

Шевченко С. Ю.

АНАЛІЗ РЕЖИМУ РОБОТИ ОБМЕЖУВАЧІВ ПЕРЕНАПРУГ ЗА НАЯВНОСТІ ВПЛИВУ НЕСИНУСОЇДАЛЬНОЇ НАПРУГИ

В статті розглянуто роботу обмежувача перенапруг нелінійного в режимах квазістаціонарних перенапруг та виявлено, що подібна робота практично неможлива. Виконані розрахунки енергії, що розсіює обмежувач перенапруг нелінійний при дії напруги, в складі якої мають місце вищі гармоніки. Розрахунки проведені на базі вольт-амперної характеристики обмежувача перенапруг нелінійного, яка дозволяє визначити значення струмів за наявності в мережі напруги з вмістом гармонійних коливань.

Ключові слова: обмежувач перенапруг нелінійний, вольт-амперна характеристика, теплові режими, гармонійні коливання.

1. Вступ

Визначення режиму роботи обмежувачів перенапруг нелінійних (ОПН) при дії найбільш допустимої напруги мережі має велике значення при виборі цих захисних апаратів. ОПН повинен підтримувати в такому випадку тепловий баланс на протязі всього строку експлуатації. Розрахунок енергії, що виділяється в ОПН при протіканні по ньому струму витоку повинен враховувати електричні та фізичні властивості апарату. На перший погляд подібний розрахунок не викликає складнощів, однак детальний аналіз роботи ОПН в зоні струмів витоку вольт-амперної характеристики (ВАХ) показує, що режим роботи ОПН в цій зоні визначається не тільки діючою напругою та струмом, а й конструктивними та електрофізичними властивостями апарату. Крім того наявність гармонійних коливань в мережі суттєво спотворює напругу, яка діє на ОПН, що може призвести до протікання по ньому струмів набагато перевищуючих струм витоку, що призводить до росту активної потужності, яку розсіює ОПН та може викликати порушення його теплового режиму.

2. Аналіз публікацій та постановка проблеми

У більшості публікацій [1, 2] на тему визначення енергії, що поглинає ОПН в якості впливів приймають різноманітні імпульси напруги в мережі та не враховують, що найбільш тривалим режимом роботи є діюча напруга мережі. В перелічених роботах енергія, що діє на ОПН, визначається за допомогою аналізу форми імпульсу, що прикладуться до нього та не враховують впливи від найбільшої напруги мережі.

Усі нормативні документи та методичні вказівки виробників з вибору ОПН [3, 4] вказують на неможливість використання їх у електричних мережах з великим вмістом гармонійних коливань без будь-яких пояснень. Однак слід зазначити, що подібна теза потребує детальних пояснень. Сьогодні всі спеціалісти при виборі найбільшої допустимої напруги ОПН виходять з кривої напруга-час, яка наведена виробником ОПН.

Такий підхід є дуже спрощеним та може призводити до невірних рішень при виборі ОПН за наявності спотворень форми кривої напруги за наявності в мережі джерел виникнення гармонічних коливань. Статистика аварійності ОПН показує, що існує достатньо велика кількість випадків, близько 20 %, коли не можливо визначити що призвело до пошкодження ОПН.

У роботі [5] вивчення енергії, що розсіює ОПН проводиться за допомогою розрахунку перехідних процесів, що можливі у розглянутій мережі, однак таких підхід може давати набагато завищені значення потужності, що виділяється в місці встановлення ОПН. Такі значення отримані, тому що ОПН врахований спрощеною розрахунковою схемою, що призводить до суттєвої похибки при виконанні розрахунків. Крім того в цій роботі виконано аналіз імпульсних впливів та ніяк не розглянуто дію найбільшої робочої напруги мережі спотворену гармонійними коливаннями напруги.

Аналіз розглянутих нормативних документів та літературних джерел показав, що існує потреба в визначенні дії на ОПН несінусоїдальної напруги. Для цього має бути виконаний аналіз робочих режимів ОПН при впливах напруг зі вмістом вищих гармонійних коливань.

