

**В. В. Радченко, канд. техн. наук., доцент**  
(Україна, Запоріжжя, Запорізька державна інженерна академія)

## **БЕЗІНЕРЦІЙНЕ ВИМІРЮВАННЯ ВІДХИЛЕНЬ ЗМІННИХ ПРОЦЕСІВ**

Матеріальні, енергетичні та інформаційні складові технічних систем, як відомо відіграють визначальну роль в забезпеченні їх дії. Важливу роль мають також комунікаційні й інші умови забезпечення процесів. Серед важливих передумов реалізації характеристик регульованих систем є вимірювання відхилення контрольованих величин. Так, вимірювання відхилення напруги є головною передумовою вірної роботи регулятора напруги (РН), що становить основу системи збудження синхронного генератора, в тому числі й гідрогенератора, [1].

Вимірювальний орган є вхідним і основним функціональним елементом РН, бо на нього покладається завдання не тільки виділення сигналу відхилення напруги із заданою точністю, але і забезпечення передачі цього сигналу з мінімальною затримкою. Вказана затримка, складаючись із рештою можливих на шляху проходження сигналу відхилення запізнювань, фактично приводить до підвищеної інерційності всієї системи збудження, що різко погіршує її динамічні характеристики, швидкодію й призводить до коливального характеру перехідного процесу, [2].

Вимірювання, реалізовані за традиційними схемами порівняння є джерелом інерційності контуру регулювання, що діє в колі зворотного зв'язку гідрогенератора. Коливальний затухаючий характер перехідного процесу переважно визначається інерційністю каналу регулювання збудження.

Доречно також нагадати, що зазвичай виділення величини відхилення контрольованої змінної напруги від заданого значення принципово засноване на порівнянні контрольованої величини, приведеної до будь – якого вигляду, із заданою, що слугує в даному випадку опорною. Найбільш широкого поширення на цей час набули схеми порівняння на нелінійних елементах і регенеративні, такі, що перетворюють електричні сигнали одного вигляду в інший. В якості джерела опорного сигналу застосовують, як правило, напівпровідникові стабілітрони і інші порогові елементи, що практично виключає інерційність опорних елементів і схем порівняння виконаних на напівпровідниках. Залишається частина вимірювального органу, що приводить вимірювану величину до необхідного вигляду. На рис. 1. наведені найбільш поширені технічні рішення вимірювальних органів. Елемент порівняння (ЕП) вимірювального органу, зображений на рис. 1 а, – вимагає практично синусоїдальної вхідної напруги і перетворює амплітуду контрольованої напруги у часо-імпульсний сигнал за допомогою нуля органу (НО), [3].

Для вірного функціонування схеми, постійна часу заряду має бути менше чверті періоду, а розряду – значно більше напівперіоду, що і обумовлює інерційні властивості даної схеми, незалежно від імпульсного принципу її дії. Схеми зображені на рис. 1, б для підвищення точності порівняння з опорною напругою мають в своєму складі згладжуючий фільтр випрямленої напруги у вигляді ємності, яка забезпечує їх інерційні властивості. Схема, рис. 1, в найбільш проста з розглянутих із-за поєднання функцій її окремих елементів, але виділяє сигнал відхилення у вигляді середнього значення напруги за допомогою інтегруючого елемента, у вигляді ємності, на виході і, тому, не позбавлена інерційних властивостей. З тих, що розглядаються, схеми рис. 1, д і е, найбільш складні, оскільки припускають або використання підсилювача з квадраторами на вході, або комутатори з елементами управління (ЕУ), елементу пам'яті (ЕП) й силового елемента (ЕС). У схемах, рис. 1, ж, зроблена спроба позбавитися від інерційного згладжуючого елемента або, принаймні, понизити її. У першому випадку обмотка управління магнітного підсилювача не дозволяє повністю вирішити цю задачу, зважаючи на інерційність, що вноситься, а в другому – інерційність практично повністю долається за рахунок застосування багатообмоточного трансформатора напруги і 12 – пульсної схеми випрямлення. Слід зазначити, що наявність навіть самої незначної інерційної складової в контурі зворотного зв'язку гідрогенератора принципово підвищує порядок системи регулювання напруги, що призводить до коливань протягом його перехідного процесу.

