

Figure 3b – The transient graph of the motor speed by the step loading condition

**Conclusions.** Using the root-locus method the curves of the speed decrease and return time via coefficients by the step loading conditions were obtained. The optimal parameters of the second order speed regulator of the metal-cutting machine tool main drive are defined.

#### References

1. Dorf R.C., Bishop R.H. (1998) "Modern Control Systems", Addison-Wesley, 855 p.
2. Vakutin A.V. "Optimal speed controller with predetermined difficulty" / Гірничі електромеханіка та автоматика: наук. – техн. зб. – 2013. – Вип. 91. – с. 62-68.

Рекомендовано до друку: канд. техн. наук, доц. Азюковським О.О.

УДК 681.518:621.22

**В.В. Радченко, канд. техн. наук**

(Україна, Запорізька державна інженерна академія)

### ФОРСУВАННЯ ЗБУДЖЕННЯ Й ДИНАМІКА ПЕРЕХІДНОГО ПРОЦЕСУ ГІДРОГЕНЕРАТОРА

Важливою складовою робочих режимів гідрогенератора ГЕС є саме динамічна. Це вітікає з системної ролі ГЕС в вітчизняній енергетиці, а саме — мобільного резерву потужностей енергетичної системи. Гідрогенератор переважно працює в режимі досить частих робочих циклів: пусків і зупинок. Завдяки своїй мобільності даний тип синхронних генераторів використовують для покриття пікових навантажень й інших динамічних впливів у системі. Тому статистика робочих циклів обладнання невпинно зростає, а це в свою чергу висуває питання експлуатаційної надійності й ефективності.

При цьому істотну роль відіграють саме принципи реалізації та алгоритмічні особливості організації найбільш відповідальних операцій процесу збудження, одна з таких важливих, безумовно, – форсування. Кратність форсування збудження потужних синхронних генераторів традиційно обмежена й змушує використовувати додаткові засоби підвищення швидкодії сучасних інерційних систем збудження, [1]. Основні функціональні елементи й зв'язки статичної системи збудження гідрогенератора, що впливають на форсування, показані на рис. 1.

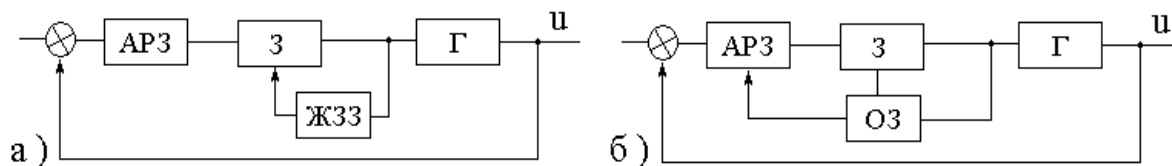


Рис. 1. Основні конфігурації систем збудження: а) без обмеження; б) з обмеженням

Основними функціональними елементами сучасних систем збудження синхронних генераторів Г є збудник З у будь-якому вигляді, переважно статичного виду та автоматичний регулятор збудження АРЗ сильної дії (СД). У конкретному виконанні (а) використовується жорсткий зворотний зв'язок ЖЗЗ та обмеження збудження ОЗ.

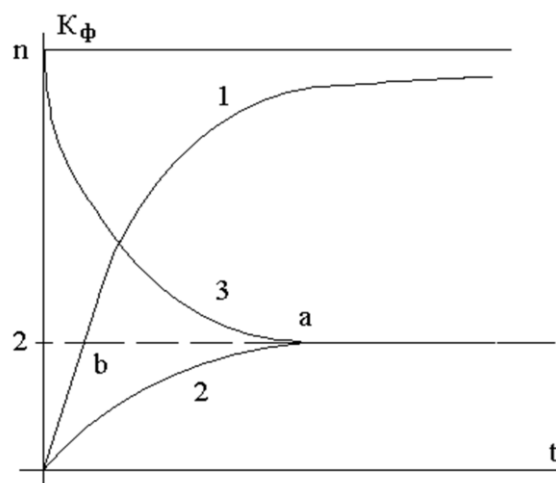
Для випадку негативного жорсткого зворотного зв'язку рівняння динаміки має наступний вигляд

