

**Додаток А**  
Графічний матеріал

# Компенсатор нелінійних спотворень мережного струму

**Об'єкт дослідження** - нелінійні спотворення, джерела і методи їх усунення.

**Предмет дослідження** - пристрій компенсації спільно з нелінійним навантаженням.

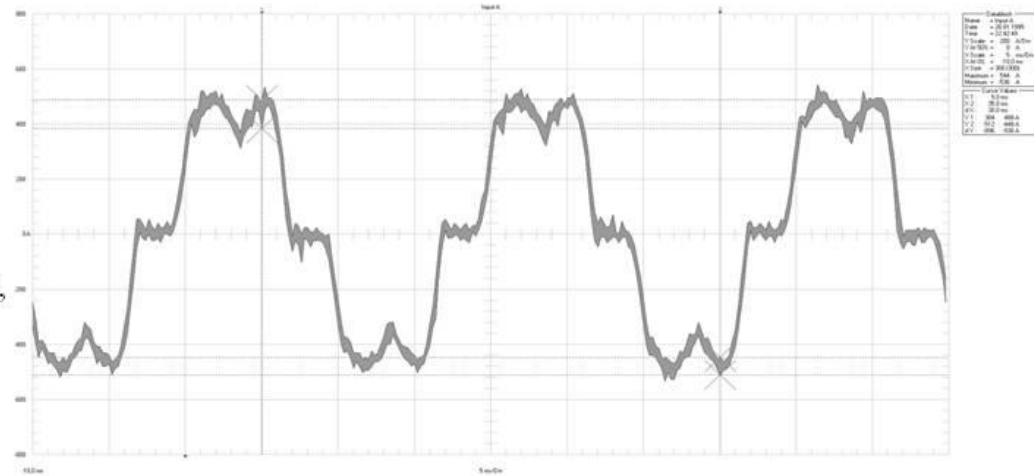
**Мета атестаційного проекту** - розробка і реалізація активних фільтрів для компенсації спотворень струму і напруги, що вносяться нелінійним навантаженням.

В роботі наведені теоретичні дослідження проблеми забезпечення якості електроенергії. Виявлено основну причину погіршення якості електроенергії - нелінійні навантаження, які утворюються різного роду споживачами. Для практичного вирішення проблеми погіршення якості електроенергії, тобто для захисту від спотворень форми струму і напруги, викликаних наявністю в мережі нелінійних навантажень використовуються активні фільтри.

**Результати:** проведено моделювання пристрою компенсації спільно з нелінійним навантаженням. Отримано модель пристрою, рівень деталізації якої дозволяє змінювати в широких межах (від ідеального випадку до обліку характеристик мікроконтролера і елементів пристрою).

## ОГЛЯД АНАЛОГІЧНИХ ПРИСТРІЙ І МЕТОДІВ

Стрімкий розвиток силової електроніки призвело до появи великої кількості нелінійних навантажень, які споживають несинусоїдальний струм з мережі живлення, а також генерують гармоніки вищих порядків (рис. 1.1 )



а) форма споживаного струму

Рисунок 1.1

Реактивна потужність і потужність спотворень, протікаючи по елементах електричної мережі, що має активний опір, викликають у них додаткові втрати електричної енергії. Крім того, реактивна потужність і потужність спотворень знижують пропускну здатність ліній електропередачі і трансформаторів, викликають їхнє нагрівання, призводять до збільшення перерізу проводів, заміну трансформаторів на велику номінальну потужність. Для захисту від гармонік, викликаних наявністю в мережі нелінійних навантажень, використовуються пасивні фільтри, що включаються паралельно джерелу гармонік, як налаштовані певну гармоніку, так і фільтри верхніх частот (рис 1. 2, 1. 3).

Варіанти схем пасивних фільтрів :

– налаштовані фільтри: з послідовним з'єднанням RLC або з ланцюжком RLC, включеним послідовно з паралельним ланцюжком RC/LR;

- Фільтри верхніх частот: ланка RC (першого порядку) або ланка C-RL або C-RC паралельно з L (другого порядку).

