

УДК 621.313.3

Г.О. ШЕЙНА (канд. техн. наук)  
Державний вищий навчальний заклад  
«Донецький національний технічний університет»  
[annsheina08@gmail.com](mailto:annsheina08@gmail.com)

## УЗАГАЛЬНЕНІ ЗАЛЕЖНОСТІ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПАРАМЕТРІВ ТУРБОГЕНЕРАТОРІВ ВІД НАСИЧЕННЯ

*Вперше отримано узагальнені аналітичні залежності параметрів еквівалентних схем заміщення, в яких враховується різний взаємний індуктивний зв'язок між обмотками, для турбогенераторів серії ТВВ від величини початкового значення періодичної складової струму раптового трифазного короткого замикання, що відображають явище магнітного насичення шляхів потоків розсіювання. Отримані узагальнені аналітичні залежності дозволяють виконувати уточнені розрахунки струмів в обмотках статора і збудження при трифазних коротких замиканнях з урахуванням впливу насичення шляхів магнітних потоків розсіювання для схем заміщення, в яких враховується різний магнітний зв'язок між обмотками.*

**Ключові слова:** узагальнені аналітичні залежності, еквівалентна схема заміщення, параметри, періодична складової струму, раптове трифазне коротке замикання, насичення, магнітні потоки розсіювання.

### Постановка проблеми.

Сучасні вимоги в області експлуатаційної надійності електроенергетичних систем в умовах застосування турбогенераторів (ТГ) з підвищеними питомими електромагнітними навантаженнями передбачає поглиблене вивчення поведінки синхронних генераторів (СГ) в системі при аномальних режимах, пов'язаних, у першу чергу, з виникненням значних струмів при коротких замиканнях (КЗ). Очевидно, що достовірне визначення поведінки машин, що обертаються, у перехідних режимах залежить від точності прийнятих математичних моделей та повноти інформації, що характеризує фізичні властивості синхронних машин (СМ).

Підвищення точності дослідження перехідних процесів (ПП) в турбогенераторах може бути досягнуто тільки в тому випадку, якщо їх математичні моделі будуть відображати реальні електромагнітні зв'язки з достатньою повнотою і, зокрема, враховувати складні явища магнітного насичення, а також витіснення струму в обмотках і масивних конструктивних елементах ротора. Для дослідження перехідних режимів роботи турбогенераторів за диференціальними рівняннями, в цьому випадку важливо встановити характер залежностей параметрів електричної машини від насичення магнітних кіл за шляхами основного магнітного потоку та шляхами потоків розсіювання. Труднощі розрахункового визначення параметрів пов'язана з наявністю в магнітопроводі масивних елементів, наявністю контактів по торцях ротора, а також присутністю матеріалів, що мають складні форми поверхонь і володіють різними електротехнічними властивостями.

Аналітичні залежності електромагнітних параметрів турбогенераторів від насичення отримані експериментальним шляхом в літературі були наведені для схеми заміщення загальноприйнятої структури. Отримання експериментальних значень для схем заміщення, в яких враховується різниця взаємного індуктивного магнітного зв'язку між обмотками статора, збудження й еквівалентними контурами демпферної системи, є актуальною задачею, так як вказана схема заміщення більш точно відображає фізичні властивості машини.

### Мета статті (постановка задачі).

Проведення експериментальних досліджень для встановлення узагальнених аналітичних залежностей параметрів еквівалентних схем заміщення різних турбогенераторів від величини початкового значення періодичної складової струму короткого замикання, що відображають явище магнітного насичення шляхів потоків розсіювання.

### Основний матеріал досліджень:

Для розробки математичних моделей ТГ, які відображають вплив насичення шляхів магнітних потоків розсіювання, були виконані експериментальні дослідження з визначення сукупності електромагнітних параметрів у формі частотних характеристик (ЧХ) і еквівалентних схем заміщення за даними серії дослідів раптових трифазних коротких замикань (РТКЗ) на виводах ізольованих від мережі СГ із режиму холостого ходу (ХХ) при номінальній частоті обертання. Для виключення впливу зміни напруги збудження на перехідні процеси живлення обмотки збудження здійснювалося від незалежного джерела постійної напруги.

Експерименти проводилися для трьох промислових турбогенераторів одного конструктивного виконання серії ТВВ різних потужностей: 160 МВт типу ТВВ-160-2; 320 МВт типу ТВВ-320-2 і 500 МВт типу ТВВ-500-2.