$$T_{f0} \frac{dy}{dt} + U_f = k_3 (U_p - k_{33} U_f),$$

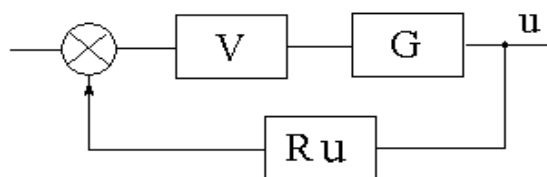
де  $T_{f0}$  – стала часу кола збудження,  $k_3$  – коефіцієнт підсилення збудника,  $k_{33}$  – коефіцієнт зворотного зв'язку,  $U_p$  – напруга регулятора збудження,  $U_f$  – напруга ротора генератора.

Слід зазначити, що наведені структури окрім генератора, мають ще й інерційність кола зворотного зв'язку, щонайменше АРЗ, що суттєво впливає на на вигляд та параметри перехідного процесу, обмежує форсування, виключає використання узгоджених структурних рішень. При цьому кола керування збудженням здатні вносити суттєві інерційні складові, що відповідно підсилюються колом збудження й впливають на об'єкт керування, знижуючи його динамічну ефективність. Основні характеристики такого процесу форсування збудження наведено на рис. 2.

При цьому навіть зазначена можливість  $K\phi = 10$ , відповідна точці п, фактично виводить інерційну систему тільки в т. а. Використання варіанту з повним відкриттям АРЗ та обмеженням збудження на рівні 2 крат дещо покращує швидкодію (точка b), але інерційність збудження за умови стійкості не дозволяє повністю використати його енергетичний потенціал. Зазначену проблему здатна вирішити неінерційна узгоджена система збудження, рис. 3.



**Рис. 2. Характеристики процесу форсування збудження:**  
 1 – напруга обмотки збудження без зворотного зв'язку;  
 2 – напруга збудження з жорстким зворотним зв'язком;  
 3 – напруга обмотки збудження



**Рис. 3. Узгоджена система збудження**

Тиристорний керований міст V через трансформатор збудження живить обмотку збудження генератора G. Це є силовий, енергетичний ланцюг системи збудження. Керуючим елементом є регулятор напруги Ru, контролюючий значення вихідної напруги і струму генератора. Переваги такої схеми в повній мірі реалізуються лише за умови практичної відсутності інерційності кола збудження.

Наведена система збудження – статичного типу. Керування збудженням реалізоване на цифровому автоматичному регуляторі напруги, який забезпечує включення керованих випрямних мостів на тиристорах, підтримуючи в обмотці ротора генератора необхідний рівень постійного струму збудження.

Система збудження, згідно регулювальних характеристик, з урахуванням характеру навантаження, забезпечує необхідні зовнішні робочі характеристики гідрогенератора. Зазначені характеристики відображають вплив характеру навантаження на алгоритм управління збудженням. Вигляд зовнішніх характеристик відповідає рівнянням напруги ланцюга обмотки якоря синхронного генератора під навантаженням:

$$U = E_0 + E_{ad} + E_{aq} - I(r_a + jx_{ca})$$

Згідно рівнянню, напруга СГ, що формується складовими й проєкціями ЕРС  $E_0$ ,  $E_{ad}$  та  $E_{aq}$  змінюється переважно під дією двох основних чинників – за рахунок зміни падіння –  $I(r_a + jx_{ca})$  і впливу реакції якоря.

