



ТИТКО О.І.

УДК 621.313

ТИТКО О.І., чл.-кор. НАН України,
ГУТОРОВА М.С., інж., Інститут електродинаміки НАН України

МОДЕЛЮВАННЯ ТА ІДЕНТИФІКАЦІЯ ДЕФЕКТІВ КОРОТКОЗАМКНЕНОЇ ОБМОТКИ РОТОРА АСИНХРОННИХ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ

Проведено моделювання електромагнітних процесів в АД при зародженні і розвитку дефектів короткозамкненої обмотки ротора. Запропоновано науково обґрунтовані чутливі діагностичні параметри, застосування яких реалізує електромагнітний спосіб ідентифікації дефектів у короткозамкненій обмотці ротора АД.



ГУТОРОВА М.С.

Під час роботи асинхронного двигуна (АД) з короткозамкненою обмоткою на роторі досить часто можливі пошкодження (обрив) стержнів обмотки ротора (ОР). Тому необхідна розробка способів і за-

способів ранньої діагностики технічного стану ОР.

Існує низка різних способів діагностики ОР АД [1–3]. Проте застосування на практиці відомих способів діагностики короткозамкнених ОР АД гальмується не досить великою чутливістю діагностичних параметрів. Дійсно, як показують експериментальні дослідження, пошкодження незначної кількості стержнів ОР у процентному відношенні до загальної кількості чи часткове пошкодження одного стержня не досить впливає на інтегральні параметри – струм обмотки статора, індукції в повітряному проміжку машин та ін.

Більш ефективними є методи електромагнітної діагностики ОР АД на основі аналізу параметрів деформованого поля в проміжку машини [4] або на основі методу компенсації поля в повітряному проміжку, тобто виділення тієї складової поля, що складає деформацію поля внаслідок появи і розвитку дефектів [5].

Таким чином, діагностика структури електромагнітного поля в повітряному зазорі на основі аналізу в процесі експлуатації АД – є перспективною і ефективною. Проведемо наукове обґрунтування особливостей розподілу електромагнітного поля за наявності дефектів різного ступеня розвитку, пошук нових діагностичних параметрів на основі моделювання поля в проміжку між статором і ротором АД при наявності дефектів. При моделюванні магнітного поля в повітряному проміжку АД можна розглядати його зубцево-пазову область і розв'язувати рівняння поля чисельним методом або за допомогою відомих пакетів програм [1].

В даній роботі прийнято модель розрахунку магнітного поля в проміжку між статором і ротором з розміщеними на їх поверхнях шарів лінійної густини струму обмоток статора (ОС) і ротора. Нелінійність середовища осердя статора і ротора та зубцево-пазова конструкція враховується відповідними коефіцієнтами. Така модель дозволяє отримати аналітичний розв'язок, який є зручним для проведення чисельних експериментів при різних ступенях розвитку дефектів. При цьому дуже важливо є моделювання дефектів обмотки ротора.

Отже розглянемо випадок, коли в обмотках ротора виникають дефекти.

Нехай h – ширина пошкоджених стержнів обмотки, h_1 – відстань від точки на роторі, де його струм дорівнює нулю. В системі ротора густина струму по колу є синусоїдальною та пульсуючою в часі і при обертанні ротора вона збуджує обертаюче магнітне поле в повітряному зазорі. Таким чином, очевидно, що поле, яке збуджує обмотка ротора з пошкодженими стержнями, залежить від положення ротора по відношенню до осі фаз обмотки статора, що, в свою чергу, залежить від навантаження, режиму работ двигуна (Рис. 1).

