

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ВЗАЄМНИХ ВПЛИВІВ МІЖ ПРОВІДНИКАМИ ТРИФАЗНОГО КАБЕЛЮ

Д. А. Маєвський¹, О. М. Семенюг², О. В. Яковлев¹, О. П. Морозов¹, О. О. Топузанов¹,
Е. В. Савьолова¹

¹Одеський національний політехнічний університет

²Інжинірингова компанія «С-Інжиніринг»

Анотація. Наведено результати експериментальних досліджень взаємних впливів між проводами трифазного броньованого кабелю ВБбШвнг 0,66 кВ. Дослідження полягало в визначенні амплітудно-частотної характеристики кабелю при зміні частоти синусоїдальної напруги в діапазоні від 50 Hz до 100 kHz. Визначено первинні параметри кабелю та виконано математичне моделювання процесів в кабелі за раніш створеною математичною моделлю. Результати експерименту підтверджують правильність моделі та свідчать про наявність суттєвих взаємних впливів між провідниками кабелю навіть на низьких частотах.

Ключові слова: трифазний кабель, взаємні впливи, електромагнітна сумісність, частотно-регульований електропривод, амплітудно-частотна характеристика, електромагнітні завади.

Вступ

Характерною особливістю світового технічного прогресу є вимога до постійного вдосконалення роботи і розширення функцій механізмів і машин. Особливо це стосується вимог, що несуть із собою так звані «індустріальні революції». Зокрема четверта індустріальна революція передбачає розвиток і злиття автоматизованого виробництва, обміну даних і виробничих технологій в єдину саморегульовану систему, з найменшим або взагалі відсутнім втручанням людини у виробничий процес. Досягнення цього неможливо без використання керованих приводів. В даний час частотно-регульований асинхронний привід набув широкого поширення в різних галузях промисловості. Механізми і машини усіх галузей безперервно поліпшуються управління ними ускладнюється. Сьогодні електроприводи із асинхронними двигунами є самими розповсюдженими в світі. Найбільш оптимальне керування швидкістю обертання асинхронного двигуна може бути досягнуто тільки за рахунок плавної зміни частоти напруги живлення. Сучасні широтно-імпульсні перетворювачі (ШПП) дозволяють порівняно легко досягти плавності в зміні частоти. Але форма напруги живлення, що подається на електричний асинхронний двигун при цьому значно відрізняється від синусоїдальної. Ця напруга являє собою високочастотну послідовність прямокутних імпульсів різної полярності й три-

валості однаковою амплітудою. На малих відстанях передача такої напруги проходить без ускладнень. Але характерною особливістю систем розподілу електроенергії є значна довжина живильних і розподільних електричних мереж, обумовлена тим, що виробниче обладнання розподілене по великій площі. В таких умовах довжини кабелів, що з'єднують ШПП із асинхронними двигунами досягають декількох сотень метрів. Головним недоліком таких систем, особливо при наявності кабелів значної довжини, що з'єднують перетворювачі частоти з двигунами, є те, що вони є досить потужними джерелами електромагнітних завад, які можуть негативно впливати як на саму систему електроприводу, так і на розташоване поблизу неї обладнання. Це підвищує вимоги до електромагнітної сумісності (ЕМС) електроприводів із частотним управлінням з іншим електрообладнанням, яке розташоване поблизу.

Крім того, проходження імпульсного сигналу з крутим фронтом викликає хвильові процеси в кабелі, що призводять до появи перенапруг на затискачах двигуна. Виникнення перенапруг створює негативний вплив на ізоляцію як обмоток двигуна, так і самого кабелю, що призводить до її передчасного зносу. А це, в свою чергу, може привести до пробою ізоляції і їх виходу з ладу усієї системи.

Наявність високочастотних складових в спектрі напруги живлення призводить до виникнення додаткових втрат в сталі магнітопровода двигуна, що в свою чергу, призводить до його підвищеного нагрівання і зниження його корисної потужності.

© Маєвський Д. А., Семенюг О. М., Яковлев О. В., Морозов О. П., Топузанов О. О., Савьолова Е. В., 2018

Врахування та зниження цих негативних факторів неможливе без створення математичних моделей взаємних впливів між провідниками кабелю. А самі математичні моделі мають бути верифікованими з допомогою експериментальних досліджень.

Тому метою цієї статті є експериментальні дослідження взаємних впливів між провідниками трифазного кабелю та співставлення отриманих результатів з результатами математичного моделювання.

1. Математична модель взаємних впливів між провідниками трифазного кабелю

При частотному керуванні електроприводами роль кабелю зводиться до передачі напруги, яка має широтно-імпульсну модуляцію. При цьому фактично форма напруги є прямокутною, з високою крутизою фронтів та з частотами, які значно, в 1000 та більше разів перевищують промислову частоту 50 Hz [1]. Крім того слід мати на увазі складові вищих гармонік напруги, які теж повинні без спотворень передаватися по кабелю для вірного відтворення прямокутної форми напруги на його виході. Таким чином, навіть при відносно малих відстанях між ШИП та асинхронним двигуном (найчастіше, не більше 100 метрів), кабель повинен розглядатися як лінія з розподіленими параметрами. З цього випливає, що математична модель такого кабелю повинна базуватись на теорії ліній з розподіленими параметрами із врахуванням взаємних індуктивних та ємнісних зв'язків між поруч розташованими провідниками.

Така модель є відомою [2, 3] й являє собою систему диференційних рівнянь у часткових похідних відносно миттєвих значень напруг та струмів. Аналітичне розв'язання такої системи в загальному випадку не є можливим. Але воно можливе для деяких окремих випадків, наприклад для синусоїдальних напруг та струмів. Таке розв'язання є дуже бажаним, тому що знаючи аналітичний вираз амплітудно-частотної (АЧХ) та фазо-частотної (ФЧХ) характеристик, можна розрахувати перехідну характеристику. Це відкриває шлях до розв'язання задачі розрахунку перехідних процесів в кабелі.

Розв'язок системи диференційних рівнянь для синусоїдального сигналу та побудова моделі розповсюдження напруг та струмів в кабелі детально розглянута в роботі [4]. Математична модель розповсюдження комплексів напруг окремих провідників кабелю в залежності від відстані від його початку x наведена в формулі (1). Ця формула містить тільки рівняння, що визначають лише залежність комплексів напруг. В [4] міс-

ється повний набір рівнянь, в утому числі й для струмів. Але в цій роботі рівняння для струмів не наведені, бо вони не використовуються.

