

2. . Фельдбаум А.А. Основы теории оптимальных автоматических систем. М.: Наука, 1966. 624с.
3. Садовой О.В., Дерещ О.Л. Спеціальні питання математичного опису і моделювання динаміки складних систем. Дніпродзержинськ: ДДТУ, 2014. 206с.
4. Горелов П.В., Мотченко А.И., Морозов Д.И. Релейно-модальное управление двух-массовыми электромеханическими системами. *Вестник НТУ ХПИ: «Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика»*. Харьков, 2008. №30. С.120-123.
5. Дерещ А.Л., Садовой А.В. Синтез каскадно-подчинённых структур релейно-модальных систем с распределением корней на основе метода N-i переключений. *Вестник НТУ «ХПИ». Сер.: «Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика»*. Харьков, 2017. №27. С.75-79.
6. Дерещ А.Л., Садовой А.В., Сохина Ю.В. Сравнительное исследование релейных систем третьего порядка с оптимальными и модальными регуляторами, синтезированными методом N-i переключений. *Сборник научных трудов ДГТУ (технические науки)*. Каменское, 2018. Вип. 1(32). С.59-63.
7. Дерещ А.Л., Садовой А.В. Коррекция параметров квазиоптимальных по быстродействию релейных систем третьего порядка, синтезированных методом N-i переключений. *Вісник НТУ «ХПІ». Серія: «Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія та практика»*. Х.: НТУ «ХПІ», 2019. № 9 (1334). С.20-23.
8. Дерещ А.Л., Садовой А.В., Дерещ А.А. Моделирование режимов позиционирования оптимизированной по быстродействию релейной системы управления при изменении расчётной амплитуды напряжения. *Сборник научных трудов ДГТУ (технические науки)*. Каменское, 2019. Вип. 2(35). С.55-59.

Поступила в редколлегию 11.03.2020.

УДК 621.313.322

DOI 10.31319/2519-2884.36.2020.12

НІЗІМОВ В.Б., д.т.н., професор

КЛЮЄВ О.В., к.т.н., доцент

Дніпровський державний технічний університет, м. Кам'янське

ВПЛИВ ВУЗЛІВ ПРИМУСОВОЇ ЄМНІСНОЇ КОМУТАЦІЇ НА ГАРМОНІЙНИЙ СКЛАД НАПРУГИ ЗБУДЖЕННЯ НЕСИМЕТРИЧНИХ МОСТОВИХ ЗБУДЖУВАЧІВ СИНХРОННИХ ГЕНЕРАТОРІВ

Вступ. Основним режимом роботи синхронних генераторів (СГ) автономних генеруючих установок (АГУ) є режим, близький до номінального. Однак, при підключенні до АГУ споживачів співставної потужності для стабілізації вихідної напруги генератора застосовують релейне або параметричне форсування напруги збудження впливом на кути керування тиристорами збуджувача. Оскільки коефіцієнт форсування за напругою лежить в межах 3...5 відносних одиниць в залежності від потужності СГ, це веде до значних кутів керування тиристорами збуджувача в номінальному режимі та викликає споживання збуджувачем значної реактивної потужності і зниження енергетичних показників. Для підвищення енергетичних показників мостових збуджувачів, особливо несиметричних, застосовують конденсатори в силових колах збуджувального

трансформатора [1] або використовують два нульових діоди, які з'єднані послідовно і підключені до виходу збуджувача. Загальна точка їх з'єднання через конденсатор підключена до нуля трансформатора живлення [2]. Суттєве покращення енергетичних показників може бути досягнуто шляхом використання вузлів примусової ємнісної комутації, експериментальне дослідження впливу якої виконано в [3].

Однак, покращення енергетичних показників вмикання нульових діодів та вузлів примусової ємнісної комутації призводить до суттєвої зміни гармонійного складу напруги збудження.

Постановка задачі. Задача роботи полягає в дослідженні гармонійного складу напруги збудження несиметричних мостових збуджувачів синхронних генераторів.

