

## СТАБІЛІЗАЦІЯ АМПЛІТУДИ СТРУМУ ДРУГОЇ ГАРМОНІКИ В ЗАХИСТІ ВІД ОБРИВУ ПРОВОДІВ ПЛ 0,38 кВ

Кобазев В.П., Смірнова М. О.

Донецький національний технічний університет  
c12@elf.dgtu.donetsk.ua

*The task of the protection improvement from wires break of overhead transmission line with voltage 0,38 kV is considered. The protection is founded on superposition of three-phase currents system of second harmonic on the transmission line with the help of sources, included in the end. The schemes of oneseperiod rectification are used as sources. The analysis of transmission line load on currents symmetry of these sources is shown. A scheme of second harmonic current source with stabilization of his amplitude is offered. The correlations for calculation of its parameters are shown. It is shown minimum current deviations will be at the stabilization voltage equal 280 V.*

**Постановка задачі.** Найбільш досконалий пристрій контролю обриву проводів ПЛ 0,38 кВ, який заснований на накладенні на лінію симетричної системи контрольних струмів непромислової частоти джерелами, що включені в кінці між кожним фазним проводом і землею [1]. Струми непромислової частоти створюються схемою однопівперіодного випрямлення. Фаза і рівень другої гармоніки, що генеруються цими схемами, залежать від прикладеної напруги, тому необхідний аналіз впливу на них режиму навантаження лінії.

**Аналіз останніх досліджень.** В [2] приймається для ПЛ 0,38 кВ розрахункова втрата напруги  $\Delta U_{0,38} = 8\%$ . Потім за допомогою ЕОМ для великої кількості типових ліній, схеми і розрахункові навантаження яких приймалися за даними інституту "Сельенергопроект", було отримано усічений нормальний статистичний розподіл втрат напруги в повітряних лініях 0,38 кВ сільськогосподарського призначення. Параметри кривої розподілу мають наступні значення: математичне очікування  $\Delta U_{0,38} = 3,5\%$ , дисперсія  $\sigma_{0,38} = 4,5\%$ . За правилом трьох сигм втрата напруги у ПЛ 0,38 кВ практично не перевищує 17%. Якщо врахувати, що втрата напруги у внутрішній електропроводці будинків становить 1-2%, то на зовнішню мережу залишається не більше 15-16%. Однак в захисті [1] непередбачена стабілізація параметрів джерела струму другої гармоніки.

**Задача досліджень.** Виконати аналіз впливу навантаження ПЛ 0,38 кВ на роботу джерела контрольного струму захисту ПЛ 0,38 кВ від обриву проводів. Розробити стабілізатор амплітуди струму другої гармоніки.

**Виклад основного матеріалу.** До лінії напругою 0,38 кВ підключаються однофазні навантаження, тому навіть при рівномірному розподілі максимальних навантажень по фазах можуть фактично зустрічатися комбінації із симетричним і несиметричним розподілом навантажень по фазах. Кожної комбінації при біноміальному розподілі відповідає певна ймовірність її появи:

$$P_m^{n1, n2, n3} = C_{n1}^{m/3} C_{n2}^{m/3} C_{n3}^{m/3} p^n (1-p)^{m-n}, \quad (1)$$

де  $m$  – загальна кількість споживачів;  $n1, n2, n3$  – кількість споживачів, приєднаних до першої (А), другої (В) і третьої (С) фазам;  $n = n1+n2+n3$  – загальна кількість включених споживачів;  $C_n^m$  – кількість сполучень із  $m$  по  $n$ ;  $p$  – ймовірність включення кожного споживача.

Якщо кожному режиму лінії відповідає певна комбінація розподілу включених навантажень по фазах, то з (1) може бути знайдена ймовірність відповідного режиму. Приймавши навантаження на вводу в будинок 1000 В·А при передачі по лінії потужності 100 кВт за формулою (1) знайдемо чисельні значення ймовірності режимів граничної передачі електроенергії. Для прийнятих вихідних даних ймовірність появи максимального навантаження в одній або двох або трьох фазах мізерно мала і відповідно дорівнює  $p_1=3 \cdot 10^{-66}$ ,  $p_2=3 \cdot 10^{-132}$ ,  $p_3=10^{-200}$ . Виділення із усього різноманіття режимів трьох згаданих режимів варто вважати правомірним при аналізі впливу навантаження повітряної лінії на захист від обриву проводів. Далі оцінку поведінки пристрою захисту розглянемо для випадку однофазного максимального навантаження лінії.