Як показано вище, основними причинами інерційності можуть, бути, залежно від конструкції різні за природою постійні часу (електромеханічні, електромагнітні, електричні і ін.) окремих елементів вимірювального органу, незалежно від місця їх положення в схемі вимірювального органу. Проте вплив інерційності залежить від чутливості елемента або ланки до якого підключений елемент, що вносить її. Більшість вимірювальних органів, незалежно від використовуваного методу виділення сигналу відхилення, побудована за схемою зображеною на рис. 2 і включає випрямний елемент (ВЕ), фільтруючий (ФЕ), опорний елемент (ОЕ) і елемент порівняння (ЕП).

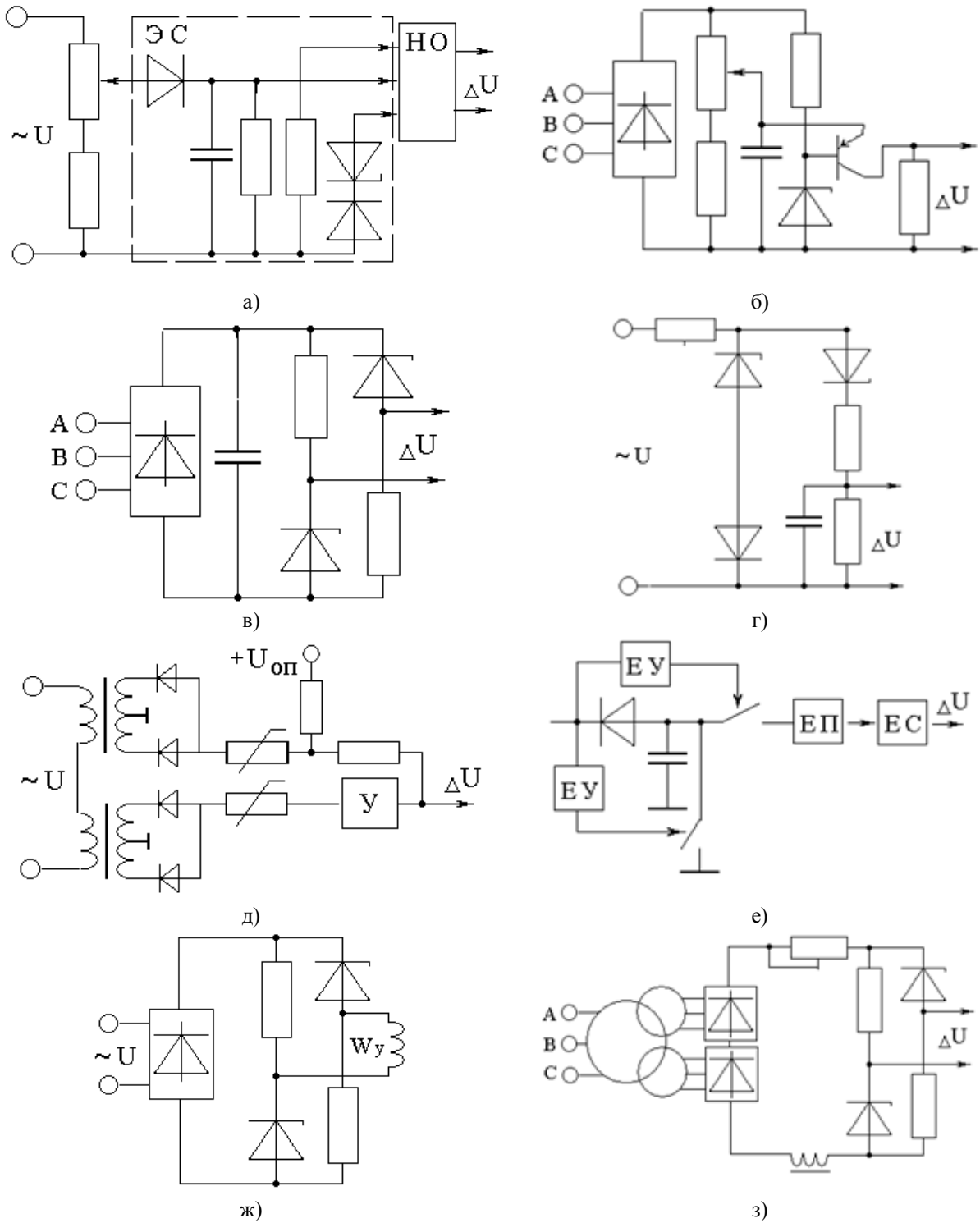


Рис. 1. Схемні рішення вимірювальних органів

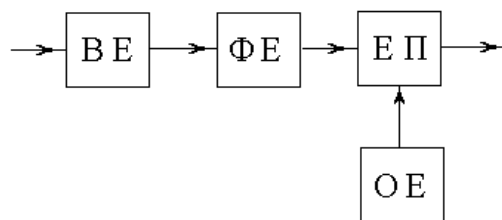
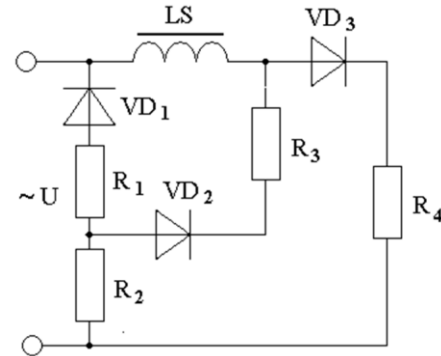


Рис. 2. Функціональна схема вимірювального органу:  
 BE – вхідний елемент; ФЕ – формуючий елемент; ЕП – елемент порівняння; ОЕ – опорний елемент

У сучасному виконанні такої схеми інерційність переважно містить тільки ФЕ, хоча вище доведена принципова можливість наявності інерційності ЕП і, навіть, ОЕ. З огляду на те, що опорна напруга постійна, а точність вимірювального органу залежить від якості приведення двох порівнюваних сигналів до одного вигляду – виду опорної напруги. Існує, принаймні, два шляхи подолання інерційності фільтру в приведеній схемі. Перший шлях показаний на рис. 1. з, полягає в підвищенні якості випрямлення змінної напруги, що спричиняє за собою різке ускладнення вимірювального трансформатора і випрямляча. Такий шлях не можливо