

МЕТОДИ І ПРИЛАДИ КОНТРОЛЮ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ

УДК 621.311:622.32

DOI: 10.31471/1993-9981-2020-1(44)-65-75

АНАЛІЗ ПОТОКІВ ЕНЕРГІЇ В СИСТЕМІ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ З ТИРИСТОРНИМ ПЕРЕТВОРЮВАЧЕМ НАПРУГИ

Б. Л. Грабчук, Ю. Ф. Романюк

*Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу; 76019,
м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15; e-mail: grabchuk.bogdan@gmail.com; romanjukjf@ukr.net*

Проведено числовий аналіз потоків енергії в трифазовій системі електропостачання з джерелом синусоїдної ЕРС, активним навантаженням та тиристорним перетворювачем, який спотворює синусоїдну форму кривої напруги і генерує вищі гармоніки. Проаналізовано вплив несинусоїдності напруги на тиристорі на потоки енергії та коефіцієнт потужності джерела. Тиристор розглядається як нелінійний елемент, що перетворює частину електричної енергії, яка поступає в мережу від джерела живлення у вигляді первинного потоку на основній частоті, і повертає її назад в мережу у вигляді вторинного потоку енергії систем нульової послідовності та вищих гармонік, внаслідок чого знижується загальний коефіцієнт потужності та погіршується якість електроенергії. Проаналізовано вплив кількісного складу врахованих гармонік на точність розрахунку струмів і напруг. Встановлено залежність амплітуд вищих гармонік від кута керування тиристором. Найбільш вираженими в спектрі гармонік тиристора є постійна складова та друга гармоніка напруги. Показано, що у нелінійному колі з синусоїдним джерелом живлення у загальному випадку, навіть за відсутності в колі індуктивних і ємнісних електроприймачів, перша гармоніка струму джерела живлення відстає за фазою від ЕРС джерела. Таким чином, тиристор можна розглядати як реактивний індуктивний елемент, який споживає реактивну потужність на частоті основної гармоніки струму, незалежно від кута його керування та наявності в системі інших реактивних елементів. Тому з метою підвищення коефіцієнта потужності необхідно компенсувати реактиву потужності зсуву тільки на частоті основної гармоніки струму, яку повинні фіксувати електронні лічильники. Для характеристики впливу вторинного потоку енергії на загальний коефіцієнт потужності запропоновано використовувати відносне значення струму першої гармоніки джерела живлення. У чотирипровідній мережі наявність тиристорного перетворювача призводить до значного збільшення струму в нульовому проводі, навіть за симетричного навантаження фаз, через протікання струмів нульової послідовності гармонік, кратних трьом, що потрібно враховувати при виборі його перерізу та розрахунку втрат потужності. Запропоновані практичні заходи щодо обмеження рівня вищих гармонік і підвищення якості електроенергії.

Ключові слова: електрична мережа, система електропостачання, нелінійні електроприймачі, несинусоїдність напруги, вищі гармоніки, втрати потужності, нульовий провід.

Проведен численный анализ потоков энергии в трехфазной системе электроснабжения с источником синусоидальной ЭДС, активной нагрузкой и тиристорным преобразователем, который искажает синусоидальную форму кривой напряжения и генерирует высшие гармоники. Проанализировано влияние несинусоидальности напряжения на тиристоре на потоки энергии и коэффициент мощности источника. Тиристор рассматривается как нелинейный элемент, который преобразует часть электрической энергии, поступающей в сеть от источника питания в виде первичного потока на основной частоте, и возвращает ее обратно в сеть в виде вторичного потока энергии систем нулевой последовательности и высших гармоник, в результате чего снижается общий коэффициент мощности и ухудшается качество электроэнергии. Проанализировано влияние количественного состава учитываемых гармоник на точность расчета токов и напряжений. Установлена зависимость амплитуд высших гармоник от угла управления тиристором. Наиболее выраженными в спектре гармоник тиристора является постоянная составляющая и вторая гармоника напряжения. Показано, что в нелинейной цепи из синусоидальным источником питания в общем случае, даже при отсутствии в цепи индуктивных и емкостных электроприемников, первая гармоника источника питания

отстает по фазе от ЭДС источника. Таким образом тиристор можно рассматривать как реактивный индуктивный элемент, который потребляет реактивную мощность на частоте основной гармоники тока, независимо от угла его управления и наличия в системе других реактивных элементов. Поэтому с целью повышения коэффициента мощности необходимо компенсировать реактивную мощность сдвига только на частоте основной гармоники тока, которую должны фиксировать электронные счетчики. Для характеристики влияния вторичного потока энергии на общий коэффициент мощности предложено использовать относительное значение тока первой гармоники источника питания. В четырехпроводной сети наличие тиристорного преобразователя приводит к значительному увеличению тока в нулевом проводе, даже при симметричной нагрузке фаз, из-за протекания токов нулевой последовательности гармоник, кратных трем, что нужно учитывать при выборе его сечения и расчета потерь мощности. Предложены практические мероприятия по ограничению уровня высших гармоник и повышению качества электроэнергии.

Ключевые слова: электрическая сеть, система электроснабжения, нелинейные электроприемники, несинусоидальность напряжения, высшие гармоники, потери мощности, нулевой провод.

A numerical analysis of energy flows in a three-phase power supply system with a sine wave EMF source, active load and a thyristor converter that distorts the sine waveform and generates higher harmonics is performed. The influence of the thyristor non-sinusoidal voltage on the energy flows and the power factor of the source is analyzed. Thyristor converter is considered as a nonlinear electric power unit consuming electricity from the primary power source at a fundamental frequency, part of which is converted and returned back to the network as a secondary energy stream of zero-sequence systems and higher harmonics, thereby reducing the overall power factor and the quality of electricity becomes worse. It is analyzed the influence of the considered harmonics quantitative composition on the accuracy of the currents and voltages calculations. The dependence of the higher harmonics amplitudes on the thyristor firing angle is established. The constant component and the 2nd order harmonic voltage are the most denoted in the thyristor harmonics spectrum. In general case it is shown that in the nonlinear circuit with a sinusoidal power source, even in the absence of inductive and capacitive electric load, the fundamental current harmonic of the power source does not coincide in phase with the sinusoidal EMF of the source. Thus, the thyristor can be considered as a reactive inductive element that consumes reactive power of the fundamental frequency of current, regardless of the its firing angle and the presence of other reactive elements in the system. Therefore, in order to increase the power factor, it is necessary to compensate the reactive power of displacement only at the current fundamental frequency, which should be recorded by electronic meters. It is proposed to use the relative current value of the first harmonic of the power source to characterize the effect of the secondary energy flow on the total power factor. In a four-wire network, the presence of a thyristor converter causes a significant current increasing in the neutral wire, even under symmetrical phase loading, due to the zero sequence currents flowing, which are multiple of three, and they must be taken into account during wire cross-section selection and power losses calculation. It is proposed the practical measures to limit the level of higher harmonics and improve the electricity quality.