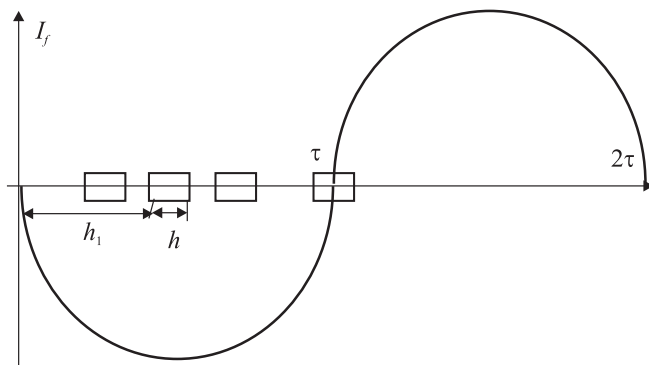


Рис. 1. Розподіл струму в стержнях ротора АД



Якщо пошкоджений стержень знаходиться в зоні малих значень струму, то вплив його на поле мінімальний, а якщо в зоні великих значень – максимальний. Отже, для використання електромагнітного способу діагностування за деформацією поля в проміжку машини доцільно випробовування АД здійснювати для двох положень ротора при пуску по відношенню до ОС, зсунутих один від одного на $\tau/2$.

Щоб підвищити чутливість електромагнітних параметрів діагностування, доцільно проводити діагностику на основі аналізу характеристик компенсованого поля. Тому модель розглянемо і розрахунки проведемо для компенсованого поля. Компенсоване поле – це різниця поля АД з технічним станом в даний момент часу експлуатації і поля при однаковому навантаженні бездефектної машини. Ясно, що в бездефектній машині характеристики такого поля в номінальному режимі близькі до нуля. При появі пошкоджених стержнів шириною h (Рис. 1) з'явиться поле, яке збуджується струмами, що умовно протікають по пошкоджених стержнях в зворотному напрямку. Для дослідження особливостей впливу дефектів в обмотці статора необхідно криву даного умовного струму розкласти в ряд Фур'є. При цьому лінійна густина струму A залежить від параметра h_1 . Приведемо постійні розкладу в ряд умовної густини струму пошкодження стержнів обмотки ротора АД на одній парі полюсів в декартовій системі координат відповідно до Рис. 1.

$$a_k = \frac{1}{\tau} \int_0^{2\tau} A(x, h_2) \cos k \frac{\pi}{\tau} x, \quad b_k = \frac{1}{\tau} \int_0^{2\tau} A(x, h_2) \sin k \frac{\pi}{\tau} x,$$

$$a_k = \frac{A_0}{\tau} \int_0^{2\tau} \cos \frac{\pi}{\tau} x \sin k \frac{\pi}{\tau} x,$$

$$a_0 = \frac{A_0}{2\tau} \frac{1}{\pi/\tau} \left[\cos\left(\frac{\pi}{\tau} h_1\right) - \cos\left(\frac{\pi}{\tau} (h_1 + h)\right) \right], \quad (1)$$

$$a_k = \frac{A_2}{2\tau} \left\{ \frac{\tau}{\pi(1-k)} \left[\cos\left(\frac{\pi}{\tau} (1-k) h_1\right) - \cos\left(\frac{\pi}{\tau} (1-k)(h_1 + h)\right) \right] + \frac{\tau}{\pi(1+k)} \left[\cos\left(\frac{\pi}{\tau} (1+k) h_1\right) - \cos\left(\frac{\pi}{\tau} (1+k)(h_1 + h)\right) \right] \right\},$$

$$b_k = \frac{A_2}{2\tau} \left\{ \frac{\tau}{\pi(1-k)} \left[\sin\left(\frac{\pi}{\tau} (1-k)(h_2 + h)\right) - \sin\left(\frac{\pi}{\tau} (1-k) h_1\right) \right] - \frac{\tau}{\pi(1+k)} \left[\sin\left(\frac{\pi}{\tau} (1+k)(h_2 + h)\right) - \sin\left(\frac{\pi}{\tau} (1+k) h_1\right) \right] \right\}, \quad (2)$$

$$A(\varphi, h_1) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} a_k \cos \frac{\pi}{\tau} kx + b_k \sin \frac{\pi}{\tau} kx, \quad (3)$$

Вирази (2) для коефіцієнтів a_k, b_k отримано при

змінній густині струму на ділянці $h_1 < \varphi < h_1 + h$ у вигляді $\sin(\pi/\tau) \varphi$, що має місце в АД.

