

УДК 681.523.4:621.22

В.В. Радченко, канд. техн. наук

(Україна, Запоріжжя, Запорізька державна інженерна академія)

ВПЛИВ ІНЕРЦІЙНОСТІ СИСТЕМИ ЗБУДЖЕННЯ НА ДИНАМІЧНІ ЯКОСТІ ГІДРОГЕНЕРАТОРА

Існуючі системи збудження синхронних генераторів досить часто мають структурну, функціональну й ресурсну надмірність, що їх невиправдано ускладнює та істотно знижує ефективність. Ці проблеми мають витoki в екстенсивних підходах й переважно обумовлені технологіями збудження, що реалізуються. При цьому важливі алгоритми й характеристики всіх основних елементів кола перетворення сигналів керування. Серед зазначених чинників впливу значне, можливо стверджувати – визначальне місце посідають інерційні складові системи збудження гідрогенератора, [1-2].

Інерційні складові процесів керування здатні суттєво впливати на загальні динамічні характеристики технічних систем. Особливо важливі вони в реалізації динамічних складових процесів енергетичного перетворення.

Структура системи збудження за принципом самозбудження в загальному вигляді включає джерело енергії збудження, яким є гідрогенератор, регулятори й виконуючі органи. Основні функціональні елементи статичної системи збудження за схемою самозбудження гідрогенератора показані на рис. 1.

Тиристорний керований міст V через трансформатор збудження T , живить обмотку збудження генератора G . Це силовий, енергетичний ланцюг системи збудження. Елементом, що управляє, є регулятор напруги PH , контролюючий значення вихідної напруги і струму генератора [3].

Досліджувалися динамічні якості трьох типів систем збудження: АРВ – СД – 01 – 2; UNITROL ® Р SPT-O/U211-D2000 та ALSTOM Redex 200. Всі вони, як виявилось, мають явні ознаки наявності інерційності каналу збудження. Тому важливо визначити її витoki, дію та впливи на динамічні характеристики гідрогенераторів.

Часові характеристики автоматичних регуляторів кола збудження можливо одержати за допомогою операторних рівнянь, рішення яких надає уявлення про перехідні процеси в часі.

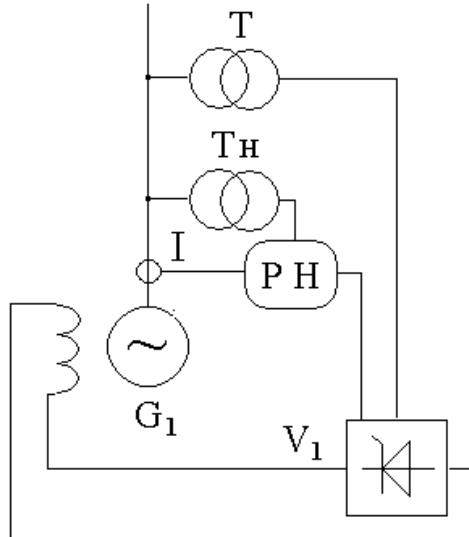


Рис. 1. Основні елементи системи самозбудження гідрогенератора

Розглянемо структуру автоматичної системи регулювання напруги (АСРН) за схемою зворотного зв'язку, яку можливо подати у вигляді функціональних важливих кіл, рис. 2.

Аналіз наведеної функціональної структури АСРН дозволяє стверджувати, що в ній спостерігається дія двох основних складових у вигляді постійних часу τ_{CG} і τ_{PH} , які визначають динамічні якості всієї системи.

Детальний аналіз кожної зі складових інерційності, дозволяє стверджувати, що величина τ_{CG} обумовлена принципом дії

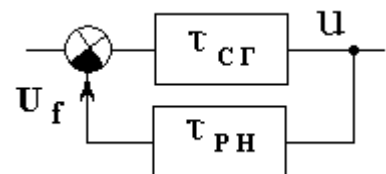


Рис. 2. Функціональна структура АСРН

синхронної машини та її конструктивними характеристиками, зокрема, індуктивними опорами. Постійна часу контура зворотного зв'язку у вигляді τ_{PH} переважно пов'язана з технологічними чинниками та фізичними принципами реалізації основних процесів і елементів кіл збудження.

При цьому характеристики гідрогенератора слід вважати сталими, зважаючи на їх безпосередній зв'язок з конструктивами, вони мають фундаментальний характер, більш затратні, отже менш модифікуються. Характеристики кола збудження функціонально слід вважати більш гнучкими і менш витратними з погляду модифікації.