вважати раціональним для широкого практичного застосування. Другим шляхом може бути проміжне перетворення контрольованої напруги й опорної у форму сигналів (або їх величин) що допускають порівняння між собою, минувши при цьому операцію фільтрації в традиційному сенсі слова. Останній шлях найбільш прийнятний для побудови безінерційного вимірювального органу, оскільки позбавлений явних недоліків попереднього. Прикладом вказаного підходу може служити технічне рішення диференціюючого блоку на однополуперіодному магнітному елементі наведено на рис. 3. Визначення похідної функції, тобто визначення величини і знаку приросту функції за певний відрізок часу вимагає знання щонайменше двох значень функції в два суміжні моменти часу.



**Рис. 3. Схема однополуперіодного диференціатора на магнітному елементі**

Магнітний сердечник з матеріалу з прямокутною петлею гістерезису дозволяє запам'ятати інформацію про амплітуду вхідного сигналу в один з напівперіодів і потім порівняти її з амплітудою сигналу в наступний напівперіод. Припустимо, що на початку напівперіоду, що управляє, магнітний сердечник знаходився в стані залишкового насичення  $B_r$ . Інтеграл вхідної напруги протягом кожного напівперіоду пропорційний його амплітудному значенню. Поки сердечник протягом частини робочого напівперіоду в процесі перемагнічування не досяг насичення, на його обмотці падає практично вся вхідна напруга. Після насичення сердечника напруга падає практично повністю на опорі його навантаження. Якщо амплітуда вхідного сигналу не змінюється, то вихідний сигнал пропорційний вхідному.