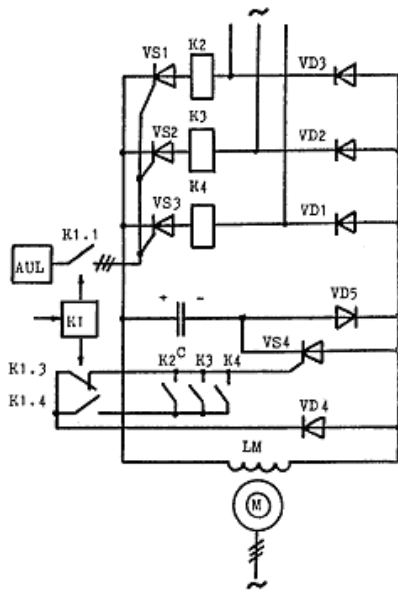


Рисунок 1 – Принципова схема несиметричного мостового збуджувача з вузлом примусової ємнісної комутації

Результати роботи. Експериментальне дослідження енергетичних показників виконано для несиметричних мостових збуджувачів із застосуванням вузлів примусової ємнісної комутації [3]. Принципову схему дослідженої системи збудження наведено на рис.1.

Керуючі сигнали на тиристори катодної групи подаються від блоку імпульсно-фазового керування АУЛ через ключ K1.1.

Під час комутації тиристорів катодної групи тиристорного збуджувача (ТЗ) по черзі спрацьовують герконові реле K2, K3, K4. Своїми ключами вони замикають коло керування комутуючим тиристором VS4, який через ключ K1.4 і діод VD4 підключає конденсатор до обмотки збудження LM, яка в цій схемі є автономним джерелом енергії. Якщо миттєве значення електрорушійної сили (е.р.с.) ТЗ стає меншим, ніж напруга кон-

денсатора С, то включається комутуючий тиристор VS4, і конденсатор С розряджається на ОЗ LM, що призводить до зменшення пульсацій напруги на обмотці збудження. Якщо ж миттєве значення е.р.с. ТЗ вище, ніж початкова напруга на конденсаторі С, то останній заряджається. При негативному значенні миттєвої е.р.с. ТЗ, що зазвичай має місце в режимі номінального збудження СГ, накопичена в індуктивності ОЗ LM електромагнітна енергія виводиться по контуру: ОЗ LM – комутуючий тиристор VS4 – конденсатор С – ОЗ LM, а не повертається в мережу, зменшуючи тим самим встановлену потужність збуджувального трансформатора.

Для дослідження гармонійного складу використовується експериментально отримана крива напруги збудження [3], яка розкладається в ряд Фур'є (рис.2).

Вираз для напруги збудження $u(t)$ представлений 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, яка

враховується.

Амплітуди і початкові фази гармонік можуть бути знайдені через ортогональні проекції U_{va} і U_{vp} :

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

які обчислюються за допомогою інтегралів:

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

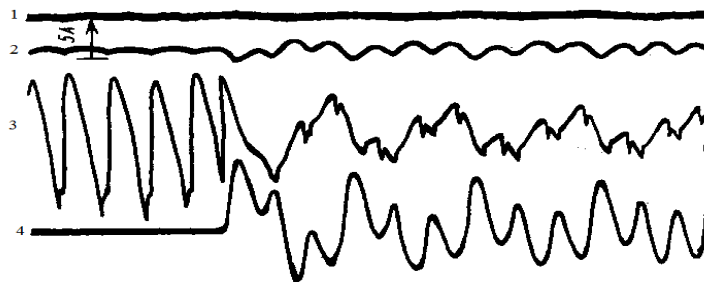
Ряд Фур'є (1) можна записати в наступному вигляді:

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

Коефіцієнт несинусоїдальності напруги є відношенням діючого значення гармонійного складу несинусоїдальної напруги до напруги основної частоти

$$k_{нс} = \frac{\sqrt{\sum_{v=2}^{\infty} U_v^2}}{U_1} 100 \approx \frac{\sqrt{\sum_{v=2}^n U_v^2}}{U_{ном}} 100, \quad (5)$$

де U_v – діюче значення напруги v -й гармоніки.



