

**МІНІСТЕРСТВО ОБОРОНИ УКРАЇНИ  
ВІЙСЬКОВА АКАДЕМІЯ (М. ОДЕСА)**

**ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКА, ЕЛЕКТРОТЕХНІКА  
ТА ЕЛЕКТРОМЕХАНІКА:  
застосування, дослідження, освіта**

**Збірник тез доповідей  
Всеукраїнської наукової конференції**

**15 квітня 2021 року**

**м. Одеса**

## ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ЦИФРОВОЇ ФІЛЬТРАЦІЇ НА РОЗПІЗНАВАЛЬНУ ЗДАТНІСТЬ ЗАШУМЛЕНИХ СИГНАЛІВ ЕНЕРГОСИСТЕМИ

**д.т.н., проф. Рудик А.В., Грицюк В.О.**

*Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне*

Електрична система високої напруги є потужною енергетичною системою, тому її сигнали є детермінованими і описуються без залучення термінів математичної статистики [1]. При обробленні сигналів енергосистеми необхідно враховувати, що аналізовані сигнали змінюють свої параметри в залежності від особливостей режиму електричної системи. В системі можуть бути присутніми гармонічні складові через нелінійність системи, відмінні від основної складової, тому необхідно враховувати, що аналізовані сигнали можуть мати порівняно складну спектральну структуру. Відомо також, що до складу сигналу можуть входити шуми та завади випадкового характеру.

Природа шуму в цифрових сигналах автоматики та релейного захисту різна і переважно визначається похибками тракту аналого-цифрового перетворення та вимірювання сигналів. Ці шуми мають випадковий характер, тому що неможлива їх повторна ідентична реалізація, і визначаються шумами округлення АЦП (ефект квантування), шумами тремтіння (девіації частоти дискретизації) та трендом (нестабільність нуля АЦП).

Електромагнітними завадами є небажані фізичні явища чи вплив електромагнітних, магнітних або електричних полів, електричних напруг або струмів, створені деяким джерелом, яке порушує нормальну роботу технічних засобів чи призводить до погіршення їх технічних параметрів та характеристик, тобто негативно впливають на корисний сигнал при його прийманні чи перетворенні.

На промислових підприємствах одні й ті самі електроприймачі (ЕП) можуть виконувати роль як джерел, так і приймачів електромагнітних завад, тому можна стверджувати, що всі електричні підстанції (ЕПС), ЕП промислових підприємств та різні електротехнічні об'єкти і пристрої автоматизації, генерування та передавання електроенергії знаходяться під впливом електромагнітних завад (ЕМЗ).

Для енергетичних систем (ЕС) природними джерелами завад є розряди блискавок, аномалії магнітного поля Землі та ін. Джерелами штучних завад є комутаційна апаратура, високовольтні лінії, напівпровідникові мости та різні типи коротких замикань, тобто аварійні режими мережі [2].

На стороні постійного струму потужні випрямлячі зазвичай мають великі індуктивності, якими є обмотки електричних машин постійного струму і згладжувальні реактори. Ці індуктивності часто в десятки разів перевищують еквівалентну індуктивність з боку змінного струму, тому такі випрямні пристрої відносно мережі змінного струму є генераторами вищих гармонік. При цьому потрібно враховувати, що струм на частоті гармоніки, спрямований в мережу, має амплітуду, яка не залежить від параметрів мережі.

Джерела завад можуть бути зовнішніми (знаходяться поза ЕП), внутрішніми (розташовані в самому ЕП), міжсистемними (розташовані не в тій системі, що розглядається) та внутрішньосистемними (розташовані в системі, що розглядається). Розділення ЕМЗ на міжсистемні та внутрішньосистемні є умовним і залежить від визначення самих систем.

За ознакою середовища поширення виділяють завади випромінювання (поширюються у навколишньому середовищі і є результатом впливу електричного, електростатичного, магнітного полів або їх комбінації) та завади провідності або кондуктивні (характерні для промислових підприємств і поширюються у провідних середовищах – лініях, кабелях, оболонках, електролітах, шинопроводах, конструкціях та ін.).