Для тиристорних випрямлячів зазвичай застосовуються фільтри, налаштовані на 5-7-11-13 гармоніки і плюс фільтр верхніх частот - на 17 гармоніку і вище. Добротність фільтрів зазвичай становить від 20 до 100.

Застосовуються пасивні фільтри додатково для корекції коефіцієнта потужності індуктивного навантаження.

Під час розрахунку точки підключення фільтра враховується можливість резонансів, які можуть спричинити перевантаження фільтрів. Недоліками пасивних фільтрів є значні капітальні витрати на реактивні елементи, великі площі. Їм властиво зниження ефективності фільтрації при коливаннях частоти та температури елементів схеми.

Обмеження кількості ланок фільтра викликає погіршення фільтрації.

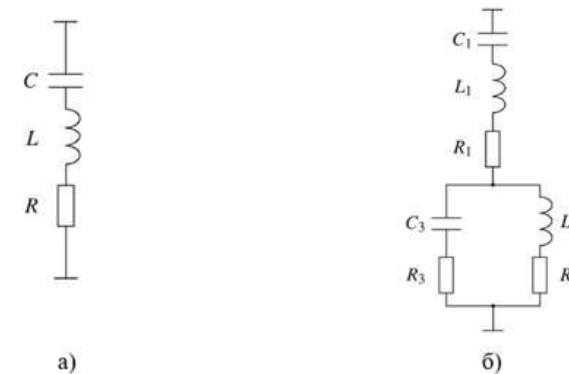


Рисунок 1. 2 – Приклади резонансних фільтрів

а) фільтр налаштований на одну частоту; б) фільтр налаштований на дві

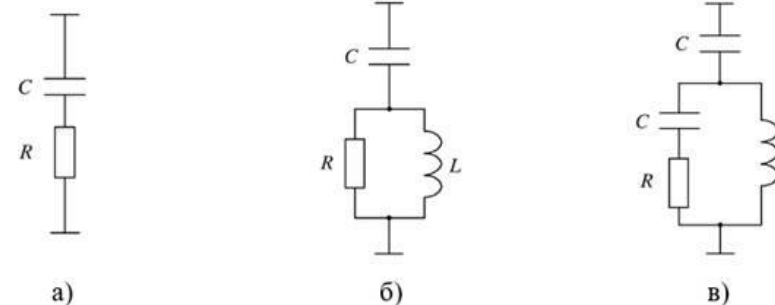


Рисунок 1. 3 – Приклади фільтрів верхніх частот

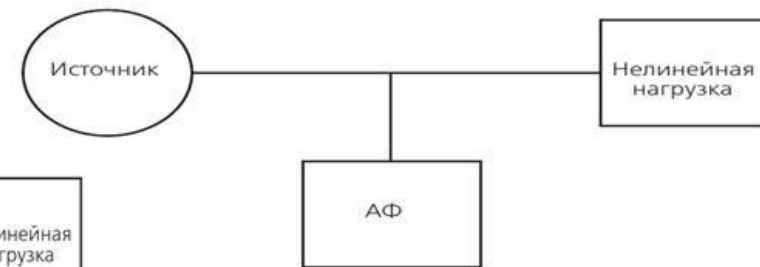
а) першого порядку б) другого порядку в) третього порядку

## Топологія активних фільтрів гармоній

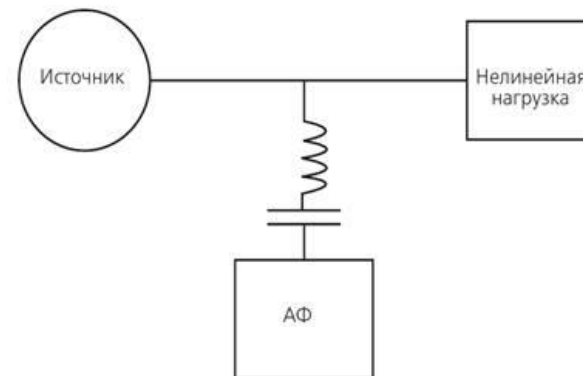
- Запропоновано велику кількість різних топологій, деякі з яких описані нижче. Для кожної топології існує специфіка необхідних параметрів як окремих елементів, так і підбору пристрою цілком для тих навантажень, які повинні бути компенсовані.
- Виділимо три топології:
  - - Послідовні фільтри;
  - - Паралельні фільтри;
  - - Гібридні фільтри.