Keywords: electrical network, power supply system, nonlinear electric load, non-sinusoidal voltage, higher harmonics, power loss, neutral wire.

Постановка і актуальність проблеми

У системах електропостачання підприємств нафтогазової та інших галузей знаходять використання нелінійні електроприймачі, зокрема поширені пристрої силової електроніки з напівпровідниковими приладами, які використовують для перетворення змінного струму в постійний, чи зворотного перетворення, агрегати для регулювання напруги промислової частоти, тиристорні перетворювачі частоти змінного струму тощо. Наявність потужних нелінійних електроприймачів в мережах електропостачання з синусоїдними джерелами живлення призводить до того, що періодичні криві струмів і напруг в мережі можуть істотно відрізнятись від синусоїди. Це погіршує якість

електроенергії, призводить до зниження коефіцієнта потужності, збільшення втрат в елементах системи та електроприймачах, знижує точність показів електровимірювальних приладів тощо. Тому дослідження спектрального складу напруг і струмів, що генерують нелінійні елементи, та розроблення заходів щодо зменшення спотворення кривих напруг і струмів з метою підвищення техніко-економічної ефективності роботи систем електропостачання є актуальними для сучасної електроенергетики.

Для аналізу процесів в системах з нелінійними приймачами несинусоїдні напруги і струми можна представити у вигляді рядів Фур'є, які в загальному випадку містять, крім першої (основної) гармоніки, постійну складову

(нульову гармоніку) та вищі гармоніки, що негативно впливає на роботу обладнання систем електропостачання. Рівень вищих гармонік залежить від потужності та типу нелінійних електроприймачів, схеми електропостачання й параметрів її елементів та нормується стандартом якості електричної енергії [1].

Під час розгляду енергетичних процесів у колах з нелінійними електроприймачами можна прийняти, що вони, споживаючи електричну енергію з мережі, частково перетворюють її та повертають назад у мережу. Енергія поступає в електричну мережу від джерела живлення у вигляді основного (первинного) потоку, що визначається симетричними системами напруг і струмів прямої послідовності основної частоти. Частина енергії перетворюється нелінійними електроприймачами та повертається назад у мережу у вигляді потоку енергії трифазних систем нульової та вищих гармонік, утворюючи вторинний потік енергії.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Питанням аналізу складу та впливу гармонік на якість електроенергії й техніко-економічні показники ефективності роботи систем електропостачання присвячена велика кількість наукових робіт [2-8] та інші. У роботі [2] проаналізовано вплив несинусоїдності напруги на роботу електроприймачів і обладнання електропостачальної системи та похибки електровимірних приладів і розглянуті можливі способи обмеження рівня гармонік. Взагалі теорію потужності в колах несинусоїдного струму остаточно не сформовано, хоч вона розглядається в чисельних публікаціях, детальний огляд і аналіз яких проведено в [5]. У роботі [7] наведені результати експериментальних досліджень енергетичних процесів у колах з нелінійними електроприймачами різних типів, проаналізовано спектральний склад гармонік і практично підтверджена необхідність врахування не тільки реактивної потужності, зумовленої наявності зсуву фаз між основною гармонікою струму та ЕРС джерела живлення, а й потужності, зумовленої струмами вищих гармонік і постійною складовою струму, що узгоджується з теоретичними дослідженнями, описаними в [5].

Невирішені частини загальної проблеми

Кількість і потужність нелінійних електроприймачів останнім часом істотно збільшилась з впровадженням нових технологій в електроенергетиці та промисловості. У зв'язку з цим підвищився рівень вищих гармонік, які генерують ці електроприймачі, що негативно впливає на ефективність роботи енергетичної системи в цілому. Тому проблема підвищення якості електроенергії є актуальною. У більшості робіт не достатньо уваги приділено чисельному аналізу потоків енергії в колах з нелінійними елементами та їх впливу на енергетичні показники електропостачальних систем, зокрема на втрати та коефіцієнт потужності джерела живлення. Невирішеним залишається питання правильного вибору потужності компенсуювальних установок для компенсації реактивної потужності навантаження з врахуванням наявної потужності спотворення в колах з нелінійними елементами, а також питання інструментального контролю реактивної потужності зсуву і потужності спотворення та їх стандартизації. У роботі [8] проведено аналіз потоків енергії в трифазній чотирипровідній системі електропостачання з ідеальними діодами та активним навантаженням і досліджено їх вплив на потоки потужності. Показано розрахунковим шляхом, що в такому колі вищі гармоніки генерують реактивну потужність спотворення, яка призводить до збільшення повної потужності та зниження коефіцієнта потужності джерела живлення. Реактивна потужність спотворення не може бути скомпенсована традиційними джерелами реактивної потужності і для її зменшення потрібно застосовувати спеціальні засоби для обмеження рівня вищих гармонік.

Мета та завдання досліджень

Метою цієї роботи є дослідження особливостей потоків енергії у трифазній електропостачальній системі з синусоїдною напругою джерела живлення, активними електроприймачами і нелінійними елементами – ідеальними тиристорами.

Основними завданнями досліджень є:

- розрахунок потужностей потоків енергії, втрат потужності в лінії живлення та додаткових втрат, зумовлених вторинним потоком енергії,

для заданих параметрів схеми електропостачання;

- аналіз впливу несинусоїдності напруг і струмів на повну потужність, реактивну потужність зсуву та потужність спотворення джерела живлення;

- дослідження впливу моменту керування тиристорів на зміну відносних значень амплітуд вищих гармонік та кути їх зсуву фаз відносно ЕРС джерела живлення;

- аналіз впливу кількісного складу врахованих гармонік на точність розрахунку параметрів режиму системи електропостачання;

- рекомендації щодо вдосконалення системи обліку електроенергії і компенсації реактивної потужності.

