

ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКА, ЕЛЕКТРОТЕХНІКА ТА ЕЛЕКТРОМЕХАНІКА. ЕЛЕКТРОНІКА

DOI: 10.31319/2519-2884.42.2023.9

УДК 621.313.322

Клюєв О.В., к.т.н., доцент, ORCID: 0000-0003-4542-3317, e-mail: kluev2006@ukr.net

Нізімов В.Б., д.т.н., професор, ORCID: 0000-0002-4580-5262, e-mail: vikbor36@gmail.com

Чугунов Д.В., здобувач другого (магістерського) рівня, e-mail: davidchugunov00@gmail.com

Патинка Д.І., здобувач першого (бакалаврського) рівня, e-mail: denchikabm@gmail.com

Дніпровський державний технічний університет, м. Кам'янське

Klyuyev Oleg, Candidate of technical sciences, Associate professor of the Department of Electrical and Mechanical Engineering Department

Nizimov Victor, Doctor of technical sciences, Professor, manager of the Department of Electrical and Mechanical Engineering Department

Chugunov David, master's degree student

Patynka Denys, undergraduate student

Dniprovsky State Technical University, Kamianske

ПОКРАЩЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПОКАЗНИКІВ НЕСИМЕТРИЧНИХ ЗБУДЖУВАЧІВ СИНХРОННИХ МАШИН В РЕЖИМАХ ФОРСУВАННЯ НАПРУГИ

У роботі розв'язана актуальна наукова задача, яка полягає в розробці і теоретичних та експериментальних дослідженнях пристроїв для покращення енергетичних показників несиметричних збуджувачів синхронних машин. Метою роботи є покращення енергетичних показників шляхом зменшення споживання реактивної потужності та амплітуд гармонійних складових. Наведена принципова схема збуджувача з примусовою ємнісною комутацією тиристорів. Для дослідження гармонійного складу використовується експериментально отримані залежності форсованої напруги збудження, які розкладаються у ряд Фур'є. Наведені амплітудні спектри напруги збудження при природній та примусовій комутації тиристорів. Проведеними експериментами доведена доцільність використання розробленого збуджувача з примусовою ємнісною комутацією.

Ключові слова: синхронна машина; несиметричний збуджувач; примусова комутація.

An actual scientific task that consists in development and theoretical and experimental researches devices for the improvement of power indexes asymmetrical exciters of synchronous machines is in-process untied. The aim of work is an improvement of power indexes by reduction of consumption reactive-power and amplitudes of harmonious constituents. The brought fundamental chart over of exciter with a force capacity commutation of thyristors. For research of harmonious composition used the experimentally got dependences of a force tension excitations that is laid out in the row Fourier. The brought peak spectrums over tension of excitation during natural and force commutation of thyristors. By the conducted experiments the well-proven expediency of the use of the worked out exciter with force capacity commutation.

Keywords: synchronous machine; asymmetrical excite; force commutation.

Постановка проблеми

Основним режимом роботи синхронних машин (СМ) в електроприводах промислових установок є режим, при якому до валу прикладається близький до номінального момент статичного навантаження. Якщо СМ працює генератором, то при підключені до статора споживачів співставної потужності для стабілізації вихідної напруги генератора застосовують форсування

напруги збудження впливом на кути керування тиристорами керованого випрямляча. В номінальному режимі кути керування тиристорами збуджувача значні, що дозволяє при форсуванні напруги забезпечити її достатню кратність. Але при значних кутах відкриття тиристорів керований випрямляч споживає значну реактивну потужність, що знижує коефіцієнт потужності випрямного моста. Крім того, форсування напруги збудження необхідно для синхронних двигунів при накидах значного навантаження на вал та при посадках напруги в мережі живлення.

Тому, виходячи з викладеного, актуальною технічною задачею є розробка пристрою який би покращував спектральний склад напруги тиристорних збуджувачів синхронних машин.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Широко застосовують підключення паралельно до обмоток силового трансформатора конденсаторів, або використовують два нульових діоди, які з'єднанні послідовно і підключені до виходу збуджувача для покращення його енергетичних показників [1]. Застосовують з'єднання нульової точки діодів через конденсатор до нуля живильного трансформатора [2]. Використання вузлів примусової ємнісної комутації суттєво покращує енергетичні показники керованих випрямлячів, що експериментально досліджено в роботі [3]. Однак наявність нульових діодів та вузлів примусової ємнісної комутації призводить до суттєвої зміни гармонійного складу напруги збудження. Гармонійний склад напруги збудження для автономних генеруючих установок розрахований у роботі [4]. Завдяки аналізу, проведеному в цій роботі, виявлена значна доля третьої гармоніки в вихідній напрузі збуджувача, що дозволило обґрунтувати необхідність з'єднання вторинної обмотки трансформатора у трикутник.