$$\begin{cases} \mathcal{U}_1^{\&}(x) = \frac{1}{3}[(C_1 + C_3 + C_5) \cdot ch\gamma_1 x + (2C_1 - C_3 - C_5) \cdot ch\gamma_2 x + \\ + (C_2 + C_4 + C_6) \cdot \frac{1}{\gamma_1} sh\gamma_1 x + (2C_2 - C_4 - C_6) \cdot \frac{1}{\gamma_2} sh\gamma_2 x] \\ \mathcal{U}_2^{\&}(x) = \frac{1}{3}[(C_1 + C_3 + C_5) \cdot ch\gamma_1 x + (2C_3 - C_1 - C_5) \cdot ch\gamma_2 x + \\ + (C_2 + C_4 + C_6) \cdot \frac{1}{\gamma_1} sh\gamma_1 x + (2C_4 - C_2 - C_6) \cdot \frac{1}{\gamma_2} sh\gamma_2 x] \\ \mathcal{U}_3^{\&}(x) = \frac{1}{3}[(C_1 + C_3 + C_5) \cdot ch\gamma_1 x + (2C_5 - C_1 - C_3) \cdot ch\gamma_2 x + \\ + (C_2 + C_4 + C_6) \cdot \frac{1}{\gamma_1} sh\gamma_1 x + (2C_6 - C_2 - C_4) \cdot \frac{1}{\gamma_2} sh\gamma_2 x] \end{cases} \quad (1)$$

В цих формулах введено такі позначення:

$$C_1 = \mathcal{U}_{11}^{\&}, \quad C_3 = \mathcal{U}_{21}^{\&}, \quad C_5 = \mathcal{U}_{31}^{\&},$$

$$C_2 = \frac{(A_4 A_6 - A_3 A_5) F_1 + (A_1 A_5 - A_1 A_6) F_2 + (A_1 A_3 - A_1 A_4) F_3}{2A_1 A_3 A_5 - A_2 A_3 A_5 - A_1 A_4 A_5 - A_1 A_3 A_6 + A_2 A_4 A_6},$$

$$C_4 = \frac{(A_3 A_5 - A_3 A_6) F_1 + (A_2 A_6 - A_1 A_5) F_2 + (A_1 A_3 - A_2 A_3) F_3}{2A_1 A_3 A_5 - A_2 A_3 A_5 - A_1 A_4 A_5 - A_1 A_3 A_6 + A_2 A_4 A_6},$$

$$C_6 = \frac{(A_3 A_5 - A_4 A_5) F_1 + (A_1 A_5 - A_2 A_5) F_2 + (A_2 A_4 - A_1 A_3) F_3}{2A_1 A_3 A_5 - A_2 A_3 A_5 - A_1 A_4 A_5 - A_1 A_3 A_6 + A_2 A_4 A_6},$$

$$A_1 = \frac{sh\gamma_1 l}{\gamma_1} - \frac{sh\gamma_2 l}{\gamma_2} + \frac{Z_{n1}}{Z_{B1}} \frac{ch\gamma_1 l}{\gamma_1} - \frac{Z_{n1}}{Z_{B2}} \frac{ch\gamma_2 l}{\gamma_2},$$

$$A_2 = \frac{sh\gamma_1 l}{\gamma_1} + 2 \frac{sh\gamma_2 l}{\gamma_2} + \frac{Z_{n1}}{Z_{B1}} \frac{ch\gamma_1 l}{\gamma_1} + 2 \frac{Z_{n1}}{Z_{B2}} \frac{ch\gamma_2 l}{\gamma_2},$$

$$A_3 = \frac{sh\gamma_1 l}{\gamma_1} - \frac{sh\gamma_2 l}{\gamma_2} + \frac{Z_{n2}}{Z_{B1}} \frac{ch\gamma_1 l}{\gamma_1} - \frac{Z_{n2}}{Z_{B2}} \frac{ch\gamma_2 l}{\gamma_2},$$

та

$$A_4 = \frac{sh\gamma_1 l}{\gamma_1} + 2 \frac{sh\gamma_2 l}{\gamma_2} + \frac{Z_{n2}}{Z_{B1}} \frac{ch\gamma_1 l}{\gamma_1} + 2 \frac{Z_{n2}}{Z_{B2}} \frac{ch\gamma_2 l}{\gamma_2},$$

$$A_5 = \frac{sh\gamma_1 l}{\gamma_1} - \frac{sh\gamma_2 l}{\gamma_2} + \frac{Z_{n3}}{Z_{B1}} \frac{ch\gamma_1 l}{\gamma_1} - \frac{Z_{n3}}{Z_{B2}} \frac{ch\gamma_2 l}{\gamma_2},$$

$$A_6 = \frac{sh\gamma_1 l}{\gamma_1} + 2 \frac{sh\gamma_2 l}{\gamma_2} + \frac{Z_{n3}}{Z_{B1}} \frac{ch\gamma_1 l}{\gamma_1} + 2 \frac{Z_{n3}}{Z_{B2}} \frac{ch\gamma_2 l}{\gamma_2}.$$

Коефіцієнти, що позначені як F_1 , F_2 та F_3 обчислюються як:

$$F_1 = -(\mathcal{U}_{11}^{\&} + \mathcal{U}_{21}^{\&} + \mathcal{U}_{31}^{\&}) \cdot ch\gamma_1 l - (2\mathcal{U}_{11}^{\&} - \mathcal{U}_{21}^{\&} - \mathcal{U}_{31}^{\&}) \cdot ch\gamma_2 l - \\ - (\mathcal{U}_{11}^{\&} + \mathcal{U}_{21}^{\&} + \mathcal{U}_{31}^{\&}) \cdot \frac{Z_{n1}}{Z_{B1}} sh\gamma_1 l - (2\mathcal{U}_{11}^{\&} - \mathcal{U}_{21}^{\&} - \mathcal{U}_{31}^{\&}) \cdot \frac{Z_{n1}}{Z_{B2}} sh\gamma_2 l,$$

$$F_2 = -(\mathcal{U}_{11}^{\&} + \mathcal{U}_{21}^{\&} + \mathcal{U}_{31}^{\&}) \cdot ch\gamma_1 l - (2\mathcal{U}_{21}^{\&} - \mathcal{U}_{11}^{\&} - \mathcal{U}_{31}^{\&}) \cdot ch\gamma_2 l - \\ - (\mathcal{U}_{11}^{\&} + \mathcal{U}_{21}^{\&} + \mathcal{U}_{31}^{\&}) \cdot \frac{Z_{n2}}{Z_{B1}} sh\gamma_1 l - (2\mathcal{U}_{21}^{\&} - \mathcal{U}_{11}^{\&} - \mathcal{U}_{31}^{\&}) \cdot \frac{Z_{n2}}{Z_{B2}} sh\gamma_2 l,$$

$$F_3 = -(\mathcal{U}_{11}^{\&} + \mathcal{U}_{21}^{\&} + \mathcal{U}_{31}^{\&}) \cdot ch\gamma_1 l - (2\mathcal{U}_{31}^{\&} - \mathcal{U}_{11}^{\&} - \mathcal{U}_{21}^{\&}) \cdot ch\gamma_2 l - \\ - (\mathcal{U}_{11}^{\&} + \mathcal{U}_{21}^{\&} + \mathcal{U}_{31}^{\&}) \cdot \frac{Z_{n3}}{Z_{B1}} sh\gamma_1 l - (2\mathcal{U}_{31}^{\&} - \mathcal{U}_{11}^{\&} - \mathcal{U}_{21}^{\&}) \cdot \frac{Z_{n3}}{Z_{B2}} sh\gamma_2 l.$$

В усіх формулах $U_{11}^{\&}, U_{21}^{\&}$ та $U_{31}^{\&}$ – комплекси напруг на початку ліній, Z_{H1}, Z_{H2} та Z_{H3} – комплекси навантажень в кінці ліній. Коефіцієнти розповсюдження γ_1 та γ_2 обчислюються як:

$$\gamma_1 = \sqrt{(Z_0 + 2Z_1)(Y_0 - 2Y_1)},$$

$$\gamma_2 = \sqrt{(Z_0 - Z_1)(Y_0 + Y_1)}.$$

Хвильові опори:

$$Z_{B1} = \sqrt{\frac{Z_0 + 2Z_1}{Y_0 - 2Y_1}}, \quad Z_{B2} = \sqrt{\frac{Z_0 - Z_1}{Y_0 + Y_1}}.$$

В формулах для коефіцієнтів розповсюдження та хвильових опорів Z_0, Z_1, Y_0 та Y_1 використано такі позначення: $Z_1 = R_0 + j\omega L_0, Z_0 = j\omega M, Y_0 = G_0 + j\omega C_0, Y_1 = G_1 + j\omega C_1$.