Результати досліджень

Проаналізуємо потоки електричної енергії в однофазному колі трифазної чотирипровідної системи електропостачання з джерелом синусоїдної ЕРС e , лінійними активними споживачами R_a і R_b та ідеальним тиристором T (рисунок 1).

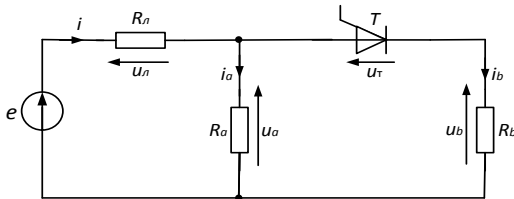


Рисунок 1 – Схема однофазного кола

Нехай

$u_b = 220\sqrt{2}\sin(\omega t) = 311,13\sin(314,16t)$ В, $R_a = R_b = 20$ Ом, а опір лінії $R_n = 2$ Ом. Опір тиристора у відкритому стані приймемо рівним нулю, а у закритому – нескінченності. У момент, коли кут керування $\alpha_k = p\pi$, де $0 < p < 1$ (в момент керування $t_k = 0,5pT$), на тиристор подається керуючий сигнал, який відкриває тиристор.

У інтервалі часу $0 < t < t_k$ тиристор закритий, його опір $R_t = \infty$, $i_b = 0$, $i = i_a = 14,142 \sin(\omega t)$ А, $u_t = u_a = 282,843 \sin(\omega t)$ В, $u_n = 28,284 \sin(\omega t)$ В.

У інтервалі часу $t_k < t < 0,5T$ тиристор відкритий, його опір $R_t = 0$, $i = 25,927 \sin(\omega t)$ А, $i_a = i_b$, $u_t = 0$, $u_a = u_b = 259,27 \sin(\omega t)$ В, $u_n = 51,854 \sin(\omega t)$ В.

Графік зміни напруги на тиристорі за значення параметра відкриття $p = 0,25$ зображено на рисунку 2.

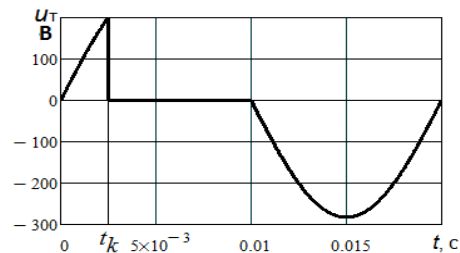


Рисунок 2 – Часова залежність напруги на тиристорі для значення параметра $p = 0,25$

Розкладемо напругу на тиристорі у ряд Фур'є, врахувавши гармоніки до шостої включно[^]

$$u_t = U_0 + U_{1m} \sin(\omega t + \psi_1) + U_{2m} \sin(2\omega t + \psi_2) + \dots + U_{6m} \sin(6\omega t + \psi_6) = U_0 + \sum_{k=1}^6 U_{km} \sin(k\omega t + \psi_k) = U_0 + B_1 \sin(\omega t) + B_2 \sin(2\omega t) + \dots + C_1 \cos(\omega t) + C_2 \cos(2\omega t) + \dots = U_0 + \sum_{k=1}^6 (B_{km} \sin(k\omega t) + C_{km} \cos(k\omega t)).$$

$$U_0(p) = \frac{U_{vm}}{2\pi} \left(\int_0^{p\pi} \sin(\alpha) d\alpha + \int_{\pi}^{2\pi} \sin(\alpha) d\alpha \right);$$

$$B_k(p) = \frac{U_{vm}}{\pi} \left(\int_0^{p\pi} \sin(\alpha) \sin(k\alpha) d\alpha + \int_{\pi}^{2\pi} \sin(\alpha) \sin(k\alpha) d\alpha \right);$$

$$C_k(p) = \frac{U_{vm}}{\pi} \left(\int_0^{p\pi} \sin(\alpha) \cos(k\alpha) d\alpha + \int_{\pi}^{2\pi} \sin(\alpha) \cos(k\alpha) d\alpha \right).$$

Після інтегрування одержимо вирази для розрахунку коефіцієнтів A_0 , B_k , C_k ряду Фур'є напруги u_t тиристора:

$$A_0(p) = - \left(\frac{\cos(p\pi) + 1}{2\pi} U_{vm} \right);$$

$$\begin{aligned}
 B_1(p) &= \frac{(p+1)2\pi - \sin(2p\pi)}{4\pi} U_{\tau m}; & C_1(p) &= \frac{1 - \cos(2p\pi)}{4\pi} U_{\tau m}; \\
 B_2(p) &= \frac{2\sin^3(p\pi)}{3\pi} U_{\tau m}; & C_2(p) &= \frac{3\cos^2(0,5p\pi) - \cos^2(1,5p\pi)}{3\pi} U_{\tau m}; \\
 B_3(p) &= \frac{2\sin(2p\pi) - 4\sin(4p\pi)}{8\pi} U_{\tau m}; & C_3(p) &= \frac{2\sin^2(p\pi) - \sin^2(2p\pi)}{4\pi} U_{\tau m}; \\
 B_4(p) &= \frac{5\sin(3p\pi) - 3\sin(5p\pi)}{30\pi} U_{\tau m}; & C_4(p) &= \frac{5\cos(1,5p\pi) - 3\cos(2,5p\pi)}{15\pi} U_{\tau m}; \\
 B_5(p) &= \frac{3\sin(4p\pi) - 2\sin(6p\pi)}{24\pi} U_{\tau m}; & C_5(p) &= \frac{4\sin^2(3p\pi) - 6\sin^2(2p\pi)}{24\pi} U_{\tau m}; \\
 B_6(p) &= \frac{7\sin(5p\pi) - 5\sin(7p\pi)}{70\pi} U_{\tau m}; & C_6(p) &= \frac{7\cos^2(2,5p\pi) - 5\cos^2(3,5p\pi)}{35\pi} U_{\tau m}.
 \end{aligned}$$

Амплітуди та початкові фази синусоїдних гармонік відповідно дорівнюють

$$A_k(p) = \sqrt{B_k^2(p) + C_k^2(p)}, \quad \varphi_k(p) = \arctg\left(\frac{C_k(p)}{B_k(p)}\right),$$

а діюче значення напруги тиристора

$$U_{\tau}(p) = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \left(\int_0^{p\pi} \sin^2(\alpha) d\alpha + \int_{\pi}^{2\pi} \sin^2(\alpha) d\alpha \right)} U_{\tau m}.$$

Результати розрахунку амплітуд гармонік напруги тиристора (коефіцієнтів A_k ряду Фур'є) для деяких значень параметра p , який визначає кут керування α , наведені в таблиці 1.