Індукція магнітного поля в повітряному проміжку в декартовій системі буде мати вигляд

$$B = C \sum_{k=1}^{\infty} \left[a'_k \cos k \frac{\pi}{\tau} x + b'_k \sin k \frac{\pi}{\tau} x \right]. \quad (4)$$

Як видно, постійна складова лінійного навантаження струму обмотки ротора збуджує тангенціальне поле, характеристики якого не залежать від кругової координати, і це явище можна також використати для діагностики ОР, здійснюючи контроль за такою складовою магнітного поля в повітряному проміжку між статором і ротором.

Дослідимо вплив дефектів обмотки ротора різного ступеня розвитку на характеристики поля.

Розрахункові дослідження впливу дефектів обмотки ротора на поле в повітряному проміжку проведемо для АД типу А62 з паспортними даними: $P_H = 1,7$ кВт; $f = 50$ Гц; $U_H = 380$ В; $2p = 12$; $I_H = 6,2$ А; $\eta = 63\%$, $n = 460$ об/хв; $\cos \varphi = 0,66$; $M_H = 45$ Н*м; $m = 3$. Такий двигун вибрано тому, що він досліджувався в лабораторних умовах при фізичному моделюванні вказаних дефектів. Так як дані по параметрах даного двигуна відсутні, знайдемо параметри двигуна, необхідні для розрахункових досліджень поля, таких як $k_\delta, k_\mu, k_{обм1}, I_p \tau, Z_c, Z_p, \delta, k_c$.

Так як двигун має дві обмотки для переключення полюсів з 12 на 6 і з 8 на 4, розрахунки проведемо для $p = 6$.

1. Внутрішній діаметр обмотки статора

$$D = k_D D_a,$$

де D_a – зовнішній діаметр осердя статора, k_D – співвідношення діаметрів статора

2. Полюсне ділення

$$\tau = \frac{\pi \cdot D}{2p} = \frac{3,14 \cdot 0,249}{2 \cdot 6} = 0,065 \text{ м},$$

де D – внутрішній діаметр осердя статора, p – число пар полюсів.

3. Число пазів статора $Z_c = 54$ (прийнято згідно рекомендацій).

4. Струм статора

$$I_{сн} = \frac{P_H}{m U_{1н} \cos \varphi \eta} = \frac{1700}{3 \cdot 220 \cdot 0,66 \cdot 0,63} = 6,195 \text{ А},$$

5. Обмотковий коефіцієнт

$$k_{c1} = k_{ск} k_p k_{у\kappa} = 0,99 \cdot 0,975 \cdot 1 = 0,965,$$

де $k_{ск}$ – коефіцієнт скорочення

$$k_{ск} = \frac{\sin(\gamma_{ск} / 2)}{0,5 \gamma_{ск}} = \frac{\sin(0,483 / 2)}{0,5 \cdot 0,483} = 0,99,$$



$$\gamma_{\text{ск}} = \frac{b_{\text{ск}} \pi}{\tau} = \frac{0,01 \cdot 3,14}{0,0651} = 0,483,$$

$b_{\text{ск}} = 10$ мм (виміряне на фізичній моделі), k_p – коефіцієнт розподілення обмотки

$$k_p = \frac{\sin(\pi / 2m)}{q \sin(\pi / 2mq)} = \frac{\sin(3,14 / 2 \cdot 3)}{1,5 \sin(3,14 / 2 \cdot 3 \cdot 1,5)} = 0,975,$$

q – число провідників на полюс і фази

$$q = \frac{Z_c}{2pm} = \frac{54}{2 \cdot 6 \cdot 3} = 1,5,$$

$k_{\text{ук}}$ – коефіцієнт укорочення

$$k_{\text{ук}} = \sin \frac{\pi y}{2\tau} = \sin \frac{3,14 \cdot 4,5}{2 \cdot 6,5} = 1,$$

6. Число послідовних витків у фазі

$$w_c = \frac{U_n Z_1}{2am} = \frac{78 \cdot 54}{2 \cdot 1 \cdot 3} = 702,$$

де U_n – число ефективних провідників в пази (заводські обмоткові дані);