Постановка дослідів у всіх випадках відповідала вимогам ДСТУ ГОСТ 10169-77 «Машини електричні синхронні трифазні. Методи випробувань». У дослідях реєструвалися три фазні струми в обмотках статора, а також струм в обмотці збудження.

Для визначення сукупності електромагнітних параметрів, які відповідають ненасиченому стану, експерименти проводилися при такій напрузі на виводах статора, при якій початкове значення періодичної складової струму короткого замикання в обмотці статора становило приблизно номінальну величину.

Вплив насичення оцінювався інтегрально шляхом знаходження частотних характеристик і параметрів схем заміщення за даними серії дослідів, виконаних при різних вихідних напругах в попередньому режимі. Останні підбиралися таким чином, щоб початкові значення періодичної складової струму РТКЗ становили приблизно 2,0; 3,0 і 4,0 в.о., але не більше максимальної величини  $0,7 U_{fll}$ , регламентованої ГОСТ 10169-77.

Досліди раптового трифазного короткого замикання для турбогенератора типу ТВВ-160-2 проводився при напругах: 0,25; 0,47; 0,70 номінальної; для ТВВ-320-2 – при напрузі 0,4; 0,5; 0,7 номінальної; для ТВВ-500-2 – при напругах 0,305; 0,504; 0,697 номінальної.

У дослідях на підставі вимірюваних миттєвих струмів в трьох фазах згідно з формулою

$$I_{sll}(t_l) = \sqrt{\frac{2}{3} (i_a^2(t_l) + i_b^2(t_l) + i_c^2(t_l))}, \quad l=1,2,\dots,n,$$

визначалися значення модулів узагальненого вектора перехідного струму статора для різних моментів часу ( $n$  - кількість заміряних перехідних струмів).

Апроксимація кривих зміни модуля узагальненого вектора перехідного струму статора здійснювалася на ПЕОМ функцією виду

$$\dot{i}_s(t) = \left( I_{d\infty} + \sum_{k=1}^N I_d^k \cdot e^{-\frac{t}{T_d^k}} + j \sum_{l=1}^M I_q^l \cdot e^{-\frac{t}{T_q^l}} \right) \cdot e^{j\omega t} + (I_{lcpm} e^{j\phi_{lcp}} \cdot e^{j\omega_a \cdot t} + \Delta I_{lm} e^{j\phi_{\Delta l}} \cdot e^{-j2\omega t}) \cdot e^{-t/T_a} \quad (1)$$

за програмою, що реалізує мінімізацію критерію якості

$$J(\alpha) = \sum_{i=1}^m \left( \text{Mod}[\dot{i}_s(\alpha, t_i)] - I_{son}(t_i) \right)^2$$

за допомогою процедури "Civen.....Minerr" універсального математичного пакету MathCad.

Аперіодичні складові струму в обмотці збудження визначалися за результатами апроксимації повного струму функцією виду:

$$I_f(t) = I_{f0} + \sum_{k=1}^n I_{f\dot{A}(0)k} \cdot e^{-\frac{t}{T_{f\dot{A}k}}} + I_{f\ddot{f}(0)} \cos(\omega \cdot t). \quad (2)$$

При цьому не враховувалося повільне обертання аперіодичного струму статора, тобто приймалося, що періодична складова струму в обмотці збудження змінюється з синхронної частотою.

Розрахунок виконувався у взаємній системі відносних одиниць. В якості базисних струмів статора приймалися їх номінальні значення. Базисні струми обмотки збудження генератора (ОЗГ) розраховувалися за наступним співвідношенням:

$$I_{f\dot{A}} = x_{ad} I_{fxx} = (x_d - x_\sigma) I_{fxx}.$$

Визначення частотних характеристик провідності з боку обмотки статора по поздовжній осі ротора ( $y_d(js)$ ), а також частотних характеристик комплексного коефіцієнта розподілу струму статора в гілці ОЗГ ( $C_f(js)$ ) здійснювалося у відповідності з положеннями, розробленими у [1]. Синтез еквівалентних схем заміщення проведено за методикою, запропонованою в [2].

Дослідження проводилися для різних умов щодо апроксимації періодичної складової струму в обмотці статора і аперіодичного струму в ланцюзі обмотки збудження. Оцінювався вплив числа і постійних часу загасання експоненціальних складових, апроксимуючих струми в статорі і обмотці збудження. Аналізувалися варіанти з однаковою і різною кількістю експонент в струмі статора та ротора, а також однаковими і різними постійними часу їх загасання. Дослідження з виявлення впливу параметрів експоненціальних складових на точність апроксимації показали, що похибки виявляються мінімальними, в загальному випадку, при різних значеннях постійних часу складових періодичного струму статора і аперіодичного струму в обмотці збудження.