Формулювання мети дослідження

Задача роботи полягає в порівняльному аналізі гармонійного складу напруги збудження несиметричних мостових збуджувачів синхронних машин при природній та примусовій комутації тиристорів в режимах форсування напруги збудження.

Виклад основного матеріалу

У роботі [3] проводилося експериментальне дослідження коефіцієнта потужності несиметричних мостових збуджувачів із застосуванням вузлів примусової ємнісної комутації.

Для дослідження гармонійного складу використовується експериментально отримана осцилограма напруги збудження на рис. 1 [3], яка знята на синхронній машині типу ЕСС-52-4У2, потужністю 5кВт, 1500 об/хв. В якості статичного напівпровідникового збуджувача застосовувався серійний тиристорний перетворювач типу ВУК-50/500 с живленням силового моста від узгоджуючого трансформатора 1,5 кВА, 220/20 В. Функції комутуючої ємності виконував конденсатор ФСТ-0,75-300У2, 300мкФ, 0,75 кВ.

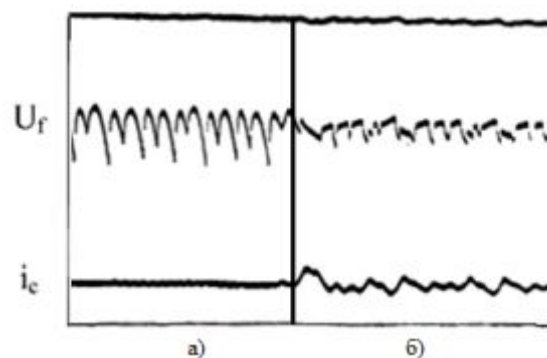


Рис. 1. Осцилограма форсованого збудження СМ при: а) природній комутації; б) примусовій комутації тиристорів

Для визначення енергетичного спектру частот вихідної напруги ТЗ, розкладемо осцилограму на рис. 1 в тригонометричний ряд графоаналітичним методом. Вираз для напруги $u(t)$ представляється наступним рядом Фур'є

$$u(t) = U_0 + \sum_{v=1}^n U_{vm} \sin(v\omega t + \psi_v), \quad (1)$$

де U_0 — постійна складова; $U_{vm} \sin(v\omega t + \psi_v)$ — гармоніки v -го порядку з амплітудою U_{vm} і початковою фазою ψ_v ; n — порядок (номер) останньої з вищих гармонік.

Гармоніка з номером $v = 1$ називається першою або основною, інші — вищими гармоніками. Сукупність амплітуд U_{vm} і фаз ψ_v утворюють дискретні амплітудний і фазовий спектри.

Для розв'язання практичних задач основне значення має амплітудний спектр, який часто називається для стислості просто спектром. Амплітуди і початкові фази гармонік знаходяться через ортогональні проекції U_{va} і U_{vp} :

$$U_{vm} = \sqrt{U_{va}^2 + U_{vp}^2}, \quad (2)$$

які обчислюються через інтеграли

$$U_{va} = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} u(t) \cos(v\omega t) d\omega t, \quad U_{vp} = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} u(t) \sin(v\omega t) d\omega t; \quad \psi_v = \arctg\left(\frac{U_{va}}{U_{vp}}\right). \quad (3)$$

Ряд Фур'є (1) можна записати в наступному вигляді

$$u(t) = U_0 + \sum_{v=1}^n [U_{va} \cos(v\omega t) + U_{vp} \sin(v\omega t)]. \quad (4)$$

З практичної точки зору важливо оцінювати несинусоїдальність напруги, що характеризується коефіцієнтом несинусоїдальності напруги, який являє собою відношення діючого значення гармонійного складу фактичної напруги до напруги першої гармоніки. Стосовно випрямлячів розраховують коефіцієнт пульсацій як відношення діючого значення гармонійного складу несинусоїдальної напруги до постійної складової напруги, тобто

$$k_{нл} = \frac{\sqrt{\sum_{v=1}^{\infty} U_v^2}}{U_0} 100\%, \quad (5)$$

де U_v — діюче значення напруги v -й гармоніки.