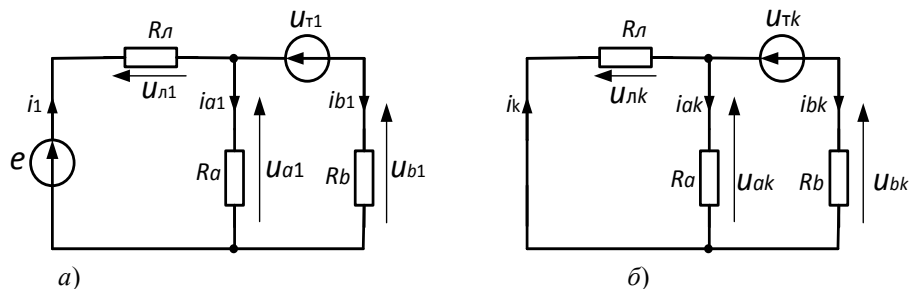
Таблиця 1 – Амплітуди гармонік напруги тиристора для різних значень параметра p та значення $U_{\tau m} = 282,84$ В

p	$U_{\tau 0}$, В	$U_{\tau 1m}$, В	$U_{\tau 2m}$, В	$U_{\tau 3m}$, В	$U_{\tau 4m}$, В	$U_{\tau 5m}$, В	$U_{\tau 6m}$, В
0	-90,031	141,42	60,021	0	12,004	0	5,145
0,125	-86,603	143,333	65,943	6,592	16,171	6,148	7,745
0,25	-76,846	155,901	75,495	22,508	17,067	16,776	8,537
0,5	-45,015	216,854	67,105	40,015	24,747	15,005	15,647
0,75	-13,185	270,929	24,59	22,508	19,829	16,776	13,608
1,0	0	282,84	0	0	0	0	0

Замінімо тиристор джерелом несинусоїдної напруги, яка дорівнює розкладеній в ряд Фур'є напрузі u_{τ} на тиристорі, і по чергово розрахуємо струми та напруги в колі при дії в ньому джерел кожної з частот окремо.

Розрахунок діючих значень струмів I_1, I_{a1}, I_{b1} , активних потужностей $P_{a1}, P_{b1}, P_{\tau 1}$, які споживаються в колі на основній частоті, а також потужності $P_{\tau 1}$ частини основного потоку енергії, яку тиристор перетворює і повертає

назад у коло, генеруючи вторинний потік енергії у вигляді нульової та вищих гармонік, виконаємо за схемою, наведеною на рисунку 3, а. Значення постійної складової I_0 , діючих значень струмів шести вищих гармонік I_k, I_{ak}, I_{bk} та потужностей $P_{\tau k}, P_{ak}, P_{bk}$, де $k = 0, 2, 3, 4, 5, 6$ – порядок гармоніки, розрахуємо за схемою рисунка 3, б. Результати розрахунку для значення параметра $p = 0,25$ наведені в таблиці 2.



Рисунки 3 – Схеми для розрахунку перших гармонік (а) і нульової та вищих гармонік (б) струмів і напруг

Таблиця 2 – Діючі значення гармонік струмів та активні потужності потоків енергії у фазі трифазної чотирипровідної системи електропостачання за значення $p = 0,25$

k	I_k, A	I_{ak}, A	I_{bk}, A	$P_{ak}, Вт$	$P_{bk}, Вт$	$P_{lk}, Вт$	$\sum P_{prk}, Вт$	$P_{Tk}, Вт$
Струми та потужності первинного (основного) потоку енергії								
1	13,804	9,621	4,23	1851,4	357,9	381,1	2590,5	-442,94
Струми та потужності вторинного потоку енергії								
0	3,202	-0,320	3,522	2,051	248,09	20,505	270,66	-270,66
2	2,224	0,222	2,447	0,989	119,73	9,895	130,61	-130,61
3	-0,6631	0,0663	-0,7295	0,088	10,642	0,8795	11,61	-11,61
4	0,5029	0,0503	0,5531	0,051	6,12	0,506	6,677	-6,676
5	0,4943	0,0494	0,5437	0,049	5,919	0,489	6,45	-6,45
6	0,2515	0,0252	0,2767	0,01273	1,531	0,1265	1,67	-1,67
Σ				3,24	391,61	32,40	427,25	-427,68

Миттєві значення гармонік напруги тиристора для значення $p = 0,25$ дорівнюють:

$$U_{T0} = -76,846 \text{ В};$$

$$u_{T1}(t) = 155,901 \sin(\omega t + 8,301^\circ) \text{ В};$$

$$u_{T2}(t) = 75,495 \sin(2\omega t + 73,675^\circ) \text{ В};$$

$$u_{T3}(t) = 22,508 \sin(3\omega t) \text{ В};$$

$$u_{T4}(t) = 17,067 \sin(4\omega t + 5,912^\circ) \text{ В};$$

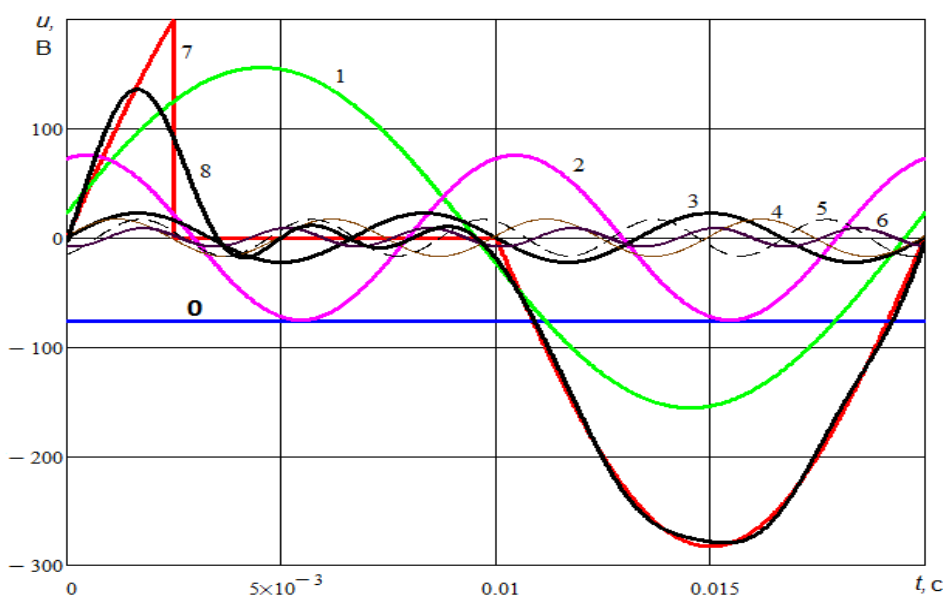
$$u_{T5}(t) = 16,776 \sin(5\omega t - 63,435^\circ) \text{ В};$$

$$u_{T6}(t) = 8,537 \sin(6\omega t - 102,302^\circ) \text{ В}.$$

Графіки часової зміни гармонік напруги тиристора $u_{T0} \div u_{T6}$, а також графіки фактичної (теоретичної) залежності напруги тиристора u_T та залежності напруги тиристора u_{TT} , як суми миттєвих

значень її перших шести гармонік з врахуванням постійної складової, зображені на рисунку 4.

Проаналізуємо, як впливає кількісний склад врахованих гармонік на точність розрахунку струмів і напруг. У таблиці 3 наведені діючі значення струмів і напруг, визначені через діючі значення їх гармонік до сьомої та одинадцятої включно. Як видно з таблиці 3, у разі врахування одинадцяти гармонік відносна різниця діючих значень струмів не перевищує 0,3%, а напруг – 1% порівняно з їх значеннями, визначеними з врахуванням семи гармонік.



0 – u_{T0} , 1 – u_{T1} , 2 – u_{T2} , 3 – u_{T3} , 4 – u_{T4} , 5 – u_{T5} , 6 – u_{T6} , 7 – u_T , 8 – u_{TT}

Рисунок 4 – Графіки зміни в часі напруги тиристора та її гармонік для значення $p = 0,25$

Таблиця 3 – Діючі значення струмів I, I_a, I_b і напруг U_T, U_a, U_b для значення $p = 0,25$

I, A		I_a, A		$I_b = I_T, A$		U_T, B		U_a, B	U_b, B
$I_{(7)}$	$I_{(11)}$	$I_{a(7)}$	$I_{a(11)}$	$I_{T(7)}$	$I_{T(11)}$	$U_{T(7)}$	$U_{T(11)}$	$U_{a(7)}$	$U_{b(7)}$
14,379	14,3873	9,6298	9,6299	6,1236	6,1474	145,58	147,05	192,5965	122,4714

Аналіз потоків енергії в системі електропостачання

Активна потужність потоків

Комплексна та активна потужності джерела ЕРС, від якого в коло поступає основний потік енергії з системою напруг і струмів основної частоти, відповідно дорівнюють:

$$S_{e1} = EI_1^* = 3033,4 + j145,86 \text{ ВА}; P_{e1} = 3033,4 \text{ Вт.}$$

Активна потужність частини основного потоку енергії, яку споживають приймачі та яка втрачається в лінії на частоті першої гармоніки струму,

$$P_{n1} = P_{a1} + P_{b1} + P_{r1} = 2590,5 \text{ Вт.}$$

Комплексне значення потужності першої гармоніки тиристора

$S_{T1} = U_{T1} \cdot I_{T1}^* = P_{T1} + jQ_{T1} = 442,9 + j145,86 \text{ ВА}$ показує, що іншу частину активної потужності основного потоку енергії тиристор перетворює і повертає назад у коло вторинним потоком енергії, який складається з потоків енергії нульової та вищих гармонік, тобто тиристор є генератором цих гармонік. Потужність тиристора можна враховувати зі знаком «плюс», розглядаючи його як приймач електричної енергії основного потоку, чи зі знаком «мінус», оскільки він одночасно є генератором напруг і струмів вторинного потоку.

Сумарна активна потужність, яка споживається на основній частоті електроприймачами, втрачається в лінії та перетворюється тиристором, дорівнює активній потужності джерела живлення:

$$P_{e1} = P_{n1} + P_{T1} = 3033,4 \text{ Вт.}$$

Енергію вторинного потоку також споживають електроприймачі на частотах відповідних гармонік (за винятком основної) у вигляді додаткових втрат активної потужності. У разі врахування гармонік до шостої включно одержимо:

$P_{n(6)} = P_{n0} + P_{n2} + P_{n3} + P_{n4} + P_{n5} + P_{n6} = 427,7 \text{ Вт}$, а якщо врахувати гармоніки до десятої включно, то $P_{n(10)} = 434,2 \text{ Вт}$, тобто точність розрахунку підвищується на 1,5%. Решта потужності

вторинного потоку (8,7 Вт) споживається в колі на гармоніках більш високого порядку.

Сумарна потужність, яка споживається в колі на частотах перших семи гармонік з врахуванням основної, $P_{n(7)} = P_{n0} + P_{n1} + P_{n2} + P_{n3} + P_{n4} + P_{n5} + P_{n6} = 3018 \text{ Вт}$, а у разі врахування одинадцяти гармонік одержимо $P_{n(11)} = 3024,6 \text{ Вт}$, тобто точність розрахунку підвищиться всього на 0,25%.