Важливим моментом організації управління збудженням є врахування особливостей і обмежень електромеханічного перетворення енергії гідрогенератором. Основними робочими умовами форсування збудження генератора є наявність достатньої зміни електромагнітної потужності та відповідного моменту:

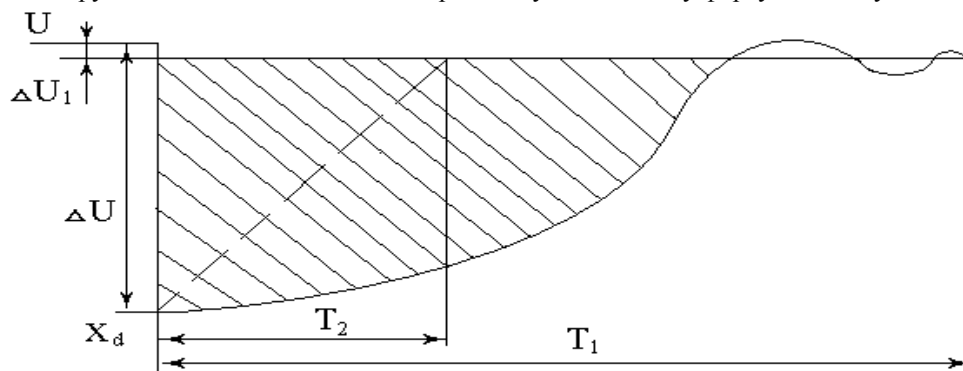
$$\Delta P_{em} > 0; \Delta M_{em} > 0$$

Існуючі системи збудження синхронних генераторів окрім зазначених вище вад, досить часто мають структурну, функціональну й ресурсну надмірність, що невиправдано їх ускладнює та теж істотно знижує динамічну ефективність. Ці проблеми мають традиційні витoki в екстенсивних підходах й переважно обумовлені реалізованими попередніми технологіями збудження. Їх прямим наслідком є діюче двократне обмеження форсування збудження гідрогенератора, переважно обумовлене вимогами його стійкості, як статичної, так і динамічної.

Під динамічною стійкістю синхронної машини розуміється її здатність зберігати синхронний режим паралельної роботи з мережею при досить великих і різких збуреннях режиму роботи (навантаження, короткі замикання в мережі і ін.). Стійкість роботи за цих умов залежить як від величини збурення і його тривалості, так і від параметрів машини, величини, її попереднього навантаження, можливостей регуляторів і інших умов. В більшості випадків при таких збуреннях виникають коливання або гойдання ротора з великою амплітудою. Режим, що нерідко виникає при таких збуреннях, є досить нестійким і машина випадає з синхронізму [3].

Перехідні режими системи збудження безпосередньо пов'язані з перехідними режимами синхронної машини. Це перш за все холостий хід, включення навантаження і його зміна, а також скидання навантаження. Будь-який перехідний режим гідрогенератора безпосередньо пов'язаний зі зміною його напруги в часі. Слід зазначити, що характер та протяжність такої зміни безпосередньо пов'язані з динамічними та енергетичними властивостями регулятора напруги.

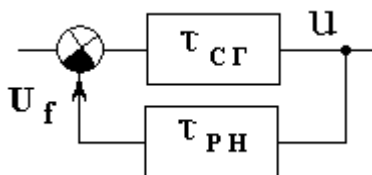
Основними кількісними характеристиками перехідного процесу є  $\Delta U$  і  $T$ , рис. 4. При цьому падіння напруги при стрімкому навантаженні складає величину до 40%  $U_n$  і визначається індуктивною складовою  $x_d$  опору обмотки статора, що є конструктивним чинником гідрогенератора. Що стосується часової характеристики  $T$ , то вона істотно залежить від властивостей контура регулювання. Характер перехідного процесу визначається інерційністю кола збудження. Зазначена інерційність викликає перерегулювання й коливальність, обмежує енергетичну складову збудження, що визначає суттєвий час відновлення напруги  $T_1$ . Час  $T_2$  відповідає неінерційному достатньому форсуванню збудження.



**Рис. 4. Основні характеристики перехідного процесу генератора**

Тривалість перехідного процесу безпосередньо залежить від енергетичної міри форсування збудження, яка згідно існуючим нормам, закріпленим діючими стандартами, не має перевищувати двох крат. Однак ці норми на практиці явно не відповідають сучасним енергетичним потребам форсування збудження за умови скорочення перехідного процесу. Вказані норми своїми витokами відносяться до машинної ери інерційних збудників і перш за все обмежуються не стільки тепловими і міцнісними обмеженнями обмотки збудження, скільки вимогами стійкості паралельної роботи попередніх схем гідрогенераторів. При цьому багато статичних перетворювачів з інерційним управлінням також мають таке обмеження саме з міркувань стійкості.