Похибки аналітичного представлення експериментальних залежностей зміни миттєвих значень перехідних струмів в обмотках статора в дослідях РТКЗ функцією виду (1) не перевищили: 7,4% для турбогенератора ТВВ-160-2; 4,35% – для генератора ТВВ-320-2 і 7,5% – для ТВВ-500-2. Слід зазначити, що вказані найбільші розбіжності експериментальних значень струмів від їх аналітичних функцій для всіх генераторів відносяться до результатів дослідів при максимальній вихідній напрузі ( $0,7 U_{fll}$ ).

За знайденими безпосередньо в результаті апроксимації початковими значеннями складових періодичного струму  $I_{dan}^k$  і їх постійних часу загасання  $T_{dan}^k$  розраховувалися істинні значення комплексних провідностей

роторних контурів  $\dot{i}_d^k$  при ковзанні  $s = -1$  згідно формул

$$y_{dan}^k(js)_{s=-1} = I_{dan}^k \frac{-j}{\alpha_{dan}^k - j}; \varphi_d^k = \arg(y_{dan}(-j1)); i_d^{\bullet k} = \frac{I_{dan}^k}{\cos(\varphi_d^k)} e^{j\varphi_d^k}; I_{d\dot{\omega}}^k = \frac{Mod^2[i_d]}{Re[i_d]}.$$

Частотні характеристики провідності з боку обмотки статора СМ  $y_d(js)$ , розраховувалися з використанням істинних значень експоненціальних складових періодичних струмів

$$y_d(js) = I_{d\infty} + \sum_{k=1}^n I_{d\dot{\omega}}^k \frac{js}{js + \alpha_d^k} = I_{d\infty} + \sum_{k=1}^n I_{d\dot{\omega}}^k \frac{js}{js + \frac{1}{T_d^k}},$$

що відповідають рівням насичення магнітної системи.

Аналіз показав, що збільшення напруги до  $0,7 U_{ном}$  призводить до незначної зміни частотних характеристик в області ковзань ротора менше 0.01 в.о.. Для різних генераторів воно знаходиться в межах від 3% до 6%. В області ковзань ротора від 0,01 в.о. до 1,0 в.о. збільшення напруги в дослідях до  $0,7 U_{ном}$  викликає збільшення амплітудних значень провідності до 14% - 21%. Отже, можна очікувати збільшення в таких же межах значень ударних струмів КЗ з урахуванням впливу насичення шляхів магнітних потоків розсіювання ТГ.

Частотні характеристики  $\tilde{N}_f(js)$ , що характеризують струморозподіл в гілці обмотки збудження, розраховувалися відповідно до методики, розробленої в [3].

В результаті апроксимації експериментальних значень перехідних струмів в обмотці збудження досліджуваних турбогенераторів функцією (2) були отримані значення експоненціальних складових аперіодичного струму. При цьому кількість експонент приймалося рівним числу експоненціальних складових періодичного струму статора. Похибки апроксимації виявилися дещо меншими, ніж похибки апроксимації струмів в обмотках статора.

Частотні характеристики  $y_f(js)$ , що характеризують зміну аперіодичного струму ОЗГ в частотній області, розраховані за співвідношенням

$$i_{fan}(t) = \sum_{k=1}^N i_{fan_k}(0) \cdot e^{-t/T_{fan_k}},$$

де  $i_{fan_k}(0)$ ,  $T_{fan_k}$  - початкові значення і постійні часу загасання  $k$ -ої експоненційної складової аперіодичного струму ОЗГ;  $N$  - кількість контурів на роторі.

В якості об'єкту дослідження була прийнята схема заміщення СМ з різною взаємодуктивністю між контурами по поздовжній осі, яка досить точно відображає фізичні властивості машини. В [2] приведені результати синтезу зазначеної схеми.

Аналіз активних та індуктивних опорів обмотки збудження (ОВ) і демпферної системи (ДС) схем заміщення досліджуваних генераторів, отриманих для різних значень початкового струму короткого замикання, дозволив отримати аналітичні вирази для визначення їх залежностей у функції струму статора, при значенні останнього більш 1 в.о., наступного виду

$$x_k(I_d'') = x_{k_{ненас}} \cdot \left[ a + b \left( 1 - e^{-\frac{-I}{c}} \right) \right]. \quad (3)$$

Ненасичені значення параметрів в (3) повинні визначатися в дослідях КЗ, які відповідають початковому значенню струму в статорі близькому до номінального.