3. Об'єкт, мета та завдання дослідження

Об'єктом дослідження є робота ОПН при наявності в електричній мережі коливань та вищих гармонійних складових напруги

Проведені дослідження ставили за мету розрахунки енергії, яку розсіює ОПН при роботі в зоні струмів витоку ВАХ та при квазістаціонарних перенапругах.

Для досягнення поставленої мети вирішувалися наступні завдання:

- розрахунок енергії, що діє на ОПН у випадку виникнення в мережі квазістаціонарних напруг;
- визначення струмів, які протікають скрізь ОПН при дії гармонійних коливань різних порядків;
- розрахунок енергії, що розсіюється у ОПН при впливах гармонійних коливань різних порядків.
- визначити чи є вплив гармонійних коливань на значення потужності, що розсіює ОПН.

4. Матеріали та методи визначення величин потужності, що розсіює обмежувач перенапруг нелінійний та впливу на неї вищих гармонік напруги

4.1. Методика визначення величин потужності, що виділяється у обмежувачі перенапруг нелінійному. Для аналізу режимів роботи ОПН в умовах наявності в електричній мережі вищих гармонійних складових напруги, використовувався пакет програм MATCAD. При цьому розрахункова модель має давати змогу оцінити усталений режим роботи ОПН, що надасть можливість оцінювати енергію, що виділяється в ньому під дією робочої напруги.

4.2. Досліджувані матеріали та обладнання, що використовувались в роботі. Для проведення аналізу величин потужностей, що розсіює ОПН під час роботи була використана ВАХ ОПН 110 кВ. Усі розрахунки виконані в середовищі MATCAD. Граничне значення потужності, за якого порушується тепловий баланс ОПН, отримана з літературних джерел. Для визначення порядків та значень вищих гармонійних складових використано ГОСТ на якість електричної енергії.

5. Визначення величин потужності, що виділяється у обмежувачі перенапруг нелінійному

Розглянемо роботу ОПН в мережі з номінальною напругою 110 кВ за відсутності вищих гармонік напруги. Струм через ОПН у разі синусоїдної напруги на його затискачах визначимо за його вольт-амперною характеристикою, наведеною на рис. 1, а, б.

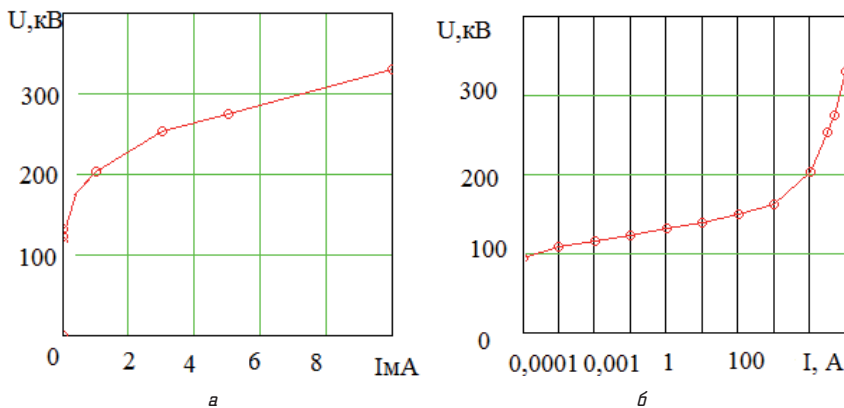


Рис. 1. Вольт-амперні характеристики ОПН на напругу 110 кВ виробництва Таврида електрик Україна: а — у зоні струмів витоку; б — у робочій зоні

Струм через ОПН $i(t)$ визначимо за миттєвими значеннями напруги на його затискачах $u(t)$ (рис. 1), а енергію, що виділяється в ОПН (рахуючи процес адиабатичним) за одну секунду, обчислимо за формулою:

$$w = \int_0^1 u(t) \cdot i(t) dt. \tag{1}$$

На рис. 2 наведено графіки зміни теплової потужності, що виділяється в ОПН, в залежності від коефіцієнту тимчасової перенапруги. Як видно на рис. 2,

у разі виконання умов енергія, яка виділяється в ОПН, не перевищує його енергоємності $W_{\text{ОПН}} = 320$ кДж.