При розкладанні в тригонометричний ряд період осцилограми розбивають на N рівних інтервалів Δt . Враховують співвідношення: $T = N\Delta t$, $\omega = 2\pi/T = 2\pi/N\Delta t$, де $T = 0,02c$ — період зміни струму або напруги. Тоді інтеграли (3) замінюють кінцевими сумами:

$$\begin{aligned} U_{va} &= \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} u(t) \cos(v\omega t) d\omega t \approx \frac{1}{\pi} \sum_{j=1}^N U_j(t) \cos\left(v \frac{2\pi}{T} j\Delta t\right) \omega \Delta t = \\ &= \frac{\omega \Delta t}{\pi} \sum_{j=1}^N U_j(t) \cos(v100\pi j \Delta t) = \frac{2}{N} \sum_{j=1}^N U_j(t) \cos(v100\pi j \Delta t); \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} U_{vp} &= \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} u(t) \sin(v\omega t) d\omega t \approx \frac{1}{\pi} \sum_{j=1}^N U_j(t) \sin\left(v \frac{2\pi}{T} j\Delta t\right) \omega \Delta t = \\ &= \frac{\omega \Delta t}{\pi} \sum_{j=1}^N U_j(t) \sin(v100\pi j \Delta t) = \frac{2}{N} \sum_{j=1}^N U_j(t) \sin(v100\pi j \Delta t). \end{aligned} \quad (7)$$

Постійна складова знаходиться за формулою

$$U_0 = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N U_j(t). \quad (8)$$

Окремі точки експериментально отриманого значення напруги на виході напівпровідникового збуджувача при природній комутації тиристорів, представлені в табл. 1, де записані номери інтервалів часу і відповідні їм значення напруги, узяті по осцилограмі на рис. 1. Період вихідної напруги розбивається на $N = 42$ інтервалу. Довжина елементарного інтервалу в секундах $\Delta t = T/N = 0,02/42 = 1/21 \cdot 10^{-2} \text{ c}$. Протягом кожного елементарного інтервалу часу напруга на виході випрямляча вважається незмінною. Таким чином, реальна безперервна крива напруги замінюється гратчастою функцією. Розв'язується задача апроксимації гратчастої функції рядом Фур'є. Число гармонік ряду, відповідно до теореми В.О. Котельникова, не повинне перевищувати половини числа зроблених вимірів напруги, тобто номери гармонік повинні задовольняти умові $\nu \leq N/2$.

Таблиця 1. Експериментальні значення напруги при природній комутації тиристорів

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
11	11.2	10.95	10.5	9.5	10.2	11	11.2	11.4	11.2	10.7	10.2	9.5	8.5	11	11.2
16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31
10.95	10.5	9.5	10.2	11	11.2	11.4	11.2	10.7	10.2	9.5	8.5	11	11.2	10.95	10.5
32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42					
9.5	10.2	11	11.2	11.4	11.2	10.7	10.2	9.5	8.5	11					

Значення часу представлені в номерах інтервалів, а значення напруги — у вольтах. Залежність напруги, побудована за вимірами табл. 1 з перерахуванням по осі абсцис на час за формулою $j\Delta t$, де j — номер інтервалу, показана на рис. 2.

Постійна складова, обчислена за формулою (8) дорівнює $U_0 = 10,515 \text{ B}$. Віднімаємо з кривої на рис. 1 постійну складову U_0 й одержуємо графік змінної складової напруги на рис. 3.

У розкладанні береться $N/2 = 21$ гармоніка і вони всі враховуються. Значення ортогональних проєкцій амплітуд гармонік напруги U_{va}, U_{vp} розраховуються в програмі Mathcad за формулами (6), (7) і далі за виразом (2) визначаються амплітуди гармонік напруги.

На рис. 4 показаний амплітудний спектр змінної складової напруги у відсотках відносно постійної складової напруги, тобто для кожної гармоніки обчислюється величина $(U_{vm}/U_0) \cdot 100\%$. З рис. 4 видно, що враховувати можна тільки гармоніки кратні трьом, тобто статистично незначущі. то $\nu = 3k$, де $k = 1, \dots, 7$. Інші гармоніки незначні в порівнянні з зазначеними. Можна сказати, що гармоніки не кратні трьом узагалі відсутні, оскільки отримані значення їх амплітуд.