Зіставлення частотних характеристик, отриманих за даними дослідів короткого замикання при напрузі  $U = 0,7 U_{ном}$  і розрахунків з використанням параметрів, розрахованих за апроксимуючою функцією (3), вказує на їх задовільний збіг для всіх досліджуваних турбогенераторів. Для всіх ТГ похибка не перевищує 6,1%.

Отримані залежності (3) індуктивних і активних опорів схем заміщення для турбогенераторів ТВВ-160, ТВВ-320 і ТВВ-500 можуть бути використані для розрахунків струмів трифазних коротких замикань при різних вихідних значеннях напруги на виводах СМ. Як показали дослідження, похибки визначення струмів в обмотках статора визначаються похибками частотних характеристик провідності з боку обмотки статора  $y_d(js)$ , а в ОВГ - коефіцієнта розподілу  $\tilde{N}_f(js)$ .

Доцільно розглянути можливість апроксимації опорів еквівалентних схем заміщення узагальненими для всіх досліджуваних ТГ серії ТВВ залежностями.

Оскільки експерименти для кожного генератора проводилися, в загальному випадку, при різних значеннях

надперехідного струму, то для оцінки значень параметрів, відповідних одному рівню насичення за залежностями (3) для кожного турбогенератора з урахуванням коефіцієнтів полінома були визначені параметри уточнених схем заміщення кожної СМ для таких початкових значень періодичних струмів КЗ: 1,0; 2,5 і 3,5 в.о. (табл. 1). Для отримання узагальнених залежностей зіставлялися відносні величини параметрів схем заміщення різних ТГ, які відповідали одному рівню насичення, і були віднесені до ненасиченого значенням відповідного параметра, отриманого при  $I_d'' = 1,0$  в.о.

Таблиця 1 – Параметри уточненої схеми заміщення, що відповідають різним рівням насичення

Параметр	Тип турбогенератора								
	ТВВ-160-2			ТВВ-320-2			ТВВ-500-2		
	$I_d''=1$	$I_d''=2,5$	$I_d''=3,5$	$I_d''=1$	$I_d''=2,5$	$I_d''=3,5$	$I_d''=1$	$I_d''=2,5$	$I_d''=3,5$
$x_\sigma$	0,2104	0,1767	0,1627	0,2157	0,1812	0,1668	0,2442	0,2051	0,1888
$x_{\sigma f}$	0,1155	0,1492	0,1669	0,0660	0,0853	0,0954	0,1136	0,1468	0,1642
$r_f$	0,0018	0,0018	0,0018	0,0015	0,0014	0,0014	0,0012	0,0012	0,0012
$x_{\sigma d1}$	1,1322	1,2304	1,2707	1,0102	0,8107	0,7821	0,7033	1,1014	1,1389
$r_{d1}$	0,0102	0,0092	0,0090	0,0065	0,0058	0,0056	0,0342	0,0423	0,0453
$x_{\sigma d2}$	0,0176	0,0260	0,0269	0,0071	0,0064	0,0056	0,0289	0,0410	0,0469
$r_{d2}$	0,0212	0,0278	0,0297	0,0081	0,0104	0,0133	0,0262	0,0318	0,0387

Аналіз дискретних значень індуктивних опорів розсіювання обмотки статора  $x_\sigma$  і ОЗ  $x_{\sigma f}$ , а також активного опору обмотки збудження  $r_f$  для всіх досліджуваних ТГ, отриманих для різних значень початкової величини струму короткого замикання, дозволив отримати аналітичні вирази для визначення їх залежностей у функції струму статора при значенні останніх більш 1 про в.о.:

$$x_\sigma(I_d'') = x_{\sigma_{\text{НЕНАС}}} \cdot (1,1642 - 0,5421 \cdot (1 - e^{-I_d''/2,7})); \quad (4)$$

$$x_{\sigma f}(I_d'') = x_{\sigma f_{\text{НЕНАС}}} \cdot (0,7428 + 1,4094 \cdot (1 - e^{-I_d''/5,3})); \quad (5)$$

$$r_f(I_d'') = r_{f_{\text{НЕНАС}}} \cdot (1,3353 - 0,3641 \cdot (1 - e^{-I_d''/0,4})). \quad (6)$$

Максимальна похибка апроксимації експериментальних значень опору розсіювання статора  $x_\sigma$  функцією (4) становить 1,65%; для  $x_{\sigma f}$  - 8,74%;  $r_f$  - 2,43%.