Часове проявлення завад характеризується тривалістю дії ЕМЗ та їх шпаруватістю. За тривалістю дії завади діляться на неперервні (їх рівні не зменшуються нижче деякого

порогового значення), тривалі (тривалість їх дії більше потроєної сталої часу контрольованого параметру), короткочасні (тривалість їх дії менше потроєної сталої часу контрольованого параметру, однак більше періоду частоти мережі 20 мс) та імпульсні (тривалість їх дії менше 20 мс). За періодичністю появи або зникнення ЕМЗ діляться на регулярні або періодичні та неперіодичні, які в свою чергу діляться на стаціонарні випадкові та нестаціонарні.

За частотними ознаками завади діляться на низькочастотні (НЧ) та високочастотні (ВЧ), що є, однак, доволі умовним. Для прикладу, аналіз спектру напруги живлення дозволяє визначити амплітуди гармонічних складових, які відносно основної гармоніки відносяться до ВЧ. В іншому випадку, якщо у високочастотній апаратурі виникає паразитна модуляція з меншою частотою, то таку модуляцію (заваду) вважають низькочастотною, хоча абсолютне значення її частоти може бути порівняно високим. Таким чином, розподіл завад за частотою має проводитися в кожному окремому випадку. Оскільки в основній кількості промислових ЕП стала часу їх параметрів режиму суттєво більше періоду основної гармоніки, то на практиці як частоту поділу на НЧ та ВЧ завади умовно приймають рівною 50 Гц.

За формою енергетичного спектру відрізняють ЕМЗ з неперервним (флуктуаційні завади чи шуми з приблизно сталою інтенсивністю спектру в межах смуги пропускання АЧХ), дискретним і змішаним спектром. Іноді застосовують і більш деталізовану градацію ЕМЗ за видом спектру, однак на практиці трирівнева градація є абсолютно достатньою.

За характером дії ЕМЗ на корисний сигнал відрізняють адитивні (додаються до корисного сигналу), мультиплікативні (їх дія на приймач змінює комплексну структуру) та симетричні і несиметричні відносно вибраної осі завади.

Основними видами штучних ЕМЗ є завади випромінювання (характеризуються залежністю розподілу напруженості поля у просторі навколо джерела, а їх дія оцінюється за амплітудою наведеної ЕРС завади) та провідності.

Рівень зв'язку джерел завад з приймачем залежить не тільки від просторового розміщення джерела і приймача та властивостей середовища розповсюдження, а також і від наявності інших можливих шляхів розповсюдження завад (металеві оболонки, корпуси, труби, залізобетонна арматура, кривля та інші металеві конструкції, проводи, шинопроводи, кабелі та ін.). Тому практично неможливо не тільки проаналізувати, але й просто врахувати всі умови, які кількісно визначають зв'язок деякого джерела з приймачем (багатомірність введення завади) [2].

Спектр частот випромінених завад широкий і може досягати сотень МГц. Наприклад, при комутації низьковольтних мереж (пускачі, реле, контактори) діапазон частот завад становить (0.005-30) МГц, кількість імпульсів 1...10, а тривалість імпульсів до 30 мкс.

Відносно ЕП корисним сигналом є напруга живлення, а її небажаними змінами – будь-які зміни параметрів режиму роботи ЕП (форми, амплітуди, частоти та ін.). Залежно від розв'язуваної задачі корисним сигналом може бути будь-який сигнал, який виникає (поширюється) у блоках, вузлах чи системі управління ЕП.

Причиною виникнення небажаних явищ (змін) є різні за амплітудою та характером струми, протікаючі по елементах електромережі та самих ЕП. В зв'язку з цим завади провідності визначаються як струми, що є результатом дії багатьох факторів – роботи ЕП, мереж, електрообладнання, перехідних процесів, аварійних та ненормальних режимів та індукованих завад випромінювання [2].

Зазвичай повний сигнал  $y(t)$  містить корисний сигнал  $u(t)$  та шум, який характеризується співвідношенням сигнал/шум SNR (Signal to Noise Ratio).

Більше значення SNR забезпечує коректний збір даних з незначними спотвореннями, викликаними небажаним шумом. В енергосистемі SNR лежить в діапазоні (80-120) дБ [3].