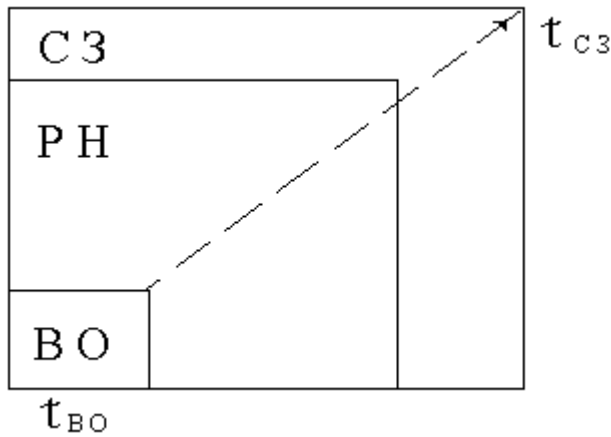


Рис. 3. Крива до аналізу причин та впливу інерційності

Основним функціональним елементом системи збудження гідрогенератора, що безпосередньо впливає на її якісні характеристики, є регулятор напруги РН. Обов'язковим входним компонентом РН є вимірювальний орган ВО, що безпосередньо виконує функцію контролю відхилення напруги від заданих значень. Узагальнена функціональна структура системи збудження, що дозволяє відобразити розповсюдження інерційності, наведена на рис. 3.

З урахуванням наведеного вище аналізу інерційності основних компонентів системи збудження гідрогенератора із статичною системою збудження, слід зазначити, що в ній явно відсутня інерційність виконавчого органа у вигляді керованого випрямляча. Це істотна

складова й умова швидкодії.

Проте регулятор напруги РН, що містить вимірювальні перетворювачі і реалізує ПД – закон керування, є джерелом інерційності.

Вимірювальний орган ВО з традиційною схемою порівняння вже є джерелом інерційності. Вказана інерційність, підсилена регулятором напруги РН визначає динамічні характеристики системи збудження. У свою чергу, система збудження виявляючись у контурі зворотного зв'язку АСРН, здатна істотно змінювати її динамічні характеристики.

Як відзначалося раніше, основними функціональними складовими кола збудження щонайменше є виконуючі елементи, регулятори, вимірювальні органи. Виконуючі статичні елементи сучасних систем збудження безінерційні.

Регулятори, побудовані на основі ПД законів містять інтегральні і диференціальні складові формул управління і за своєю фізичною природою й суттю інерційні. Так, може йтися мова тільки про особливості налагодження, що принципово не змінює їх інерційної суті.

Існуючі принципи вимірювань відхилень змінної напруги і струму також інерційні.

При цьому слід зазначити принципову відмінність у реакціях систем управління на інерційність і запізнювання 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. 4. наведено два сигнали рівної тривалості, але один інерційний з постійною часу τ , а інший із запізнюванням t .

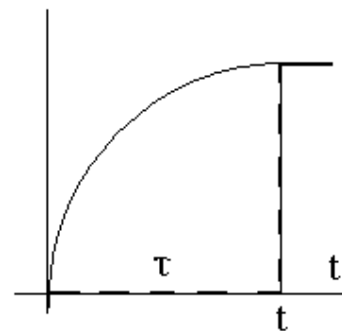


Рис. 4. Вигляд кривої зміни сигналів управління

Прояв інерційності сигналу управління в колі зворотного зв'язку здатний змінювати її порядок і сприяти коливанням. Це обумовлює проблеми стійкості АСРН, обмежує форсування збудження і проявляє інші істотні проблеми системного порядку.

Технологічна затримка сигналу управління практично не позначається на динамічних якостях системи регулювання. Вона складається з відповідних складових процесу збудження

$$K_{ЗБ} = f\left(\sum_{n=1}^N K_{CA} E_{CA} I_N\right),$$

де $\sum_{n=1}^N \hat{E}_{CA}$ – результуючий вплив затримок складових процесу; $E_{ЗБ}$ – рівень енергетичного впливу; I_C – рівень потрібного інформаційного забезпечення.

Динаміка перехідного процесу гідрогенератора істотно залежить не тільки від енергетики збудження, а й характеру реагування та її використання, зокрема, від режимів форсування збудження [4]. При цьому існують нормативні обмеження у вигляді відомих двократних значень для гідрогенераторів. Очевидно, що маються на увазі діючі значення сигналів в обмотці збудження. Оскільки дані обмеження відносяться до періоду використання електромашинних збудників у системах збудження гідрогенераторів, то можливо вони відповідали вимогам свого часу.