Аналіз надперехідних індуктивних опорів, що розраховуються як  $x_d^* = x_d(js)_{s \rightarrow \infty}$  також дозволив встановити загальну для всіх досліджуваних ТГ закономірність їх зміни від надперехідного струму:

$$x_d''(I_d'') = x_{d_{\text{НЕНАС}}}'' \cdot (1,1464 - 0,4142 \cdot (1 - e^{-I_d''/2,3})). \quad (7)$$

Похибка апроксимації не перевищила 0,835%.

Для встановлення закономірностей зміни параметрів контурів, які відображають вплив масивних елементів ротора, були проаналізовані частотні характеристики, що представляють собою комплексну провідність контурів, які еквівалентують масив ротора, що розраховуються з використанням співвідношень виду:

$$y_D(js) = \sum_{k=1}^2 \frac{js}{jsx_{\sigma d_k} + r_{d_k}}. \quad (8)$$

Усередненню повинні підлягати частотні характеристики, віднесені, наприклад, до своїх комплексів, що характеризують нерухомий стан машини  $y_{D_k}(jl)$ . Однак, отримані таким чином узагальнені частотні характеристики не можуть бути описані аналітично за допомогою еквівалентних схем заміщення у вигляді паралельно включених активно-індуктивних ланцюгів, так як при  $s=1$  їх уявна складова дорівнює нулю. Це ускладнює їх практичне використання.

Тому доцільно значення характеристик, які розраховуються за (8) провідностей віднести до своїх значень, відповідним кованню  $s = \infty$ .

Тоді вирази для відносних частотних характеристик будуть мати вигляд:

$$y_{*D}(js) = \frac{y_D(js)}{y_D(js)_{s \rightarrow \infty}}, \quad (9)$$

Отримані за (9) ЧХ провідності демпферних контурів для всіх досліджуваних ТГ, відповідних одному рівню насичення усереднювалися.

За отриманими середніми відносними ЧХ синтезувалися параметри роторних контурів для різних початкових струмів КЗ, наведені в табл. 2. Значення всіх індуктивних і активних опорів, виявляються, при цьому, віднесеними до результуючий опору роторних контурів розглянутого генератора при  $s \rightarrow \infty$ , тобто

$$x_{D\Sigma} = \frac{1}{y_D(js)_{s \rightarrow \infty}}.$$

Виконані дослідження показали, що розраховані за (9) експериментальні ЧХ для всіх турбогенераторів, що аналізуються, відрізняються від середніх за модулем максимально на 32,7% при  $s=0,039$ . Відмінність знижується до 10% і менше в діапазоні ковзань від 0,15 до 1 в.о..

Узагальнення електромагнітних параметрів, що характеризують масивні елементи ротора, можливо, також виконувати в часовій області. Для цього за параметрами демпферних контурів, наведеним у табл.1, розраховуються перехідні функції у вигляді експоненційних складових:

$$i_D(t) = \sum_{k=1}^2 \frac{1}{x_{d_k}} e^{-t/T_{d_k}}. \quad (10)$$

Усереднювалися перехідні функції, віднесені до своїх початкових значень при  $t = 0$ :

$$i_{*D}(t) = \frac{i_D(t)}{i_D(0)} = \frac{i_D(t)}{\sum_{k=1}^2 \frac{1}{x_{d_k}}}. \quad (11)$$

Усереднені перехідні функції, що розраховуються за (11) для всіх досліджуваних турбогенераторів при однакових рівнях насичення, апроксимувалися двома експонентними складовими, за якими визначалися параметри роторних контурів. Похибка апроксимації не перевищувала 9,1% у всьому діапазоні спостереження перехідних функцій. У табл. 2 наведені значення параметрів схем заміщення роторних контурів, отримані шляхом узагальнення в тимчасовій області. Вони виявилися досить близькими до відповідних параметрів, узагальнення яких здійснювалося в частотній області.