Величини R_0, L_0, C_0 та G_0 – власні первинні параметри провідників кабелю, M, C_1 та G_1 – взаємні первинні параметри, що визначають індуктивний, ємнісний та гальванічний вплив між провідниками.

Наведена в формулах (1) математична модель використовувалась для співставлення із даними експерименту. Розглянемо детальніше організацію та результати цих досліджень.

2. Експериментальні дослідження

Для проведення експериментальних досліджень взаємних впливів між проводами кабелю було використано трифазний броньований кабель ВБШвнг 0,66 кВ 3х2,5 виробництва Бердянського кабельного заводу. Дата виробництва – 22.07.2016 року, номер партії – 829-16. Кабель надано компанією «С-Інжиніринг».

Конструктивні параметри кабелю:

- провідники круглі, мідні, однодротові, діаметром 1,7 мм (виміряно на місці, не співпадає з паспортними даними);
- ізоляція – полівінілхлоридний пластикат, відносна діелектрична проникність – 4,2 – 4,5 при частоті 50 Hz. Товщина провідника в ізоляції – 2,7 мм (виміряно на місці);
- броня з двох сталевих оцинкованих стрічок і захисний шланг з полівінілхлоридного пластикату. Магнітна проникність броні – 100.

Кабель надано у вигляді двох відрізків довжиною 922 та 1578 метрів. Це дало можливість виконати експериментальні дослідження для трьох значень довжини кабелю: 922 м, 1572 м, та сумарної довжини – 2500 метрів.

Схема експерименту наведена на рис. 1. На один з провідників кабелю (умовно – фаза А) від генератора сигналів синусоїдальної форми пода-

валася напруга з діючим значенням 2V (активний провідник). Ця напруга підтримувалася однаковою при зміні частоти генератора в діапазоні від 50 Hz до 100 kHz. Два інші провідники (умовно – фаза В та С) не підімкнені (пасивні провідники).

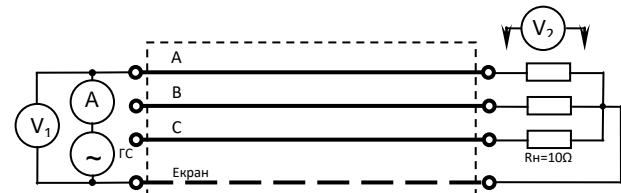


Рис. 1. Схема експерименту

Вимірювалось діюче значення напруги в кінці активного та пасивного провідників в двох режимах навантаження – режимі холостого ходу та режимі симетричного активного навантаження 10 Ω. Також вимірювалось діюче значення струму на вході активного провідника.

Відомості про вимірювальні прилади наведені в таблиці 1.

Таблиця 1.

Відомості про вимірювальні прилади

Позн.	Тип	Відносна похибка
А	В7-38	1%
V ₁	В3-38	4%
V ₂	В7-27А	2%
ГС	Г3-109	Похибка частоти $\left(2 + \frac{50}{f}\right)\%, 20\text{Hz} \leq f < 200\text{Hz}$ $\left(1 + \frac{50}{f}\right)\%, 200\text{Hz} \leq f < 20\text{kHz}$ $\left(2 + \frac{50}{f}\right)\%, 20\text{kHz} \leq f < 200\text{kHz}$

Таким чином, відносна похибка вимірювань становить ±4%. Результати вимірювань для усіх трьох довжин кабелю та усіх режимів навантаження наведено нижче в таблицях 2 – 7.

Таблиця 2.

Довжина 922 м, режим холостого ходу на виході

f, Hz	I _{вх} , А	Напруга на виході фаз, V		
		А	В	С
50	0,3	2	0,29	0,29
100	0,28	1,99	0,44	0,44
200	0,61	1,97	0,55	0,55
300	0,79	1,96	0,58	0,58
400	1,09	1,95	0,6	0,6
500	1,33	1,95	0,61	0,61
600	1,58	1,95	0,61	0,61
700	1,81	1,95	0,62	0,62

800	2,07	1,94	0,62	0,62
900	2,31	1,95	0,62	0,62
1000	2,55	1,94	0,62	0,62
1100	2,78	1,92	0,62	0,62
1200	3,04	1,91	0,62	0,62
1300	3,26	1,9	0,616	0,615
1400	3,5	1,85	0,61	0,608
1500	3,73	1,78	0,598	0,597
1600	3,96	1,64	0,568	0,57
1700	4,25	1,33	0,512	0,51
1800	4,46	1,03	0,458	0,458
1900	4,72	1,21	0,477	0,475
2000	5,03	1,51	0,53	0,528
2500	6,12	1,85	0,607	0,606
3000	7,24	1,9	0,615	0,614
4000	9,49	1,92	0,628	0,625
5000	11,71	1,93	0,629	0,627
6000	14,01	1,95	0,644	0,642
7000	16,55	2	0,663	0,661
8000	18,95	2,03	0,685	0,683
9000	22	2,15	0,742	0,74
10000	24,2	2,14	0,768	0,766
11000	27,3	2,21	0,834	0,833
12000	30,1	2,26	0,924	0,922
13000	33,3	2,35	1,062	1,06
14000	36	2,4	1,258	1,257
15000	38,8	2,53	1,517	1,515
16000	40,5	2,67	1,798	1,798
17000	42,8	2,87	1,99	2,0
18000	43,1	3	2,13	2,13
19000	43,9	3,02	2,14	2,14
20000	42,7	2,96	2,08	2,07
22000	41,4	2,71	1,88	1,88
24000	37,9	2,38	1,65	1,65
26000	35,5	2,07	1,46	1,46
28000	33,2	1,83	1,33	1,33
30000	31,9	1,64	1,24	1,24
32000	31,1	1,5	1,2	1,2
34000	31,1	1,41	1,21	1,22
36000	31,4	1,33	1,25	1,25
38000	32,2	1,21	1,27	1,28
40000	33	1,09	1,28	1,29
42000	33,9	0,96	1,28	1,29
44000	34,7	0,84	1,27	1,27
46000	35,3	0,77	1,27	1,28
48000	35,4	0,71	1,28	1,28
50000	34,4	0,66	1,25	1,25

55000	30,5	0,61	1,14	1,14
60000	25,4	0,67	0,98	0,99
70000	22,7	0,87	0,77	0,78
80000	28,4	0,93	0,81	0,82
90000	32,3	0,86	0,86	0,86
100000	34,9	0,77	0,86	0,87

Таблиця 3.