Проте, застосування статичних перетворювачів внесло істотні корективи до практики реалізації збудження синхронних машин, особливо його динамічної складової. Істотною особливістю є імпульсна їх дія на обмотку збудження. Вона дозволяє забезпечувати миттєві значення форсування збудження що істотно перевищують обмежені двократні і відповідно прискорює процес. На рис. 5 наведена структурна схема системи самозбудження.

Це навіть при нормованих двократних діючих значеннях дає можливість використовувати резерви, підвищувати якісні характеристики перехідних процесів і динамічну ефективність енергетичного перетворювача. Можливо і перевищення вказаних обмежень, що обґрунтоване критеріями механічної міцності основних елементів ротора, а це також підвищує загальну ефективність системи регулювання напруги. Основним критерієм має бути забезпечення енергетичних потреб збудження гідрогенератора.

Крім того, обмеження струму збудження подвійним номінальним значенням може порушити умови самозбудження, навіть, якщо значення граничної кратності форсування за напругою забезпечує самозбудження при близьких трифазних КЗ.

Тому має сенс у разі необхідності збільшувати кратність форсування за струмом вище нормованого подвійного номінального значення. Навіть, якщо при цьому доведеться зменшувати тривалість форсування, щоб уникнути перегріву СГ і перетворювача СЗ, основна мета буде досягнута.

Для ефективного управління збудженням СГ необхідне регульоване форсування. Автоматика управління має дозволяти визначати необхідні параметри форсування для кожної аварійної ситуації. Регульоване форсування дозволяє при близьких КЗ уникнути лавини напруги, а під час аварій, що супроводжуються дефіцитом реактивної потужності збільшувати час форсування, навіть вище нормованих значень. У таких умовах виправдані й можливі короточасні перевищення нормованих значень форсування за струмом збудження і ще істотніше перевищення по напрузі збудження [5,6].

Проте основним стримуючим чинником у даному контексті виступають динамічні характеристики системи збудження, обмеження стійкості та ін. Для ефективної реалізації регульованого форсування потрібні, насамперед, достатня швидкодія і відсутність інерційності каналу управління збудженням.

Тому динамічні якості регуляторів у даному контексті набувають першорядного значення.

Як бачимо, усі основні системи управління гідроагрегатом виконані на ПІД – регуляторах. Тому має сенс розглянути їх детальніше.

Як відомо з теорії, ПІД–регулятор включає три основних функціональних складових: пропорційну, інтегральну і диференціальну.

Закон ПІД регулювання в загальному вигляді записується так:

$$W_{PID} = K_p + K_p/T_u P + K_o T_o P,$$

пропорційно-інтегрально-диференціальний закон формування впливів, має також й наступний загальний вигляд:

$$\mu = k_p(\varepsilon + \frac{1}{T_I} \int_0^t \varepsilon \cdot dt + T_D \frac{d\varepsilon}{dt}),$$

де k_p – коефіцієнт передачі; μ та ε – відносні змінні від базових величин ($\varepsilon = x/x_o$; $\mu = u/u_o$); T_I та T_D – відповідно сталі часу інтегрування та диференціювання.

Вже на рівні пропорційного закону з інтегральною корекцією (пропорційна та інтегральна складові наведеного рівняння) забезпечується повноцінне астатичне регулювання, що витікає з наступного рівняння

$$d\mu = k_p (d\varepsilon/dt + \varepsilon T).$$

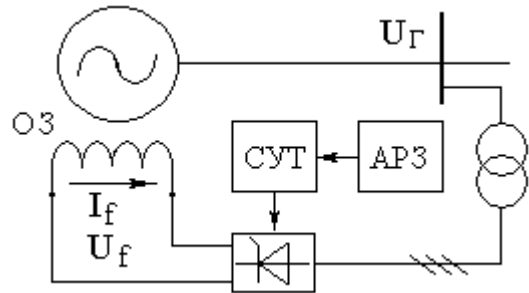


Рис. 5. Структурна схема системи самозбудження

Слід зазначити, що похідну de/dt принципово введено саме з метою підвищення якості регулювання. При цьому наявні щонайменше дві сталі часу: інтегрування та диференціювання. Це без сумніву впливає на реалізацію динамічних складових регулювання.