Таким чином, у випадку врахування одинадцяти гармонік відносна різниця між діючими значеннями струмів і напруг, а також потужностей не перевищує 1% порівняно з їх значеннями, одержаними у разі врахування семи гармонік. Отже, в нашому випадку з достатньою для практичних розрахунків точністю можна обмежитись врахуванням перших 6-7 гармонік.

Повна і реактивна потужності та потужність спотворення

Розрахунки показують, що в нелінійному колі з синусоїдним джерелом живлення у загальному випадку, навіть за відсутності в колі індуктивних і ємнісних приймачів, перша гармоніка струму джерела живлення не збігається за фазою з синусоїдною ЕРС джерела. У нашому випадку кут зсуву фаз φ_1 додатний і в інтервалі $0 < p < 0,55$ зростає з ростом параметра p (рисунок 5). У результаті джерело живлення генерує реактивну потужність, яка за значення $p = 0,25$ дорівнює $Q_{e1} = E I_1 \sin(\varphi_1) = 145,86 \text{ вар}$. Відзначимо, що в колі з ідеальним діодом і синусоїдним джерелом живлення перші гармоніки струму і ЕРС джерела живлення збігаються за фазою і джерело живлення не генерує на першій гармоніці реактивну потужність [8].

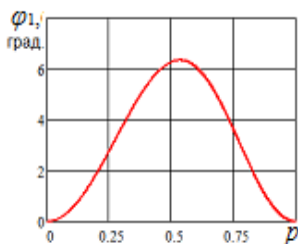


Рисунок 5 – Залежність кута зсуву фаз між ЕРС і струмом I_1 джерела живлення від параметра p

Перша гармоніка струму тиристора також відстає за фазою від його першої гармоніки напруги, а реактивна потужність тиристора дорівнює реактивній потужності першої гармоніки джерела ЕРС

$$Q_T = Q_{T1} = Q_{e1} = 145,86 \text{ вар,}$$

тобто на першій гармоніці баланс реактивних потужностей забезпечується.

Повна потужність джерела живлення з врахуванням перших семи гармонік

$S_{e(7)} = EI = E\sqrt{I_0^2 + I_1^2 + I_2^2 + I_3^2 + I_4^2 + I_5^2 + I_6^2} = 3163,3 \text{ ВА}$, а з врахуванням одинадцяти гармонік $S_{e(11)} = 3165,2 \text{ ВА}$, тобто точність розрахунку підвищується незначно.

Повну потужність синусоїдного джерела живлення за наявності нелінійних електроприймачів у загальному випадку можна представити рівнянням [5]

$$S = EI = E\sqrt{\sum_0^{\infty} I_k^2} = \sqrt{P_e^2 + Q_e^2 + T_e^2}$$

де: $P_e = EI_1 \cos(\varphi_1)$ – активна потужність джерела, яка дорівнює середньому значенню потужності за період;

$Q_e = EI_1 \sin(\varphi_1)$ – реактивна потужність зсуву джерела, зумовлена зсувом фаз між ЕРС і першою гармонікою струму джерела, що має місце за наявності в колі реактивних елементів, а також зсувом фаз між ЕРС і першою гармонікою струму джерела, який виникає внаслідок перетворюючої дії нелінійних елементів;

$$T_e = E \sum_0^{\infty} I_k^2 \quad (k \neq 1) \quad \text{– потужність}$$

спотворення, яка виникає в результаті спотворення кривої струму відносно синусоїдної кривої ЕРС, при цьому постійна

складова розглядається як гармоніка з нульовою частотою і зсувом фаз

$$\varphi_0 = 0.$$

Оскільки у колі, що розглядається, всі приймачі чисто резистивні, то всі гармоніки струмів приймачів збігаються за фазою з відповідними гармоніками напруг; коливання енергії між джерелом і приймачами відсутні, тому перша складова реактивної потужності зсуву з цієї причини відсутня. Проте тиристор перетворює частину енергії джерела і повертає її назад у коло у вигляді вторинного потоку. При цьому виникає зсув фаз між першою гармонікою струму та ЕРС джерела живлення і з'являється друга складова реактивної потужності зсуву джерела.

Обидві складові реактивної потужності зсуву Q_e і потужність спотворення T_e відрізняються за природою, але однаково впливають на повну потужність і коефіцієнт потужності, що є підставою розглядати їх як складові повної (сумарної) реактивної потужності

$$D_e = \sqrt{Q_e^2 + T_e^2},$$

де Q_e – реактивна потужність зсуву, зумовлена наявністю індуктивних і/чи ємнісних електроприймачів та зсувом фаз між першою гармонікою струму і ЕРС джерела внаслідок дії нелінійних елементів;

T_e – так звана реактивна потужність спотворення, зумовлена генерацією нелінійними елементами гармонік, відмінних від основної.

Обґрунтованість такого визначення реактивної потужності підтверджує той факт, що в основу алгоритму вимірювання реактивної потужності електронними лічильниками покладено [6] співвідношення

$$D_e = \sqrt{S_e^2 - P_e^2} = \sqrt{(EI)^2 - P_e^2}. \quad \text{Споживачі}$$

розраховуються з електропостачальником за спожиту активну електроенергію та за перетікання повної реактивної електроенергії, у тому числі за перетікання реактивної електроенергії спотворення, навіть за відсутності реактивного навантаження. Тому для споживачів важливо обмежити рівень вищих гармонік за допомогою спеціальних заходів.

У нашому випадку реактивна потужність спотворення джерела живлення з врахуванням

перших семи гармонік
 $T_{e(7)} = \sqrt{S_{e(7)}^2 - P_e^2 - Q_e^2} = 885,5$ вар, а у разі
 врахування одинадцяти гармонік $T_{e(11)} = 892,2$
 ВАр.

Повна реактивна потужність джерела
 живлення у разі врахування перших семи й
 одинадцяти гармонік відповідно дорівнює:

$$D_{e(7)} = \sqrt{Q_e^2 + T_{e(7)}^2} = 897,5 \text{ вар};$$

$$D_{e(11)} = \sqrt{Q_e^2 + T_{e(11)}^2} = 903,9 \text{ вар},$$

а повна потужність джерела:

$$S_{e(7)} = \sqrt{P_e^2 + D_{e(7)}^2} = 3163,3 \text{ ВА},$$

$$S_{e(11)} = \sqrt{P_e^2 + D_{e(11)}^2} = 3165,2 \text{ ВА}.$$

Комплексна потужність першої гармоніки
 тиристора $S_{T1} = U_{T1} I_{T1}^* = P_{T1} + jQ_{T1} = 442,9 + j145$,
 $86 \text{ В} \cdot \text{А} = 466,3 \text{ ехр } 18,23^\circ \text{ В} \cdot \text{А}$.