Прийmemo наступні допущення: до лінії підключені тільки однофазні навантаження, що рівномірно розподілені по фазах (трифазні електродвигуни відсутні); трифазну напругу на початку лінії прийmemo симетричною; максимальна втрата напруги в лінії складає – 16%.

Для розрахунку параметрів режиму скористаємося однофазною схемою заміщення лінії, яка містить послідовно з'єднані повні опори фазного і нульового проводів. На рис.1 приведена векторна діаграма напруг і струмів ПЛ 0,38 кВ при максимальному однофазному навантаженні.

На рис. 1 прийняті наступні позначення:  $O_c = U_1$  – вектор фазної напруги на початку лінії;  $O_a = U_2$  – вектор фазної напруги наприкінці лінії;  $I_2$  – вектор струму навантаження;  $\cos \varphi_2$  - коефіцієнт потужності навантаження;  $ab = I_2 R_0 L$  – вектор падіння напруги на активному опорі лінії;  $bc = I_2 X_0 L$  – вектор падіння напруги на індуктивному опорі лінії;  $O_d = U_n$  - вектор напруги між фазним проводом і землею наприкінці лінії.

Визначення напруг між фазними проводами і землею наприкінці повітряної лінії дозволяє розрахувати контрольні струми джерел. Як відомо, зв'язок напруг початку і кінця лінії описується співвідношенням:

$$\dot{U}_1 = U_2 + I_2 R_0 L + j I_2 X_0 L \quad (2)$$

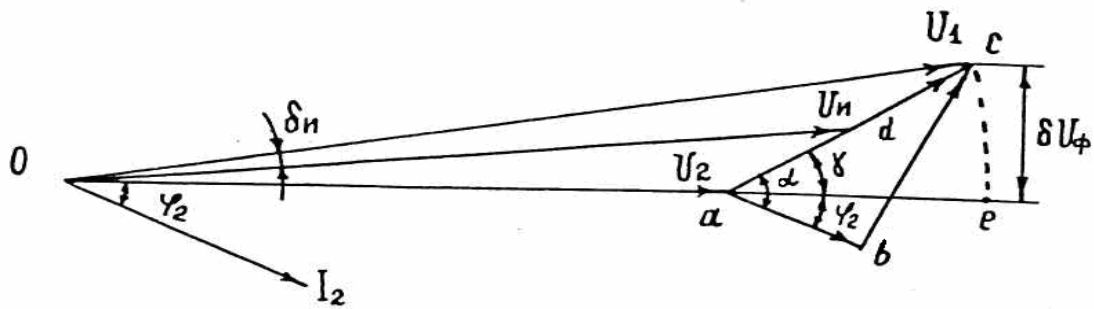


Рисунок 1 – Векторна діаграма напруг і струмів ПЛ 0,38 кВ

Із  $\Delta abc$  визначимо кут повного опору лінії:

$$\alpha = \arctg(ab / bc) = \arctg(R_0 / X_0) . \quad (3)$$

Кут  $\gamma$  дорівнює:  $\gamma = \alpha - \varphi_2$ .

$$(4)$$

Напруга наприкінці лінії визначимо за формулою:  $U_2 \cong U_1 - \Delta U_{0,38}$ .

За теоремою косинусів для  $\Delta aOc$  можна отримати рівняння:

$$U_1^2 = U_2^2 + \Delta U^2 + 2\Delta U \cdot U_2 \cos(180^\circ - \gamma) .$$

Вирішивши це рівняння відносно  $\Delta U$ , одержимо формулу для обчислення падіння напруги в лінії:

$$\Delta U = -U_2 \cos \gamma + \sqrt{U_2^2 \cos^2 \gamma + U_1^2 - U_2^2} . \quad (5)$$

Перерізи фазного і нульового проводів для ліній, що живлять комунально-побутове навантаження, однакові, тому падіння напруги на повному опорі фазного і нульового проводів виявляться однаковими за величиною і по фазою. З'єднавши середину відрізка  $ac$  (точка  $d$ ) з початком вектора  $U_2$  (точка  $O$ ), одержимо вектор напруги  $U_u$  між навантаженим фазним проводом і землею (нульовою точкою трансформатора) наприкінці лінії, що дорівнює напрузі на джерелі контрольного струму навантаженої фази  $A$ .

