

УДК 621.313.(075.8)

Чернюк Артем Михайлович канд. техн. наук, доцент кафедри електроенергетики, *ach2@yandex.ru*
Егоров Олексій Борисович, канд. техн. наук, доцент кафедри електроенергетики, *diaskk@yandex.ru*
Буданов Павло Феофанович, канд. техн. наук, доцент кафедри електроенергетики, *ach2@yandex.ru*
Бикова Вікторія Сергіївна, магістрант кафедри електроенергетики, *viktory_bykova@rambler.ru*
 Українська інженерно-педагогічна академія, м. Харків, Україна. Вул. Університетська 16, м. Харків, Україна, 61003

МЕТОДИКА ОЦІНКИ ВПЛИВУ МАСОГАБАРИТНЫХ ПОКАЗНИКІВ СИНХРОННИХ ГЕНЕРАТОРІВ НА ЇХ ДИНАМІЧНУ СТІЙКІСТЬ ПРИ ЗОВНІШНІХ ЗБУРЕННЯХ

У статті проведений аналіз методів зниження масо-габаритних показників синхронних генераторів і підвищення їх техніко-економічних характеристик. Визначені можливі зміни в режимах роботи машини в результаті зміни її масо-габаритних показників. Показана залежність динамічної стійкості роботи машини як функція моменту інерції її ротора. Отримані характеристики швидкості зміни кута δ синхронного генератора залежно від моменту інерції ротора машини.

Ключові слова: синхронний генератор, момент інерції, динамічна стійкість, час стійкої роботи, комп'ютерне моделювання.

Чернюк Артём Михайлович, канд. техн. наук, доцент кафедри электроэнергетики, *ach2@yandex.ru*
Егоров Алексей Борисович, канд. техн. наук, доцент кафедри электроэнергетики, *diaskk@yandex.ru*
Буданов Павел Феофанович, канд. техн. наук, доцент кафедри электроэнергетики, *ach2@yandex.ru*
Быкова Виктория Сергеевна магистрант кафедри электроэнергетики, *viktory_bykova@rambler.ru*
 Украинская инженерно-педагогическая академия, г. Харьков, Украина. Ул. Университетская 16, г. Харьков, Украина, 61003

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ВЛИЯНИЯ МАСОГАБАРИТНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ СИНХРОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ НА ИХ ДИНАМИЧЕСКУЮ УСТОЙЧИВОСТЬ ПРИ ВНЕШНИХ ВОЗМУЩЕНИЯХ

В статье проведен анализ методов снижения массо-габаритных показателей синхронных генераторов и повышения их технико-экономических характеристик. Определены возможные изменения в режимах работы машины в результате изменения её массо-габаритных показателей. Показана зависимость динамической устойчивости работы машины как функция момента инерции её ротора. Получены характеристики скорости изменения угла δ синхронного генератора в зависимости от момента инерции ротора машины.

Ключевые слова: синхронный генератор, момент инерции, динамическая устойчивость, время устойчивой работы, компьютерное моделирование.

Chernyuk Artem Mikhaylovich, Ph.D., associate professor of department of electroenergy, *ach2@yandex.ru*
Egorov Olegii Borisovich, Ph.D., associate professor of department of electroenergy, *diaskk@yandex.ru*
Budanov Pavlo Feofanovch, Ph.D., associate professor of department of electroenergy, *ach2@yandex.ru*
Bykova Viktoriya Sergeevna, student of department of electroenergy, *viktory_bykova@rambler.ru*
 Ukrainian engineer-pedagogical academy, Kharkov, Ukraine. Str. Universitetskaya 16, Kharkov, Ukraine, 61003

METHOD OF ESTIMATION INFLUENCE OF MASS AND SIZE INDEXES OF SYNCHRONOUS GENERATORS ON THEIR DYNAMIC STABILITY AT EXTERNAL INDIGNATIONS

The analysis of methods of decline of mass and size indexes of synchronous generators and increase of their teknik and economic descriptions is conducted in the article. Possible changes are certain in the modes of operations of machine as a result of change of its массо-габаритных indexes. Dependence of dynamic stability of work of machine as function of moment of inertia of its rotor is shown. Descriptions of speed of change of corner of δ of synchronous generator are got depending on the moment of inertia of rotor of machine.

