}_n \end{cases} \quad \begin{cases} \Delta \mathbf{x}_1 = \Delta t_1 (\mathbf{A}_1^* \mathbf{x}_{1cp} + \mathbf{B}_1^* \mathbf{u}_1) \\ \Delta \mathbf{x}_2 = \Delta t_2 (\mathbf{A}_2^* \mathbf{x}_{2cp} + \mathbf{B}_2^* \mathbf{u}_2) \\ \dots \\ \Delta \mathbf{x}_n = \Delta t_n (\mathbf{A}_n^* \mathbf{x}_{ncp} + \mathbf{B}_n^* \mathbf{u}_n) \end{cases}$$

$\mathbf{A}_1^*, \mathbf{A}_2^* \dots \mathbf{A}_n^*, \mathbf{B}_1^*, \mathbf{B}_2^* \dots \mathbf{B}_n^*$  - матриці, члени яких відповідають членам матриць

$\mathbf{A}_1, \mathbf{A}_2 \dots \mathbf{A}_n, \mathbf{B}_1, \mathbf{B}_2 \dots \mathbf{B}_n$  із точністю до знаку у відповідності зі знаком приросту функцій вектора змінних станів  $\Delta \mathbf{x}$  і законами Кірхгофа для контурів схем заміщення на інтервалах.

$\Delta t_1, \Delta t_2, \dots, \Delta t_n$  – тривалості всіх  $n$  інтервалів сталості структури перетворювача.

# Визначення умов підвищення якості вихідної напруги систем електроживлення потужних газорозрядних установок.

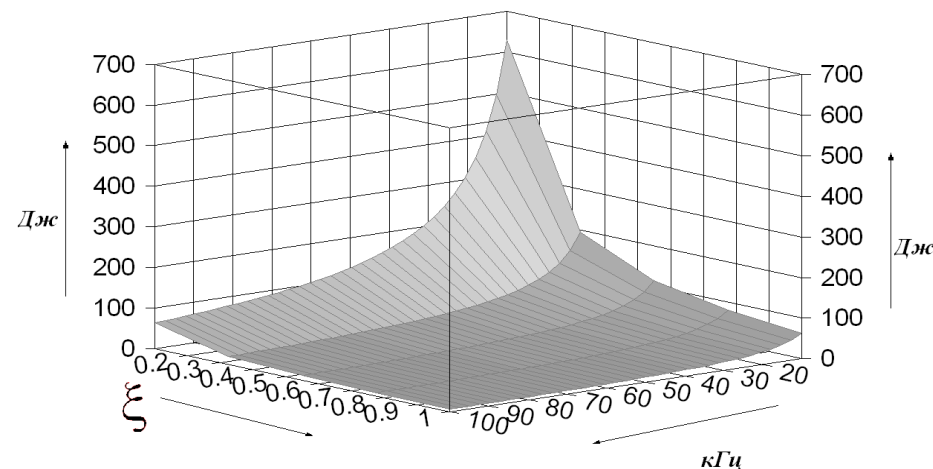


$$\sqrt{LC} = \frac{10^{0,5 \cdot \lg\left(\frac{U_{out}}{\Delta U}\right)}}{2 \cdot \pi \cdot f_T} \quad \text{Постійна часу фільтра}$$

Енергія накопичена в ємності фільтра істотно залежить від коефіцієнта загасання

$$4 \cdot \xi^2 \cdot \frac{C \cdot U_n^2}{2} = \frac{L \cdot I_n^2}{2}$$

Залежність накопиченої енергії в елементах фільтра при розрахункових пульсація 1%, коефіцієнті затухання 0,1, від потужності навантаження і частоти перемикачів