З  $\Delta aOc$  одержимо співвідношення для розрахунку кута зсуву вектора  $U_u$  щодо напруги  $U_1$ :

$$\delta_u = 0,5 \arcsin(\Delta U \sin \gamma / U_1) \quad (6)$$

Напругу на джерелі струму другої гармоніки визначимо з  $\Delta aOd$ :

$$U_u = \sqrt{U_2^2 + (0,5\Delta U)^2 + U_2\Delta U \cos \gamma} . \quad (7)$$

Подальший аналіз проведемо для найбільше що часто зустрічаються в повітряних мережах 0,38 кВ перерізів проводів 16, 25, 35, 50  $\text{мм}^2$ .

Для ліній з комунально-побутовим навантаженням при середньозваженому  $\cos \varphi_{2\text{св}} = 0,98 \div 1$  протягом доби його миттєва фактична величина коливається від 0,8 до 0,95. У цьому випадку при аналізі роботи захисту доцільно враховувати навіть короточасні зміни напруги, а отже, і короточасні зміни  $\cos \varphi_2$ .

Задавшись максимально можливою втратою напруги  $\Delta U_{0,38}$ , для кожного перерізу проводу при різних значеннях  $\cos \varphi_2$  за формулами (3) ÷ (7) були обчислені кути  $\delta_u$  і напруги  $U_u$ . Результати розрахунків при практично незмінному  $U_u \cong 212,7\text{В}$  такі: для  $\cos \varphi_2 = 0,8$  маємо  $-1,996^\circ \div -0,444^\circ$ ;  $\cos \varphi_2 = 0,95$  маємо  $-0,471^\circ \div -1,02^\circ$ ;

При однофазному навантаженні фази  $A$  напруги фаз  $B$  і  $C$  щодо нульової точки трансформатора в будь-якому місці лінії рівні за величиною і зсунути за фазою на кут  $120^\circ$ . Напруга між проводом фази  $A$  і нульовою точкою трансформатора змінюється по довжині лінії. На початку лінії воно дорівнює напрузі фаз  $B$  і  $C$  і зсунуто щодо них  $\pm 120^\circ$ , а в кінці лінії воно менше на величину падіння напруги у фазному проводі і зсунуто щодо початкового положення на кут  $\delta_u$ .

Сполучаємо вектор напруги фази  $A$  на початку лінії з віссю уявних чисел. Тоді векторна діаграма напруг, прикладених до джерела контрольного струму, розташується щодо системи прямокутних координат відповідно рис. 2,а.

Струми небалансу і корисні сигнали на частоті другої гармоніки, що діють на датчик пристрою захисту, можна визначити з векторної діаграми контрольних струмів, що протікають у фазних проводах згідно рис. 2,б.

Для схеми однопівперіодного випрямлення фаза і амплітуда струму другої гармоніки жорстко пов'язана із прикладеною напругою до її затисків. З рис. 2,б слідує, що кут зсуву між напругами фаз  $B$  і  $C$  становить  $120^\circ$ . Для зручності аналізу контрольний струм фази  $C$  був сполучений з позитивним напрямком вісі уявних чисел. Розташування контрольного струму фази  $A$  стосовно початку відліку залежить від кута  $\delta_u$ . Для струмів другої гармоніки кут між струмами фаз  $A$  і  $C$  дорівнює  $120^\circ - 2\delta_u$ , і між струмами фаз  $A$  і  $B$  –  $120^\circ + 2\delta_u$ .

З векторної діаграми струмів рис. 2,а визначимо такі сигнали.

Величина перешкоди (струм небалансу) при справній лінії:

$$I_{нб} = \sqrt{I_B^2 + I_A^2 + 2I_B I_A \cos 2\delta_u} . \quad (8)$$

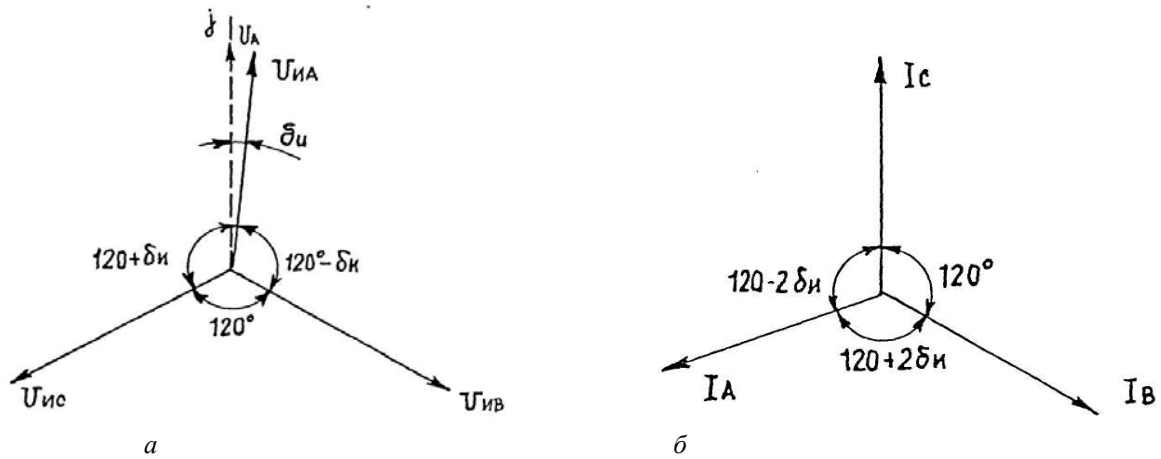


Рисунок 2 - Векторні діаграми: а – напруг на затискачах джерел струму 100 Гц, б - контрольних струмів 100 Гц

Корисний сигнал при обриві проводу фази В:

$$I_{\Sigma B} = \sqrt{I_A^2 + I_C^2 + 2I_A I_C \cos(60^\circ + 2\delta_u)}. \quad (9)$$

Корисний сигнал при обриві проводу фази С:

$$I_{\Sigma C} = \sqrt{I_A^2 + I_B^2 + 2I_A I_B \cos(60^\circ - 2\delta_u)}. \quad (10)$$

Корисний сигнал при обриві проводу фази А буде дорівнювати струму джерела:

$$I_{\Sigma A} = \sqrt{I_B^2 + I_C^2 + 2I_B I_C \cos(60^\circ)} = I_B = I_C. \quad (11)$$

Обрив двох проводів одразу приводить також до появи сигналу на виході датчика. Можливі одночасні обриви проводів у фазах А і В, В і С, А і С. При цьому на датчик пристрою захисту впливає одне із джерел контрольного струму, що залишилися в роботі, підключене відповідно до фази С або А, або В. Тому у випадку обриву двох фазних проводів можна отримати наступні вирази для корисних сигналів: при обриві проводів фаз А і В маємо  $I_{\Sigma AB} = I_C$ , при обриві проводів фаз В і С  $I_{\Sigma BC} = I_A$ , при обриві проводів фаз А і С  $I_{\Sigma AC} = I_B$ .

Розглянемо чисельні характеристики захисту від обриву проводів у режимі максимального однофазного навантаження. Для зручності аналізу результатів скористаємося відносними величинами контрольних струмів. При номінальній напрузі  $U_{ном} = 220\text{В}$  контрольний струм джерела, до якого ця напруга прикладена, приймається рівним одній відносній одиниці (в.о.). Тоді при будь-яких інших значеннях напруги  $U_n$  на джерелі контрольний струм виявиться рівним:  $I_{A2} = U_n / U_{i1}$ . Результати розрахунку сигналів про обрив за співвідношеннями (3) ÷ (11) при  $\cos\varphi = 1$  наведені в табл. 1

Таблиця 1 – Сигнали, що впливають на датчиком струму захисту при  $\cos\varphi = 1$

Перетин F, мм <sup>2</sup>	Кут $\delta_u$ , град	Струм, о.е. небалансу	Обрив фазного проводу		
			А $I_{\Sigma A}$ , о.е	В $I_{\Sigma B}$ , о.е	С $I_{\Sigma C}$ , о.е
16	0,732	0,081	1,045	1,03	0,0986
25	1,054	0,082	1,045	1,04	0,976
35	1,643	0,085	1,045	1,057	0,958
50	2,337	0,09	1,045	1,077	0,936

Результати розрахунку впливу режиму однофазного навантаження ПЛ 0,38 кВ на захист (табл. 1) показали, що при  $\cos\varphi = 1$  і перетині проводу 50 мм<sup>2</sup> струм небалансу (перешкода) у нормальному режимі максимальний і становить 9,0% номінального струму джерела. Якщо прийняти коефіцієнт чутливості захисту при номінальній напрузі рівним 2, то відносний струм спрацьовування захисту виявиться рівним  $I_c = 0,5\text{в.о.}$ . Стосовно цього струму для перерізу проводу 50 мм<sup>2</sup> струм небалансу становить 18,0%, тому можна зробити висновок про те, що захист при відсутності обриву проводу і максимальному струмі небалансу не буде спрацьовувати. Мінімальний коефіцієнт чутливості має місце при обриві фази С (проводом з перетином 50 мм<sup>2</sup>) і становить 1,872, що цілком задовольняє вимозі надійного спрацьовування захисту.