Довжина 922 м, активне навантаження 10 Ω .

f, Hz	I вх, А	Напруга на виході фаз, V		
		A	B	C
50	55,5	0,645	0,036	0,054
100	40,4	0,466	0,039	0,037
200	34,1	0,388	0,038	0,034
300	32,2	0,364	0,036	0,033
400	32	0,362	0,037	0,034
500	31,9	0,358	0,038	0,035
600	31,6	0,357	0,041	0,037
700	31,3	0,352	0,041	0,038
800	31,3	0,353	0,045	0,041
900	31,2	0,353	0,045	0,043
1000	31,6	0,35	0,05	0,047
1100	31,1	0,349	0,051	0,049
1200	31	0,349	0,054	0,052
1300	30,7	0,348	0,058	0,055
1400	30,2	0,342	0,061	0,059
1500	30,3	0,342	0,063	0,062
1600	30,3	0,342	0,067	0,066
1700	30,2	0,341	0,07	0,069
1800	30,2	0,341	0,073	0,073
1900	30,1	0,341	0,077	0,076
2000	30	0,339	0,08	0,08
2500	29,3	0,333	0,097	0,097
3000	29,3	0,335	0,099	0,099
4000	29,4	0,339	0,0131	0,0132
5000	25	0,295	0,019	0,0195
6000	23,1	0,278	0,023	0,0235
7000	21,4	0,262	0,0273	0,0281
8000	20,3	0,252	0,0324	0,033
9000	19	0,24	0,037	0,0381
10000	18	0,233	0,0427	0,0437
11000	17,5	0,225	0,0493	0,0502
12000	17,2	0,224	0,0555	0,0568
13000	17,1	0,221	0,0625	0,064
14000	17,2	0,222	0,0697	0,0712
15000	17,7	0,224	0,0771	0,0789
16000	18,3	0,233	0,0855	0,0873
17000	19,1	0,239	0,0938	0,0954

18000	19,8	0,253	0,1002	0,1022
19000	20,4	0,26	0,1063	0,1086
20000	21	0,27	0,1119	0,114
22000	21,8	0,293	0,1193	0,1217
24000	22,2	0,303	0,1218	0,125
26000	22,4	0,312	0,121	0,124
28000	22,8	0,314	0,118	0,122
30000	23,6	0,312	0,112	0,115
32000	24,5	0,312	0,109	0,111
34000	25,6	0,306	0,104	0,107
36000	26,7	0,302	0,102	0,104
38000	27,7	0,295	0,098	0,101
40000	28,5	0,286	0,096	0,099
42000	23,1	0,276	0,094	0,096
44000	30,1	0,27	0,095	0,097
46000	30,6	0,259	0,093	0,096
48000	30,9	0,251	0,094	0,096
50000	31,3	0,341	0,093	0,096
55000	32,1	0,227	0,097	0,099
60000	32,7	0,216	0,101	0,104
70000	32,9	0,218	0,111	0,115
80000	30,4	0,226	0,114	0,12
90000	27,8	0,236	0,116	0,121
100000	27,6	0,236	0,113	0,116

1000	4,06	1,95	0,62	0,61
1100	4,47	1,96	0,63	0,62
1200	4,84	1,96	0,62	0,61
1300	5,24	1,96	0,63	0,62
1400	5,65	1,96	0,62	0,61
1500	6,02	1,96	0,63	0,62
1600	6,35	1,95	0,62	0,61
1700	6,75	1,95	0,63	0,61
1800	7,14	1,96	0,63	0,62
1900	7,5	1,96	0,63	0,62
2000	7,93	1,96	0,63	0,62
2500	9,7	1,96	0,64	0,62
3000	11,43	1,95	0,64	0,62
4000	15	1,99	0,67	0,65
5000	18,32	2,02	0,69	0,67
6000	22,1	2,12	0,77	0,76
7000	25,4	2,16	0,81	0,8
8000	28,5	2,19	0,85	0,85
9000	30,8	2,19	0,9	0,89
10000	32,2	2,15	0,94	0,93
11000	32,5	2,04	0,95	0,94
12000	31,9	1,91	0,94	0,93
13000	30,9	1,76	0,93	0,92
14000	29,7	1,61	0,91	0,9
15000	28,7	1,48	0,89	0,89
16000	27,9	1,36	0,88	0,88
17000	27,3	1,25	0,88	0,88
18000	26,8	1,16	0,88	0,87
19000	26,4	1,06	0,87	0,87
20000	26,7	0,98	0,88	0,88
21000	27,2	0,92	0,89	0,89
22000	27,5	0,84	0,88	0,88
23000	28,2	0,78	0,89	0,89
24000	28,7	0,72	0,89	0,89
25000	29,1	0,67	0,89	0,89
26000	29,3	0,63	0,88	0,88
27000	29,2	0,6	0,86	0,86
28000	28,9	0,58	0,85	0,85
29000	28,3	0,57	0,82	0,82
30000	27,4	0,58	0,79	0,8
31000	26,3	0,59	0,77	0,77
32000	25,1	0,61	0,73	0,73
33000	23,8	0,63	0,7	0,71
34000	22,8	0,65	0,68	0,68
35000	21,8	0,66	0,65	0,65
36000	21	0,67	0,62	0,63
37000	20,4	0,68	0,6	0,6

Таблиця 4.

Довжина 1578 м, режим холостого ходу

f, Hz	I _{вх} , А	Напруга на виході фаз, V		
		A	B	C
50	0,21	2,01	0,63	0,62
100	0,43	2,01	0,63	0,62
150	0,65	2,01	0,63	0,62
200	0,85	1,99	0,63	0,62
250	1,07	1,98	0,63	0,62
300	1,27	1,97	0,63	0,62
350	1,49	1,98	0,63	0,62
400	1,69	1,99	0,63	0,62
450	1,89	1,99	0,63	0,62
500	2,11	1,99	0,63	0,62
550	2,32	1,98	0,63	0,62
600	2,49	1,98	0,63	0,62
650	2,7	1,98	0,63	0,62
700	2,91	1,98	0,63	0,62
750	3,12	1,98	0,63	0,62
800	3,32	1,98	0,63	0,62
850	3,49	1,97	0,63	0,62
900	3,68	1,98	0,63	0,62
950	3,89	1,98	0,63	0,62

38000	20,1	0,68	0,58	0,58
39000	20,1	0,68	0,57	0,56
40000	20,3	0,68	0,55	0,55
41000	20,7	0,66	0,54	0,54
42000	21,3	0,65	0,53	0,53
43000	21,9	0,64	0,52	0,51
44000	22,7	0,62	0,51	0,51
45000	23,5	0,6	0,5	0,5
46000	24,3	0,58	0,5	0,5
47000	25,1	0,56	0,49	0,49
48000	25,9	0,54	0,49	0,49
49000	26,6	0,52	0,49	0,48
50000	27,9	0,5	0,49	0,48
55000	30,8	0,44	0,49	0,48
60000	32,8	0,42	0,48	0,48
70000	30,3	0,43	0,44	0,44
80000	25,4	0,46	0,39	0,39
90000	27,4	0,42	0,36	0,36
100000	31,3	0,38	0,34	0,34

Таблиця 5.