Коливальний затухаючий характер перехідного процесу визначається інерційністю каналу регулювання збудження. Автоматичну систему регулювання напруги (АСРН) можливо представити у вигляді наступних основних ланок, рис. 5.



**Рис. 5. Функціональна структура АСРН**

Аналіз наведеної функціональної структури АСРН дозволяє стверджувати, що в ній позначається переважна дія двох основних складових у вигляді постійних часу  $\tau_{CG}$  і  $\tau_{RH}$ , що визначають динамічні якості всієї системи.

Детальний аналіз джерел кожної зі складових інерційності, дозволяє стверджувати, що  $\tau_{CG}$  обумовлена принципом дії синхронної машини й її конструктивними характеристиками, зокрема індуктивними опорами.

Постійна часу контуру зворотного зв'язку у вигляді  $\tau_{RH}$ , переважно пов'язана з фізичними принципами реалізації основних процесів і елементів ланцюгів збудження.

Одним з прикладів різкої зміни навантаження є раптове коротке замикання. При цьому напруга генератора різко зменшується. Як впливає з рівняння, [2]

$$P_{EM} = \frac{mU\mathcal{E}}{x_d} \sin\theta + \frac{m^2U}{2} \left( \frac{1}{x_d} - \frac{1}{x_q} \right) \sin 2\theta,$$

при різкому зниженні вихідної напруги синхронного генератора  $U$ , суттєво знижується його електромагнітна потужність, з'являється небезпека випадання генератора з синхронізму. Щоб запобігти цьому, генератор забезпечується швидкодією системою збудження. При зменшенні напруги  $U$ , автоматично відбувається форсування струму збудження генератора. При цьому ЕРС обмотки якоря  $\mathcal{E}_0$  збільшується, і за рахунок цього електромагнітна потужність  $P_{em}$  залишається в необхідних межах. Таким чином, динамічна стійкість паралельно працюючого генератора на необхідному рівні переважно має забезпечуватися системою швидкодіючого збудження з потрібним рівнем форсування.

Важливим чинником достатнього забезпечення динамічної стійкості є інерційні характеристики гідрогенератора та кола керування. Слід зазначити, що інерційність переважно є фізичною властивістю елементів обладнання. Особливу роль відіграє динамічна взаємодія інерційних елементів. Вона визначається не тільки значеннями, а й конфігурацією, розташуванням та положенням динамічних чинників в системі регулювання.

Функція автоматичного регулювання напруги (АРН) реалізується програмно. АРН визначає відхилення напруги генератора (за сигналом завдання та її поточного значення) і обробляє за ПД – законом регулювання. Він має такий загальний вигляд:

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

де  $k_p$  – коефіцієнт передачі;  $\mu$  та  $\varepsilon$  – відносні змінні від базових величин ( $\varepsilon = x/x_0$ ;  $\mu = u/u_0$ );  $T_I$  та  $T_D$  – відповідно сталі часу інтегрування та диференціювання.

Наведене співвідношення доводить наявність щонайменше трьох складових за різними законами перетворення, два з яких інерційні за визначенням. Це без сумніву впливає на реалізацію динамічних складових регулювання.

Функція, що описує роботу ПД – регулятора має наступний вигляд:

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

де  $Y$  – вихідний сигнал регулятора;  $K_p$  – коефіцієнт підсилення пропорційного регулювання;  $T_I$  – коефіцієнт інтегрального регулювання;  $T_D$  – коефіцієнт диференціального регулювання;  $(u-x)$  – відхилення величини  $u$  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  $N_d$  реагує на швидкість зміни різниці ( $u-x$ ).

Це автоматично викликає проблему їх узгодження та налагодження. ПІД-регулятор має щонайменше чотири параметри налагодження:  $K_p$ ,  $T_I$ ,  $T_D$  і  $K_d$ .