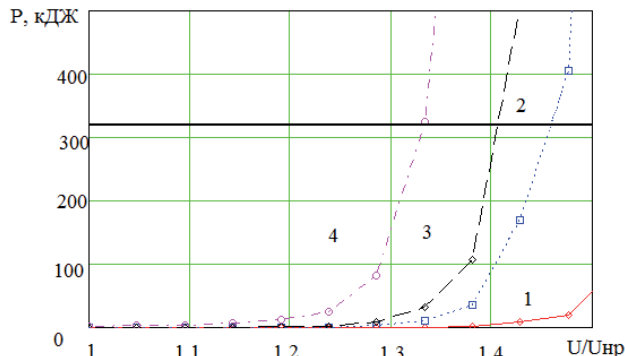


Рис. 2. Потужність, що виділяється в ОПН в залежності від коефіцієнту тимчасової перенапруги: 1 — за 1 с; 2 — за 20 с; 3 — 60 с; 4 — за 600 с

Як видно з рис. 2 підвищення робочої напруги в мережі дуже швидко призводить до втрати ОПН теплового балансу та виходу його з ладу. Отримані результати підтверджують тезу про непридатність ОПН для захисту електричних мереж, в яких можливе виникнення квазі-стаціонарних перенапруг [6]. Для використання ОПН в таких мережах необхідно виконати розрахунки величин можливих перенапруг та перевірити спроможність обраного типу ОПН їх поглинути. Багато спеціалістів енергетиків вважають, що ОПН працює так, як і вентильний розрядник. Ця теза є помилковою тому, що ОПН приєднано до мережі напряму, а розрядник через іскровий проміжок. Тому ОПН постійно знаходиться під впливом робочої напруги мережі, що обумовлює додаткові вимоги до його параметрів при виникненні в мережі квазістаціонарних перенапруг.

Виконані розрахунки енергії, що розсіює обмежувач перенапруг нелінійний при дії напруги, в складі якої мають місце вищі гармоніки дозволяють зробити висновок, що за відповідності напруги в мережі вимогам ГОСТ на якість енергії, ОПН працює нормально, підтримуючи тепловий баланс. Однак при роботі в мережах з великим вмістом гармонійних коливань може наступити порушення теплового балансу ОПН, що призведе до виходу його з ладу.

В сучасних електричних мережах досить часто існують вищі гармонійні коливання напруги, які можуть впливати на теплові режими роботи ОПН [7, 8]. Коефіцієнт спотворення синусоїдності кривої напруги (у відсотках) відповідно до ГОСТ 13109 обчислюють за формулою [9]:

$$K_{U1} = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{40} U_n^2}}{U_1} \cdot 100\%, \tag{2}$$

де U_n — діюче значення n -ї гармоніки напруги; U_1 — діюче значення першої гармоніки напруги (основної частоти).

Для наочності розглянемо роботу ОПН у разі наявності першої і третьої гармонік. Визначимо миттєве значення напруги на ОПН як:

$$u(t) = U_{m1} \cdot \sin(\omega \cdot t) + U_{m3} \cdot \sin(3 \cdot \omega \cdot t + \varphi_3), \quad (3)$$

де U_{m1} — амплітуда першої гармоніки (основної частоти); U_{m3} — амплітуда третьої гармоніки; φ_3 — початкова фаза третьої гармоніки.

На рис. 3, 4 наведено зміни миттєвих значень напруг і струмів ОПН за різних початкових фаз третьої гармоніки на інтервалі, що дорівнює половині періоду основної частоти. Діюче значення синусоїдної напруги першої гармоніки, прикладеної до ОПН, дорівнює $1,1 \cdot U_n$, а діюче значення напруги третьої гармоніки складає 3 % від першої гармоніки.