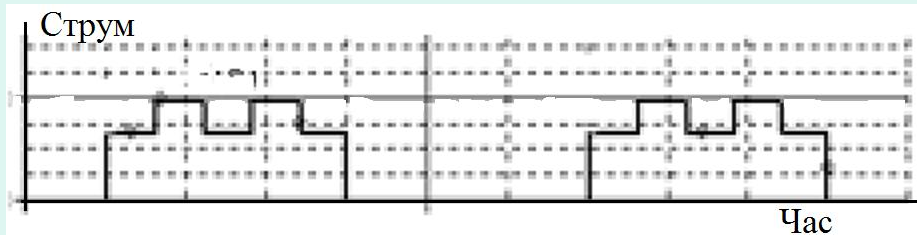


$$\frac{C \cdot U_n^2}{2} = \frac{I_n \cdot U_n}{8 \cdot \pi \cdot f_T} \frac{10^{\frac{0,5 \cdot \ln \frac{U_n}{U_d}}{\ln 2 + \ln 5}}}{\xi}$$

Залежність накопиченої енергії при розрахункових пульсація 1% і постійної потужності в навантаженні 500 кВт.

Аналіз кривих вихідної напруги перетворювачів показує, що відношення частоти перемикачів перетворювача до власної частоти зрізу фільтра є параметрами які визначають запас енергії в вихідний ланцюга перетворювача.

# Особливості розрахунку якості вихідної напруги систем електроживлення з двотактними асиметричними напівмостовими інверторами.



В синхронних несінфазних перетворювачах вихідна напруга має ступінчасту форму

Припустимо, що перетворювачі ідеальні, та коефіцієнт трансформації дорівнює одиниці

амплітуда струму в максимальній ступені:  $I_{f \max} = \frac{2U_n}{R_n(m-1)}$

амплітуда струму в мінімальної ступені  $I_{f \min} = \frac{2U_n}{R_n(m+1)}$

пульсації струму на виході багатозафазного перетворювача дорівнюватимуть:

$$\Delta I = I_{f \max} - I_{f \min} = \frac{4U_n}{R_n(m-1)(m+1)}$$

Пульсації напруги

$$\Delta U = \frac{4U_n}{(m-1)(m+1)}$$

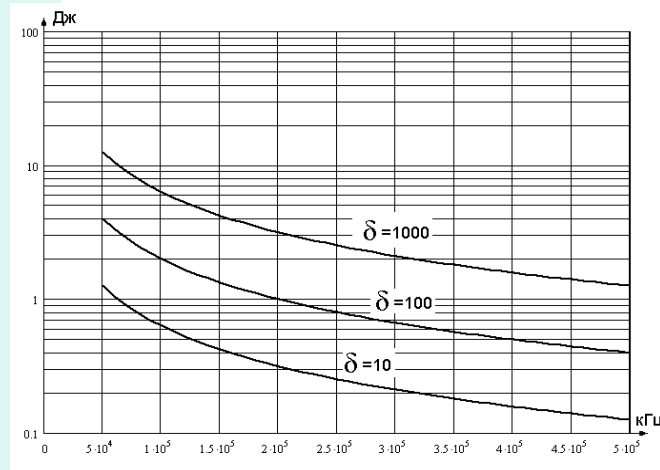
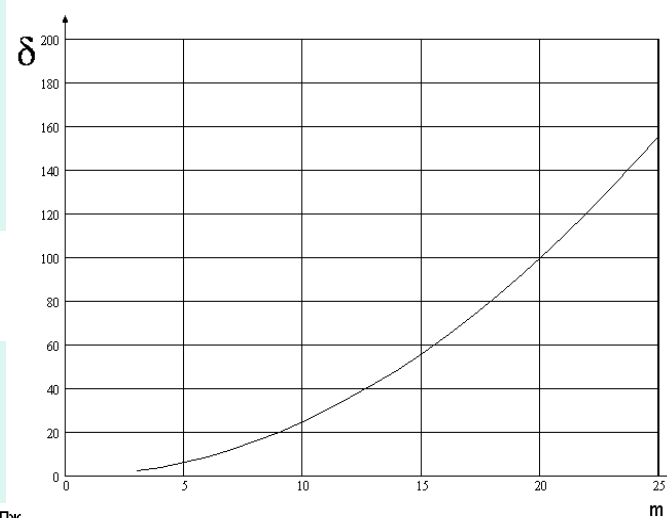
Відносний коефіцієнт зменшення змінної складової в вихідній напрузі в залежності від числа фаз