Крім того, для стабілізації робочого режиму, на вхід АРН можуть подаватися вихідний сигнал стабілізатора потужності та додатковий сигнал від функції вирівнювання реактивної потужності тощо. Вихідним сигналом АРН є так звана керуюча змінна  $U_c$ . Таким чином можливо набудувати і забезпечити прийнятну роботу регулятора напруги. Проте існуючі постійні часу інтегрування і диференціювання обумовлюють перерегулювання і відповідну коливальність перехідних процесів.

Застосований ПІД-закон регулювання напруги – інерційний за визначенням. При такій інерційній реалізації регулятора напруги потрібні досить складні додаткові механізми стабілізації потужності гідрогенератора. Однак вони з погляду інерційності не встигають повноцінно спрацювати в перехідних режимах.

Таким чином, основним завданням забезпечення ефективного регулювання є підвищення динамічних властивостей системи керування збудженням гідрогенератора. Це обумовлює алгоритмічні особливості реалізації збудження, перш за все відносно інерційних якостей як окремих операцій, так і процесів.

Слід уникати будь-яких, навіть потенційних проявів постійних часу. Для цього перш за все необхідно уникати операцій за видом диференціювання в часі, оскільки

$$\frac{dx}{dt} > e^{-pt}$$

Це прямий шлях щонайменше до аперіодичних процесів контуру керування, що характеризуються постійними часу. Саме вони, взаємодіючи з інерційністю об'єкта керування, підвищують порядок системи регулювання, сприяють коливальності й викликають проблеми її стійкості.

Тому слід уникати операції диференціювання в контурі керування, що наразі широко використовується для прискорення дії ПІД-систем, оскільки плата за це досить велика, – стійкість.

У разі коли диференціювання дійсно необхідне, доцільно в контурі керування його слід апроксимувати, замінивши

$$\frac{dx}{dt} \rightarrow \frac{\Delta x}{\Delta t}$$

Така заміна в більшості випадків дозволяє подолати вплив постійних часу диференціювання, зберігши реакцію на зміну самої величини.

Важливим моментом є також формування робочої ділянки характеристики РН з урахуванням можливостей динаміки системи і форсування збудження. Для цього можливо використовувати основні характеристики генератора з урахуванням формування керуючих впливів, рис. 6, рис. 7.

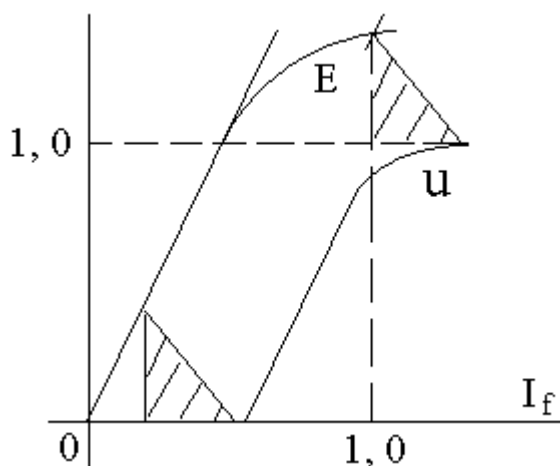


Рис. 6. Вигляд характеристик навантаження СГ

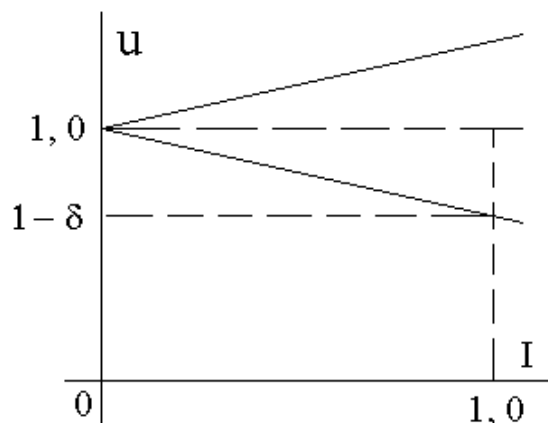


Рис. 7. Вигляд характеристик АСРН

Аналіз регулювальної, зовнішньої характеристики СГ з урахуванням зовнішньої характеристики АСРН дозволяє при  $u = 1 - \delta$  отримати залежність  $I_f = f(I)$ . Маючи такі складові можливо отримати ділянку статичної характеристики регулятора відповідну використаним характеристикам, що забезпечує форсування, рис. 8.