Робочу функцію ПІД регулятора можливо також представити в наступному вигляді:

$$Y = K_p(u-x) + T_I \int (u-x) \cdot dt + T_D \frac{d(u-x)}{dt},$$

де Y – вихідний сигнал регулятора; K_p – коефіцієнт посилення пропорційного регулювання; T_I – коефіцієнт інтегрального регулювання; T_D – коефіцієнт диференціального регулювання; $(u-x)$ – відхилення величини i від необхідного значення x .

Коефіцієнт K_p впливає на швидкість набору регульованою величиною свого значення.

Коефіцієнт T_I визначає статичний коефіцієнт передачі об'єкту.

Коефіцієнт T_D реагує на швидкість зміни різниці $(u-x)$.

Таким чином виникає щонайменше два джерела інерційності, принципово пов'язані з принципами дії підрегуляторів.

На практиці, в реальних регуляторах остання залежність фактично формується двома основними шляхами: послідовною, рис. 6, а, або паралельною, рис. 6, б, корекцією ПІ-регулятора за допомогою реальної диференціюючого (РД) кола. При цьому, в обох випадках ПІД-закон відповідно апроксимується, – відтворюється тільки приблизно. Фактично він апроксимується з певною погрешністю. Наближені величини позначимо ПІД*.

При послідовній корекції функція перетворення має вигляд

$$W^*_{\text{ПІД}}(p) = \left[\frac{K_{\dot{A}} T_{\dot{A}} p}{(1+T_{\dot{A}} p)} + 1 \right] \frac{K_p}{T_I p} (1+T_I p) = \frac{1}{1+T_{\dot{A}} p} (K^* p + \frac{K_p}{T_I p} + K_p \cdot T_{\dot{A}}^* p),$$

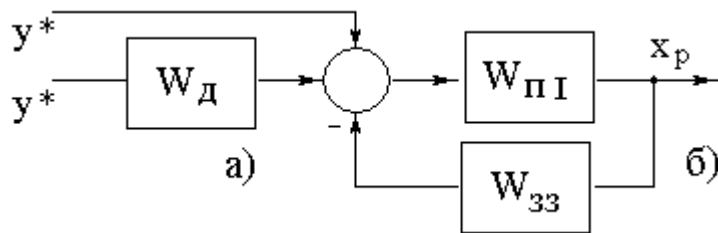


Рис. 6. Блок-схема послідовної (а) та паралельної (б) корекції ПІ-регулятора диференціюючим колом

де

$$K^* p = K_p \left[1 + \frac{T_{\dot{A}}}{T_I} (1+K_{\dot{A}}) \right]; T_{\dot{A}}^* = T_{\dot{A}} (1+K_{\dot{A}}).$$

При паралельній корекції вона запишеться так:

$$W^*_{\text{ПІД}}(p) = \frac{K_p(1+T_I p)}{T_I p \left[1 + \frac{K_{\dot{A}} T_{\dot{A}} p}{1+T_{\dot{A}} p} \cdot \frac{K_p}{T_I p} (1+T_I p) \right]} = \frac{1}{1+T^* p} \left[K^* p \left(1 + \frac{T_{\dot{A}}}{T_I} \right) + \frac{K^* p}{T_I p} + K^* p T_{\dot{A}} p \right],$$

де

$$K^* p = \frac{K_p}{1+K_p K_{\dot{A}} \frac{T_{\dot{A}}}{T_I}}; T^* = T_{\dot{A}} \frac{1+K_p K}{1+K_p K_{\dot{A}} \frac{T_{\dot{A}}}{T_I}}.$$

При цьому перехідні характеристики такого регулятора набувають вигляду, показаного на рис. 7.

Як випливає з наведених характеристик наближена характеристика ПІД* від дійсної ПІД-регулятора відрізняється не тільки за величиною, але і формою. Ці спотворення можуть виявитися істотними, суттєвими, а можуть бути і критичними за певних умов дії таких регуляторів у системі керування гідроагрегату. Важливими є також й технічні налагодження.

ПІД-регулятор має чотири параметри налагодження: K_p , T_w , T_o і K_o , які можуть бути отримані з експериментальних кривих розгону ПІ-регулятора і РД-кола, знятих окремо. Комплексні параметри настройки реального ПІД-регулятора K^*_p і T^* можна визначити й аналітично.

Відомо також, що реакція ПІД-регулятора на одиничну ступеневу дію в достатньо повній мірі відображає його динамічні характеристики, рис. 8.