Тиристор перетворює частину енергії
 джерела ЕРС і повертає її назад у коло у вигляді
 вторинного потоку енергії, потужність якого
 дорівнює дійсній частині комплексної
 потужності тиристора $P_T = P_{T1} = 442,9$ Вт.
 Реактивна потужність тиристора дорівнює
 реактивній потужності першої гармоніки
 джерела живлення $Q_T = Q_{e1} = 145,86$ вар. У той
 же час тиристор не споживає електричну
 енергію з кола, тобто ідеальний тиристор можна
 розглядати як чисто реактивний елемент.

Повна потужність, реактивна потужність
 спотворення та повна реактивна потужність
 тиристора у разі врахування перших семи
 гармонік відповідно дорівнюють:

$$S_{T(7)} = U_{T(7)} I_{T(7)} = 897,6 \text{ ВА};$$

$$T_{T(7)} = \sqrt{S_{T(7)}^2 - P_T^2 - Q_T^2} = 767 \text{ ВА};$$

$$D_{T(7)} = \sqrt{Q_T^2 + T_{T(7)}^2} = 780,7 \text{ ВА},$$

а у разі врахування одинадцяти гармонік
 одержимо:

$$S_{T(11)} = U_{T(11)} I_{T(11)} = 904 \text{ ВА};$$

$$T_{T(11)} = \sqrt{S_{T(11)}^2 - P_T^2 - Q_T^2} = 774,4 \text{ ВА};$$

$$D_{T(11)} = \sqrt{Q_T^2 + T_{T(11)}^2} = 788 \text{ ВА}.$$

Зауважимо, що повна потужність
 тиристора дорівнює повній реактивній
 потужності джерела живлення $S_T = D_e$.

Активна потужність, яка споживається в
 колі від синусоїдного джерела живлення,

визначається лише першою гармонікою струму і
 може бути представлена у вигляді:

$$P_e = E I_1 \cos(\varphi_1) =$$

$$EI \frac{I_1}{I} = EI k_\phi \cos(\varphi_1) = EI \cos(\theta),$$

де $k_\phi = I_1/I$ – коефіцієнт спотворення кривої
 струму; $\cos(\theta)$ – еквівалентний коефіцієнт
 потужності.

З ростом постійної складової та амплітуд
 вищих гармонік струму коефіцієнт спотворення
 зменшується, що призводить до зниження
 еквівалентного коефіцієнта потужності джерела
 живлення порівняно з випадком, коли за такого
 ж діючого значення струм є синусоїдний.
 Коефіцієнт спотворення струму джерела
 живлення можна використовувати для
 характеристики впливу гармонік вторинного
 потоку енергії на його еквівалентний коефіцієнт
 потужності.

Постійна складова та амплітуди вищих
 гармонік джерела живлення пропорційні
 амплітудам відповідних гармонік напруги
 тиристора. Найбільший вплив на коефіцієнт
 спотворення струму та відповідно на
 еквівалентний коефіцієнт потужності, має друга
 гармоніка напруги тиристора, амплітуда якої за
 $p = 0,25$ більше як утричі перевищує амплітуду
 наступної третьої гармоніки. Зі зміною
 параметра p амплітуда гармонік змінюється, але
 в діапазоні $0 < p < 0,5$ друга гармоніка напруги
 тиристора за амплітудою значно переважає інші
 вищі гармоніки (рисунок 6). У випадку
 симетричної трифазної системи
 електропостачання друга гармоніка утворює
 симетричні системи напруг і струмів зворотної
 послідовності, зменшуючи обертовий момент
 електродвигунів та підвищуючи втрати в них. З
 метою підвищення коефіцієнта потужності та
 зменшення втрат електроенергії при роботі в
 цьому діапазоні необхідно вживати заходи щодо
 зменшення, в першу чергу, другої гармоніки
 напруги. Одночасно це дозволить зменшити
 втрати електроенергії в лініях живлення
 споживачів.

Зниження рівня вищих гармонік в
 електропостачальних системах можна
 забезпечити шляхом застосування схемних
 рішень, наприклад, незалежним живленням
 нелінійних електроприймачів від різних секцій
 шин розподільних пристроїв або від різних віток
 зведеного реактора, а також застосуванням

шунтових резонансних фільтрів вищих гармонік (фільтрокомпенсувальних пристроїв), які на основній частоті одночасно виконують функцію компенсації реактивної потужності, а на інших частотах відфільтровують струми вищих гармонік, найбільш виражені в їх амплітудному спектрі. Крім того, можна застосувати активні фільтри, які компенсують реактивну складову струму першої гармоніки та вищі гармоніки струму навантаження. З метою обмеження рівня вищих гармонік в електропостачальних системах потрібно на законодавчому рівні зобов'язати виробників електротехнічної продукції комплектувати свої вироби фільтрами вищих гармонік. Компенсацію реактивної потужності потрібно здійснювати на частоті основної (першої) гармоніки. Для цього електронні лічильники обліку електроенергії повинні фіксувати реактивну потужність на основній частоті.

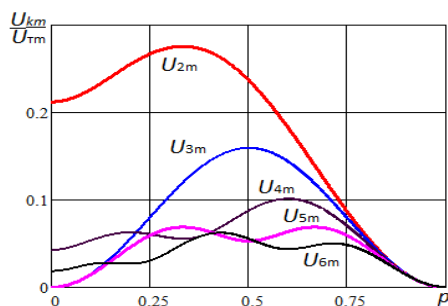


Рисунок 6 – Графічні залежності відносних значень амплітуд 2, 3, 4, 5, 6 гармонік напруги тиристора від параметра p

Під час аналізу енергетичних потоків у колах періодичного несинусоїдного струму несинусоїдні напруги можна замінити еквівалентними їм синусоїдами основної частоти, діючі значення яких дорівнюють діючим значенням відповідних несинусоїдних величин, а умовний кут зсуву фаз φ_e між еквівалентними синусоїдами струму і напруги приймають таким, щоб активна потужність, яка споживається колом, дорівнювала активній потужності несинусоїдного струму, тобто цей кут визначають з виразу $\cos(\varphi_e) = P/S = P/EI$.