Запишемо суму складових ряду Фур'є у вигляді (1), де амплітуди знаходяться за формулою (2), а початкові фази гармонік ψ_ν визначаються за умовами:

$$\begin{aligned}
 &\text{якщо } U_{va} > 0 \text{ і } U_{vp} > 0, \text{ то } \psi_\nu = \frac{180}{\pi} \arctg\left(\frac{U_{va}}{U_{vp}}\right); \\
 &\text{якщо } U_{va} > 0 \text{ і } U_{vp} < 0, \text{ то } \psi_\nu = 180 - \left| \frac{180}{\pi} \arctg\left(\frac{U_{va}}{U_{vp}}\right) \right|; \\
 &\text{якщо } U_{va} < 0 \text{ і } U_{vp} < 0, \text{ то } \psi_\nu = -180 + \frac{180}{\pi} \arctg\left(\frac{U_{va}}{U_{vp}}\right); \\
 &\text{якщо } U_{va} < 0 \text{ і } U_{vp} > 0, \text{ то } \psi_\nu = \frac{180}{\pi} \arctg\left(\frac{U_{va}}{U_{vp}}\right).
 \end{aligned} \tag{9}$$

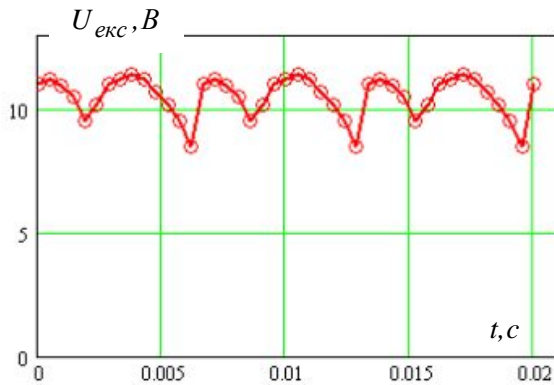


Рис. 2. Вихідна залежність форсованої напруги збудження СМ

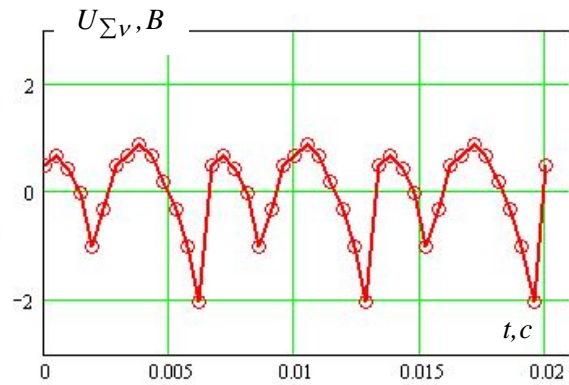


Рис. 3. Змінна складова форсованої напруги збудження

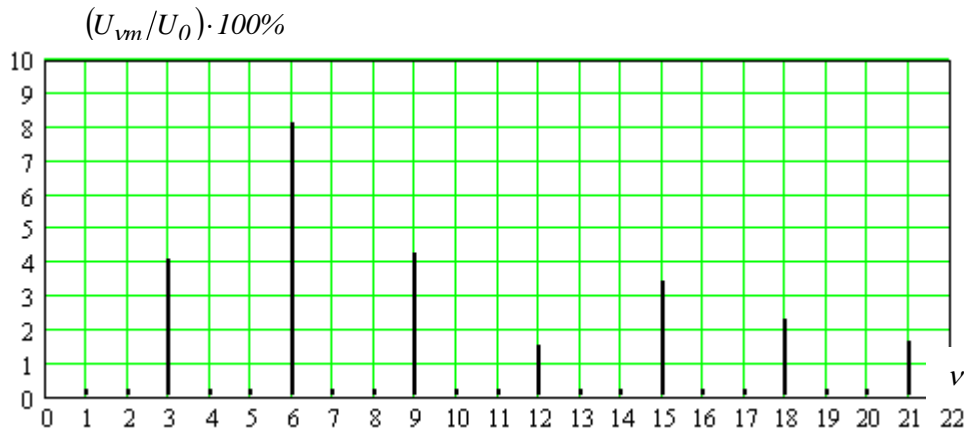


Рис. 4. Амплітудний спектр напруги збудження СМ

Після обчислень, проведених у Mathcad за формулами (2), (6)—(9), сума гармонік ряду приймає вигляд

$$u(t) = 10,515 + 0,427 \sin(3\omega t - 80,9^\circ) + 0,855 \sin(6\omega t + 24,1^\circ) + 0,449 \sin(9\omega t - 1,7^\circ) + 0,159 \sin(12\omega t + 45,1^\circ) + 0,357 \sin(15\omega t + 67,2^\circ) + 0,24 \sin(18\omega t + 57,9^\circ) + 0,173 \sin(21\omega t + 90^\circ) \quad (10)$$