Keywords: synchronous generator, moment of inertia, dynamic stability, time of steady work, computer design.

Вступ

В умовах сучасних ринкових відносин вітчизняні гідрогенератори мають малу конкурентоспроможність із-за їхньої великої матеріалоемності, та, як наслідок, великих капітальних витрат на саме електрообладнання та на будівельні роботи та обладнання при будівництві гідроелектростанцій.

Це обумовлено недосконалістю проектування електричних машин та завищеними нормами моменту інерції гідрогенератора для забезпечення його динамічної стійкості в системі.

Виробники гідрогенераторів для визначення ефективності використання ресурсів (металу, енергоресурсів, працевитрат) обрали такий показник як питома матеріалоемність g , який показує скільки кілограмів готової продукції (гідрогенератора) приходить на 1 кВА його встановленої потужності. За допомогою цього показника можна визначити досконалість проектування генератора та можливі напрямки енерго- та ресурсозберігання при виробництві гідрогенераторів.

Нормативи максимально допустимого значення питомої матеріалоемності гідрогенераторів приведені в табл. 1.

Для машин випуску до 1991 року нормативи обмежень по g на 7 % вище (група 1), на 13 % (для групи 2) і на 12 % (група 3)

Провівши аналіз гідрогенераторів вітчизняних та світових виробників («Електроважмаш», Україна; «Електросила», Росія; «Уралелектроважмаш», Росія; «Елсіб», Росія; «Альстом», Франція; «Сіменс», Німеччина) було отримано рівень питомої матеріалоемності гідрогенераторів, який приведено в табл. 2.

Таблиця 1

Нормативи крайнього значення показника питомої матеріалоемності (кг/кВА) для гідрогенераторів та генераторів-двигунів випуску після 01.01.91 р.

Група	Потужність, S, МВА	Охолодження	$k=S/2p$ МВА	Питома матеріалоемність Не більше $g=G/S$, кг/кВА
1	100-250	повітряне	1,3-9,0	8,4-3,9
2	>250	повітряне	5,5-10,0	4,5-3,5
3	>250	водяне	9,0-20,0	2,5-2,1

Таблиця 2

Рівень питомої матеріалоемності гідрогенераторів вітчизняних та світових виробників

Група	Потужність, S, МВА	$k_{cp}=S/2p$ МВА/полюс (вітчизняні /світові /російські)	Питома матеріалоемність $g_{cp}=G/S$, кг/кВА (вітчизняні /світові/російські)
1	100<	2,29/2,3/-	7,31/4,82/-
2	100-250	4,61/7,57/4,68	5,54/4,5/5,59
3	>250	8,66/10/13,25	4,53/2,68/3,1

Графік розподілення питомої матеріалоемності гідрогенераторів відносно їхньої потужності та виробника представлено на рис. 1.

Отже, з огляду на вищевказані матеріали, можна стверджувати, що зменшення масогабаритних показників суттєво впливає на конкурентоспроможність синхронних генераторів.

Тенденція відновлення і збільшення гідравлічних потужностей на базі устаткування, відпрацьованого свій термін експлуатації, вимагають проведення ревізій і капітальних ремонтів з одночасною заміною зношених і морально застарілих вузлів. При проведенні подібних ремонтів з одночасним збільшенням напруги дуже важливо зберегти габарити машини. Це дозволить уникнути додаткових витрат на глобальну реконструкцію станції, скоротить капітальні витрати.

Слід пам'ятати, що навіть після проведення робіт по оновленню окремих вузлів і елементів ГГ термін його «життя» не зможе бути рівний попередньому періоду експлуатації, наприклад, по механічних критеріях. Спроектований з новими можливостями

ГГ увібрав в себе все нові, сучасні досягнення в електромашинобудуванні і супутніх галузях [1]:

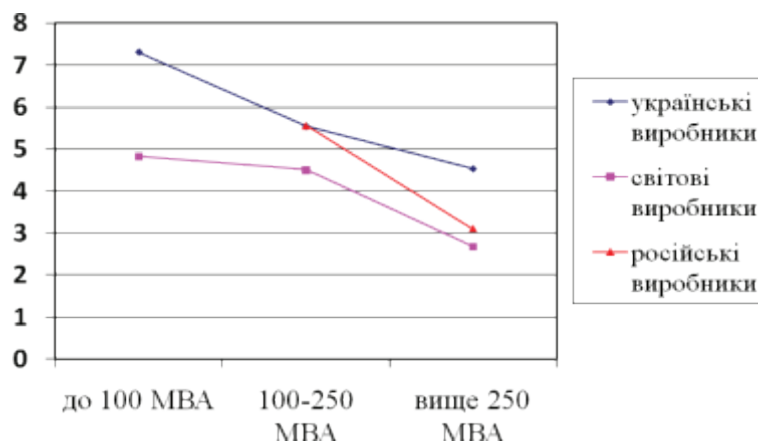


Рис. 1. Графік розподілення питомої матеріалоємності гідрогенераторів відносно їхньої потужності та виробника

– для сердечників статора пропонується використовувати холоднокатані електротехнічні сталі. Це дозволить збільшити питомі навантаження (магнітну індукцію, лінійне навантаження) із збереженням величини втрат в сталі;

– запропоновано використовувати нові електроізоляційні матеріали для обмоток статора і ротора. Наприклад, застосувати для обмоток статора ізоляцію типу «Моноліт-2М» (м. Харків, НВО «ХЕМЗ»), Micadur (ABB) або із зшитого поліетилену, що дозволяє підвищити напругу, зменшити фазні струми і збільшити потужність, підвищити коефіцієнт заповнення паза міддю.

Необхідність використання нових марок сталі визначена тим, що, по порівнянню з гарячекатаними сталлями, вживаними в старих машинах, сердечники статора, виконані з холоднокатаних тонколистових електротехнічних сталей, володіють кращими магнітними характеристиками.

Збільшення робочого потоку, індукції в магнітному ланцюзі машини дозволяє скоротити довжину активної сталі і всієї машини, тобто скоротити витрату всіх матеріалів: сталей, мідь, ізоляції, спроститься технологія виготовлення ГГ.

Проте зменшення масо-габаритних показників машини неодмінно певним чином впливатиме на практично усі характеристик її роботи, на динамічну стійкість зокрема. Далі проведемо аналіз впливу зміни масо-габаритних показників синхронних генераторів на процес забезпечення їх динамічної стійкості при зовнішніх збуреннях.

Викладення основного матеріалу

Як описано в [2, 3] динамічна стійкість генератора оцінюється з точки зору збереження режиму видачі потужності в мережу (без порушення синхронізму) у разі раптових значних змін в ланцюзі електропередачі, наприклад, при відключенні лінії, короткому замиканні і т.д.

У генератора існує власна динамічна стійкість до зовнішніх збурень, але її, як правило, не достатньо для забезпечення надійної роботи. Тому існує ряд заходів та засобів для підвищення динамічної стійкості синхронного генератора, а саме:

- застосування швидкодіючих вимикачів і правильне налаштування релейного захисту;
- застосування автоматичного повторного включення лінії електропередач (АПВ);
- підвищення рівня напруги на лініях електропередач;
- застосування гідрогенераторів із зменшеним значенням перехідного індуктивного опору x'_d ;

- застосування гідрогенераторів із збільшеним значенням моменту інерції [2].

Розглянемо останні два рішення, тому що вони безпосередньо пов'язані з конструкцією гідрогенераторів.

Зменшення індуктивного опору x'_d призводить до збільшення амплітуди кутових характеристик нормального, аварійного та післяаварійного режимів у відповідності з залежністю

$$P = \frac{U_c \cdot E'_q}{x'_{d\Sigma}} \sin \theta + \frac{(x'_d - x_q) \cdot U_c^2}{2 \cdot x'_{d\Sigma} \cdot x_{q\Sigma}} \sin 2\theta,$$

де x_q – синхронне індуктивний опір по поперечній осі;

x'_d – перехідне індуктивний опір по поздовжній осі;

E'_q – перехідна ЕРС по поперечній осі;

U_c – напруга мережі;

θ – кут вильоту ротора, в якій знаменники включають в себе величини

$$x'_{d\Sigma} = x'_d + x_\Sigma; \quad x_{q\Sigma} = x_q + x_\Sigma,$$

де x_Σ – сумарний опір мережі.