Небажаний шум є невід'ємною, хоча і небажаною, складовою частиною усіх сигналів електронних схем та переданих повідомлень. В загальному випадку до складу зашумленого сигналу входять вищі гармоніки, кратні основній частоті, затухаючі аперіодичні складові, а також затухаючі та незатухаючі періодичні складові з частотами, що відрізняються від

основної. Тому в практичних випадках точне врахування всіх шумових компонент зашумленого сигналу є принципово неможливим [4].

Проведемо порівняння різних методів цифрової фільтрації для випадку, коли на вхід цифрового фільтра (ЦФ) подається зашумлений сигнал (1) з компонентою білого шуму:

$$y(t) = 200\sin(2\pi \cdot 50t) + 10\sin(2\pi \cdot 15t) + 1.2\sin(2\pi \cdot 0.6t) + WN(SNR_{80}). \quad (1)$$

Для реалізації попередньої фільтрації потрібно задати початкові параметри ЦФ, які визначаються вимогами до затухання в області НЧ, обмеженої основною гармонікою енергосистеми та фільтрацією шумових компонент.

Початкові параметри ЦФ НЧ є такими: частота дискретизації  $F_s = 500 \text{ Гц}$ ; граничні частоти смуг пропускання (СП)  $F_{pass} = 50 \text{ Гц}$  і затримування (СЗ)  $F_{stop} = 70 \text{ Гц}$ ; максимально допустиме затухання в СП  $A_{pass} = 1 \text{ дБ}$  і мінімально допустиме затухання в СЗ  $A_{stop} = 80 \text{ дБ}$ .

В програмному пакеті MatLab було синтезовано декілька фільтрів мінімального порядку типів Баттерворта, Чебишева I та II роду і Золотарьова-Кауера (еліптичний) за методами найкращої рівномірної (чебишевської) апроксимації (Equiripple) та з використанням вікна Кайзера (Kaiser window). Результати оброблення сигналів за методом Проні з попередньою цифровою фільтрацією представлено в табл. 1.

Таблиця 1 – Результати розпізнавання компонент сигналу з фільтрацією і без

Метод реалізації фільтра	Порядок фільтра	Параметри виявлених компонент сигналу з фільтрацією		Параметри виявлених компонент сигналу без фільтрації	
		амплітуда, в.о.	частота, Гц	амплітуда, в.о.	частота, Гц
Butterworth	29	200; 10; 1.2	50; 15; 0.6	200; 10	50; 15
Chebyshev I	12	200; 10; 2	50; 15; 0.4		
Elliptic	8	189; 9.8; 1.2	50; 15; 0.55		
Least-square	90	200; 10	50; 15		
Equiripple	65	208.6; 10.6	50; 15		
Kaiser window	124	200; 10	50; 15		

За результатами табл. 1 можна зробити висновок, що ЦФ типу КІХ (кінцева імпульсна характеристика) зовсім не виявили компоненти з частотою 0.6 Гц при тривалості вікна спостереження 2 с. При збільшенні вікна спостереження до 6.2 с та зміни порядку методу Проні до 12 фільтром, синтезованим за методом вікна Кайзера, виявлено всі компоненти, на відміну від фільтра, синтезованого за методом найкращої рівномірної апроксимації. Результати досліджень, отримані для КІХ-фільтрів при зміні порядку методу Проні та тривалості вікна спостереження представлені в табл. 2.

Таблиця 2 – Результати розпізнавання компонент сигналу КІХ-фільтрами

Метод реалізації фільтра	Порядок фільтра	Порядок методу Проні	Тривалість вікна спостереження, с	Параметри виявлених компонент сигналу з фільтрацією	
				амплітуда, в.о.	частота, Гц
Equiripple	65	20	0.2 – 6	208.6; 10.6; 1.2	50; 15; 0.6
			0.2 – 8	208.6; 10.6; 1.2	50; 15; 0.6
Kaiser window	124	12	0.2 – 6	200; 10; 1.2	50; 15; 0.59
			0.2 – 8	200; 10; 1.2	50; 15; 0.6

Далі проведено оптимізацію методів фільтрації досліджуваного сигналу збільшенням порядку фільтра для зменшення порядку методу Проні, а результати представлені в табл. 3.