Довжина кабелю 1578 м, активне навантаження
10 Ω .

f, Hz	I _{вх} , А	Напруга на виході фаз, V		
		А	В	С
50	26,2	0,245	0,017	0,017
100	21,2	0,244	0,017	0,018
150	21,1	0,243	0,018	0,019
200	21,1	0,244	0,019	0,019
250	21,9	0,243	0,019	0,019
300	21,1	0,243	0,019	0,019
350	21,1	0,243	0,02	0,02
400	21,1	0,243	0,02	0,02
450	21,2	0,243	0,02	0,02
500	21,2	0,243	0,02	0,021
550	21	0,24	0,021	0,021
600	21	0,241	0,022	0,022
650	21	0,241	0,022	0,022
700	21	0,241	0,022	0,022
750	20,9	0,24	0,022	0,022
800	21	0,24	0,022	0,022
850	21	0,241	0,023	0,023
900	20,9	0,238	0,023	0,023
950	20,9	0,238	0,023	0,023
1000	20,8	0,237	0,024	0,024
1100	20,8	0,237	0,024	0,024
1200	20,7	0,235	0,024	0,024
1300	20,7	0,235	0,024	0,024

1400	20,6	0,234	0,024	0,024
1500	20,5	0,233	0,025	0,025
1600	20,3	0,232	0,026	0,025
1700	20,3	0,233	0,026	0,026
1800	20,2	0,23	0,026	0,026
1900	20,2	0,23	0,026	0,026
2000	20,1	0,229	0,027	0,027
2100	20	0,228	0,027	0,027
2200	19,9	0,227	0,027	0,027
2300	19,8	0,225	0,027	0,027
2400	19,7	0,226	0,028	0,028
2500	19,5	0,223	0,028	0,028
2600	19,5	0,223	0,028	0,028
2700	19,4	0,223	0,028	0,028
2800	19,4	0,222	0,028	0,028
2900	19,3	0,221	0,028	0,028
3000	19,1	0,219	0,028	0,028
4000	18,3	0,212	0,032	0,032
5000	17,6	0,206	0,037	0,038
6000	16,9	0,2	0,044	0,044
7000	16,7	0,196	0,052	0,052
8000	17	0,198	0,06	0,062
9000	17,4	0,202	0,07	0,071
10000	18,2	0,212	0,079	0,079
11000	18,9	0,224	0,087	0,088
12000	19,2	0,233	0,093	0,095
13000	19,6	0,243	0,098	0,099
14000	19,9	0,251	0,102	0,103
15000	20	0,256	0,102	0,103
16000	20,2	0,259	0,101	0,103
17000	20,5	0,26	0,1	0,102
18000	20,9	0,258	0,097	0,099
19000	21,3	0,254	0,095	0,097
20000	21,8	0,25	0,093	0,094
21000	22,2	0,244	0,09	0,092
22000	22,7	0,237	0,088	0,09
23000	23,3	0,23	0,086	0,088
24000	23,7	0,221	0,084	0,086
25000	24,1	0,213	0,084	0,085
26000	24,4	0,205	0,082	0,083
27000	24,8	0,2	0,083	0,084
28000	25,1	0,193	0,082	0,084
29000	25,5	0,188	0,082	0,084
30000	25,9	0,182	0,083	0,084
31000	26,1	0,177	0,083	0,084
32000	26,6	0,175	0,084	0,085
33000	27,1	0,172	0,085	0,086

34000	27,3	0,17	0,086	0,087
35000	27,7	0,169	0,087	0,088
36000	28,1	0,168	0,089	0,09
37000	28,3	0,162	0,09	0,091
38000	28,5	0,165	0,091	0,092
39000	28,6	0,165	0,092	0,093
40000	28,7	0,165	0,093	0,094
41000	28,7	0,165	0,094	0,095
42000	28,6	0,166	0,095	0,096
43000	28,3	0,165	0,095	0,096
44000	28,2	0,167	0,095	0,096
45000	27,9	0,167	0,095	0,096
46000	27,7	0,169	0,095	0,097
47000	27,4	0,17	0,096	0,097
48000	27	0,173	0,096	0,097
49000	26,5	0,171	0,095	0,097
50000	26,3	0,173	0,095	0,096
60000	25	0,172	0,09	0,092
70000	28,3	0,158	0,084	0,085
80000	29,7	0,152	0,082	0,083
90000	28,1	0,152	0,08	0,082
100000	26,7	0,15	0,077	0,08

Таблиця 6.

Довжина 2500 м, режим холостого ходу

f, Hz	I _{вх} , А	Напруга на виході фаз, V		
		A	B	C
50	0,33	2	0,64	0,64
100	0,71	2	0,64	0,64
150	1,07	2	0,64	0,64
200	1,41	2	0,64	0,64
250	1,75	1,99	0,64	0,64
300	20,9	1,99	0,64	0,64
350	2,43	1,99	0,64	0,64
400	2,77	1,98	0,64	0,64
450	3,08	1,99	0,64	0,63
500	3,43	1,98	0,64	0,63
550	3,72	1,96	0,64	0,63
600	4,04	1,96	0,64	0,63
650	4,38	1,96	0,64	0,63
700	4,71	1,96	0,63	0,63
750	50,4	1,96	0,62	0,61
800	5,31	1,95	0,63	0,61
850	5,66	1,97	0,65	0,63
900	5,9	1,94	0,63	0,62
950	6,23	1,94	0,63	0,62
1000	6,53	1,93	0,63	0,62
1100	7,15	1,94	0,57	0,56

1200	7,75	1,91	0,64	0,62
1300	8,45	1,94	0,64	0,63
1400	9,1	1,91	0,64	0,62
1500	9,68	1,92	0,64	0,62
1600	10,28	1,92	0,64	0,63
1700	10,85	1,91	0,64	0,63
1800	11,39	1,9	0,64	0,63
1900	11,74	1,87	0,63	0,62
2000	12,38	1,87	0,63	0,62
2100	12,76	1,87	0,63	0,63
2200	13,4	1,87	0,63	0,62
2300	13,91	1,86	0,64	0,63
2400	14,3	1,84	0,64	0,63
2500	14,95	1,85	0,64	0,63
2600	15,45	1,86	0,64	0,63
2700	15,87	1,85	0,64	0,63
2800	16,45	1,84	0,64	0,64
2900	16,91	1,83	0,64	0,64
3000	17,26	1,81	0,64	0,64
3500	19,52	1,79	0,66	0,64
4000	20,9	1,73	0,66	0,66
4500	22,4	1,69	0,67	0,66
5000	23,5	1,63	0,66	0,66
5500	24,5	1,57	0,69	0,68
6000	25,1	1,49	0,68	0,68
6500	25,1	1,4	0,68	0,68
7000	25	1,32	0,68	0,68
7500	24,7	1,23	0,68	0,68
8000	24,6	1,16	0,68	0,67
8500	24,3	1,08	0,68	0,67
9000	23,9	1	0,67	0,66
9500	23,8	0,94	0,67	0,67
10000	23,8	0,88	0,67	0,67
11000	24	0,77	0,68	0,68
12000	24,5	0,68	0,69	0,69
13000	25,1	0,6	0,7	0,7
14000	25,6	0,53	0,7	0,7
15000	25,7	0,49	0,7	0,7
16000	25,4	0,46	0,68	0,68
17000	24,5	0,44	0,66	0,66
18000	23,2	0,44	0,64	0,64
19000	21,7	0,44	0,61	0,61
20000	20,1	0,46	0,57	0,57
21000	19,2	0,46	0,55	0,55
22000	18,5	0,47	0,52	0,52
23000	18,4	0,47	0,5	0,5
24000	18,8	0,47	0,48	0,48