Сигнал, пропорційний сумі змінної та її похідної за часом (з відповідним знаком), є імпульсом модульованим по ширині. Вихідний сигнал описаного пристрою складається з сигналу пропорційного значенню вимірюваної величини, і сигналу пропорційного похідній цієї ж змінної за часом.

Описана схема диференціатора не відрізняється високою точністю, порядку 3...5%, має досить обмежену смугу пропускання. Проте завдяки простоті, надійності і високій перешкодостійкості отримала застосування в системах автоматичного контролю, регулювання і управління. Вона може служити прототипом для побудови алгоритму і моделі безінерційного вимірювального органу з умовою підвищення точності.

Алгоритмічна основа вимірювання відхилення змінної напруги безпосередньо впливає на статичні і динамічні характеристики функціонального перетворювача. Вона має забезпечувати необхідний рівень технічних якостей системи управління. Важливими уявляються не тільки і не стільки статичні режими системи управління, але і її динамічні якості в цілому.

Стосовно гідроагрегатів ГЕС ця вимога безпосередньо витікає, як зазначено з системної ролі гідроенергетики, – мобільного резерву потужностей енергетичної системи. Вказана обставина, окрім забезпечення добових пікових режимів, призводить до істотного зростання числа робочих циклів енергетичного обладнання гідроелектричних станцій. Так, за останні роки число робочих циклів гідроагрегатів Дніпровською ГЕС зросло з 5000 до 8000 і більш на рік.

Це істотно підвищує вимоги до ефективності саме динамічних складових робочих процесів.

Вимірювання і перетворення відхилення змінної напруги від встановленого значення не повинні вносити істотних спотворень на рівні первинного перетворювача. Тому алгоритми перетворення і формування сигналу, що управляє, окрім необхідної точності, метрологічних характеристик, повинні виключати прояви спотворюючих динамічних чинників. Для цього слід чітко уявляти джерела і причини прояву інерційності ланцюгів вимірювання і регулювання в першу чергу.

Існуючі методи виділення істотних управляючих дій також досить часто містять різні джерела низької динаміки процесів і демпфування передачі сигналів по каналах управління. Можливі також і алгоритмічні причини появи і прояву постійних часу окремих процесів, що реалізуються програмно (інтегрування, диференціювання і ін.).

Проте вплив інерційності переважно залежить від чутливості елемента або ланки до якого підключений елемент, що вносить її, або відповідна функція. Більшість вимірювальних органів, незалежно від використовуваного методу виділення сигналу відхилення, побудовано за схемами порівняння і включають випрямлення, фільтрацію, формування, опорні величини й їх порівняння.

У сучасному виконанні така схема може містити інерційність переважно на рівні фільтрації, хоча вище доведена принципова можливість наявності інерційності порівняння і, навіть, опорних величин. З огляду на те, що опорна напруга постійна, а точність вимірювального органу залежить від якості приведення двох порівнюваних сигналів до одного вигляду – виду опорної напруги, існує, принаймні, два основні шляхи подолання вказаних перешкод в схемі вимірювань.

Перший шлях за своєю суттю екстенсивний, він полягає в підвищенні якості випрямлення змінної напруги, що спричиняє за собою різке ускладнення вимірювального трансформатора, випрямляча і пристрою в цілому. Такий шлях не можна вважати раціональним для широкого практичного застосування.