7. Повітряний проміжок $\delta = 0,4$ мм;

8. Число пазів ротора $Z_f = 44$;

9. Струм в стержні ротора

$$I_f = k_i I_c v_i = 0,72 \cdot 6,2 \cdot 92 = 410 \text{ А}$$

де $k_i = 0,72$, v_i – коефіцієнт приведення струмів ротора до витків статора

$$v_i = \frac{2m w_c k_{cl}}{Z_f} = \frac{2 \cdot 3 \cdot 702 \cdot 0,965}{44} = 92,$$

10. Коефіцієнт повітряного проміжку

$$k_\delta = k_{\delta 1} k_{\delta 2} = 1,158 \cdot 1,038 = 1,2$$

де $k_{\delta 1}$ – коефіцієнт картера для статора; $k_{\delta 2}$ – коефіцієнт картера для ротора.

11. Коефіцієнт насичення магнітного кола

$$k_\mu = F_k / F_\delta = 695,381 / 491,04 = 1,416,$$

де F_k – магнітна напруженість на пару полюсів; F_δ – магнітна напруженість повітряного проміжку.

Струм обмотки статора збудує в повітряному проміжку АД магнітне поле з індукцією в 1,74 Тл, струм обмотки ротора – 1,23 Тл. Лінійна густина струмів обмотки ротора може бути розрахована двома способами. В першому випадку можна вважати короткозамкнену обмотку як багатозамкнену обмотку з $m = 44$, $w_f = 1/2$, $k_f = 1$, в другому – знаходячи амплітудне значення лінійної густини струму в стержні, який визначиться як струм в стержні, поділений на ширину стержня. В обох випадках значення для лінійної густини струму ротора практично співпадають. Для суперпозиції полів обмоток ротора і статора АД необхідно зна-

ти зсув фаз між струмами. Для цього необхідно побудувати векторні діаграми. В даному випадку даний кут знайдемо з умови, що величина $B_\delta = 0,7$ Тл. Значення B_δ вимірювалось експериментально індуктивним датчиком у вигляді витка, намотаного на зубці статора.

Отже, в номінальному режимі струм ротора є зсунутих по фазі відносно струму статора на кут, рівний 150° . Для АД, що розглядається, на полюсне ділення припадає 3,7 стержня.

Результати розрахунків компенсованого поля в повітряному проміжку машин при різних видах і ступені розвитку дефектів в обмотці ротора АД приведено в Табл. 1 – 3 та на Рис. 2, 3. Розрахунки проводились при таких даних: $A_1 = 22777$ А/м, $C = 0,57 \cdot 10^{-5}$.

В Табл. 1 приведено значення окремих гармонік для окремих складових і в цілому для B_δ . Видно, що збіжність ряду для індукції магнітного поля досить висока. Розрахунки проводились для $x = \tau/2$. Отже, було отримано максимальні значення індукції і амплітудні значення окремих гармонік поля, розподіленого по розточці ротора АД. Аналіз значень гармонік показує, що за ними також можна діагностувати кількість пошкоджених стержнів ОР за співвідношенням ширини їх розміщення до величини τ . Відповідні гармоніки вищі.

В Табл. 1 приведено досить чутливий діагностичний параметр a_0 – постійна розкладу в ряд лінійної густини струму. Для всіх розглянутих варіантів дефектів цей параметр досить чутливо реагує на розвиток дефектів в ОР АД.

Треба відмітити, що розкладаючи в ряд індукцію магнітного поля в повітряному проміжку машини, отримуємо свою постійну розкладу. Чутливість цього параметра до розвитку дефектів ОР така сама, як параметра a_0 .

На Рис. 2 приведено характеристики розподілу компенсованого магнітного поля, за яким діагностуються дефекти ротора, на його поверхні в системі координат ротора. Видно, що максимальною індукція є в зоні дефекту.

Поле суттєво несиметричне, що і дозволяє ефективно і просто діагностувати дефекти обмотки ротора, наприклад, контролювати дане поле з допомогою датчика магнітного поля, встановленого на статорі.