Шляхом розрахунку було також встановлено, що зсув за фазою між векторами напруг відносно землі в началі і на наприкінці лінії зростає при збільшенні перерізу проводу і досягає максимуму  $2,337^0$  при  $50 \text{ мм}^2$ , а напруга на джерелі струму другої гармоніки при цьому знижується на 17,3В.

Подальше зменшення рівня перешкоди захисту від обриву може бути досягнуто за рахунок стабілізації амплітуди струму другої гармоніки джерела контрольного струму. Для доцільно використання джерела зі стабілізацією амплітуди струму, який створює в проводах лінії контрольних струмів з однаковою амплітудою незалежно від навантаження лінії і її перетину.

Схема стабілізатора струму, що пропонується приведена на рис. 3,а. Діаграма струмів і напруг, що пояснює роботу схеми, наведена на рис. 3,б.

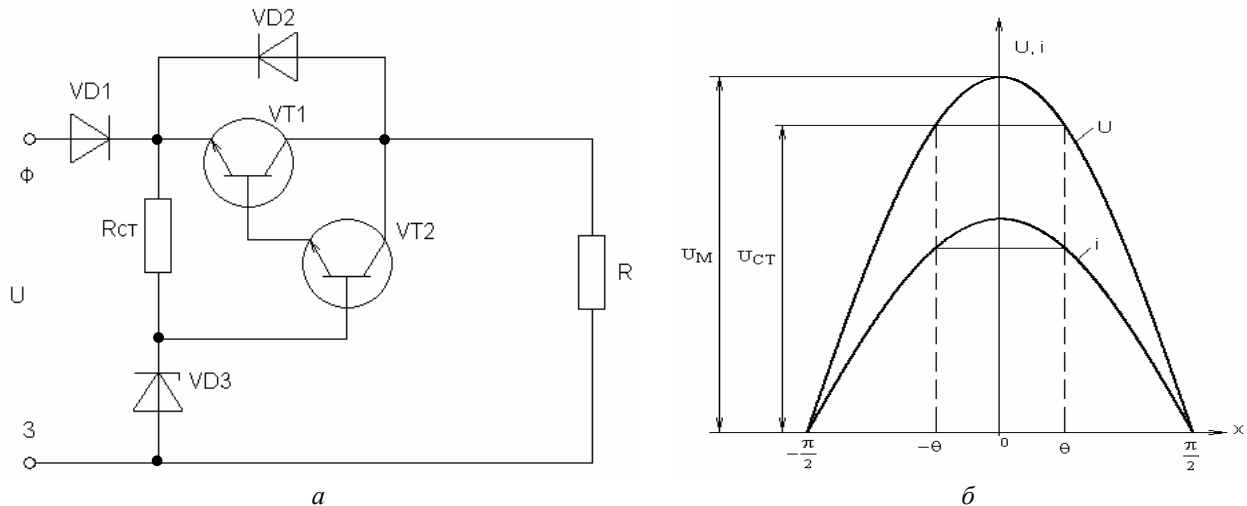


Рисунок 3 – Стабілізатор струму другої гармоніки: а – схема, б – діаграма напруг і струмів

Схема на рис. 3,а складається з параметричного стабілізатора із складеного транзистора VT1 і VT2, стабілітрону VD3, резистору  $R_{CT}$ , навантаження  $R$ . Діод VD2 захищає складений транзистор від пробую. Однопівперіодне випрямлення напруги здійснюється діодом VD1.

При невід'ємному півперіоді напруги діод VD1 відкритий, і схема виявляється підключеною до мережі. Результуючий струм визначається дією двох паралельних кіл: резистор  $R_{CT}$ , стабілітрон VD3 і складовий транзистор VT1, VT2, навантажувальний резистор  $R$ . Коли напруга  $U$  на затискачах досягне напруги стабілізації, стабілітрон відкриється і через нього потече струм  $i_{CT}$ .