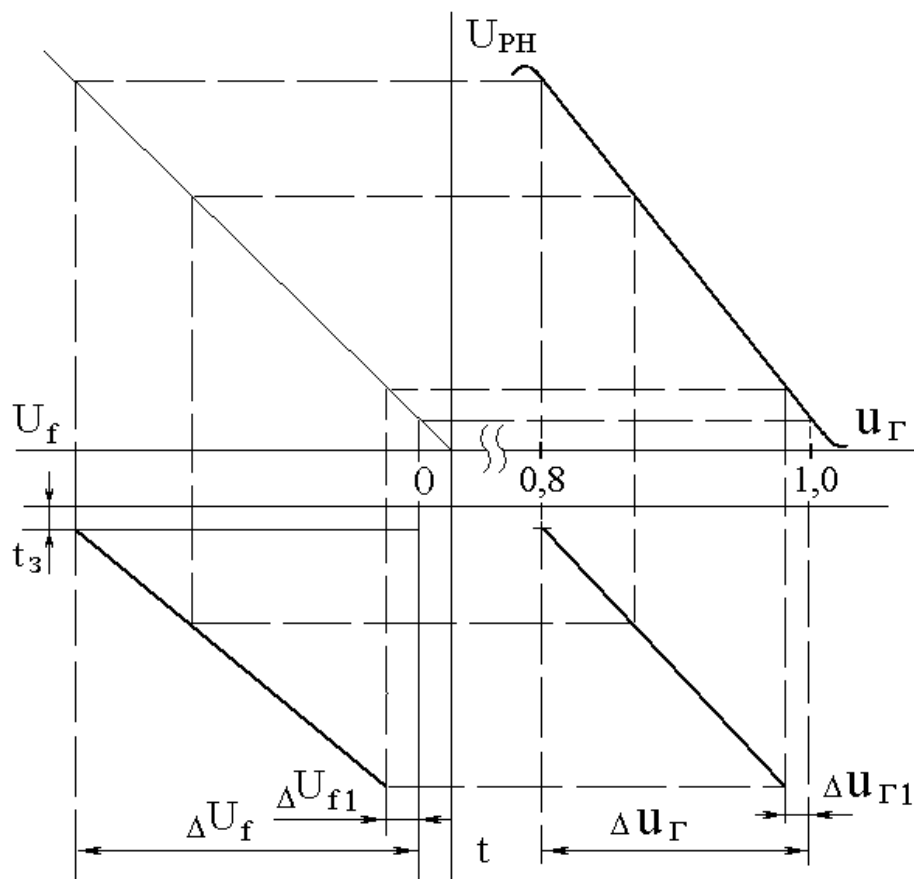


Рис. 8. Побудова ділянки імпульсу форсування збудження генератора

Очевидно, що для забезпечення динамічної точності й швидкодії кратність форсування збудження в перехідних режимах СГ має бути збільшена. Тим самим довжина активної ділянки характеристики збільшується. Необхідна ідеалізована характеристика приймає вигляд як на рис. 9. Вона має трикутну форму і складається з двох функціонально різних ділянок.