У випадку чотирипровідного трифазного кола за наявності нелінійних електроприймачів через нульовий провід додатково протікають струми гармонік, кратних трьом, що утворюють симетричні системи нульової послідовності. Ці струми накладаються на струм першої

гармоніки, зумовлений несиметрією навантаження фаз, яке має місце в низьковольтних мережах. У результаті діюче значення струму в нейтральному проводі може значно перевищувати лінійні струми, що необхідно враховувати під час розрахунку сумарних втрат потужності та виборі перерізу нульового проводу.

У нашому випадку (для значень $U_{tm} = 282,84$ В і $p = 0,25$) діюче значення додаткового струму в нульовому проводі лінії живлення

$$I_N = 3 \sqrt{I_0^2 + I_3^2 + I_6^2} = 9,84 \text{ А,}$$

а його відносне значення порівняно зі значеннями лінійних струмів, навіть у випадку симетричного навантаження, становить $I_N/I = 0,68$, а в колі з тиристором це відношення становить $I_N/I_b = 1,77$.

З метою зниження втрат від струмів нульової послідовності потрібно збільшити переріз нульового проводу або використати фільтри нульової послідовності.

Висновки

1. Розрахунковим шляхом показано, що у колі з тиристорним перетворювачем і активним навантаженням, навіть за відсутності індуктивних і ємнісних елементів, на відміну від кола з діодами, споживається не тільки реактивна потужність спотворення, зумовлена вищими гармоніками та постійною складовою струму, а й реактивна потужність зсуву, зумовлена першою гармонікою струму, що призводить до збільшення повної потужності та зниження коефіцієнта потужності.

2. З метою підвищення коефіцієнта потужності навантаження і зменшення втрат потужності потрібно компенсувати тільки складову реактивної потужності, зумовлену першою (основною) гармонікою струму. Для цього електронні лічильники обліку електроенергії повинні фіксувати, крім повної реактивної потужності, також реактивну потужність зсуву.

3. Показано, що в електропостачальній системі з тиристорними перетворювачами напруги з достатньою для практичних розрахунків точністю можна обмежитись врахуванням перших шести – семи гармонік.

4. Тиристри можна розглядати як індуктивні елементи, які споживають реактивну

потужність, так як кути зсуву фаз між першими гармоніками струму та ЕРС джерела живлення трифазної системи залишаються додатними в усьому діапазоні зміни кута керування тиристорів.

5. Проаналізовано вплив кута керування тиристорів на зміну відносних значень амплітуд вищих гармонік напруги. Показано, що найбільш виражена в амплітудному спектрі гармонік є друга гармоніка, яку потрібно компенсувати в першу чергу.

6. Запропоновані практичні заходи щодо обмеження рівня вищих гармонік та підвищення ефективності передачі електроенергії.

Список використаних джерел

1. ГОСТ 13109-97. Нормы качества электрической энергии в системах общего назначения. Київ: Госстандарт Украины, 1997.
2. Власюк Н. Искажения в электросети с нелинейной нагрузкой – новая проблема энергетиков. *Электрик*. 2012. № 7. С. 46-49, № 8. С. 62-65.
3. Перхач В.С. Теоретична електротехніка: лінійні кола. Київ: Вища школа, 1992. 439 с.
4. Жежеленко И.В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий. М.: Энергоатомиздат, 2000. 160 с.
5. Сегеда М.С. Электричні мережі та системи: підручник. Львів: Вдавництво Львівської політехніки, 2015. 540 с.
6. Шидловский А.К., Жаркин А.Ф. Высшие гармоники в низковольтных электрических сетях. К.: Наукова Думка, 2005. 211 с.
7. Соломчак О.В., Гладь І.В. Проблеми розрахунку та компенсації реактивної потужності в мережах з несинусоїдним

(нелінійним) навантаженням. *Енергетика і електрифікація*. 2008. № 6. С. 27-32.

8. Грабчук Б.Л., Романюк Ю.Ф. Аналіз потоків енергії в системах електропостачання з нелінійними приймачам. *Методи та прилади контролю якості*. 2019. № 1 (42). С. 56-64.

References

1. GOST 13109-97. Normy kachestva elektricheskoy energii v sistemah obshchego naznacheniya. K: Gosstandart Ukraini, 1997. [in Russian]
2. Vlasyuk N. Iskazheniya v elektroseti s nelineynoy nagruzkoy – novaya problema energetikov. *Elektrik*. 2012. No 7. P. 46-49, No 8. P. 62-65. [in Russian]
3. Perkhach V.S. Teoretychna elektrotehnika: liniini kola. Kyiv: Vyscha shkola, 1992. 439 s. [in Ukrainian]
4. Zhezhelenko Y.V. Visshye harmonyky v sistemakh elektrosnabzheniya prompredpriyatiy. M.: enerhoatomyzdat, 2000. 160 p. [in Russian]
5. Sehedo M.S. Elektrychni merezhi ta systemy: pidruchnyk. Lviv: Vdavnytstvo Lvivskoi politekhniki, 2015. 540 p. [in Ukrainian]
6. Shidlovskiy A.K., Zharkin A.F. Vyisshie garmoniki v nizkovoltnyih elektricheskikh setyah. K.: Naukova Dumka, 2005. 211 p. [in Russian]
7. Solomchak O.V., Glad I.V. Problemy rozrakhunku ta kompensakii reaktivnoi potuzhnosti v merezhakh z nesynusoidnym (neliniynym) navantazhenniam. *Enerhetyka i elektryfikatsiia*. 2008. No 6. P. 27-32. [in Ukrainian]
8. Hrabchuk B.L., Romaniuk Yu.F. Analiz potokiv enerhii v sistemakh elektropostachannia z neliniinymy pryimacham. *Metody ta pryklady kontroliu yakosti*. 2019. No 1 (42). P. 56-64. [in Ukrainian]