У Табл. 1 і на Рис. 3, а приведено результати розрахунку індукції поля при зміні h_1 , тобто місця виявлення дефекту.

Максимальним є поле при його розташуванні в зоні максимального струму в стержнях ОР. Роз-



рахунки показують, що індукція компенсованого поля досягає значення 0,2 Тл, що дає підставу говорити, що електромагнітний спосіб діагностування стану ОР короткозамкненого АД на основі аналізу магнітного поля в повітряному проміжку може бути здійсненим, ефективним та простим у реалізації.

На Рис. 3, б і в Табл. 2 приведено дані розрахунку індукції поля при варіації величини h . При збільшенні кількості зруйнованих стержнів ОР деформація магнітного поля в повітряному проміжку вища. Причому, як видно на Рис. 3, б, збільшення носить лінійний характер.

На Рис. 3, в і в Табл. 3 наведено результати розрахунку поля при частковому руйнуванні одного стержня ОР, коли руйнування відбулися на 0,25, 0,5, частині стержня і, для порівняння, при повному руйнуванні стержня. Як і слід було очікувати, при розвитку дефекту (тріщини в стержні) компенсоване магнітне поле в повітряному проміжку посилюється, а деформація поля в проміжку товщин буде тим менша, чим менша тріщина в стержні. Рівень магнітного поля дає підстави говорити, що деформація поля в проміжку піддається контролю навіть при частковому руйнуванні одного стержня.

На фізичному стенді, створеного на базі вказаного двигуна, проведено комплекс експериментальних досліджень для аналізу магнітного поля в повітряному проміжку АД при дефектах ОР та виявлення і наукового обґрунтування чутливих діагностичних параметрів. Дефекти ОР моделювались шляхом свердління в стержнях отвору з різьбою для вкручування в

Таблиця 1. Залежність магнітної індукції компенсованого поля від h_1 при $h = 0,006$ м

	k	a'_k	b'_k	$a'_k \cdot \cos k \frac{\pi}{\tau} x$	$b'_k \cdot \sin k \frac{\pi}{\tau} x$	B_δ	a_0
$h_1 = 0$	1	0	57,95372	0	57,95372		
	2	138,8978	56,50359	-138,898	3,33E-08		
	3	82,6443	54,14432	-7,3E-08	-54,1443		
	4	52,11652	50,95957	52,11652	-6E-08		
	5	32,31195	47,06095	4,76E-08	47,06095		
	6	18,29305	42,58299	-18,2931	7,53E-08		
	7	7,975578	37,67698	-1,6E-08	-37,677		
	8	0,324126	32,50426	0,324126	-7,7E-08		
	9	-5,24943	27,22913	-1,4E-08	27,22913		
	10	-9,12557	22,0118	9,125575	6,49E-08		
			-0,00545	0,002304	-0,00315	151,3619	
$h_1 = 0,01625$	1	0	1347,65	0	1347,65		
	2	-245,199	791,2298	245,1987	4,67E-07		
	3	-512,543	178,1519	4,53E-07	-178,152		
	4	-327,348	-224,616	-327,348	2,65E-07		
	5	-10,2436	-307,351	-1,5E-08	-307,351		
	6	193,3352	-152,466	-193,335	-2,7E-07		
	7	193,8972	53,44008	-4E-07	-53,4401		
	8	59,31031	155,3329	59,31031	-3,7E-07		
	9	-74,9969	116,2552	-2E-07	116,2552		
	10	-115,174	6,860259	115,1744	2,02E-08		
			-0,00576	0,052723	0,046966	839,9973	
$h_1 = 0,0295$	1	0	2087,82	0	2087,82		
	2	-1032,99	6,05E-07	1032,986	3,57E-16		
	3	-5,9E-07	-676,622	5,26E-16	676,622		
	4	494,9883	-5,8E-07	494,9883	6,84E-16		
	5	5,61E-07	383,3718	8,27E-16	383,3718		
	6	-306,895	5,39E-07	306,8951	9,54E-16		
	7	-5,1E-07	-250,632	1,06E-15	250,6323		
	8	207,1375	-4,8E-07	207,1375	1,14E-15		
	9	4,54E-07	172,2875	1,2E-15	172,2875		
	10	-143,619	4,2E-07	143,6188	1,24E-15		
			0,124581	0,203532	0,328112	1047,566	
$h_1 = 0,0325$	1	0	2044,539	0	2044,539		
	2	-980,07	-290,26	980,0701	-1,7E-07		
	3	280,2468	-608,051	-2,5E-07	608,0506		
	4	410,8237	266,6953	410,8237	-3,1E-07		
	5	-250,047	285,2828	-3,7E-07	285,2828		
	6	-197,326	-230,834	197,3264	-4,1E-07		
	7	209,6603	-132,482	-4,3E-07	132,4815		
	8	83,55332	187,1696	83,55332	-4,4E-07		
	9	-164,023	46,50772	-4,4E-07	46,50772		
	10	-18,8274	-140,869	18,82745	-4,2E-07		
			0,096364	0,177661	0,274025	1036,574	