1 – струм обмотки збудження; 2 – струм мостового ТЗ;

3 – е.р.с. мостового ТЗ; 4 – струм комутуючого конденсатора

Рисунок 2 – Осцилограма номінального збудження СГ при підключенні вузла примусової ємнісної комутації

При розкладанні в ряд Фур'є період кривої розбивається на N рівних інтервалів Δt . Враховуються співвідношення: $T = N\Delta t$, $\omega = 2\pi/T = 2\pi/N\Delta t$, де $T = 0,02$ с – період зміни струму або напруги. Тоді інтеграли (3) можна приблизно замінити кінцевими сумами:

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

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

Експериментально отримані значення напруги представлено в таб.1. Для цих даних довжина елементарного інтервалу 12° або інтервал часу $\Delta t = \frac{12}{360} \cdot 0,02 = \frac{2}{3} \cdot 10^{-3} \text{ с}$, число інтервалів $N = 30$.

Таблиця 1 – Експериментальні значення напруги

Ел. гр.	0	12	24	36	48	60	72	84	96	108	120	132	144	156	168	180
мм.	0	4	9	11	4	0	2	4	9	11	15	18	16	11	7	0
Ел. гр.	192	204	216	228	240	252	264	276	288	300	312	324	336	348	360	
мм.	-8	-16	-11	-9	-7	-4	-3	-6	-11	-16	-20	-14	-10	-7	0	

Значення часу представлені в градусах, а значення напруги – у міліметрах (рис.2). Криву напруги, побудовану за вимірами табл.1, наведено на рис.3.

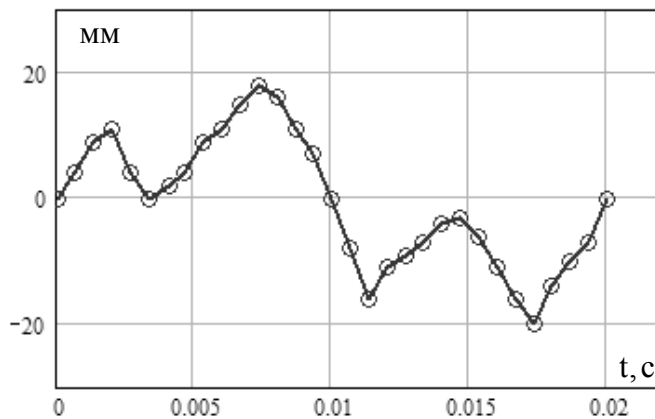


Рисунок 3 – Експериментальна крива напруги збудження

При розкладанні в ряд Фур'є враховуються 15 гармонік. Причому є присутніми як парні, так і непарні гармоніки, оскільки напівперіоди початкової кривої на рис.3 несиметричні по відношенню один до одного. Значення амплітуд гармонік напруги U_{va}, U_{vp} (рис.4) розраховуються в програмі Mathcad за формулами (6), (7) і далі (2).

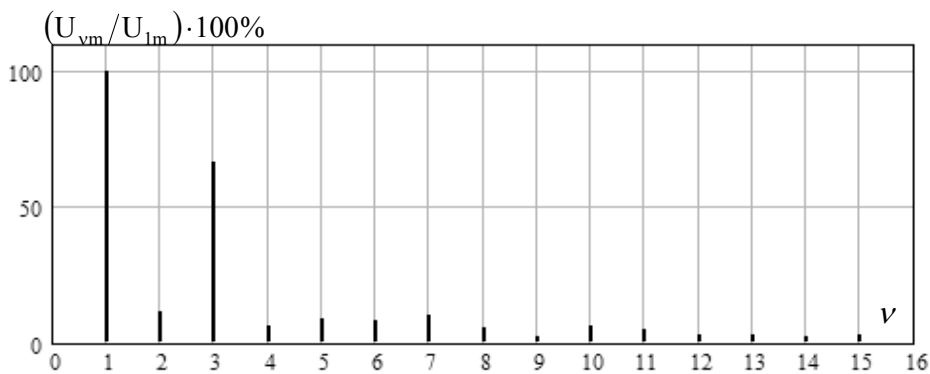


Рисунок 4 – Амплітудний спектр напруги

Запишемо суму доданків ряду Фур'є у вигляді (1), де амплітуди знаходяться за формулою (2), а початкові фази гармонік ψ_v в градусах визначаються відповідно до умов:

$$\text{якщо } U_{va} > 0 \text{ і } U_{vp} > 0, \text{ то } \psi_v = \frac{180}{\pi} \arctg \left(\frac{U_{va}}{U_{vp}} \right);$$

$$\begin{aligned} \text{якщо } U_{va} > 0 \text{ і } U_{vp} < 0, \text{ то } \psi_v &= 180 - \left| \frac{180}{\pi} \arctg \left(\frac{U_{va}}{U_{vp}} \right) \right|; \\ \text{якщо } U_{va} < 0 \text{ і } U_{vp} < 0, \text{ то } \psi_v &= -180 + \frac{180}{\pi} \arctg \left(\frac{U_{va}}{U_{vp}} \right); \\ \text{якщо } U_{va} < 0 \text{ і } U_{vp} > 0, \text{ то } \psi_v &= \frac{180}{\pi} \arctg \left(\frac{U_{va}}{U_{vp}} \right). \end{aligned} \quad (8)$$

Після обчислень, виконаних в програмі Mathcad за формулами (2), (6)-(8), сума п'ятнадцяти гармонік ряду прийме вигляд:

$$\begin{aligned} u(t) = & 11,89 \sin(\omega t - 12,7^\circ) + 1,33 \sin(2\omega t - 166,4^\circ) + 7,89 \sin(3\omega t + 31,5^\circ) + \\ & + 0,74 \sin(4\omega t + 108,3^\circ) + 1,02 \sin(5\omega t - 72,2^\circ) + 0,97 \sin(6\omega t - 121,01^\circ) + \\ & + 1,24 \sin(7\omega t - 96,7^\circ) + 0,68 \sin(8\omega t + 116,4^\circ) + 0,29 \sin(9\omega t - 58,9^\circ) + \\ & + 0,77 \sin(10\omega t + 64,2^\circ) + 0,57 \sin(11\omega t + 92,6^\circ) + 0,36 \sin(12\omega t + 23,2^\circ) + \\ & + 0,37 \sin(13\omega t + 142,7^\circ) + 0,286 \sin(14\omega t - 107,6^\circ) + 0,32 \sin(15\omega t + 78,1^\circ). \end{aligned} \quad (9)$$

У координатних осях побудовано графік за значеннями табл.1 та графік, розрахований за виразом (9). Результати побудови показано на рис.5, які підтверджують якість апроксимації.