Зі збільшенням напруги струм  $i_{CT}$  також збільшується, але напруга на базі складеного транзистора залишається незмінною. Тому при напрузі з  $U_M > U_{CT}$  на навантаженні  $R$  напруга буде незмінною по амплітуді, тому що збільшення напруги  $U$  викличе тільки подальше підвищення падіння напруги на регулюючому транзисторі VT1. Таким чином, до резистора  $R$  буде прикладена періодична трапецієподібна напруга, що створить у колі контролю фазного проводу лінії послідовність трапецієподібних імпульсів невід'ємної полярності з амплітудою  $U_{CT}/R$ . Струм, що протікає в колі стабілітрону VD3, малий і тому він не впливає на форму загального струму джерела. Це пояснюється тим, що у якості регульованого елемента використовується складений транзистор з великим коефіцієнтом підсилення, що дозволяє прийняти  $R_{CT}$  порядку 70 кОм, тобто в багато разів більше опору навантаження  $R$ , тому струм  $R_{CT}$  в подальшому не враховується.

При амплітуді напруги джерела з  $U_M < U_{CT}$  стабілітрон зачиняється, однак транзистор буде відкритий. У цьому режимі коло для протікання струму бази створюється тільки резистором  $R_{CT}$ . В результаті транзистор повністю відкривається, а на навантаження  $R$  надходять синусоїдальні невід'ємні півхвилі напруги мережі. У такому випадку схема працює так само, як схема випрямлення з діодом і резистором. Тому далі розглянемо тільки режим роботи схеми при  $U_M < U_{CT}$ .

Нехай до затискачів схеми на рис. 3,а буде прикладена напруга  $U = U_M \cos(\omega t)$ , тоді струм джерела струму другої гармоніки визначиться наступними співвідношеннями:

$$i_R(x) = \begin{cases} \frac{U_M \cos x}{R}, & \text{якщо } -\frac{\pi}{2} \leq x \leq \theta \text{ и } \theta \leq x \leq \frac{\pi}{2} \\ \frac{U_{CT}}{R}, & \text{якщо } -\theta \leq x \leq \theta \end{cases}$$

Кут  $\theta$  визначається за аналітичним виразом:  $\arccos(U_{CT}/U_M)$ .

Функція  $i_R(x)$  є парної, тому розкладається в ряд Фур'є тільки по косинусах. Коефіцієнт другої гармоніки струму виявляється таким:

$$I_{A2} = \frac{2U_M}{3\pi R} - \frac{U_M}{\pi R} \sin \theta + \frac{U_{CT}}{\pi R} \sin 2\theta - \frac{U_M}{3\pi R} \sin 3\theta. \quad (12)$$

При  $U_M = U_{CT}$  маємо кут  $\theta=0$ , схема на рис. 3,а функціонує аналогічно схемі з послідовним з'єднанням діода і резистора.

Напруга на транзистора, що регулює, дорівнює при  $-\theta \leq x \leq \theta$   $U_{VT} = U_M \cos x - U_{CT}$ , а в інших випадках нулю. Тому потужність, що виділяється в транзисторі можна розрахувати за виразом:

$$P_{VT} = \frac{I}{2\pi} \int_{-\theta}^{\theta} (U_M \cos x - U_{CT}) \frac{U_{CT}}{R} dx = \frac{I}{2\pi} (U_M U_{CT} \sin \theta - U_{CT}^2 \theta). \quad (13)$$

При виборі конкретного транзистора, крім потужності розсіювання необхідно знати ефективне значення випрямленого струму:

$$I_E = \sqrt{\frac{I}{\pi} \left[ \frac{U_M^2}{R^2} \left( \frac{\pi}{4} - \frac{\theta}{2} \sin \theta - \frac{1}{4} \sin \theta \right) + \frac{U_{CT}^2}{R^2} \theta \right]} \quad (14)$$

Потужність, що виділяється в опорі навантаження R при врахуванні співвідношення (14), дорівнює:

$$P_R = \frac{U_M^2}{\pi R} \left( \frac{\pi}{4} - \frac{\theta}{2} \sin 2\theta \right) + \frac{U_{CT}^2}{\pi R} \theta \quad (15)$$

Загальні втрати потужності дорівнює сумі складових, обумовлених по вираженнях (14) і (15):

$$P_{\Sigma} = P_{VT} + P_R. \quad (16)$$

Для розрахунку схеми стабілізації амплітуди струму другої гармоніки за формулами (12) – (16) була складена програма розрахунку, яка реалізована у середовищі додатка Matchcad.