$$\delta = \frac{(m-1)(m+1)}{4}$$

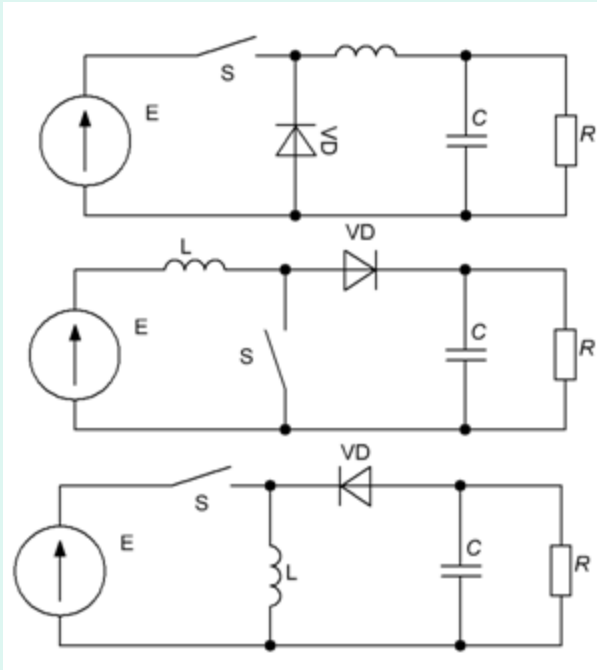
Послаблення змінної у вихідній напрузі завдяки енергії фільтру

$$\delta = 631.65 \cdot Q^2 \cdot f_T^2 \frac{\xi^2}{p^2}$$

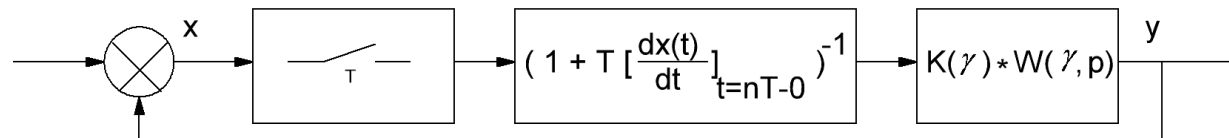
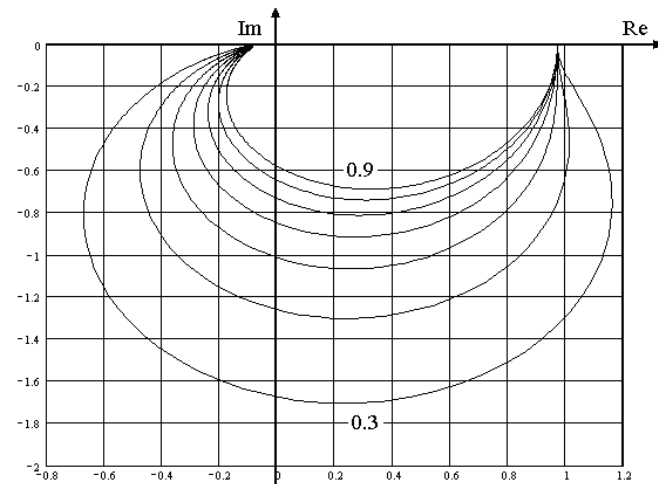
На наведені результати розрахунків при коефіцієнті загасання фільтра  $\xi = 1$ , і потужності джерела електроживлення  $P = 500$  кВт.