На рис. 2 показані кутові характеристики гідрогенератора зі звичайним значенням індуктивного опору та з величиною, зменшеною у два рази.

Видно, що амплітуда кутових характеристики гідрогенератора (при тих же параметрах електропередачі) зростає і зміщується в бік більших значень кута θ , що підвищує динамічну стійкість за рахунок збільшення площі гальмування.

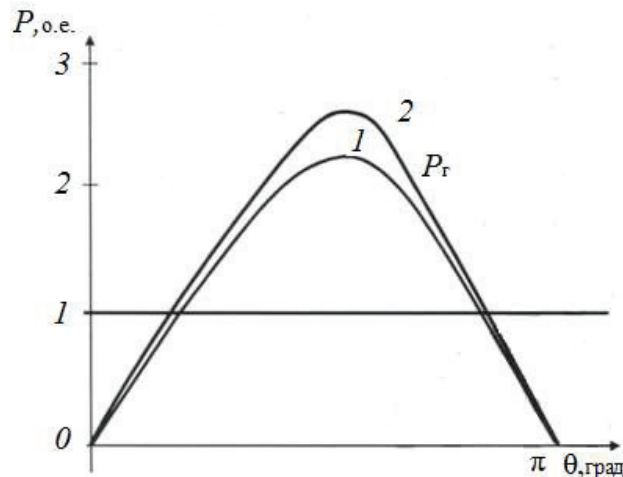


Рис. 2. Кутові характеристики гідрогенератора з індуктивним опором:

$$1 - x'_d = 0,4; \quad 2 - x'_d = 0,2$$

Проте зменшення вдвічі перехідного опору збільшує вартість генератора більш ніж на 50 % [4].

Синхронізуюча динамічна стійкість генераторів, або здатність генераторів повернутися до стійкого режиму, близького до початкового, після великих збурень забезпечується, якщо дія факторів, які намагаються зберегти синхронну роботу генератора з мережею після зняття обурення, сильніша за дію факторів, які мали місце під час збурення[4].

Так, рух ротора машини описується рівнянням:

$$J \frac{d\omega}{dt} = T_j \frac{d^2\delta}{dt^2} = -T_j \frac{ds}{dt} = T_j s \frac{ds}{d\delta} = M_T - M_{en} = \Delta M,$$

де J – момент інерції мас, яка обертається;

ω – кутова швидкість обертання ротора;
 T_j – постійна інерції агрегату турбіна - генератор;
 M_m – момент турбіни;
 $M_{ел}$ – електромагнітний момент генератора;
 ΔM – надлишковий момент;
 s – ковзання ротора щодо поля статора, який синхронно обертається, яке дорівнює

$$s = \frac{n_c - n}{n_c} = -\frac{d\delta}{dt};$$

n_c – синхронна частота звернення;
 n – частота обертання ротора.

При синхронній роботі машини $\Delta M = 0$. Поява за якою причини позитивного або негативного надлишкового моменту призводить до відповідно прискоренню або гальмування ротора машини, поява ковзання ротора і зміна кута δ . Аналіз динамічної стійкості генераторів зручно виконувати, користуючись так званим правилом площ. При коливаннях ротора під час переходу від одного стійкого стану до іншого, що стали причиною збурення в системі, повинна виконуватися умова [4]:

$$W_{\text{приск}} = W_{\text{гальм}},$$

де $W_{\text{приск}}$ – енергія, витрачена на прискорення ротора;
 $W_{\text{гальм}}$ – енергія, витрачена на гальмування ротора.

Так як при зміні кута δ від значення δ_1 до значення δ_2 енергія ротора змінюється на величину

$$W_{12} = \int_{\delta_1}^{\delta_2} \Delta P d\delta = \int_{\delta_1}^{\delta_2} (P_{ел} - P_T) d\delta,$$

це при коливаннях ротора належна також виконуватися умова

$$\int \Delta P d\delta = 0,$$

інакше кажучи на кутових характеристиках площі прискорення повинні бути рівними площами гальмування [4].

Рух ротора гідрогенератора при порушенні динамічної рівноваги підпорядковується рівнянню

$$J \frac{d^2\theta}{dt^2} = P_{ГГ} - P_G = \pm \Delta P$$

де J – динамічний момент інерції;
 $P_{ГГ}$ – потужність гальмування генератора;
 P_G – потужність генератора;
 ΔP – надлишкова потужність.