Таблиця 2. Залежність магнітної індукції компенсованого магнітного поля від h при $h_1 = \tau/2 - h/2$

$h, \text{М}$	$B, \text{Тл}$	A_0
0,006	0,33	1048
0,012	0,543	2073
0,065	0,77	7250

Таблиця 3. Залежність магнітної індукції компенсованого магнітного поля при різних ступенях пошкодження одного стержня ОР АД при $h_1 = 0,0295 \text{ м}$, $h = 0,006 \text{ м}$

Величина тріщини в стержні, в.о.	$B_\delta, \text{Тл}$	a_0
1	0,24	1047
0,5	0,12	523
0,25	0,06	262

Таблиця 4. Постійна a'_0 розкладу в ряд Фур'є індукції магнітного поля при розвитку дефектів ОР АД, отримана при фізичному моделюванні

Ступінь пошкодження	a'_0
Умовно справна машина	1,24
Ушкодження 0,25 товщини стержня	3,13
Обрив одного стержня	8,8
Обрив трьох стержнів	32,6

ностичних параметрів. У Табл. 4 приведено залежність постійної розкладу в ряд Фур'є індукції магнітного поля в повітряному проміжку машини від розвитку дефектів ОР, яке підтверджує високу чутливість даного діагностичного параметру.

Отже, даний спосіб діагностування та діагностичні параметри, перш за все постійна розкладу в ряд індукції поля в повітряному проміжку машин, співвідношення гармонік розкладу в ряд та значення індукції компенсованого поля дають змогу достовірно діагностувати дефекти ОР АД на ранній стадії розвитку. Це суттєво підвищить надійність роботи гідроагрегатів та обладнання власних потреб ГЕС і ГАЕС.

ЛІТЕРАТУРА

1. Папазов Ю.Н., Чувашев В.А., Васильковський Ю.Н., Гайденко Ю.А. Анализ механических характеристик короткозамкнутых асинхронных электродвигателей методами теории электромагнитного поля. — Научные журналы НТУ "ХПИ": Электротехника и электромеханика № 1 — НТУ "ХПИ", 2005. — ISSN 2074-272X.

2. Патент України № 15261. Спосіб контролю справності стрижнів короткозамкненої обмотки ротора асинхронного двигуна /Сивокобиленко В.Ф./ 2006 р. Бюл. № 6.

3. Гашимов М.А., Абдуладзе С.В. Исследование в целях диагностики физических процессов функционирования электрических машин при неисправностях в обмотке статора и ротора. Электротехника, 2004. — № 2 С. 20—27.

4. Патент України №5510. Пристрій для контролю виткових замикань в обмотці ротора електричної машини /Кузьмін В.В., Ліцов В.І., Шофул А.К./ 1994 р. Бюл. № 7.

5. Титко О.І., Урманов О.Б., Федоренко Г.М. Аксіальний магнітний потік в зубцях крайніх пакетів статора потужних турбогенераторів. Гідроенергетика України, 2013. — № 1. — С. 21—26.