# Параметри лінійно-імпульсної математичної моделі, при яких треба враховувати модуляційну нелінійність для аналізу статичних і динамічних характеристик напівпровідникових систем електроживлення із широтно-імпульсною модуляцією другого порядку.

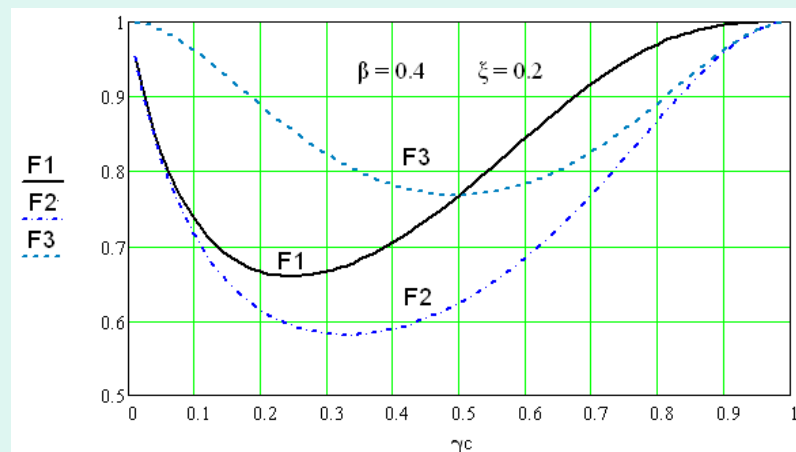
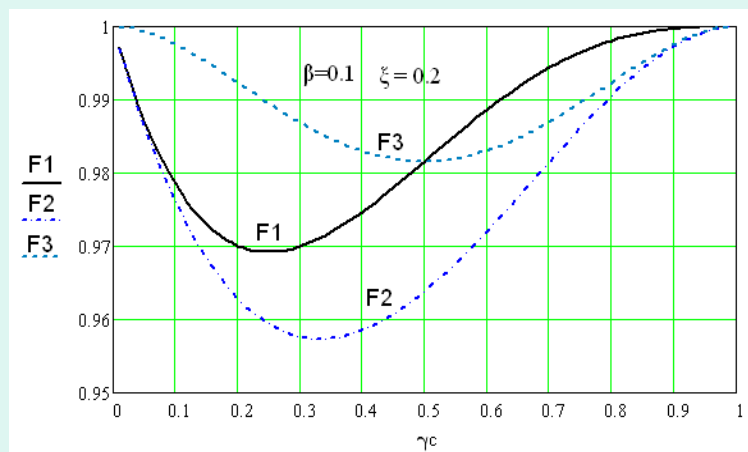
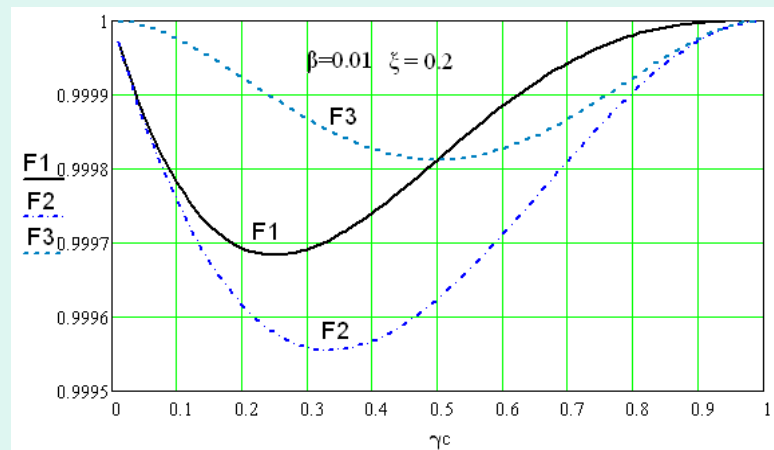
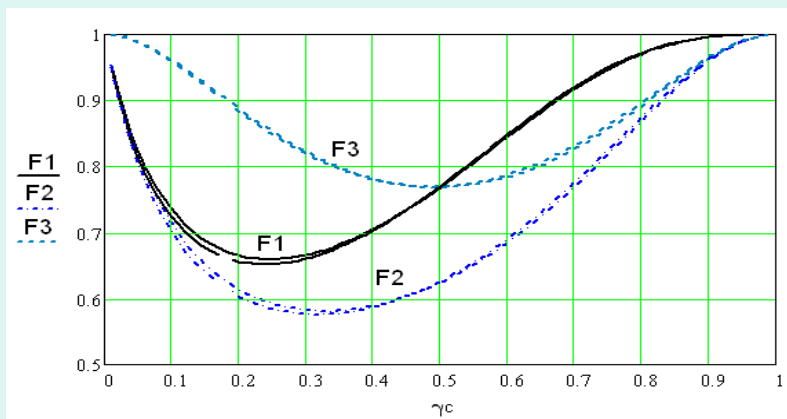