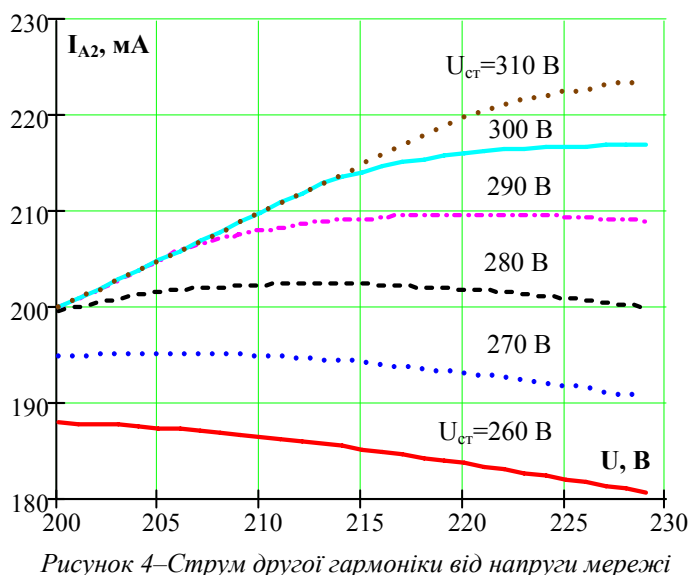


Рисунок 4—Струм другої гармоніки від напруги мережі

На рис. 4 приведені графіки залежності амплітуди струму другої гармоніки джерела від напруги, яка приложена до затискачів, при різних значеннях напруги стабілізації стабілітрона. Розрахунок виконувався при таких вихідних даних: напруга  $U$  змінювалася з 200В до 230В з кроком 1В, напруга стабілізації – з 260В до 310В з кроком 10 В, активне навантаження схеми 300 Ом. На рис. 4 струм приведений у мА.

З рис. 4 слідує, що найбільший рівень стабілізації амплітуди струму другої гармоніки досягається при напрузі стабілізації стабілітрона 280В. Аналіз результатів розрахунку струму  $I_{A2}$  при  $R=300$  Ом  $U_{CT}=280$  В при зміні напруги з 200В до 230В ( $\pm 7,5\%$  від середнього рівня 215В) показав, що струм другої гармоніки відхиляється від середнього рівня в напрямку збільшення на  $0,76\%$ , а в напрямку зменшення також на  $-0,76\%$ . Таким чином, схема джерела на рис. 3,а дозволяє зменшити вплив амплітуди напруги на

рівень контрольного струму в десять разів.

Крім амплітуди струму другої гармоніки розраховувалися також втрати потужності в складеному транзисторі VT1, VT2 і в резисторі навантаження R, а також ефективне значення випрямленого струму. Значення цього струму потрібно використовувати при виборі типу транзистора VT1. При зростанні напруги в резисторі втрати потужності знижуються з 65,1 Вт до 62,12 Вт, а в транзисторі втрати потужності зростають з 0,08Вт до 4,6 Вт. В той же час сумарні втрати потужності повільно зростають. Ефективний випрямлений струм схеми зростає практично за лінійним законом.

#### Висновки.

Отримано співвідношення для розрахунку параметрів стабілізатора струму 100 Гц .

Аналіз результатів розрахунку амплітуди струму другої гармоніки стабілізатора показав, що при зміні напруги на затискачах стабілізатора з 200В до 230В найменші зміни цього струму будуть при використанні стабілітрона з напругою стабілізації 280В.

Схема стабілізатора струму другої гармоніки, що запропонована, дозволяє знизити в десять разів зміну амплітуди струму 100 Гц по відношенню до схеми з послідовно з'єднаними діодом і резистором.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Кобазев В.П., Ткаченко А.А. Диагностика состояния проводов ВЛ 0,38.-Сборник трудов ДонГТУ. Серия «Электротехника и энергетика» выпуск 17.- Донецк: ДонГТУ, 2000.-С. 194 – 197.

2. Левин М.С., Мурадян А.Е., Сырых Н.Н. Качество энергии сельских районов.-М.:Энергия, 1975.-224 с.

Рекомендовано д.т.н. Гребченко М.В.