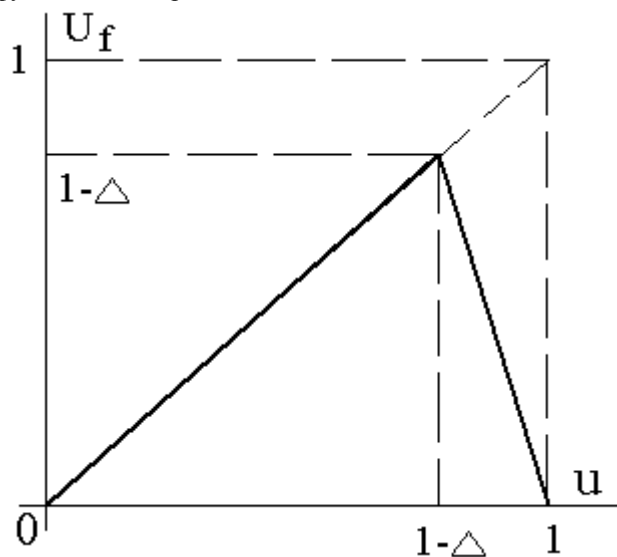


Рис. 9. Характеристика системи збудження

Висхідна ділянка характеристики на інтервалі  $0 < U < 1 - \Delta$  є допоміжною і служить для виходу робочої точки РН в зону регулювання. На цій ділянці нахил характеристики визначається зовнішніми відповідно до регулятора чинниками і враховується коефіцієнтом  $k$ . Таким чином буде справедливим співвідношення

$$U_f = k U$$

• Активна ділянка характеристики є найбільш важливою з погляду якості регулювання, тому до неї пред'являються підвищені вимоги. Визначимо закон регулювання, відповідний активній ділянці у разі застосування РН на тиристорах (див. рис. 9). Для цього прийемо максимальні значення середніх величин на вході і виході регулятора одиничними ( $U = 1, U_f = 1$ ). Ширину ділянки регулювання прийемо за величиною  $\Delta$ . Покладемо, що активна ділянка строго лінійна. Тоді її крутість виразиться співвідношенням

$$K_1 = \Delta^{-1} - 1. \quad (1)$$

Функція регулювання виразиться співвідношенням

$$U_f = (\Delta^{-1} - 1)(1 - U), \quad (1 - \Delta) \leq U < 1. \quad (2)$$

Закон зміни напруги на виході РН, що задовольняє паралельній структурній схемі АСРН з урахуванням (1) і (2) має такий вигляд

$$U_f = k U + (\Delta^{-1} - 1)(1 - U). \quad (3)$$

Якщо в якості виконуючого органу РН застосовується керований випрямляч на тиристорах, то його система керування має забезпечити виконання співвідношення (3). Очевидно, що пасивній ділянці характеристики має відповідати режим роботи некерованого випрямляча за кутом керування тиристорами  $\alpha = 0$ . На активній ділянці напруга випрямляча задовольняє співвідношенню

$$U_f = U \frac{1 + \cos \alpha}{2},$$

а кут керування має змінюватися за наступним законом

$$\alpha = \arccos [(2/\Delta - 1) U^{-1} - 2 \Delta^{-1} + 1].$$

Слід зазначити, що характер перехідних процесів, у поєднанні з істотним скороченням часу їх протікання на фізичних моделях досить переконливо свідчать на користь реалізації ідеального сильного регулювання. Воно реалізується за умови

$$\frac{dE}{dt} = -gr dt_3$$

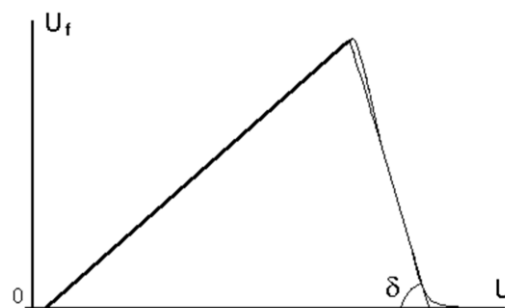
Вказаний ефект у даному разі досягається неінерційністю РН у поєднанні з суттєвою крутістю активної ділянки його зовнішньої характеристики (рис. 10).

Зовнішня характеристика РН має достатню крутість активної ділянки регулювання, визначувану  $\text{tg } \delta$ . Це дозволяє практично точно реалізувати досить високий рівень миттєвого імпульсного форсування збудження й принципово змінити характеристики перехідного процесу генератора.