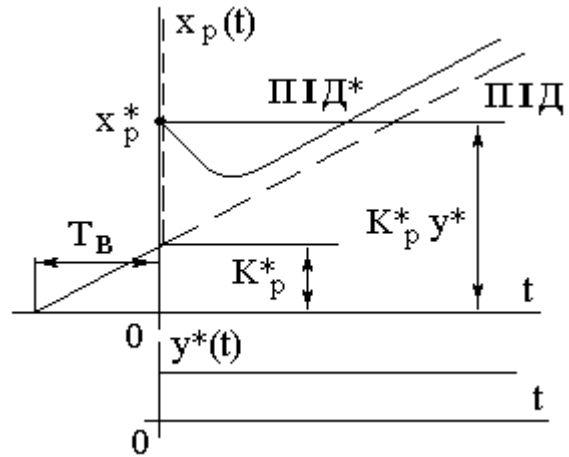


Рис. 7. Перехідні характеристики ПІД-регуляторів

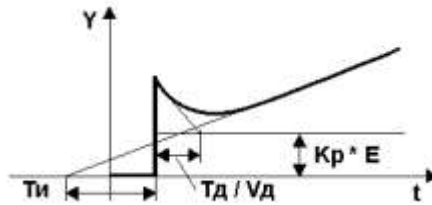


Рис. 8. Реакція ПІД-регулятора на одиничну ступеневу дію

Реакція регулятора на імпульсну прямокутну дію свідчить про наявність сумарної постійної часу регулювання.

На рис. 9. наведена крива розгону реального ПІД-регулятора з аналоговим виходом (суцільна лінія). На відміну від ідеального (переривиста лінія) вона має обмежений і плавно загасаючий «сплеск» x^*_p , пов'язаний з диференціюванням ступеневого сигналу за допомогою РД-кола.

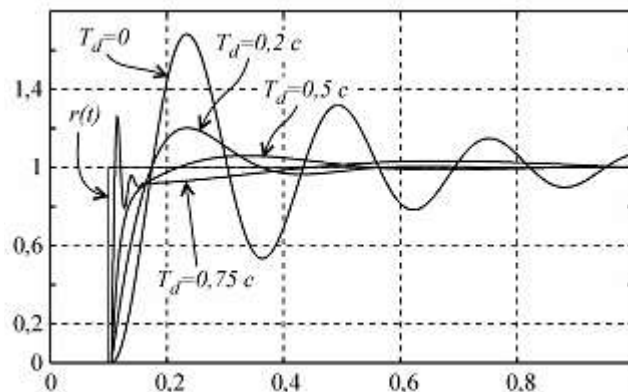


Рис. 9. Крива розгону реального ПІД-регулятора

Постійні часу як ПІД-регулятора T_w , так і ПІ-регулятора T_i фактично чисельно дорівнюють підотичним до перехідної кривої реального диференціюючого кола відповідно до їх налагоджень.

Це на практиці означає наявність функціональних постійних часу каналу управління, які не можуть бути усунені шляхом режимних змін регулятора. Тому взагалі виникає питання доцільності використання таких регуляторів у системах збудження потужних синхронних генераторів.

Вимірювальний орган є вхідним і одночасно 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.

Більшість вимірювальних органів, незалежно від використовуваного методу виділення сигналу відхилення, побудовані за схемою, зображеною на рис. 10.

Вимірювальний перетворювач включає випрямний елемент (ВЕ), фільтруючий (ФЕ), опірний елемент (ОЕ) і елемент порівняння (ЕП). У сучасному виконанні така схема має інерційність переважно на рівні ФЕ, хоча доведена принципова можливість наявності інерційності ЕП і, навіть, ОЕ.

Тому потрібне й технологічне дороблення вимірювального перетворювача змінної напруги РН з метою подолання його інерційності [7].

Будь-який перехідний $ghjwts$ гідрогенератора безпосередньо пов'язаний із зміною його напруги в часі. Слід зазначити, що характер такої зміни безпосередньо пов'язаний з властивостями регулятора напруги.

Основними кількісними характеристиками перехідного процесу є ΔU і T , рис. 11. При цьому падіння напруги при швидкому навантаженні складає до 40% U_n і визначається індуктивною складовою опору обмотки статора, що є конструктивним чинником. Що стосується часової характеристики T , то вона в основному залежить від властивостей контуру регулювання. Тривалість перехідного процесу безпосередньо залежить від форсування збудження, яке згідно існуючими нормами не повинно перевищувати двох кратів.