25000	19,6	0,45	0,46	0,46
26000	20,7	0,43	0,45	0,45
27000	21,7	0,41	0,44	0,44
28000	22,8	0,4	0,43	0,43
29000	23,9	0,39	0,42	0,42
30000	25	0,38	0,41	0,41
31000	25,7	0,37	0,41	0,41
32000	26,4	0,37	0,41	0,41
33000	26,9	0,36	0,41	0,4
34000	27,1	0,36	0,38	0,38
35000	27,2	0,36	0,38	0,38
36000	27,1	0,36	0,38	0,38
37000	27	0,36	0,37	0,37
38000	26,7	0,36	0,36	0,36
39000	26,4	0,37	0,35	0,35
40000	26,1	0,38	0,35	0,35
41000	25,6	0,39	0,35	0,35
42000	25,2	0,39	0,34	0,34
43000	24,6	0,4	0,34	0,34
44000	24,2	0,4	0,34	0,34
45000	23,7	0,4	0,34	0,34
46000	23,2	0,4	0,34	0,34
47000	22,9	0,4	0,33	0,33
48000	22,7	0,4	0,33	0,33
49000	22,7	0,4	0,33	0,33
50000	22,8	0,39	0,33	0,33
60000	26,6	0,36	0,31	0,31
70000	25,4	0,35	0,31	0,31
80000	25,3	0,34	0,31	0,31
90000	27,1	0,34	0,31	0,31
100000	26	0,32	0,31	0,31

Таблиця 7.

Довжина 2500 м, активне навантаження 10 Ω .

f, Hz	I _{вх} , А	Напруга на виході фаз, V		
		A	B	C
50	16,3	0,186	0,037	0,033
100	14,3	0,163	0,035	0,029
150	13,8	0,157	0,036	0,034
200	13,5	0,154	0,04	0,037
250	13,5	0,153	0,043	0,041
300	13,5	0,153	0,045	0,045
350	13,4	0,152	0,05	0,05
400	13,5	0,152	0,058	0,058
450	13,5	0,151	0,065	0,064
500	13,4	0,151	0,071	0,07
550	13,4	0,15	0,077	0,076
600	13,5	0,151	0,082	0,082

650	13,5	0,151	0,089	0,088
700	13,5	0,151	0,094	0,095
750	13,5	0,15	0,101	0,1
800	13,5	0,15	0,106	0,107
850	13,5	0,15	0,112	0,113
900	13,5	0,15	0,117	0,119
950	13,6	0,152	0,124	0,125
1000	13,5	0,151	0,131	0,132
1100	13,6	0,149	0,144	0,145
1200	13,7	0,15	0,155	0,156
1300	13,7	0,149	0,166	0,168
1400	13,8	0,15	0,179	0,182
1500	13,8	0,151	0,193	0,196
1600	13,9	0,152	0,204	0,208
1700	14	0,151	0,22	0,221
1800	14,1	0,153	0,229	0,234
1900	14,1	0,153	0,241	0,244
2000	14,2	0,153	0,254	0,259
2100	14,3	0,153	0,265	0,268
2200	14,3	0,153	0,277	0,281
2300	14,4	0,153	0,291	0,293
2400	14,5	0,153	0,302	0,306
2500	14,6	0,155	0,315	0,319
3000	15	0,156	0,378	0,382
4000	16,1	0,165	0,502	0,509
5000	17,1	0,173	0,621	0,63
6000	18,3	0,188	0,734	0,741
7000	18,7	0,197	0,809	0,82
8000	19,1	0,21	0,866	0,876
9000	19,1	0,21	0,872	0,888
10000	19,1	0,208	0,861	0,876
11000	19,6	0,203	0,841	0,86
12000	20,2	0,199	0,822	0,84
13000	20,7	0,187	0,797	0,816
14000	21,3	0,181	0,778	0,794
15000	21,8	0,167	0,761	0,776
16000	22,4	0,16	0,755	0,767
17000	22,6	0,148	0,744	0,756
18000	23,2	0,143	0,752	0,76
19000	23,6	0,136	0,763	0,772
20000	24,3	0,133	0,777	0,785
21000	24,9	0,131	0,788	0,799
22000	25,1	0,13	0,789	0,796
23000	25,4	0,129	0,79	0,798
24000	25,5	0,131	0,79	0,797
25000	25,4	0,13	0,782	0,793
26000	25,2	0,132	0,783	0,789

27000	25	0,132	0,773	0,781
28000	24,6	0,135	0,768	0,774
29000	24,3	0,134	0,758	0,765
30000	23,9	0,135	0,752	0,756
31000	23,6	0,134	0,738	0,745
32000	23,4	0,135	0,73	0,733
33000	23,2	0,132	0,716	0,717
34000	23,15	0,132	0,704	0,704
35000	23,2	0,128	0,689	0,69
36000	23,4	0,127	0,676	0,675
37000	23,6	0,122	0,661	0,662
38000	23,9	0,121	0,648	0,645
39000	24,2	0,117	0,634	0,632
40000	24,5	0,116	0,624	0,621
41000	24,8	0,113	0,609	0,607
42000	25,1	0,112	0,6	0,595
43000	25,4	0,109	0,587	0,584
44000	25,6	0,108	0,578	0,574
45000	25,8	0,106	0,567	0,565
46000	26	0,106	0,561	0,557
47000	26,1	0,104	0,553	0,551
48000	26,2	0,105	0,549	0,546
49000	26,2	0,104	0,542	0,541
50000	26,2	0,105	0,54	0,537
55000	25,6	0,103	0,519	0,519
60000	25	0,102	0,49	0,492
70000	25,9	0,88	0,407	0,414
80000	26,1	0,86	0,377	0,382
90000	26,2	0,83	0,37	0,367
100000	26,9	0,76	0,346	0,341

3. Інтерпретація результатів

Для інтерпретації результатів експерименту та їх співставлення з результатами моделювання за формулами (1) було розраховано первинні параметри кабелю. Розрахунок виконано з допомогою розрахунків електричного та магнітного полів в кабелі в середовищі ANSYS MAXWELL.

Значення розрахованих первинних параметрів наведено в таблиці 8. Параметри провідності прийнято рівними нулю.

Таблиця 8.