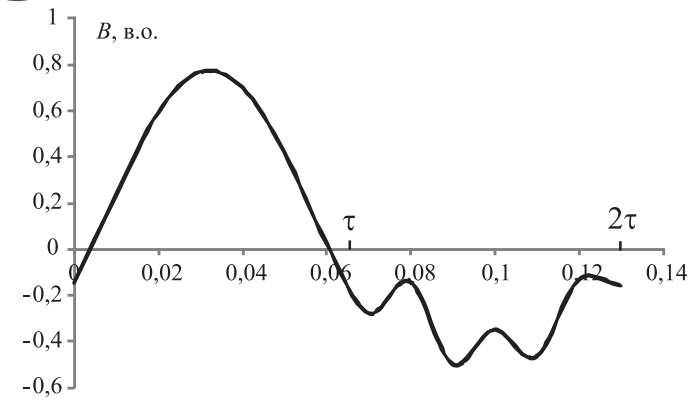


Рис. 2. Розподіл індукцій компенсованого магнітного поля в проміжку між статором і ротором при пошкодженні одного стержня

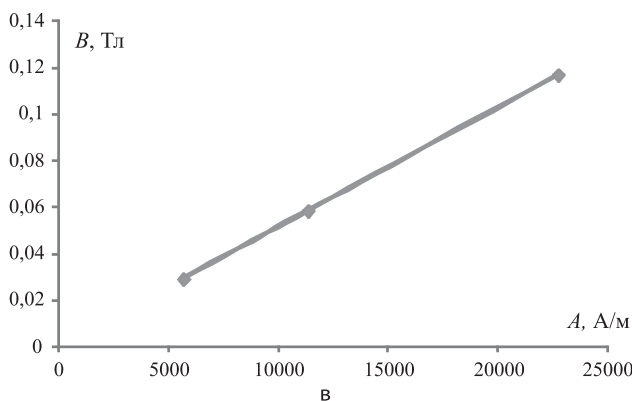
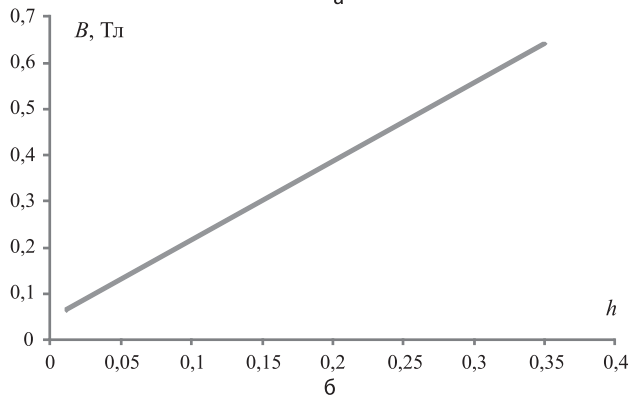
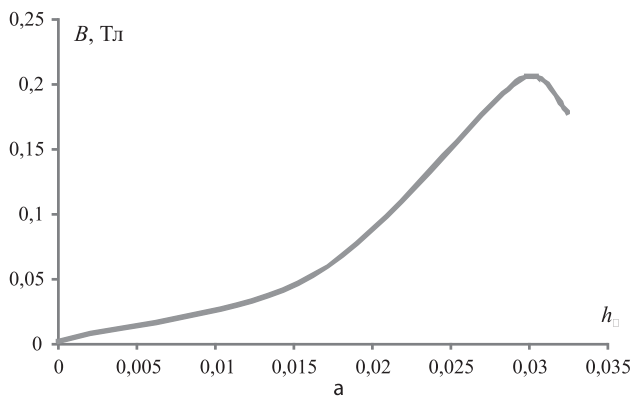


Рис. 3. Криві індукції в залежності від h_1 (а), h (б) і ступеня розвитку тріщини в стержні ОР (в)

нього спеціальних болтів. Таким чином моделювалось часткове або повне руйнування окремих стержнів. Індукція магнітного поля в зазорі вимірювалась шляхом намотування на зубці витків. Експерименти підтвердили основні наукові положення, що витікають із результатів математичного моделювання та ефективність виявлених діаг-