Ряд (10) апроксимує вихідну криву, значення якої представлені в табл. 1. Розглянемо функцію (10) без постійної складової U_0 на виході випрямляча, тому що нам важливо проаналізувати гармонійний склад пульсацій напруги. В одних осях координат побудований графік за значеннями табл. 1 з відрахуванням постійної складової й інший графік, розрахований за виразом (10) без доданка U_0 . Результати побудови показані на рис. 5, на якому видна якість апроксимації.

Отриманий ряд (10) дозволяє розрахувати коефіцієнт пульсацій вихідної напруги ТЗ в номінальному режимі при природній комутації тиристорів за формулою (5):

$$k_{nl} = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^7 U_{3i}^2}}{U_0} \cdot 100\% = \frac{\sqrt{0,427^2 + 0,855^2 + \dots + 0,24^2 + 0,173^2}}{10,515} = 11,2\% \quad (11)$$

Розкладання в ряд Фур'є напруги збудження мостових збуджувачів синхронних машин дозволило виявити амплітудний спектр напруги, з якого випливає, що шоста гармоніка найбільша і складає 8 % від постійної складової. З інших канонічних гармонік найбільшими є третя і дев'ята, які складають близько 4 % від постійної складової. Значна величина шостої гармоніки

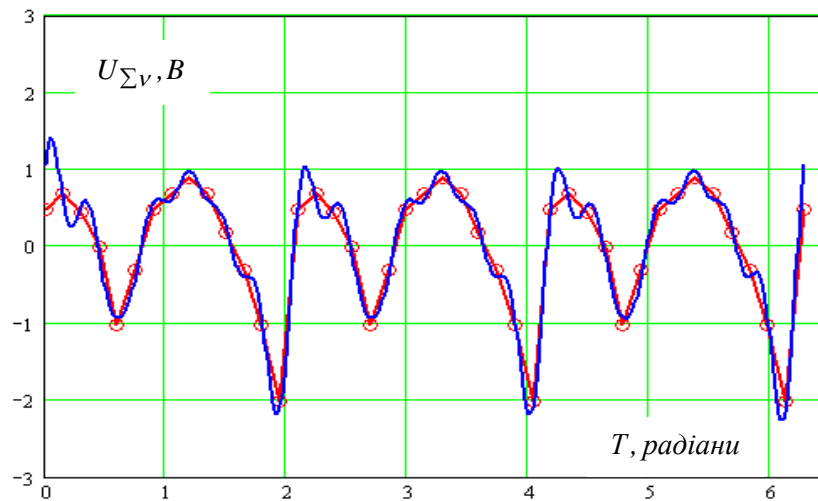


Рис. 5. Експериментальна залежність напруги без постійної складової та її апроксимація гармоніками тригонометричного ряду (10)

обумовлена шестипульсною схемою випрямлення. Значна частка всіх інших кратних трьом гармонік викликана тим, що випрямний міст збудника напівкерований через що суміжні пульсації напруги графічно не подібні одна одній.

Експериментальні значення напруги ТЗ у випадку примусової комутації тиристорів наведені в табл. 2.

Таблиця 2. Експериментальні значення напруги при примусовій комутації тиристорів

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
9.6	10.1	10.4	10.5	10.6	10.6	10.3	9.8	9.5	10	10.5	10.6	10.6
13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
10.4	10.2	9.7	10	10.5	10.6	10.6	10.4	10	9.8	9.5	9.7	10.2
26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38
10	9.8	10	10.5	10.2	10	9.9	10.2	10.4	10.5	10.6	10.6	10.7
39	40	41	42	43	44	45	46	47	48			
10.8	10.8	10	9.5	10.1	10	9.9	10	9.8	9.6			

Форма функції напруги на виході випрямляча з примусовою комутацією тиристорів представлена на рис. 6. Інтервалів $N = 48$. Довжина елементарного інтервалу в секундах $\Delta t = T/N = 0,02/48 = 1/24 \cdot 10^{-2} \text{ c}$. Кількість гармонік приймається максимально можливою $N/2 = 48/2 = 24$. Постійна складова розраховується за формулою (8). Вона дорівнює $U_0 = 10,176 \text{ В}$. Віднімаємо з кривої на рис. 6 постійну складову U_0 й одержуємо графік змінної складової напруги на рис. 7.