Первинні параметри кабелю

Параметр	Значення
$R, \Omega/m$	0,007402
$L, H/m$	$1,53 \cdot 10^{-5}$
$C, F/m$	$1,65 \cdot 10^{-9}$
$M, H/m$	$1,37 \cdot 10^{-6}$
$C1, F/m$	$8,62 \cdot 10^{-10}$

На рис. 2 представлено експериментальні (суцільна лінія) та розраховані (пунктирна лінія) криві АЧХ вихідної напруги фази А для відрізка кабелю довжиною 1578 метри в режимі холостого ходу.

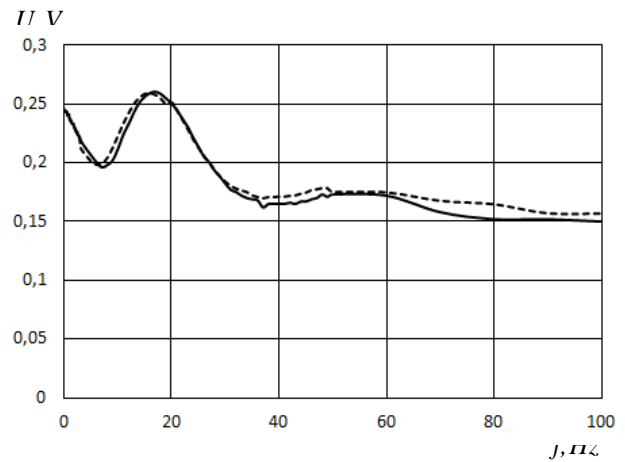


Рис. 2. АЧХ вихідної напруги фази А, холостий хід

На рис. 3 представлено графік АЧХ вихідної напруги фази В кабелю в режимі холостого ходу.

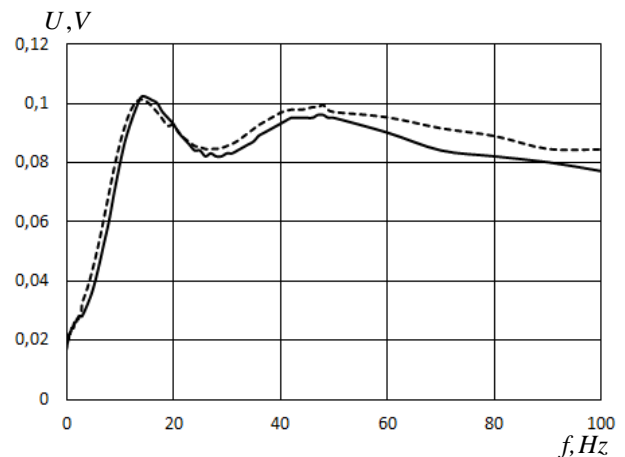


Рис. 3. АЧХ вихідної напруги фази В, холостий хід

Як можна бачити із рисунків 2 та 3, результати моделювання добре збігаються із результатами експерименту. Незначне відхилення в діапазоні великих частот можна пояснити, поперше, поверхневим ефектом, а по-друге, залежністю магнітної проникності броньової стрічки від частоти. Від значення магнітної проникності, у свою чергу, залежать первинні параметри власної та взаємної індуктивності кабелю.

4. Висновки

Із наведених в статті матеріалів видно, що між провідниками кабелю існують взаємні зв'язки, що призводить до того, що реальні закони розповсюдження струмів та напруг в кабелі

відрізняються від розрахованих традиційними методами. Наявність цих зв'язків підтверджено як експериментально, так і з допомогою математичного моделювання.

Із проведених досліджень можна зробити такі висновки:

1. При експлуатації кабелю навіть в пасивних, не підключених до джерел провідників, виникають досить великі напруги. Так, в режимі холостого ходу напруга на пасивному проводі кабелю може досягати 47% від напруги на активному. При навантаженні кабелю напруга пасивного провідника знижується, але все одно досягає 19%. Зважаючи на принцип накладання, ці відносні значення повинні зберігатися й у випадку, коли усі провідники кабелю будуть знаходитись під напругою.

2. Результати моделювання свідчать про те, що наявність магнітних зв'язків [4, 5] впливає не тільки на амплітуду, але й також на початкову фазу синусоїдальних складових напруги. Таким чином форма сигналу на виході кабелю (на вході навантаження) буде відрізнятися від форми сигналу на вході (після ШИП). Це ще один факт, який унеможливує роботу довгих кабельних ліній в частотно-керованому електроприводі.

3. Напрямами подальших досліджень може стати визначення критичної довжини кабелю, при якій рівень спотворень форми напруги на його виході ще задовольняє вимогам експлуатації.

Список використаної літератури

1. Kazmierkowski, M. P. Power Electronics and Variable Frequency Drives Technology and Applications [Book Reviews] / M. P. Kazmierkowski // *IEEE Industry Applications Magazine*. – Vol. 3. – № 2, 1997. – pp. 91–91. – DOI:10.1109/MIA.1997.579140
2. Берзан, В. П. Передача электрической энергии по длинным линиям [Текст] / В. П. Берзан, В. К. Римский, В. И. Пацюк, М. Н. Узун // *Проблемы региональной энергетики*. – № 2(10). – Кишинев: АН Молдовы, 2009. – С. 54–63.
3. Nazarcik, T., Modelling of the mutual influence of the parallel AC/DC circuits on the hybrid power transmission line [Text] / T. Nazarcik, V. Muzik. // *2018 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering*

(EICon Rus). – 2018. – С. 731–736. DOI: 10.1109/EICon Rus.2018.8317196

4. Маевский, Д. А. Особенности несимметричных режимов работы трехфазного кабеля с учетом связей между его проводниками [Текст] / Д. А. Маевский, Е. Ю. Маевская, А. Н. Семенюг, С. Н. Огинская // *Электротехнические и компьютерные системы*. – № 22 (98). – К. : Техніка, 2016. – С. 84–90.

5. Маевский, Д. А. Установившиеся режимы в связанных двухпроводных линиях передачи [Текст] / Д. А. Маевский, А. Н. Семенюг, Г. Н. Кучеренко // *Электротехнические и компьютерные системы*. – № 14 (90). – К. : Техніка, 2014. – С. 61–66.

References

1. Kazmierkowski, M. P. (1997) "Power Electronics and Variable Frequency Drives Technology and Applications [Book Reviews]" *IEEE Industry Applications Magazine*, vol. 3, no. 2, pp. 91–91. DOI: 10.1109/MIA.1997.579140.
2. Berzan, V. P., Rimsky, V. K., Patsyuk, V. I., Uzun M. N. (2009) "Transmission of Electric Energy Along Long Lines" [Peredacha ehlektricheskoy ehnergii po dlinnym liniyam]. *Problems of Regional Energetics*, 2009, no. 2, pp. 54–63.
3. Nazarcik, T., Muzik V. (2018) "Modelling of the mutual influence of the parallel AC/DC circuits on the hybrid power transmission line" *2018 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus)*, 2018, pp. 731-736. DOI: 10.1109/EIConRus.2018.8317196.
4. Maevsky, D. A. (2016) "Influence of Coupling Between the Cables Conductors in the Operation Mode of Electric Networks" [Osobennosti nesimmetrichnyh rezhimov raboty trekhfaznogo kabelya s uchetom svyazey mezhdru ego provodnikami]. *Electrotechnic and Computer Systems*, 22(98), pp. 84–90.
5. Maevsky, D. A. Semenyug, A. N. Kucherenko, G. M. (2014) "The Steady-State Modes in the Coupled Two-Wire Transmissions Lines" [Ustanovivshiesya rezhimyi v svyazannyih dvuhprovodnyih liniyah peredachi]. *Electrotechnic and Computer Systems*, 14(90), pp. 61–66.