Таблиця 2 – Узагальнені відносні параметри демпферного масиву турбогенераторів для уточненої схеми заміщення

Параметри	Область узагальнення					
	частотна	часова	частотна	часова	частотна	часова
	$I_d''=1$		$I_d''=2,5$		$I_d''=3,5$	
$\frac{x_{*sd_1}}{r_{*d_1}}$	$\frac{49,0550}{1,3555}$	$\frac{48,9989}{1,365200}$	$\frac{38,1762}{1,7646}$	$\frac{36,4040}{1,24500}$	$\frac{35,1818}{1,9319}$	$\frac{33,7314}{1,21690}$
$\frac{x_{*sd_2}}{r_{*d_2}}$	$\frac{1,0408}{1,0886}$	$\frac{1,0212}{1,0959}$	$\frac{1,0845}{1,1241}$	$\frac{1,0303}{1,1286}$	$\frac{1,1492}{1,2835}$	$\frac{1,0326}{1,2776}$

Аналіз відносних активних і індуктивних опорів узагальненого в частотній області ротора турбогенератора дозволив встановити наступні залежності для параметрів двоконтурної схеми заміщення демпферного масиву досліджуваних турбогенераторів серії ТВВ у функції початкового струму КЗ:

$$x_{*sd_1}(I_d'') = 65,7854 - 33,6279(1 - e^{-I_d''/1,4531}); \quad (12)$$

$$r_{*d_1}(I_d'') = 0,9178 + 1,3708(1 - e^{-I_d''/2,5996}); \quad (13)$$

$$x_{*sd_2}(I_d'') = 0,9922 + 4,0187(1 - e^{-I_d''/93}); \quad (14)$$

$$r_{*d_2}(I_d'') = 0,9924 + 6,6989(1 - e^{-I_d''/89}). \quad (15)$$

Перерахунок отриманих відповідно до (12) - (15) середніх відносних параметрів роторних контурів, до індуктивних і активних опорів, що відображають вплив масивних елементів ротора турбогенератора конкретного типу, може бути виконаний при використанні наступних ненасичених значень його індуктивних опорів  $x_{d \text{ ненас}}''$ ;

$x_{\sigma \text{ ненас}}$  і  $x_{\sigma f \text{ ненас}}$  таким чином.

За співвідношенням (4), (5) і (7) знаходяться опори розсіювання обмотки статора  $x_{\sigma}(I_d'')$ , опір розсіювання обмотки збудження  $x_{\sigma f}(I_d'')$  і надперехідний індуктивний опір  $x_d^*(I_d'')$  для заданого значення надперехідного

струму КЗ.

Визначається результуюче індуктивний опір, еквівалентного демпферного контуру

$$x_{D\Sigma}(I_d'') = \frac{1}{\frac{1}{\frac{1}{x_{d''}(I_d'') - x_{\sigma}(I_d'')} - \frac{1}{x_{ad}}} - x_{\sigma f}(I_d'')} - x_{\sigma fD}(I_d'')}. \quad (16)$$

Розраховуються справжні параметри демпферних контурів на основі їх відносних узагальнених значень, наведених у табл. 4.2.

$$x_{\sigma d_k}(I_d'') = x_{\sigma d_k}(I_d'') x_{D\Sigma}(I_d''); \quad (17)$$

$$r_{d_k}(I_d'') = r_{d_k}(I_d'') x_{D\Sigma}(I_d''). \quad (18)$$

Аналіз похибок, що вносяться до розрахунку електромагнітних параметрів уточнених схем заміщення на основі отриманих у роботі узагальнених аналітичних виразів для визначення активних і індуктивних опорів схем заміщення генераторів конкретного типу, виконаємо шляхом зіставлення розрахованих за ним і експериментальних частотних характеристик провідності з боку обмотки статора і комплексного коефіцієнта розподілу струму статора в гілці ОЗ.

Відповідність синтезованої еквівалентної схеми заміщення турбогенератора початковим значенням періодичної складової струму короткого замикання може перевірятися як в часовій, так і в частотній області вхідної провідності по поздовжній осі ротора. Це положення, як відомо, впливає з аналогії виразів для перетворень Лапласа і Фур'є.

У розглянутому випадку, в умовах прийнятих припущень, характер зміни амплітудно-фазних частотних характеристик  $y_d(js)$ , отриманих за узагальненими параметрами, повинен бути достатньо близьким в області щодо великих значень частот  $s$ . Як показує аналіз, в межах часу відключення пошкоджень в високовольтних мережах електричних систем при спрацьовуванні основних релейних захистів істотне значення має близькість модульних величин і аргументів характеристик в області частот більше 0,1 в.о..

Для більш точного розподілу струму між ОЗ та еквівалентною ДС необхідно, щоб розрахункові та експериментальні частотні характеристики  $C_f(js)$  мінімально відрізнялися в області ковзань менше 0,1 в.о..