Лінійно імпульсні моделі перетворювачів з ШІМ другого порядку			
	Знижуючий регулятор	Регулятор, що підвищує	Реверсний регулятор
Постійна часу	$T_0 = \sqrt{LC}$	$\frac{T_0}{1-\gamma}$	$\frac{T_0}{1-\gamma}$
Коефіцієнт передачі	$K_{сх2} = \gamma$	$K_{сх2} = \frac{1}{1-\gamma}$	$K_{сх2} = \frac{\gamma}{1-\gamma}$
коефіцієнт загасання	$\xi = \frac{1}{2R} \sqrt{\frac{L}{C}}$	$\frac{\xi}{1-\gamma}$	$\frac{\xi}{1-\gamma}$
Передавальна функція однофазної схеми	$\frac{1}{T_0^2 p^2 + 2\xi T_0 p + 1}$	$\frac{1}{\left(\frac{T_0}{1-\gamma}\right)^2 p^2 + 2\frac{\xi}{(1-\gamma)}\frac{T_0}{(1-\lambda)} p + 1}$	$\frac{1}{\left(\frac{T_0}{1-\gamma}\right)^2 p^2 + 2\frac{\xi}{(1-\gamma)}\frac{T_0}{(1-\lambda)} p + 1}$



Для знижуючих: якщо  $\xi \geq 1$  враховувати не треба;  
якщо  $\xi < 1$  враховувати треба.

Істотний вплив модуляційної нелінійності, позначається при невеликих фільтруючих властивостях імпульсних перетворювачів. При відносній частоті переривання  $\beta = 0.4$ , відхилення від лінійності складає більше 40%. При  $\beta = 0.1$ , відхилення від лінійності не перевищує 5%, а при  $\beta = 0.01$  відхилення від лінійності не перевищує 0.05%, що при аналізі динаміки системи, її стійкості, можна не враховувати.



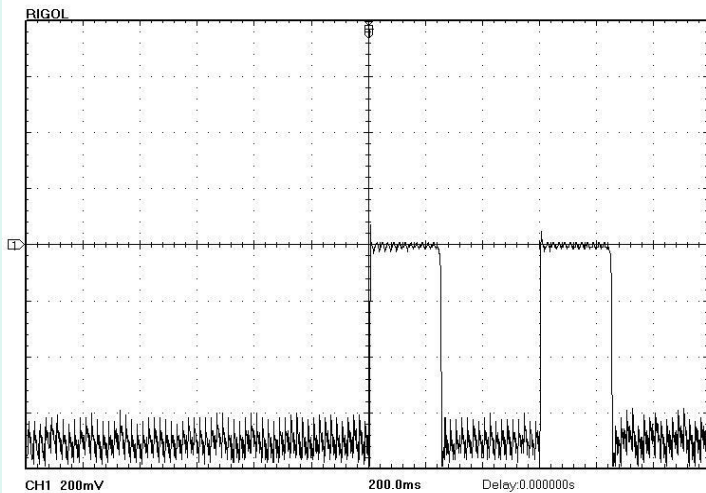
Звичайна практика при побудові швидкодіючих систем другого порядку призводить до відносної частоті переривання не більше 0.4, що при об'єднанні в багатофазну систему, наприклад, яка складається з 10 фаз, до значення  $\beta = 0.04$ , а це дозволяє вже аналізувати динаміку системи виходити тільки з властивостей усередненої лінійно імпульсної моделі.