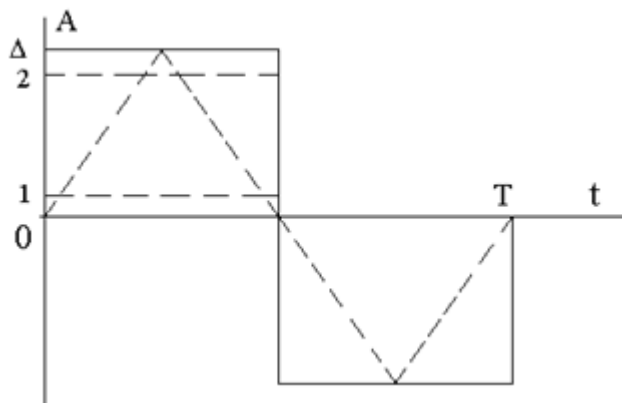
Другим шляхом може бути проміжне перетворення як контрольованої напруги, так і опорної у форму сумірних сигналів (або їх величин) що допускають порівняння між собою, принципово минувши при цьому операцію фільтрації в традиційному сенсі слова.

Останній шлях найбільш прийнятний для реалізації безінерційних вимірювань, оскільки позбавлений явних недоліків попереднього підходу.

Алгоритмічні причини інерційності можуть бути також подолані в процесі розробки безінерційного методу вимірювань що не використовує операції з постійними часу на рівні обробки і формування вихідних сигналів управління.

Більш того, теоретично й практично можлива розробка методу перетворення відхилення змінної напруги безпосередньо в управляючий сигнал, що дозволяє об'єднати функції вимірювання і регулювання. Вказаний підхід є продуктивним.

Аналіз показує, що перераховані вище проблеми безпосередньо пов'язані з використовуваними методами і принципами вимірювань змін змінних величин. Тому має сенс розглянути докладніше за можливість реалізації методу безінерційного вимірювання зміни змінної величини. При цьому досить виділити і розглянути замкнутий операційний цикл у вигляді періоду контрольованої змінної напруги, рис. 4. Контрольовані величини можуть мати синусоїдний, трикутний або прямокутний вигляд.



**Рис. 4. Цикл зміни контрольованої величини:  
1 та 2 — характерні контрольовані ділянки сигналу**

докладніше. Закон змінної напруги в загальному вигляді

$$u = U_m \sin(\omega t + \psi).$$

Оскільки напруга, зокрема її поточне значення, змінюється за синусоїдальним законом, то теоретично зміряти, точніше зафіксувати ці значення можливо не раніше, чим досягши максимального значення в точці  $U_m$ , відповідній  $1/4$  періоду. Проте практичне визначення його у вказаній точці також проблематично зважаючи на дію різного роду збурень.

Для практичної реалізації завдань управління в енергетиці і гідроенергетиці, зокрема збудженням гідрогенератора, вказаного вище операційного циклу протягом періоду змінної напруги промислової частоти цілком достатньо для забезпечення необхідної швидкодії без попередніх рішень. При цьому, що особливо важливе, забезпечується необхідна однозначність результатів. Основою такого методу може бути формування і обробка динамічних інтегральних величин для виділення семантики процесу.

Для цього перш за все необхідне виділення семантичної області, чутливої до зміни змінної напруги з урахуванням розподілу необхідної інформації в просторі напівперіоду.

Відносно виділення міри зміни поточного значення напруги істотно більш інформативною є вершина синусоїдального сигналу по відношенню до його основи. Саме інтегральна область у вершини включає максимум змістовної інформації про значення напруги і його поточну зміну. Вона по суті є реальним відображенням поточного його значення

$$\varphi: I_u \rightarrow I_s.$$

Вказана обставина забезпечує істотну перевагу даного підходу по відношенню до функціональних можливостей контролю тільки амплітудного значення напруги.

Так, контролювати миттєві поточні або безпосередньо амплітудне значення змінної напруги також теоретично можливо, але тільки за умови ідеального синусоїдального сигналу, що практично не реалізується. Це вимагає достатньо точних налаштувань і швидкодії контролюючої системи. Крім того, високочастотні імпульсні збурення здатні критично змінювати поточні й амплітудні значення. Потрібна щонайменше фільтрація сигналу, а це відповідно — інерційність.