На рис. 1 наведені частотні характеристики  $y_d(js)$  турбогенератора типу ТВВ-160 при напрузі  $U = 0,7 U_{\text{ном}}$ , отримані різним способом.

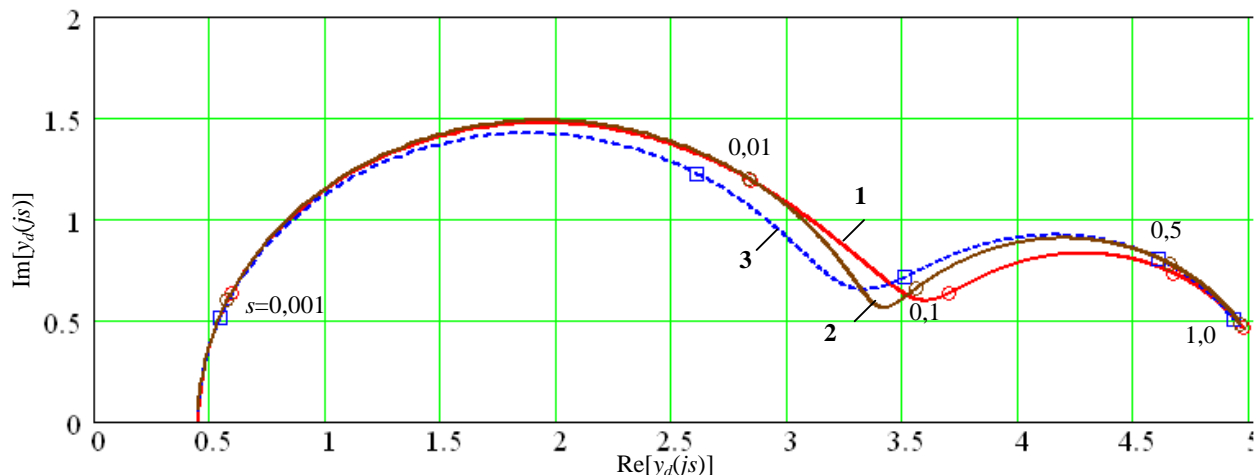


Рисунок 1 – Частотні характеристики  $y_d(js)$  ТВВ-160-2 при  $0,70 U_{\text{ном}}$

1 – експериментальна; 2 – розрахункова з виділенням ОЗ;

3 – розрахункова з використанням узагальнених функцій

Порівняння характеристик, отриманих за даними дослідів короткого замикання при напрузі  $U = 0,7 U_{\text{ном}}$  і розрахунком з використанням узагальнених параметрів вказує на їх задовільний збіг. Зокрема, значення модулів векторів струму зазначених характеристик в діапазонах частот  $0 \leq s \leq 0,01$  і  $0,01 \leq s \leq 1$  відрізняються не більше, ніж на 15,5 і 6,8% відповідно. При цьому розбіжність дійсних значень і аргументів в області  $s > 0,1$  в.о. не перевищує 5,2 %. Це свідчить про те, при розрахунку струмів КЗ при такому рівні насичення слід очікувати

помилки такого ж порядку.

Аналіз експериментальних і розрахованих при такому ж рівні насичення амплітудно-фазових частотних характеристик  $C_f(js)$ , зображених на рис. 2, свідчить про те, що їх максимальні відмінності за дійсною та уявною складовими у діапазонах частот  $0 \leq s \leq 0,01$  і  $0,01 \leq s \leq 1$  відрізняються не більше, ніж на 12,9% і 16,1% відповідно.

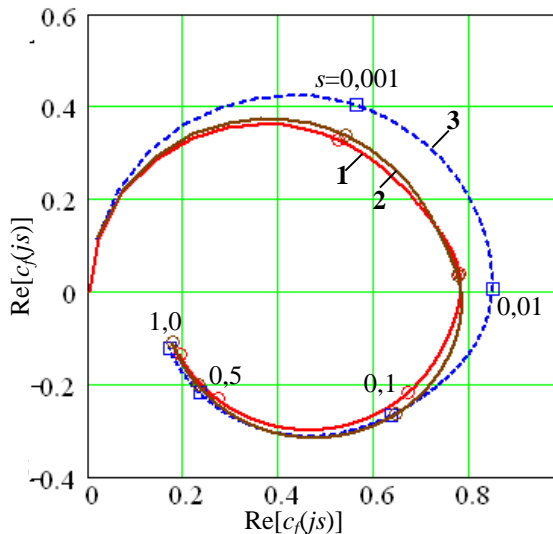


Рисунок 2 – ЧХ  $C_f(js)$  ТБВ-160-2 при  $0,70 U_{ном}$

- 1 – експериментальна;  
2 – розрахункова з виділенням ОЗ;  
3 – розрахункова з використанням узагальнених функцій

Очевидно, що при використанні параметрів схем заміщення, безпосередньо синтезованих за експериментальними даними призводить до істотно меншим погрешностей у визначенні ЧХ (рис.4.7, крива 2).