Не виключено, що в наявному ефекті сильної дії в даному випадку певну роль відіграє й зв'язок за струмом генератора, що реалізується врахуванням спотворення форми його напруги від навантаження. Проте це питання вимагає додаткових досліджень.

Таким чином, завдяки швидкодії РН забезпечується потрібний в перехідних режимах роботи АСРН рівень форсування збудження СГ, що істотно поліпшує характер та якість перехідних процесів.

Однак характеристики РН в значній мірі будуть визначатися можливостями каналу енергетичного забезпечення збудження. Динаміка перехідного процесу гідрогенератора істотно залежить від енергетики збудження, зокрема, від режимів форсування збудження. При цьому існуючі нормативні обмеження у вигляді відомих двох крат для гідрогенераторів є досить умовними. Очевидно, що маються на увазі діючі значення сигналів в обмотці збудження. Оскільки дані обмеження історично відносяться до періоду використання електромашинних збуджувачів в системах збудження гідрогенераторів, то можливо вони відповідали вимогам свого часу. Проте застосування статичних перетворювачів дозволило внести істотні корективи у можливість та практику реалізації збудження синхронних машин, особливо їх



**Рис. 10.** Вигляд зовнішньої характеристики РН

динамічної складової. Істотною особливістю є їх імпульсна дія на обмотку збудження й можливість реалізації миттєвих значень форсування збудження що істотно перевищують двократні обмеження, забезпечують потрібні зрушення та прискорення в ході перехідного процесу.

Це навіть при нормованих двократних діючих значеннях дозволяє використовувати наявні резерви, підвищувати якісні характеристики перехідних процесів і динамічну ефективність енергетичного перетворювача. Можливе й перевищення зазначених обмежень, яке обґрунтоване критеріями механічної стійкості основних елементів ротора, що також здатне підвищити 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 в 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 керування збудженням СГ необхідне регульоване форсування. Автоматика керування має дозволити визначати необхідні параметри форсування для кожної аварійної ситуації. Регульоване форсування дозволяє у разі близьких КЗ уникнути лавини напруги, а під час аварій, що супроводжуються дефіцитом реактивної потужності, збільшувати час форсування, навіть вище нормованих значень. У таких умовах можливі короточасні перевищення нормованих значень форсування за струмом збудження та ще істотніші перевищення за напругою збудження [ 6 – 7].

Проте основним стримуючим чинником у даному контексті виступають динамічні характеристики самої системи збудження. Для ефективно реалізації регульованого форсування необхідні відгодна швидкодія і відсутність інерційності каналу керування збудженням. Тому динамічні якості регуляторів збудження в даному контексті набувають першорядного значення, відповідно мають бути неінерційними й потужними.

Зазначений підхід дозволяє досягти суттєвого скорочення часу перехідного процесу синхронного генератора, що на фізичних моделях сягає щонайменше п'яти крат.

### **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. Пожуев В. И., Радченко В. В. Информационно-энергетическое обеспечение диагностики, контроля и управления в энергетических объектах. Монография. – Запорожье, ЗГИА, 2011. – 182 с.
4. Радченко В. В. Влияние инерционности системы возбуждения на динамические качества гидрогенератора. /Научно-техн. збірник "Гірнична електромеханіка та автоматика" – Д.: РВК ДВНЗ "НГУ". – Вип. 90. – 2013. – С. 119-125.
5. Любарский В. Г. Динамические характеристики АРВ сильного действия и вопросы методики их настройки // Автоматическое регулирование и управление в энергосистемах: Тр. ВЭИ. – М.: Энергия, 1978. Вып. 78. С. 37–60.
6. Гольдштейн М. Е., Пахомов Е. И. Форсировка генераторов, оснащённых тиристорными системами самовозбуждения // Вестник ЮУрГУ, сер. «Энергетика». – 2004. – Вып. 4, № 1. – С. 119–122.
7. Пахомов Е. И. Определение кратности форсировки возбуждения синхронного генератора для предотвращения аварий в энергосистемах XIII Межд. НПК «Современные техника и технологии» – Томск: ТПУ, 2007. С. 88–90.