Очевидно, що інформаційна семантична місткість точки на кривій істотно менше, ніж області обмеженої цією кривою.

Визначаючи амплітудне значення синусоїдального сигналу можливо контролювати дану фазу або декілька фаз за умови їх симетрії. Це також джерело можливих похибок.

При спотворенні форми сигналу або його несиметрії такий підхід загрожує істотними погіршеннями і глобальними спотвореннями, що в системах збудження гідроагрегатів неприпустимо. Можливі також прояви динамічних миттєвих збурень і впливів.

Використання інтегральних імпульсних сигналів навпаки дозволяє окрім розширень функціональних, внести й додатковий чинник стабільності.

Додатково виявляється безінерційна фільтруюча функція, заснована на тому, що частка високочастотної складової в інтегральному сигналі істотно знижується і її дія різко обмежується. Тим самим забезпечується підвищення достовірності інформації, що виділяється, і точності перетворення сигналу, що управляє.

Таким чином, достатньо логічно, виправдано і допустиме використання виділеної характерної області у вершини синусоїди як інформативної про зміну поточного значення напруги і відповідної області у основи синусоїди як своєрідної опорної величини для порівняння, рис. 5.

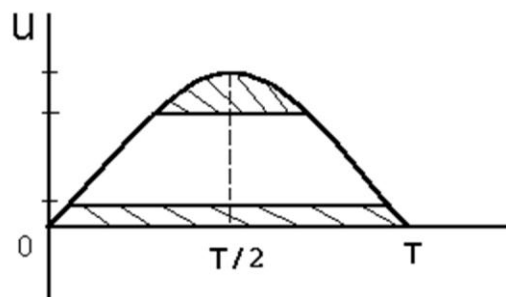


Рис. 5. Характерні області виділення сигналів

Виділені заходи можливо вважати цілком коректними і стабільними в плані принципової організації вимірювань.

Важливою умовою забезпечення необхідної точності вимірювань є та обставина, що практично протягом операційного циклу, через інерційність гідроагрегату і синхронну роботу, частота і амплітуда істотно змінитися не спроможна, отже виділені області є практично фіксовані.

Теоретичною основою розробленого методу є принциповий висновок про те, що алгоритмічна обробка вимірюваного сигналу має проводитися в інтегральній імпульсній формі, що виключає інерційність даного процесу.

При імпульсній обробці сигналу питання кількісної оцінки сигналів набувають першорядного значення. Тому необхідно ввести початкові умови і обмеження.

Визначальним чинником реалізації вказаного методу є умови вибору значень рівнів обмеження сигналів.

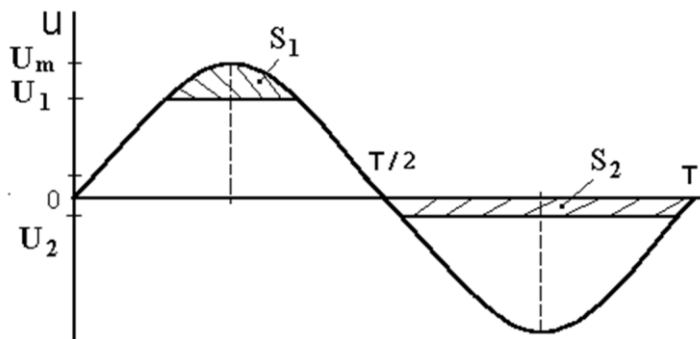


Рис. 6. Формування робочого циклу вимірювань

Застосована тактова обробка виділених сигналів змінної напруги. Кожен такт відповідає напівперіоду змінної напруги. Робочий цикл складається з двох тактів і відповідає періоду, рис. 6.

Протягом першого робочого такту інтегрується перевищення поточного значення напруги над рівнем  $U_1$

$$S_1 = \int_0^{\pi} (U - U_1) dt$$

Це дозволяє фіксувати інформацію про поточне значення напруги в даний момент.