Таблиця 3 – Оптимізація методів фільтрації досліджуваного сигналу

Метод реалізації фільтра	Порядок фільтра	Порядок методу Проні	Параметри виявлених компонент сигналу з фільтрацією		Тривалість оброблення сигналу фільтром, с	Тривалість вікна спостереження, с
			амплітуда, в.о.	частота, Гц		
Chebyshev II	15	15	200; 10; 1.2	50; 15; 0.6	0.01	1 – 2
	20	15			0.01	
	30	15			0.011	
Kaiser window	124	15			0.014	
Least-square	90	13			0.011	
Equiripple	70	17			0.01	
	80	16	0.011			
	100	15	0.012			

На рис. 1 представлена форма сигналу до і після оброблення еліптичним фільтром.

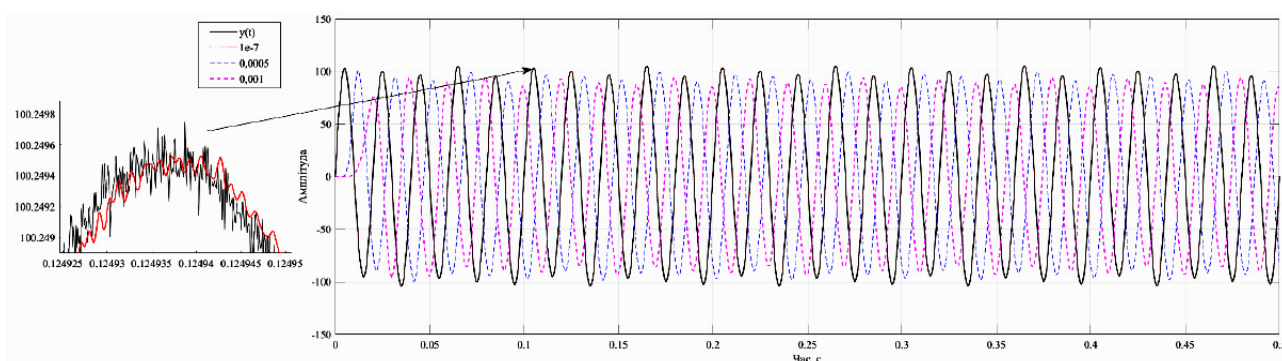


Рисунок 1 – Форма сигналу до та після його оброблення еліптичним фільтром

Нажаль, еліптичний фільтр не дає бажаних результатів розпізнавання компонент сигналу практично незалежно від його порядку та тривалості вікна спостереження, тому що амплітуда вихідного сигналу фільтра зменшується та вноситься деякий фазовий зсув. Причиною таких лінійних частотних спотворень є наявність пульсацій в смузі пропускання. Крім того, амплітуда вихідного сигналу еліптичного фільтра істотно залежить від частоти дискретизації сигналу (рис. 1), а при її зменшенні амплітуда вихідного сигналу фільтра значно менше, ніж амплітуда вхідного сигналу.

1. Антонов В.И. Теория и приложения адаптивного структурного анализа сигналов в интеллектуальной электроэнергетике: дис. д. т. н.: 05.14.02. – Чебоксары, 2018. – 330 с.
2. Вагин Г.Я., Лоскутов А.Б., Севостьянов А.А. Электромагнитная совместимость в электроэнергетике: Учебное пособие. Нижегородский гос. техн. ун-т. – Нижний Новгород, 2004. – 214 с.
3. Буткевич О.Ф., Чижевський В.В. Вплив цифрової фільтрації сигналів на результати аналізу низькочастотних електромеханічних коливань в об'єднаних електроенергетичних системах / Технічна електродинаміка. – 2016. – №6. – С. 54-59.
4. Румянцев Ю.В., Романюк Ф.А., Румянцев В.Ю., Новаш И.В. Реализация цифровых фильтров в микропроцессорных устройствах релейной защиты / Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. – 2016. – Т.59. – №5. – С. 397-417.

***ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКА, ЕЛЕКТРОТЕХНІКА ТА ЕЛЕКТРОМЕХАНІКА:  
застосування, дослідження, освіта***

**Збірник тез доповідей  
Всеукраїнської наукової конференції**

**15 квітня 2021 року**

**Редакційна група за якість матеріалів відповідальності не несе.  
Матеріали доповідей авторів надано у вигляді, відповідно  
до заявок на участь у конференції.  
Дякуємо авторам за дотримання рекомендованого шаблону та обсягу виступів.**

Відповідальний за випуск – Букарос А.Ю.