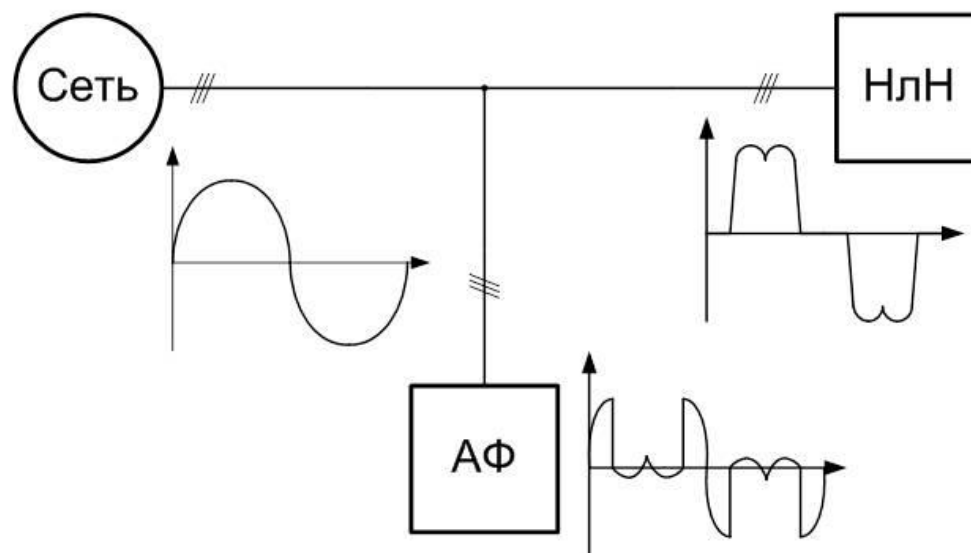
Послідовний активний фільтр



Паралельний активний фільтр



Гібридний активний фільтр

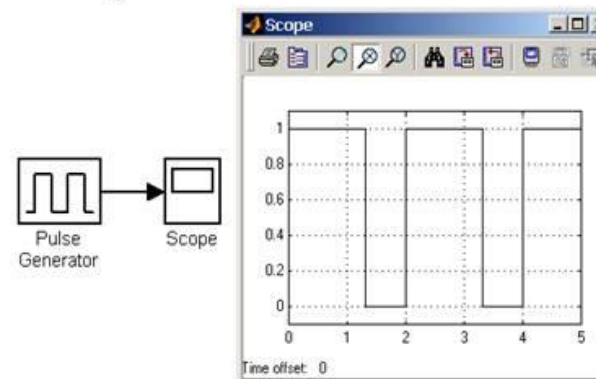
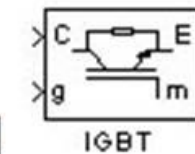
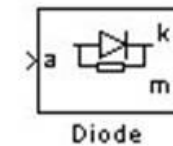
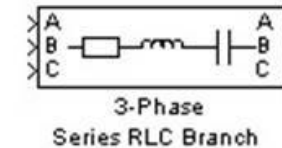
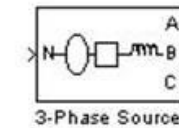