Прискорення ротора залежить від динамічного моменту інерції, тобто від діаметра ротора генератора: чим більше буде діаметр, тим повільніше буде розганятися гідрогенератор під дією надлишкової потужності ΔP .

$$\frac{d^2\theta}{dt^2} = \frac{\Delta P}{J} = \frac{4g}{GD^2} \Delta P$$

де GD^2 – маховий момент обертових частин гідрогенератора:

$$GD^2 = \frac{T_{эм} \cdot S}{2,74 \cdot n^2 \cdot 10^{-6}},$$

$$J = \frac{GD^2}{4 \cdot g}$$

$T_{эм}$ – постійна інерції;

n – частота обертання ротора гідрогенератора;

S – повна потужність гідрогенератора;

g – прискорення вільного падіння;

Час, необхідний для розгону агрегату до його номінальної частоти обертання

$$T_{эм} = J \frac{\omega_0^2}{P_n},$$

$$\omega_0 = 2 \cdot \pi \cdot n_n.$$

Коефіцієнт демпферного моменту

$$D = 2 \cdot \alpha \cdot J,$$

де α – постійна часу загасання коливань.

На рис. 3 показані два графіка руху роторів гідрогенераторів з різними величинами моментів інерції з відміткою граничного кута відключення короткого замикання по умові збереження динамічної стійкості.

Видно, що якщо є вимикач з часом відключення коротко замикання τ , то у першій машини буде порушена динамічна стійкість, так як при своєму русі її ротор перевершить граничний кут відключення $\theta_{откл}$. Другий же гідрогенератор матиме «запас по часу». Однак збільшення моменту інерції гідрогенератора в два рази збільшує вартість останнього на 20% [4].

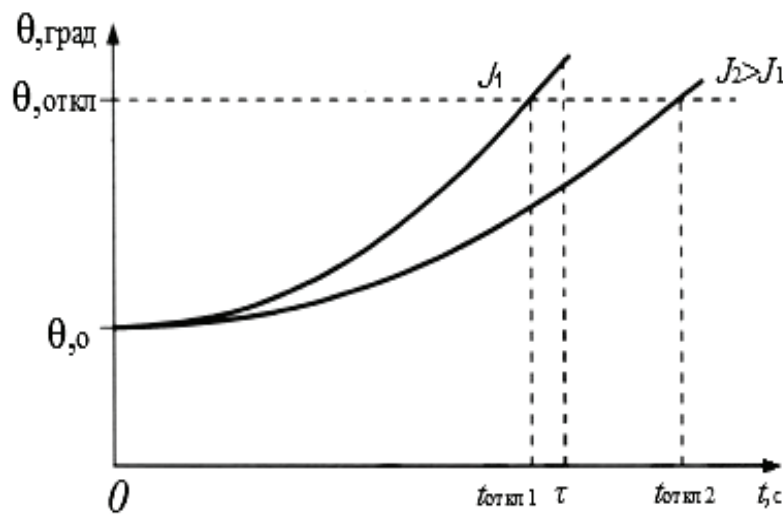


Рис. 3. Графіки руху роторів гідрогенераторів з різними моментами інерції

Дослідження [2] показує, що GD^2 має вплив на втрати і ефективність із загальною тенденцією до зниження рівня ефективності при збільшенні GD^2 .

Мінімально необхідне значення динамічного моменту інерції, як правило, зазначене в технічній специфікації проекту. Зазначена динамічного моменту інерції виходить з оцінок впливу порушень роботи енергосистеми системи на новий гідрогенератор та гідравлічних умов проекту [2,4].

Побудова характеристик часу зміни кута δ синхронних генераторів з різним моментом інерції під час великих зовнішніх збурень.

В даній статті був розглянутий режим роботи синхронного генератора, який втрачає динамічну стійкість внаслідок аварійного відключення однієї з паралельних ЛЕП мережі, що живиться від нього. Розрахункова схема заміщення енергосистеми представлена на рис. 4.