Значення ортогональних проєкцій амплітуд гармонік напруги U_{va}, U_{vp} розраховуються в програмі Mathcad за формулами (6), (7) і далі за виразом (2) визначаються амплітуди гармонік напруги. На рис. 8 показаний амплітудний спектр змінної складової напруги у відсотках відносно постійної складової напруги, тобто для кожної гармоніки обчислюється величина $(U_{vm}/U_0) \cdot 100\%$.

Як впливає з рис. 8 у розкладанні присутні різні парні і непарні гармоніки. Особливу увагу звертає на себе велика друга гармоніка. Однак навіть найбільші гармоніки (2, 6, 7) не перевищують 2,5 % від постійної складової, що значно менше, ніж у розкладанні напруги з

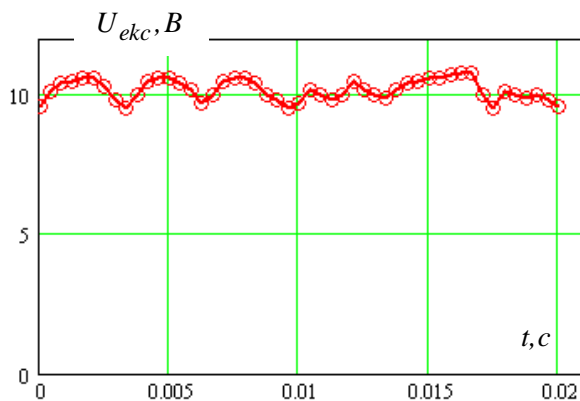


Рис. 6. Вихідна залежність форсованої напруги при примусовій комутації тиристорів збуджувача

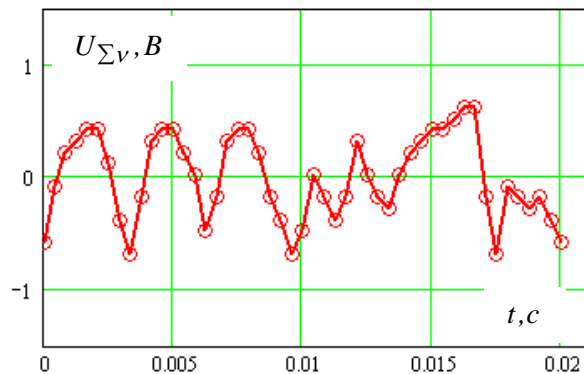


Рис. 7. Змінна складова форсованої напруги при примусовій комутації тиристорів збуджувача

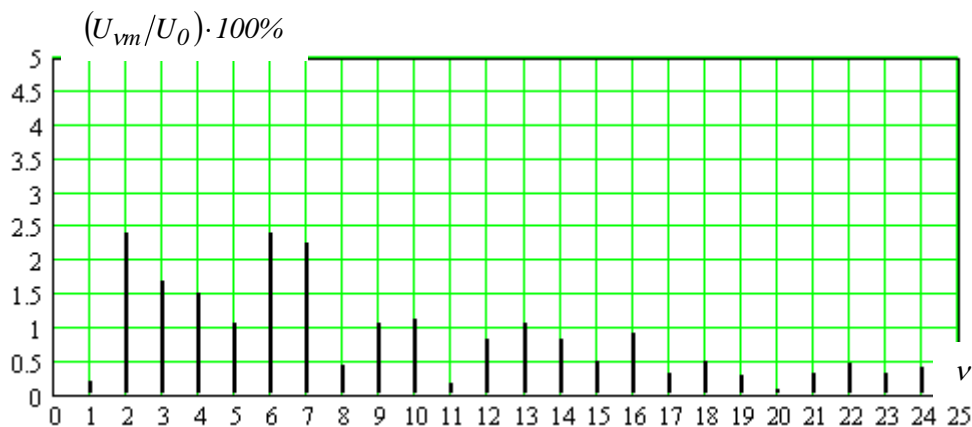


Рис. 8. Амплітудний спектр напруги при примусовій комутації

природною комутацією. Для шостої гармоніки співвідношення наступне $8\%/2,5\% = 3,2$, тобто частка шостої гармоніки в напрузі з примусовою комутацією в 3,2 рази менше, ніж при природній комутації. Гармоніки, амплітуди яких менше 0,5 % у розкладанні враховувати не будемо. Тоді з урахуванням формул (2), (6)—(9) ряд Фур'є вигляду (1) для кривої на рис. 6 приймає вигляд