Принцип дії активного шунтуючого фільтра

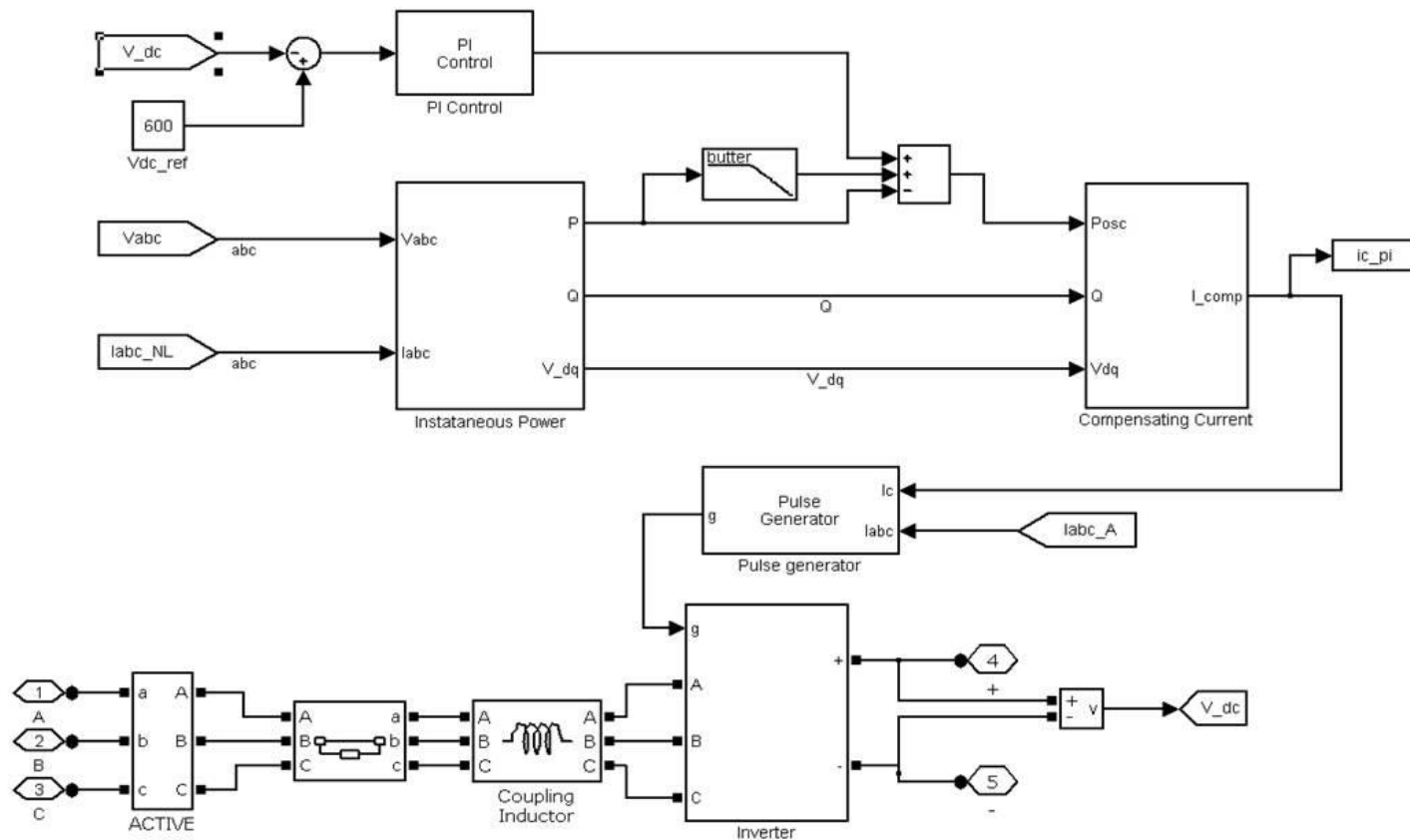
## Модель паралельного активного фільтра гармонік

Для реалізації схеми пристрою потрібні такі блоки:

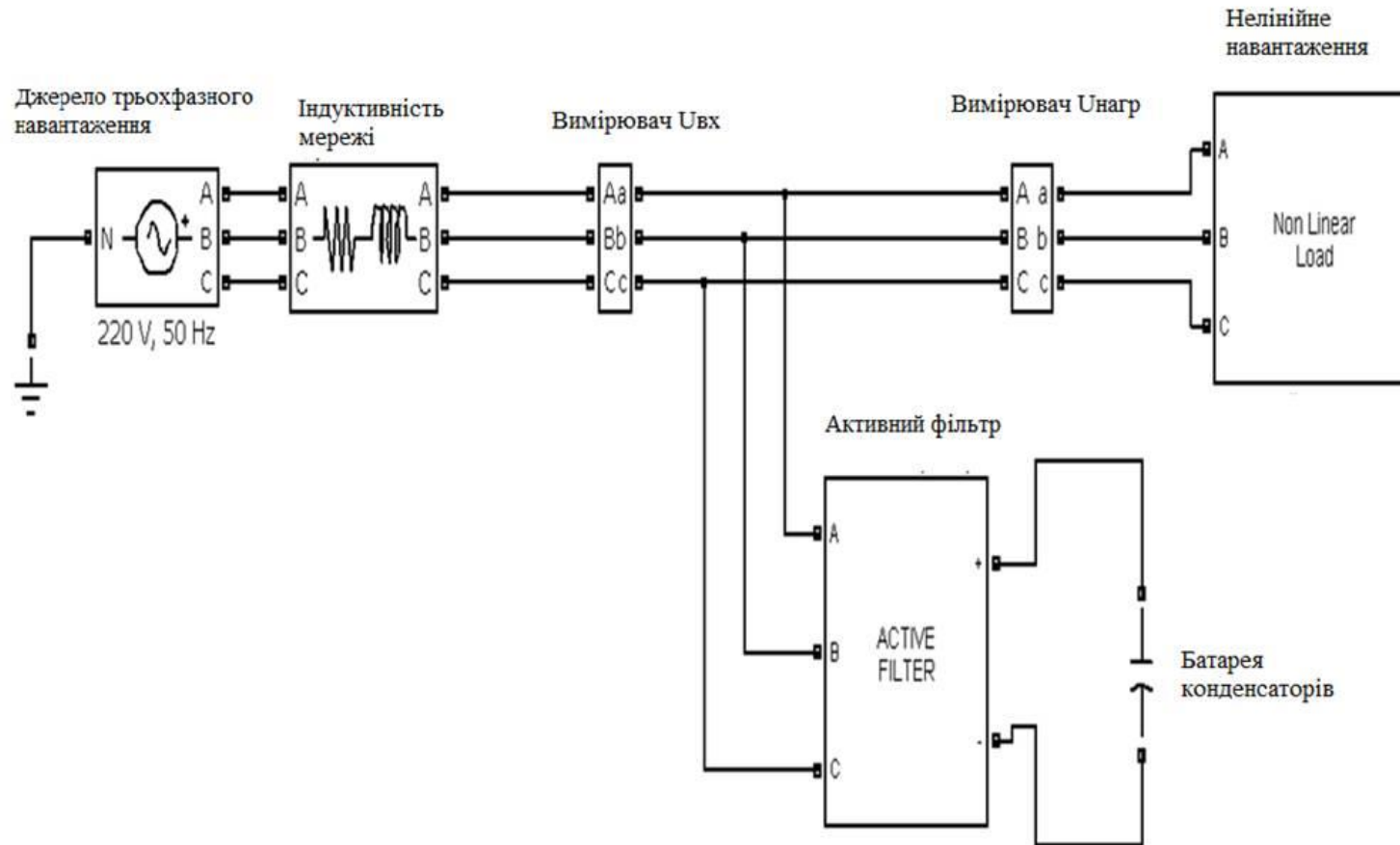
- Блок трифазне джерело напруги (3- PhaseSource ) (рис. 2.1) призначений для формування трифазної системи напруги
- Блок трифазний послідовний RLC-ланцюг (3-Phase Series RLC Branch ) (рис. 2.2) призначений для моделювання трифазного ланцюга, що складається з трьох RLC-ланцюгів.
- Блок силовий діод ( Diode ) (рис. 2.3) призначений для моделювання напівпровідникового силового діода
- Блок біполярний транзистор IGBT (IGBT) призначений для моделювання біполярного транзистора з ізольованим затвором ( див . рис. 2.4 ).
- Блок джерело імпульсного сигналу ( PulseGenerator ) призначений для формування прямокутних імпульсів ( див . рис. 2.5 ).