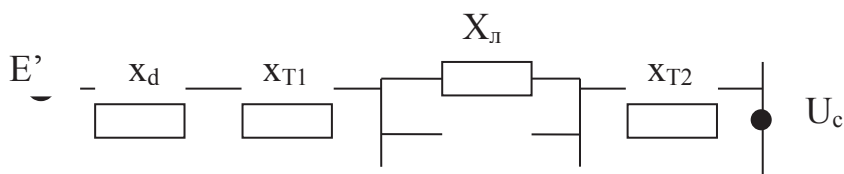
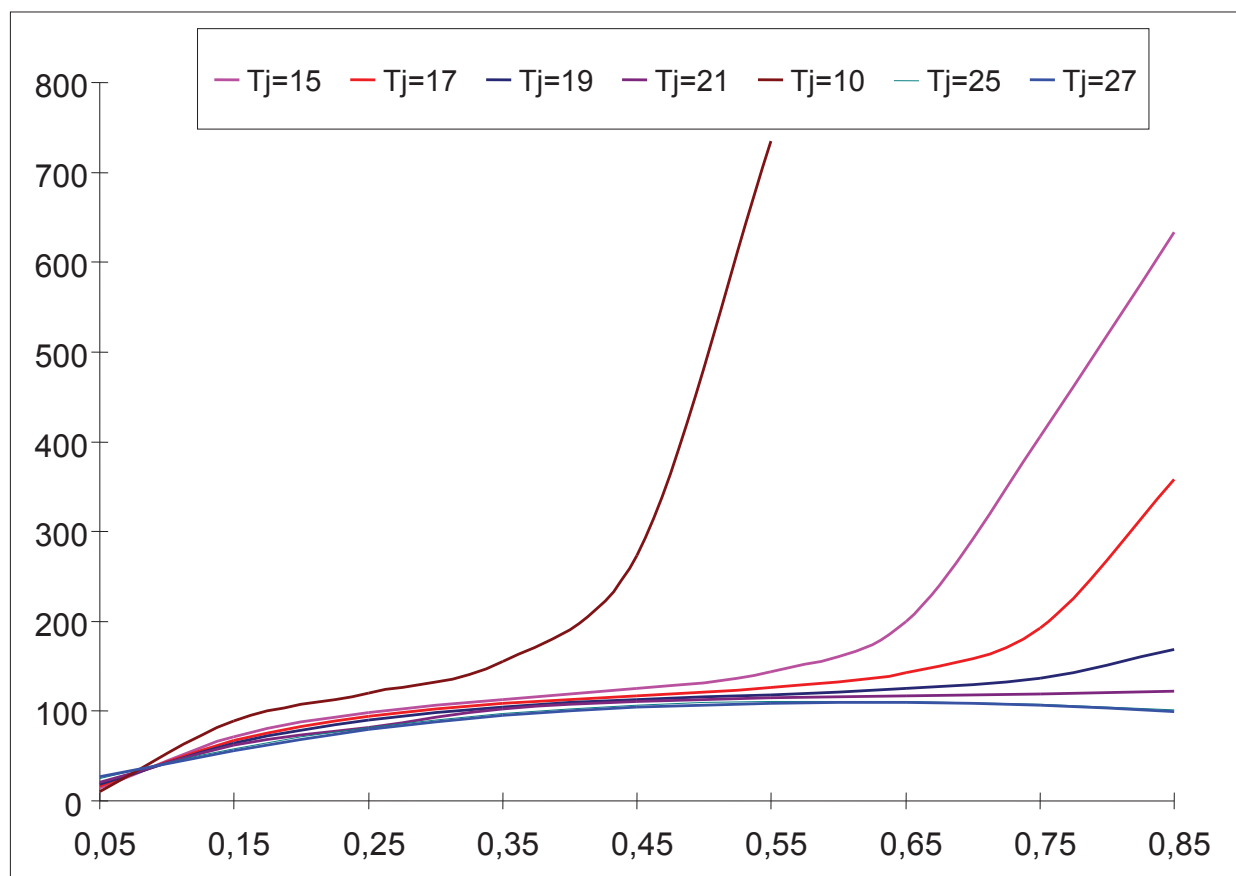


Рис. 4 Схема заміщення енергосистеми

Визначення залежностей швидкості зміни кута δ при зовнішніх збуреннях було здійснено відповідно до наступних параметрів системи, однакових для будь-якого значення T_j :

- Активна потужність системи $P_o=0,90$ в.о.
- Реактивна потужність системи $Q_o=0,200$ в.о.
- Опір генератора $x_d=0,295$
- Опір підвищувального трансформатора $x_{T1}=0,14$
- Опір дволанцюгової ЛЕП $x_{л}=0,474$
- Опір понижуючого трансформатора $x_{T2}=0,122$
- Кут $\delta=37,5$ град
- Максимальна потужність турбіни $P_{\max}=1.48$ в.о.
- Момент інерції ротора генератора був змінною величиною та задавався довільно.
- Отримані характеристики представлені на рис. 5.