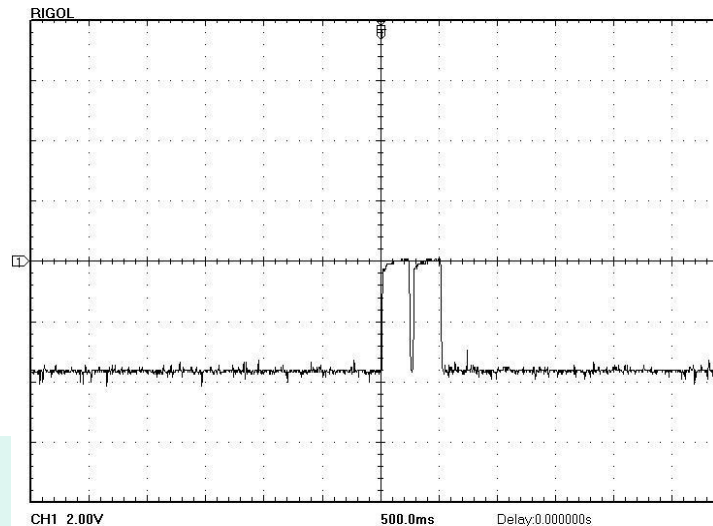
# Джерело живлення електронного нагріву ДЖ-ЕН-500-30 (12 фаз).



№	Характеристика	Значення
Вхідні параметри		
1	Вхідна напруга	<b>380В 50Гц (Y-0)</b>
2	Нестабільність вхідної напруги	<b>+10%, -15%</b>
3	Загальна потужність в номінальному режимі, не вище	<b>500 кВт</b>
Вихідні параметри		
4	Номінальна вихідна напруга (полос "плюс" заземлюється на навантажені)	<b>-30 кВ</b>
5	Номінальний струм навантаження	<b>15 А</b>
6	Номінальна вихідна потужність навантаження, не вище	<b>450 кВт</b>
7	Зміна вихідної напруги під дією зовнішніх факторів, не більше	<b>±5% від номінального значення</b>



Струм навантаження



Напруга на навантажені

Науково-технічні завдання роботи:

1. Дослідження та удосконалення електромагнітних процесів у напівпровідникових перетворювачах для високовольтних систем живлення електротехнологічного обладнання, що реалізує pvd-технології та забезпечує підвищення твердості металевих виробів, їх стійкості проти спрацьовування, витривалості та корозійної стійкості у відповідальних вузлах об'єктів машинобудування.
2. Дослідження та розробка перетворювачів на основі асиметричних структур, що забезпечують мінімізацію вихідної енергії та безколивальні перехідні процеси при живленні електротехнологічного обладнання для плазмових технологій та запобігають їх негативному впливу як на вузли джерела живлення, так і на технологічний процес при перехідних процесах.
3. Дослідження та удосконалення електромагнітних процесів у напівпровідникових перетворювачах для електротехнічних систем акумулювання електроенергії в промислових та автономних об'єктах широкого спектру функціонування, що забезпечують їх безперервну і надійну роботу та високі техніко-економічні показники.
4. Дослідження та розробка ефективних алгоритмів керування перетворювачами, що забезпечують задану динаміку та керування формою вихідної напруги та струму, використання двополярної імпульсної технології формування вихідної напруги джерела зміщення для запобігання дугоутворення в технологічному обладнанні.
5. Розроблення математичних моделей напівпровідникових перетворювачів, методів та методик їх розрахунку для потужних джерел живлення електротехнологічного та електротехнічного обладнання.
6. Розроблення і експериментальні дослідження макетних вузлів напівпровідникових перетворювачів з метою відпрацювання схемних рішень та практичних рекомендацій з побудови джерел живлення сучасного електротехнологічного та електротехнічного обладнання.