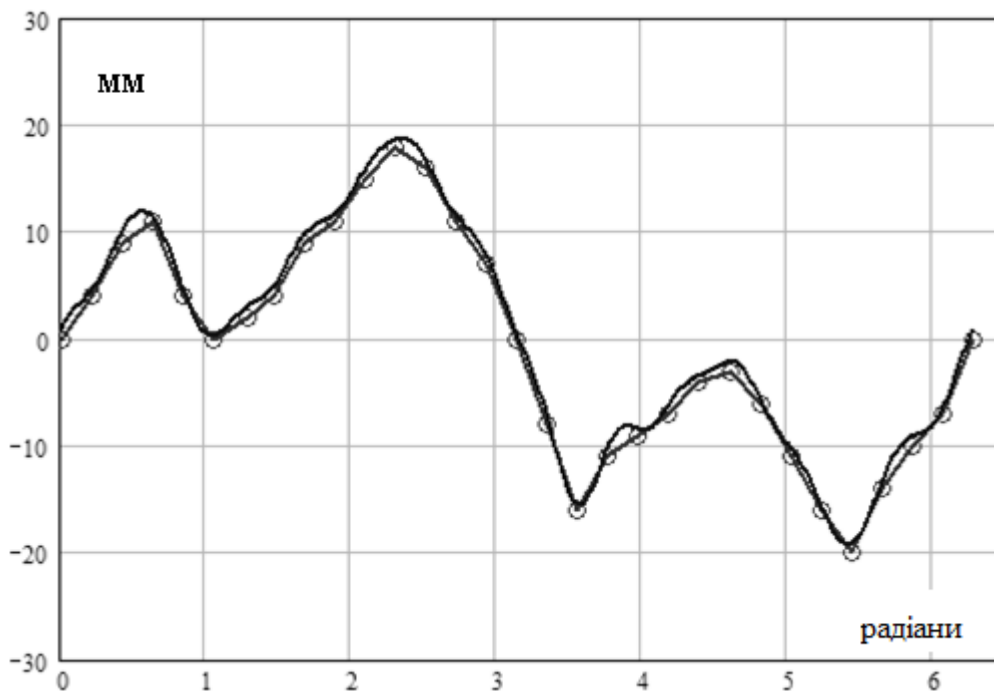


Рисунок 5 – Експериментальна крива напруги та її апроксимація п'ятнадцятьма гармоніками тригонометричного ряду

Висновки. Результати розкладання в ряд Фур'є напруги збудження мостового несиметричного збуджувача синхронного генератора свідчать, що третя гармоніка складає 66% від амплітуди першої гармоніки. Значна величина третьої гармоніки обумовлена великим кутом керування тиристорами збуджувача при номінальному режимі роботи синхронного генератора. Через значну третю гармоніку вторинна обмотка випрямляючого трансформатора живлення несиметричного мостового збуджувача повинна бути з'єднана у трикутник. Несиметрія напруги збудження по відношенню до осі абсцис викликає присутність парних гармонік.

ЛІТЕРАТУРА

1. Баев А.В., Волков Ю.К., Долинин В.П., Корнеев В.Я. Вентильные преобразователи с конденсаторами в силовых цепях. М.: Энергия, 1969. 236с.: ил.
2. Петухов М.В., Літковець С.П. Спосіб зниження питомих втрат активної потужності в статичних тиристорних компенсаторах реактивної потужності з примусовою комутацією. *Електромеханічні і енергозберігаючі системи*. Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, 2013. № 2 (22), частина 2. С.298-302.
3. Кашкалов В.И., Пололовинкин Б.И. Улучшение энергетических показателей управляемых вентилей. К.: Техника, 1988. 159с.
4. Артюхов И.И., Митяшин Н.П., Степанов С.Ф. Адаптируемый преобразовательный комплекс. *Вестник СГТУ*, 2005. №3 (8). С. 104-109.
5. Низимов В.Б., Колычев С.В., Розумный П.С. Влияние принудительной емкостной коммутации на энергетические показатели мостовых возбудителей. *Електротехніка*, 1990. №4. С.4-9.

Надійшла до редколегії 21.01.2020.

УДК 519.216:621.311.44

DOI 10.31319/2519-2884.36.2020.13

КЛЮЄВ О.В., к.т.н., доцент
ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ Є.Д., к.т.н., доцент
НОСАКОВ Є.Г., здобувач вищої освіти
КОЛІСНИК Д.О., здобувач вищої освіти

Дніпровський державний технічний університет, м. Кам'янське

АНАЛІЗ СТРУМУ НАВАНТАЖЕННЯ ТЯГОВОЇ ПІДСТАНЦІЇ ЯК ВИПАДКОВОГО ПРОЦЕСУ

Вступ. Рішення завдань підвищення ефективності і надійності роботи систем електропостачання тісно пов'язане з питаннями розрахунку і прогнозування електричних навантажень. З огляду на те, що графіки навантаження електроприймачів є реалізаціями випадкових процесів, найбільш доцільними є імовірнісні методи визначення розрахункових навантажень. Приймаючи до уваги, що визначення навантажень є одним із перших етапів проектування, то їх точна величина суттєво впливає на вибір усіх елементів системи електропостачання та її техніко-економічні показники [1].

Постановка задачі. Оцінити можливість застосування методики аналізу нестационарних випадкових процесів з прихованими періодичностями до визначення імовірнісних характеристик загального струму тягової підстанції залізниці.