Рис. 5. Характеристики часу зміни кута δ синхронних генераторів з різним моментом інерції під час великих зовнішніх збурень

Відповідно до отриманого сімейства характеристик можемо зробити висновок, що при мінімальних значеннях моменту інерції машина та система в цілому не стійкі. Для забезпечення динамічної стійкості синхронного генератора при великих збуреннях в конкретному розглянутому випадку слід використовувати синхронний генератор з такими масо-габаритними показниками, щоб стала часу моменту інерції T_j була не нижчою за 21 с., але не варто приймати великі значення моменту інерції, бо вони обумовлені збільшеними масо-габаритними показниками, а це не раціонально.

Відповідно до масо-габаритних показників роботи синхронного генератора в режимі великих зовнішніх збурень можна характеризувати за трьома видами:

– швидка втрата синхронізму, яка за часом не дозволяє вжити будь-яких заходів щодо підтримання стійкої роботи машини шляхом її регулювання або шляхом усунення причин зовнішніх збурень;

– втрата синхронізму, яка за часом дозволяє утримати машину в режимі динамічно стійкої роботи за умов зостосування додаткових заходів до її підтримання або швидкого усунення причин зовнішніх збурень;

– динамічно стійка робота машини, яка забезпечується за рахунок відповідних характеристик самої машини (моменту інерції зокрема) та роботи системи регулювання.

Висновки

1. Проведено аналіз існуючих методик визначення динамічної стійкості синхронних генераторів при великих зовнішніх збуреннях, та визначено, що суттєвим чинником її забезпечення є момент інерції машини.

2. Досліджено вплив масо-габаритних показників машини на її момент інерції, та динамічну стійкість. Побудовані характеристики часу зміни кута δ синхронних генераторів з різним моментом інерції під час великих зовнішніх збурень.

1. Визначений час збереження машинами, що досліджувалися, динамічної стійкості.

Перелік використаної літератури:

1. Шпатенко Т. В., Пасько Л. Г. Проработка концептуальных основ и технико-экономической эффективности создания АСГД для ЗаГАЭС-2 в контрроторном исполнении, Харьков – 2007.
2. Жданов П. С. Устойчивость электрических систем. М.; Л.: Госэнергоиздат, 1948. – 400 с.
3. Винославский В. Н. Переходные процессы в системах электроснабжения. М.; Высшая школа, 1989. – 289 с.
4. Мелешкин Г. А., Меркурьев Г. В. Устойчивость энергосистемы. Монография. Книга 1: СПб.: НОУ «Центр подготовки кадров энергетики», 2006. – 369 с.

References:

1. Shpatenko T. V., Pas'ko L.G. Working of conceptual bases and technic-economics efficiency of creation of ASGD for ZAGAES-2 in contrrotor execution [Prarabotka konceptual'nyh osnov i tehniko-jekonomicheskoy jeffektivnosti sozdaniya ASGD dlja ZaGAJeS-2 v kontrrotornom ispolnenii], Kharkov – 2007.
2. Zhdanov P. S. Stability of the electric systems [Ustojchivost' jelektricheskikh sistem]. M.; L.: Gosenergoizdat, 1948. – 400 p.
3. Vinoslavskiy V. N. Transitional processes are in the systems of power system [Perehodnye processy v sistemah jelektrosnabzhenija]. M.; Higher school, 1989. – 289 p.
4. Meleshkin g.A., Merkur'ev g.V. Stability of grid [Ustojchivost' jenergosistemy]. Monograph. Book 1: Spb.: NOU «Center of training of personnels of energy», 2006. – 369 p.

Поступила в редакцию 22.12 2014 г.