Протягом другого такту інтегрується сигнал зворотної полярності обмежений рівнем  $U_2$

$$S_2 = \int_{\pi}^{\alpha} U_1 dt$$

Тривалість інтеграції під час другого такту обмежена умовою рівності інтегралів

$$S_1 = S_2$$

У момент настання рівності вказаних площ інтегрування припиняється і залишкова частина сигналу в межах  $S_2$ , що характеризується відповідним фазовим кутом  $\alpha$ , несе функціональну інформацію про відхилення змінної напруги від заданого значення

$$\alpha = f(\Delta U)$$

Таким чином принципово забезпечуються всі необхідні і достатні умови практичної реалізації методу перетворення відхилення змінної напруги від встановленого значення для управління процесом регулювання.

З урахуванням приведеного вище запропонований і розроблений спосіб швидкого визначення відхилення змінної величини від заданого значення, [6]. Його особливістю є наведений алгоритм безінерційного виділення змістовної інформації про зміну поточного значення напруги і формування управляючої реакції протягом операційного циклу відповідного тривалості періоду контрольованої напруги. Для цього встановлюються відповідні рівні обмеження сигналу, використовуються функції інтегрування, пам'яті і порівняння протягом періоду. Це забезпечує детерміноване рішення задачі контролю відхилень та суттєво спрощує технічні рішення. Однак такий метод має технологічну затримку сигналу управління на пів періоду.

При цьому слід зазначити принципову відмінність в реакціях систем управління на інерційність і затримку контрольованих сигналів. Так якщо порівнювати вплив двох сигналів з еквівалентними часовими характеристиками, але різним характером зміни, то виявиться, що дія їх суттєво різна. На рис. 7. наведено два сигнали рівної тривалості, але один інерційний з постійною часу  $\tau$ , а інший із запізненням  $t$ .

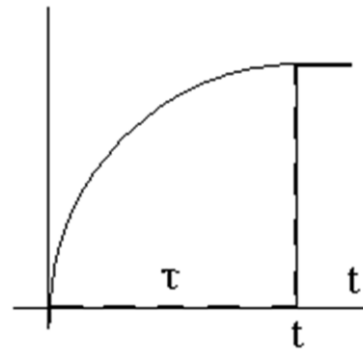


Рис. 7. Основні види зміни сигналів управління

Прояв інерційності сигналу управління в ланцюзі зворотного зв'язку, як показано вище, здатний змінювати її порядок і сприяти коливанням. Це обумовлює проблеми стійкості АСРН, обмежує форсування збудження і проявляє інші істотні проблеми системного порядку. Технологічна ж затримка сигналу управління практично не позначається на динамічних якостях системи регулювання й не обмежує стійкість системи. Це дозволяє підвищити ефективність енергетичного обладнання ГЕС.

#### Список літератури

1. Глебов И. А. Научные основы проектирования систем возбуждения мощных синхронных машин. – Л.: Наука, 1988. – 332 с.
2. Горев А. А. Переходные процессы синхронной машины. – Л.: Наука, 1985. – 502 с.
3. Радченко В. В. Процеси в системах збудження гідрогенераторів. Монографія. - Запоріжжя: ЗДІА, 2012. - 248 с.
4. Радченко В. В. Вплив інерційності системи збудження на динамічні якості гідрогенератора. НТЗ „Гірнична електромеханіка та автоматика” № 90, 2013 р. С. 119 – 125.
5. Радченко В. В. Семантика інформаційних складових енергетичних процесів. НТЗ „Гірнична електромеханіка та автоматика” № 89, 2012 р. С. 87 – 91.
6. Радченко В. В. Спосіб визначення відхилення змінної величини від встановленого рівня. G01 R 19/22, Пат. України, № 68900, від 10. 04. 2012, Бюл. №7. – 7 с.

*Рекомендовано до друку д-ром техн. наук, проф. Шкрабцем Ф.П.*