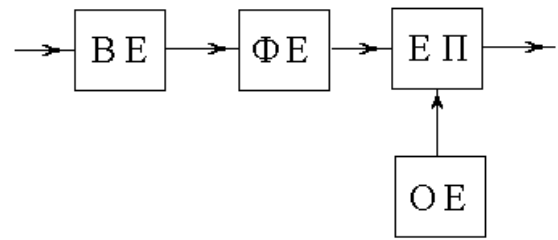


Рис. 10. Функціональна схема вимірювального органа:

ВЕ – вхідний елемент; ФЕ – формуючий елемент; ЕП – елемент порівняння; ОЕ – опорний елемент

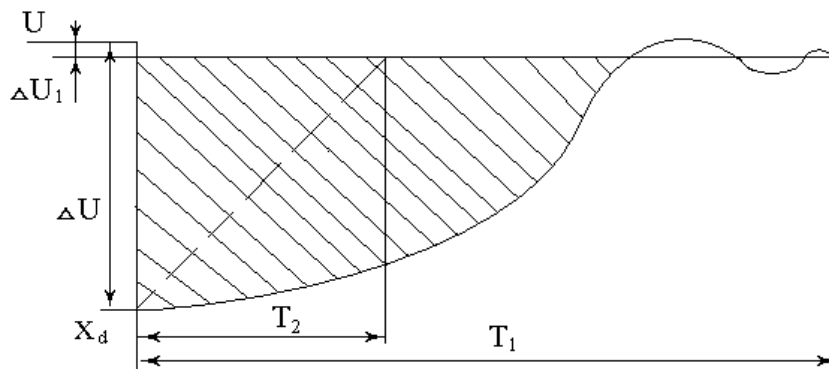


Рис. 11. Основні характеристики перехідного процесу

Вказані норми своїми витокami відносяться до машинної ери збудників і перш за все обмежуються не стільки тепловими і міцнісними показниками, скільки вимогами стійкості паралельної роботи гідрогенераторів. При цьому багато статичних перетворювачів з інерційним управлінням також мають таке обмеження з міркувань стійкості. Коливальний загасаючий характер перехідного процесу визначається інерційністю каналу регулювання збудження й суттєво невиправдано збільшує його час, а також втрати перехідного процесу.

Вирішити зазначену проблему можливо тільки у разі виключення інерційності каналу збудження гідрогенератора. Це досягається за допомогою використання відповідних семантичних складових інформаційних процесів, що реалізуються АСРН.

Основні висновки

Існуючі системи збудження гідрогенераторів принципово інерційні, концептуально і технічно надмірні, потенційно містять причини нестійкості.

Динамічні якості системи збудження, як і всієї системи регулювання гідрогенератора, за виключенням інерції мас і індуктивних електромеханічних характеристик перетворювача енергії, переважно визначаються постійними часу контуру управління.

ПІД-регулятори діючих систем управління гідроагрегатом принципово теоретично інерційні, що суттєво обмежує динамічні можливості енергетичного перетворювача.

Реальні ПІД-регулятори гідроагрегатів відтворюють апроксимовані функції, що спотворюють не тільки значення, але і форму сигналів, вносять додаткові істотні динамічні похибки.

Слід уникати будь-яких сталих часу каналу збудження, що можливе за умови правильного використання семантики інформаційних процесів.

Список літератури

1. Копылов И. П. Электрические машины / И. П. Копылов. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 360 с.
2. Гидрогенераторы / И. А. Глебов, В. В. Домбровский, А. А. Дукштау и др. – Л.: Энергоиздат, 1982 – 368 с.
3. Глебов И. А. Научные основы проектирования систем возбуждения мощных синхронных машин /И.А. Глебов. – Л.: Наука, 1988. – 332 с.
4. Горев А. А. Переходные процессы синхронной машины. – Л.: Наука, 1985. – 502 с.
5. Юрганов А. А. Регулирование возбуждения синхронных генераторов / А. А. Юрганов, В. А. Кожевников. – С. Пб.: Наука, 1996. – 138 с.
6. Гольдштейн М. Е. Форсировка генераторов, оснащённых тиристорными системами самовозбуждения / М.Е. Гольдштейн, Е. И. Пахомов // Вестник ЮУр ГУ, сер. «Энергетика». – 2004. – Вып. 4.– № 1. – С. 119–122.
7. Радченко В. В. Семантика інформаційних складових енергетичних процесів / В.В. Радченко. // Гірна електромеханіка та автоматика: наук. –техн. зб. –2012. – Вип. 89. – С. 87 – 91.

Рекомендовано до друку проф. Шкрабцем Ф.П.