## Структура досліджень

Робота планується в п'ять етапів.

Перший етап присвячений дослідженню особливостей побудови систем живлення потужного електротехнологічного навантаження та обґрунтуванню раціонального вибору структур джерел живлення для електротехнологічних навантажень, що розглядаються.

Другий етап присвячений роботам з дослідження електромагнітних процесів взаємодії перетворювачів з потужним нестаціонарним технологічним навантаженням.

Третій етап присвячений моделюванню та оптимізації процесів комутації у високочастотних перетворювачах, розробці систем управління комутацією в силових вузлах джерел живлення, що реалізують ефективні алгоритми роботи обладнання.

Четвертий етап присвячений розробці математичних моделей перетворювачів та дослідженню перехідних і усталених режимів перетворювачів для джерел живлення з нестаціонарним навантаженням.

П'ятий етап присвячений розробці та експериментальним дослідженням макетних вузлів джерел електроживлення в складі технологічного та електротехнічного обладнання, узагальненню результатів дослідження.

.

## **Наукові (науково-технічні) результати, що очікуються за основними етапами та роботою в цілому**

1. Огляд особливостей побудови систем живлення потужного електротехнологічного навантаження, аналіз та обґрунтування структур джерел живлення для електротехнологічних навантажень, що розглядаються.
2. Результати досліджень усталених та перехідних процесів у напівпровідникових перетворювачах з урахуванням їх взаємодії з потужним нестационарним технологічним навантаженням.
3. Результати моделювання та оптимізації процесів комутації у високочастотних перетворювачах, рекомендації з побудови систем управління комутацією в силових вузлах джерел живлення, що реалізують ефективні алгоритми роботи обладнання.
4. Математичні моделі перетворювачів та результати дослідження перехідних і усталених режимів перетворювачів для джерел живлення з нестационарним навантаженням.
5. Результати розроблення та експериментальних досліджень макетних вузлів джерел електроживлення в складі технологічного та електротехнічного обладнання, узагальнення результатів дослідження. Практичні рекомендації щодо створення та використання напівпровідникових перетворювачів потужних систем живлення електротехнологічного обладнання.

В результаті виконання роботи будуть розроблені практичні рекомендації для побудови енергоефективних високочастотних напівпровідникових перетворювачів модульної структури для потужних систем живлення електротехнологічного обладнання

Потенційними споживачами розробленої продукції можуть бути електротехнологічні підприємства України.

## Потенційні споживачі наукових та науково-технічних результатів

Найменування результатів, ОІВ	Назва підприємства, організації, де передбачається використовувати результати, ОІВ	Заплановані обсяги впровадження	
Рекомендації по побудові ефективних систем живлення потужного технологічного обладнання з урахуванням вимог експлуатації	Дослідний завод зварювального обладнання НАНУ (Україна)	Будуть уточнюватися у ході виконання роботи	
Рекомендації по вдосконаленню систем електроживлення потужного електронно-променевого обладнання	ТОВ МК «Антарес», ТОВ «Стратегія ВМ» (Україна)	Будуть уточнюватися у ході виконання роботи	
Рекомендації по побудові потужних модульних напівпровідникових перетворювачів для двонаправлених систем накопичення електроенергії	ТОВ BMS Solar (Україна)	Будуть уточнюватися у ході виконання роботи	
Рекомендації по вдосконаленню експериментальних зразків систем електроживлення для pvd-технологій	Phygen inc. (США)	Будуть уточнюватися у ході виконання роботи	

*Дякую за увагу.*