Дослідження, виконані для турбогенераторів ТБВ-320 і ТБВ-500 показали, що похибки розрахункових характеристик  $y_d(js)$  при частоті струму в роторі більш 0,1 в.о не перевищують 18,3% і 8,6% відповідно.

Розбіжність характеристик  $C_f(js)$  для цих генераторів складає 17,1% і 9,5%.

**Висновки.** На основі аналізу дискретних значень параметрів уточнених схем заміщення, отриманих для ТГ типів ТБВ-160, ТБВ-320 і ТБВ-500 при різних значень вихідного напруги, встановлено аналітичні співвідношення, що дозволяють з похибкою не більше 6,1% визначати частотні характеристики і параметри еквівалентних схем заміщення, що відображають як ефект витіснення струму в обмотках, так і явище заданого рівня насичення шляхів потоків розсіювання по поздовжній осі електричних машин.

Отримані аналітичні залежності параметрів схем заміщення з різною взаємною індукцією між обмотками статора, збудження і контурами демпферної системи у функції початкового значення періодичного струму статора дозволяють виконувати уточнені розрахунки струмів в обмотках статора і збудження при трифазних коротких замиканнях з урахуванням впливу насичення шляхів магнітних потоків розсіювання.

#### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Ларин А.М., Новый подход к определению частотных характеристик синхронных машин по данным опытов внезапного трехфазного короткого замыкания / А.М. Ларин, А.А. Шеина // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: «Електротехніка і енергетика». – Донецьк. – 2011, №10(180). – С. 100-107.
2. Шеина Г.О., Визначення електромагнітних параметрів обмотки збудження і демпферної системи / А.А. Шеина // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: «Електротехніка і енергетика». – Донецьк. – 2015, №1(17)'2015. – С. 30-33.
3. Ларин А.М., Определение электромагнитных параметров обмотки возбуждения синхронного генератора из опытов внезапного трехфазного короткого замыкания / А.М.Ларин, А.А.Ткаченко, И.И.Ларина // «Електротехніка і електромеханіка». – Харків. – 2005. – №2. –С. 32-34.

#### REFERENCES

1. Larin A.M. and Sheina A.A. (2011), "New approach to determination of the frequency characteristic of the synchronous machine by experimental data of sudden three-phase short circuit.", "Naukovi pratsi Donetskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu. Seriya: "Elektrotekhnika i enerhetyka", vol.10, no. 189, pp. 100-107
2. Sheina H. O. (2015), "Determination of the electromagnetic parameters of the excitation winding and damper system", "Naukovi pratsi Donetskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu. Seriya: "Elektrotekhnika i enerhetyka", vol. 1, no 17, pp 30-33.
3. Larin A.M. , Tkachenko A.A. and Larina I.I. (2005), "Determination of electromagnetic parameters of the excitation winding of synchronous generator from the experiments of sudden three-phase short circuit", Elektrotekhnika i elektromekhanika, vol. 2, pp. 32-34.

Надійшла до редколегії 01.12.2015

Рецензент: Толочко О.І.

G.O. SHEINA

State Institution of Higher Education «Donetsk National Technical University»

**Generalized dependences of turbogenerator electromagnetic parameters on saturation.** For the first time we obtained generalized analytical dependences of the parameters of equivalent circuits (which take into account different mutual inductive coupling between the windings) of TBB turbogenerators on the initial value of the periodic component of the sudden three phase short circuit current, reflecting the phenomenon of magnetic saturation of flux linkage way. The obtained generalized analytical dependences allow refined calculations of currents in the stator windings and excitation in three-phase short circuit with the influence of saturation magnetic flux linkage way for equivalent circuits, which takes into account the different magnetic connection between the windings.

**Key words:** *generalized analytical dependence, equivalent circuit parameters, periodic component of the current, three-phase sudden short circuit, saturation magnetic flux linkage ways.*