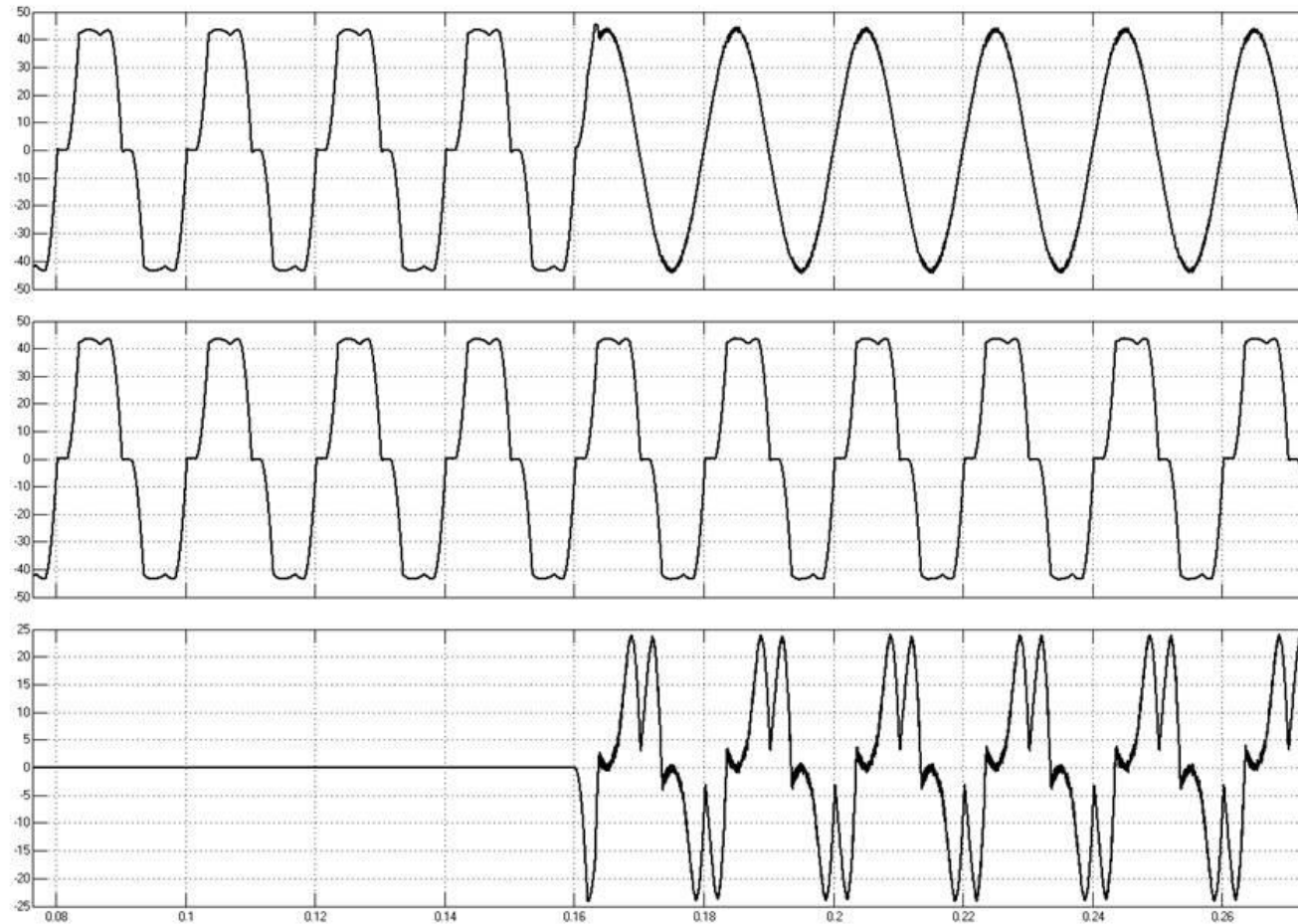
# Модель активного фільтру



## Модель «джерело енергопостачання – нелінійне навантаження – активний фільтр»



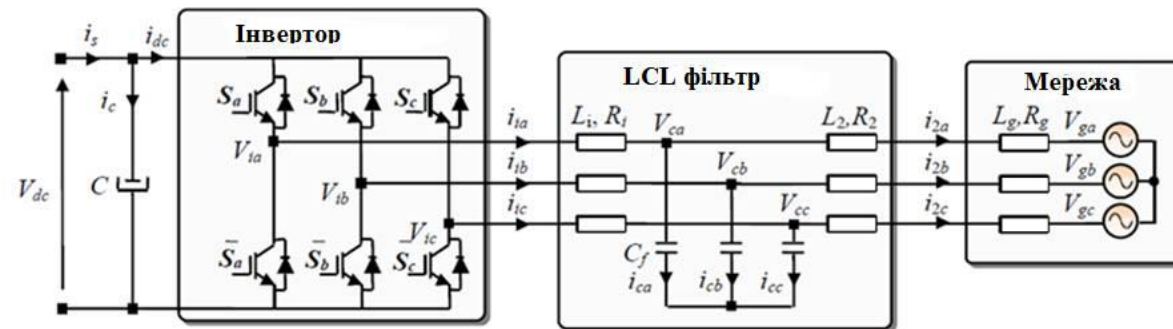
## Результати моделювання



## Особливості розрахунку інтерфейсного LCL фільтра

Методика розрахунку LCL фільтра потребує обліку наступних складових та умов:

- лінійна середньоквадратична напруга мережі  $U_g$ ;
  - номінальна активна потужність системи  $P$ ;
  - номінальна частота мережевої напруги  $f_g$ ;
  - частота перемикання перетворювача  $f_{sw}$ ;
  - струм насичення індуктивностей (дроселів) LCL фільтра  $I_{sat}$ .
- Умова стабільної роботи LCL фільтра



## Приклад розрахунку LCL фільтра

Розрахунок індуктивності з боку мережі

Вибирається коефіцієнт ослаблення гармонік струму 7 %. Потім обчислюється значення  $a = 0,178$  на основі виразу (3.30). Відповідно до виразу (3.29) значення індуктивності на стороні мережі становить 1 мГн, що становить 11% загального значення індуктивності LCL фільтра.

Частота резонансу

Виконуємо перевірку на частоту резонансу згідно з виразом (3.17).

Резонансна частота виділена напівжирним зображенням.

$$500 \text{ Гц} \leq 1,667 \text{ Гц} \leq 1889 \text{ Гц} \leq \mathbf{2400 \text{ Гц}} \leq 2470 \text{ Гц} \leq 5000 \text{ Гц}$$

Отже, для вибраних параметрів LCL фільтра резонансна частота розміщена у стійкій області, де не потрібно додаткового демпфування.

## Приклад розрахунку LCL фільтра

Розрахунок індуктивності з боку перетворювача