EXPERIMENTAL STUDY OF THE MUTUAL INFLUENCES BETWEEN THE THREE PHASE CABLE'S WIRES

D. A. Maevsky¹, A. M. Semenug², O. V. Yakovlev¹, O. P. Morozov¹, O. O. Topuzanov¹,
E. V. Savolova¹

¹Odessa National Polytechnic University

²Engineering Company "S-Engineering"

Abstract. The article presents the results of experimental studies of mutual influences between the wires of the "ВБбШвнг" three-phase armored cable of 0.66 kV. The purpose of this study is to check the mathematical model of propagation of currents and voltages in power electric cables created by the authors. The main difference between this model and existing one is the consideration of mutual electric and magnetic influences between the cable conductors. A voltage with an effective value of 2V (active conductor) was applied to one of the conductors of the cable (conditionally - phase A) from the sinusoidal waveform generator. When the oscillator frequency was varied from 50 Hz to 100 kHz, this voltage was maintained the same. Two other conductors (conditionally - phase B and C) are not connected (passive conductors). The effective value of the voltage at the end of the active and passive conductors was measured in two load modes - idle and in symmetrical active load mode of 10 Ohm. The effective value of the current at the input of the active conductor was also measured. The frequency response of the cable was determined. The primary parameters of the cable are calculated and mathematical modeling of the processes in the cable is performed according to the previously created mathematical model. The experimental results with an accuracy of about 8% correspond to the results of the experiment. Thus, the experiment demonstrates the correctness of the model and shows the presence of significant mutual influences between the cable conductors even at low frequencies. So, in the idle mode at 50 Hz, the voltage on the passive conductor has a value of 10% of the voltage on the active conductor. And at high frequencies the wobble increases and at 100 kHz the voltage on the passive conductor exceeds the voltage on the active one by 1.1 times. This excess arises from the imposition of incident and reflected waves in the conductors of the cable. The results of all experiments are presented in the article.

Keywords: three-phase cable, mutual influences, electromagnetic compatibility, frequency-regulated electric drive, electromagnetic interference.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЗАИМНЫХ ВЛИЯНИЙ МЕЖДУ ПРОВОДНИКАМИ ТРЕХФАЗНОГО КАБЕЛЯ

Д. А. Маевский¹, А. Н. Семенюг², А. В. Яковлев¹, А. П. Морозов¹, А. А. Топузанов¹,
Э. В. Савёлова¹

¹Одесский национальный политехнический университет

²Инжиниринговая компания «С-Инжиниринг»

Аннотация. Приведены результаты экспериментальных исследований взаимных влияний между проводами трехфазного бронированного кабеля ВБбШвнг 0,66 кВ. Исследование проведено при изменении частоты синусоидального напряжения в диапазоне от 50 НЗ до 100 кНЗ. Определены первичные параметры кабеля и выполнено математическое моделирование процессов в кабеле по ранее созданной математической модели. Результаты эксперимента подтверждают правильность модели и свидетельствуют о наличии существенных взаимных влияний между проводниками кабеля. Показано, что наличие взаимных влияний приводит к искажению формы сигнала на выходе кабеля (на входе нагрузки) по отношению к форме сигнала на входе (после ШИП). Это позволило сделать вывод о невозможности применения длинных кабельных линий в частотно-управляемом электроприводе.

Ключевые слова: трехфазный кабель, взаимные влияния, электромагнитная совместимость, частотно-регулируемый электропривод, электромагнитные помехи.

Отримано 15.02.2018



Маєвський Дмитро Андрійович, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри теоретичних основ і загальної електротехніки Одеського національного політехнічного університету. Просп. Шевченка, 1, Одеса, Україна, E-mail: Dmitry.A.Maevsky@opu.ua, тел. +38-048-705-84-54

Dmitry Maevsky, Dr. of Science, Professor, Head of the Department of theoretical foundations and general electrical engineering, Odessa National Polytechnic University, Shevchenko ave., 1, Odessa, Ukraine

ORCID ID: 0000-0003-0666-6199



Семенюг Олександр Миколаєвич, зам. генерального директора по науці ООО «С-Інжиніринг». ул. Н. Боровського, 28, корп. 47, Одеса, Україна, E-mail: Aleksander.semenyug@se.ua, тел. +38-048-730-57-31

Aleksandr Semenyug, Deputy CEO for Science, S-Engineering LLC, 28 Nickolaya Borovskogo Str., block 47, city of Odessa, Ukraine

ORCID ID: 0000-0003-1198-2014



Яковлев Олександр Володимирович, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри теоретичних основ і загальної електротехніки Одеського національного політехнічного університету. Просп. Шевченка, 1, Одеса, Україна, E-mail: yakovlev@opu.ua, тел. +38-048-705-84-54

Oleksandr Yakovlev, PhD, Ass. professor, Ass. professor of the Department of theoretical foundations and general electrical engineering, Odessa National Polytechnic University, Shevchenko ave., 1, Odessa, Ukraine

ORCID ID: 0000-0002-5840-1267



Морозов Олександр Павлович, завідувач лабораторіями кафедри теоретичних основ і загальної електротехніки Одеського національного політехнічного університету. Просп. Шевченка, 1, Одеса, Україна, E-mail: morozov@gmail.com, тел. +38-048-705-84-54

Oleksandr Morozov, head of the laboratories of the Department of theoretical foundations and general electrical engineering, Odessa National Polytechnic University, Shevchenko ave., 1, Odessa, Ukraine

ORCID ID: 0000-0002-1583-5241



Топузанов Олександр Олександрович, інженер кафедри теоретичних основ і загальної електротехніки Одеського національного політехнічного університету. Просп. Шевченка, 1, Одеса, Україна, E-mail: alex.topuzanov@gmail.com, тел. +38-048-705-84-54

Oleksandr Topuzanov, engineer of the Department of theoretical foundations and general electrical engineering, Odessa National Polytechnic University, Shevchenko ave., 1, Odessa, Ukraine, E-mail: alex.topuzanov@gmail.com, tel. +38-048-705-84-54

ORCID ID: 0000-0002-8555-9289



Савьолова Ельвіра Вікторівна, старший Викладач кафедри теоретичних основ та загальної електротехніки Одеського національного політехнічного університету. Пр-т. Шевченка, 1, Одеса, Україна, 65044, E-mail: savolova.ev@opu.ua, тел. +38-048-705-81-83

Savolova Elvira, senior lecturer of the Department of theoretical foundations and general electrical engineering, Odessa National Polytechnic University, Shevchenko ave., 1, Odessa, Ukraine 65044, E-mail: savolova.ev@opu.ua, tel. +38-048-705-81-83

ORCID ID: 0000-0001-9266-9323