$$\begin{aligned}
 u(t) = & 10,176 + 0,244 \sin(2\omega t - 92,7^\circ) + 0,172 \sin(3\omega t - 1,4^\circ) + 0,152 \sin(4\omega t - 9,8^\circ) + \\
 & + 0,108 \sin(5\omega t + 59,3^\circ) + 0,245 \sin(6\omega t - 77,6^\circ) + 0,229 \sin(7\omega t - 136,9^\circ) + \\
 & + 0,043 \sin(8\omega t - 175,8^\circ) + 0,107 \sin(9\omega t - 71,6^\circ) + 0,112 \sin(10\omega t + 10,9^\circ) + \\
 & + 0,082 \sin(12\omega t - 48,6^\circ) + 0,107 \sin(13\omega t - 157,8^\circ) + 0,084 \sin(14\omega t - 114,1^\circ) + \\
 & + 0,049 \sin(15\omega t - 73,0^\circ) + 0,091 \sin(16\omega t - 74,6^\circ) + 0,049 \sin(18\omega t - 42,9^\circ) + \\
 & + 0,047 \sin(22\omega t - 69,4^\circ)
 \end{aligned} \tag{12}$$

Ряд (12) апроксимує вихідну криву, значення якої представлені в табл. 2. Розглянемо функцію (12) без постійної складової U_0 на виході випрямляча, тому що нам важливо проаналізувати гармонійний склад пульсацій напруги. В одних осях координат побудований графік за значеннями табл. 2 з відрахуванням постійної складової й інший графік, розрахований за виразом (12) без доданка U_0 . Результати побудови показані на рис. 9, на якому видна якість апроксимації ґратчастої функції аналітичною залежністю.

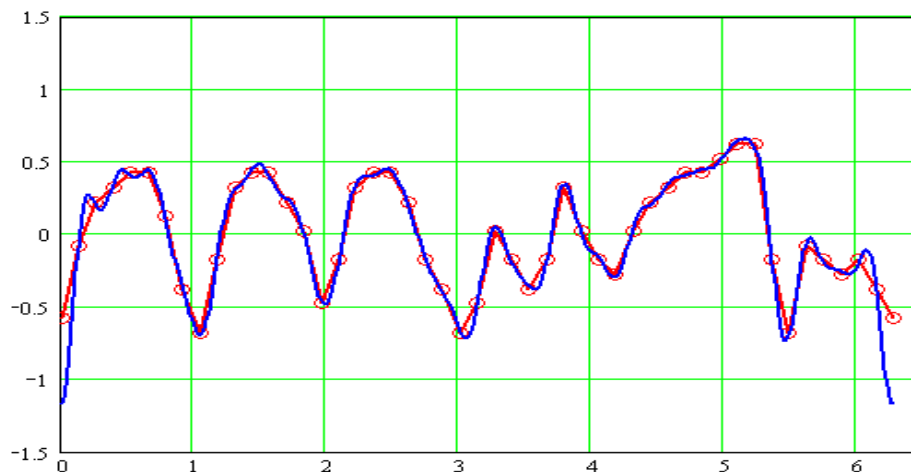


Рис. 9. Експериментальна крива напруги без постійної складової та її апроксимація гармоніками тригонометричного ряду (12) при примусовій комутації

Отриманий ряд (12) дозволяє розрахувати коефіцієнт пульсацій вихідної напруги ТЗ в номінальному режимі при примусовій комутації тиристорів за формулою (5):

$$k_{nl} = \frac{\sqrt{\sum_{v=1}^{22} U_v^2}}{U_0} 100\% = \frac{\sqrt{0,244^2 + 0,172^2 + \dots + 0,049^2 + 0,047^2}}{10,176} = 5,4\%. \quad (13)$$

Висновки

Наведені розрахунки показують, що коефіцієнт пульсацій вихідної напруги тиристорного збуджувача при використанні випрямляча з примусовою комутацією більш ніж у два рази менше (5,4 %), чим коефіцієнт пульсацій вихідної напруги випрямляча з природною комутацією (11,2 %). Енергетичний спектр частот різний в обох випадках. При природній комутації явно виражені гармоніки кратні трьом, особливо гармоніки 3, 6, 9. При примусовій комутації енергетичний спектр частот можливо вважати суцільним крім першої гармоніки і деяких інших. Однак сумарна енергія гармонік цього суцільного спектру значно менша ніж сумарна енергія гармонік без застосування примусової комутації.