Струм насичення дроселів приймемо рівним  $I_{sat}$  17 А, а максимальний струм перетворювача  $I_{imax}$  дорівнює 13 А. Таким чином максимальні пульсації струму перетворювача  $i_{imax}$  дорівнює 4 А.

З рівняння (3.28) розрахуємо значення індуктивності.

$$L_{imin} = 600 / (12 \cdot 10^4 \cdot (17 - 13)) = 1,25 \text{ мГн.}$$

Для індуктивності на стороні перетворювача вибирається значення 4 мГн, що становить 43% загального значення індуктивності LCL фільтра.

## Приклад розрахунку LCL фільтра

У цьому підрозділі застосуємо вищеописану методику проектування LCL фільтра. Вихідні дані для розрахунку згідно з технічним завданням.

Напруга мережі  $U_g = 380 \text{ В}$  ;

Частота мережі живлення  $f_g = 50 \text{ Гц}$ ;

Потужність встановлення  $P = 5 \text{ кВт}$ ;

Частота комутації  $f_{sw} = 10 \text{ кГц}$ ;

Напруга ЗПТ  $V_{dc} = 600 \text{ В}$  ;

Індуктивність мережі  $L_{gmin} = 0$  та  $L_{gmax} = 13 \text{ мГн}$ .

Максимальне значення загальної індуктивності  $L_{Tmax}$

Згідно з виразом (3.19) максимальне значення повної індуктивності  $L_{Tmax}$  дорівнює

$$0,1 \cdot 380^2 / (2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 5 \cdot 10^3) = 9,20 \text{ мГн}.$$

Максимальне значення конденсатора LCL фільтра  $C_{fmax}$

Відповідно до виразу (3.24) максимальне значення ємності конденсатора фільтра  $C_{fmax}$  дорівнює

$$0,05 \cdot 5 \cdot 10^3 / (2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 380^2) = 5,5 \text{ мкФ}.$$