Список використаної літератури

1. Баев А.В., Волков Ю.К., Долинин В.П., Корнеев В.Я. Вентильные преобразователи с конденсаторами в силовых цепях. М.: Энергия, 1969. 236 с.
2. Кашкалов В.И., Половинкин Б.И. Улучшение энергетических показателей управляемых вентилях. К.: Техника, 1988. 159 с.
3. Низимов В.Б., Колычев С.В., Розумный П.С. Влияние принудительной емкостной коммутации на энергетические показатели мостовых возбудителей. *Электротехника*, 1990. №4. С. 4–9.
4. Нізімов В. Б., Ключев О.В. Вплив вузлів примусової ємнісної комутації на гармонійний склад напруги збудження несиметричних мостових збуджувачів синхронних генераторів. *Збірник наукових праць Дніпровського державного технічного університету (технічні науки)*. Кам'янське, 2020. Вип. 1(36). С. 72–77.

IMPROVEMENT OF THE ENERGY PERFORMANCE OF ASYMMETRIC EXCITORS OF SYNCHRONOUS MACHINES IN VOLTAGE FORCING MODES

Abstract

The main mode of operation of synchronous machines in electric drives of industrial plants is the mode in which a static load moment close to the nominal is applied to the shaft. If the synchronous machine works as a generator, when consumers of comparable power are connected to the stator to stabilize the output voltage of the generator, forcing of the excitation voltage is applied by influencing the control angles of the thyristors of the controlled rectifier. In the nominal mode, the control angles of the thyristors of the exciter are significant, which makes it possible to ensure a sufficient multiplicity of the voltage during forcing. But with significant thyristor opening angles, the controlled rectifier consumes significant reactive power, which reduces the power factor of the rectifier bridge. In addition, forcing the excitation voltage is necessary for synchronous motors when a significant load is applied to the shaft and when voltage drops in the power supply network.

It is widely used to connect capacitors in parallel to the windings of the power transformer, or to use two zero diodes that are connected in series and connected to the output of the exciter to improve its energy performance. A significant improvement in the power factor can be achieved by using forced capacitive switching nodes. However, the improvement of energy indicators by turning on zero diodes and capacitors leads to a significant change in the harmonic composition of the excitation voltage. In the work, a research of the harmonic composition of the excitation voltage of synchronous machines with asymmetric bridge rectifiers using artificial commutation circuits was carried out.

To research the harmonic composition, experimentally obtained dependences of the forced excitation voltage, which are decomposed into a trigonometric series, are used. Calculated amplitude spectra of the excitation voltage during natural and forced switching of thyristors. The above calculations show that the coefficient of ripples of the output voltage of the thyristor exciter when using a rectifier with forced commutation is more than two times less (5.4 %) than the coefficient of ripples of the output voltage of a rectifier with natural commutation (11.2 %). The conducted experiments and the results of their analysis proved the expediency of using the developed exciter with forced capacitive commutation.

References

- [1] Baev A.V. & Volkov Yu.K. & Dolinin V.P. & Korneev V.Ya. (1969) *Ventilnye preobrazovateli s kondensatorami v silovyh cepyah [Valve converters with capacitors in power circuits]*. Moscow. Energiya. 236 p. [in Russian].
- [2] Kashkalov V.I. & Polovinkin B.I. (1988) *Uluchshenie energeticheskikh pokazatelej upravlyaemykh ventilej [Improving the energy performance of controlled valves]*. Kiev. Tehnika. 159 p. [in Russian].
- [3] Nizimov V.B. & Kolychev S.V. & Rozumnyj P.S. (1990) *Vliyanie prinuditelnoj emkostnoj kommutacii na energeticheskie pokazateli mostovykh vzbuditelej [Influence of forced capacitive switching on the energy performance of bridge exciters]*. Elektrotehnika, №4. P. 4–9. [in Russian].
- [4] Nizimov V. B. & Klyuyev O.V. (2020) *Vpliv vuzliv primusovoyi yemnisnoyi komutaciyi na garmonijnij sklad naprugi zbudzhennya nesimetrichnih mostovih zbudzhuvachiv sinhronnih generatoriv [The influence of forced capacitive switching nodes on the harmonic composition of the excitation voltage of asymmetric bridge exciters of synchronous generators]*. Zbirnik naukovih prac Dniprovskogo derzhavnogo tehnicnogo universitetu (tehnicni nauki). Kam'yanske, Vip. 1(36). P. 72–77. [in Ukrainian].