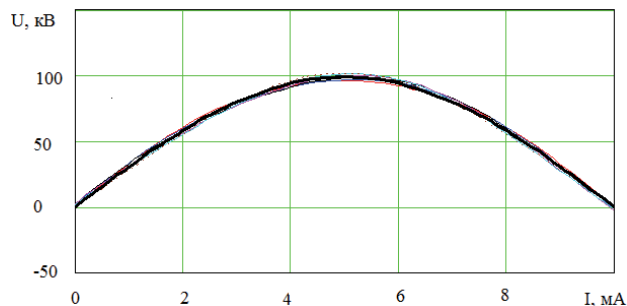


Рис. 3. Миттєві значення синусоїдної напруги u_{s1} і несинусоїдних напруг $u_{s1} + u_{s3}$ з початковими фазами, що зростають через 36 градусів

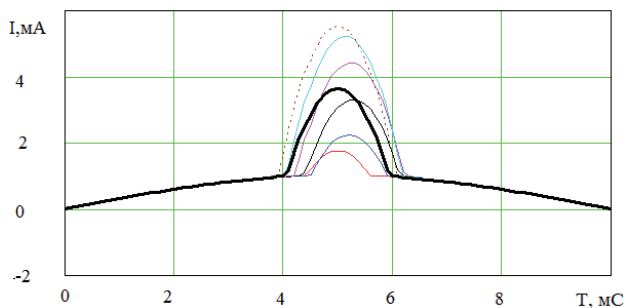


Рис. 4. Миттєві значення струмів ОПН, утворених синусоїдною напругою u_{s1} і несинусоїдними напругами $u_{s1} + u_{s3}$ з початковими фазами, що зростають через 36 градусів

Як видно на рис. 4, у разі синусоїдної напруги, прикладеної до ОПН, завдяки нелінійності варисторів спостерігаються характерні для струму третьої гармоніки імпульси, величина яких залежить від початкової фази третьої гармоніки напруги (залежно від початкової фази напруги третьої гармоніки максимальне значення струму через ОПН може як зрости, так і зменшитися). Це, в свою чергу, може по-різному вплинути на температурний режим роботи ОПН.

На рис. 5 наведено залежність зміни відносної енергії, що виділяється в ОПН протягом одного напівперіоду, від початкової фази напруги третьої гармоніки. Цей показник обчислено за формулою:

$$W_o = \frac{\int_0^{0,01} U_{m1} \cdot \sin(\omega \cdot t) + U_{m3} \cdot \sin(3 \cdot \omega \cdot t + \varphi_3) \cdot i(u) dt}{\int_0^{0,01} U_{m1} \cdot \sin(\omega \cdot t) \cdot i(u) dt}. \quad (4)$$

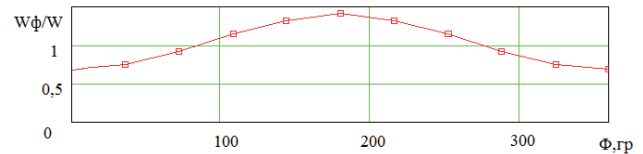


Рис. 5. Зміни відносної енергії, що виділяється в ОПН протягом одного напівперіоду, від початкової фази напруги третьої гармоніки

Як видно на рис. 5, за незмінного діючого значення несинусоїдної напруги $u(t)$, прикладеної до ОПН, залежно від початкової фази третьої гармоніки за час, що дорівнює на півперіоду основної частоти, тепла енергія, яка виділяється в ОПН, зростає від 70 % енергії, що виділяється в ОПН у разі увімкнення його на синусоїдну напругу із тим самим діючим значенням, до 150 %, а потім знову зменшується. Це свідчить про недостатню інформативність такого показника, як коефіцієнт спотворення синусоїдності кривої напруги, при виборі ОПН.

Як було зазначено вище, вміст напруги третьої гармоніки може бути значним. Розглянемо вплив вмісту третьої гармоніки напруги на температурний режим роботи ОПН за незмінного діючого значення несинусоїдної напруги. До уваги візьмемо третю гармоніку з початковою фазою $\varphi_3 = \pi$ (рис. 6), за якої протягом напівперіоду в ОПН виділяється найбільша енергія (рис. 5). На рис. 7, 8 наведено миттєві значення струмів ОПН, утворені несинусоїдними напругами $u_{s1} + u_{s3}$ з початковими фазами $\varphi_3 = \pi$, та зміни відносної енергії, що виділяються в ОПН протягом одного напівперіоду.

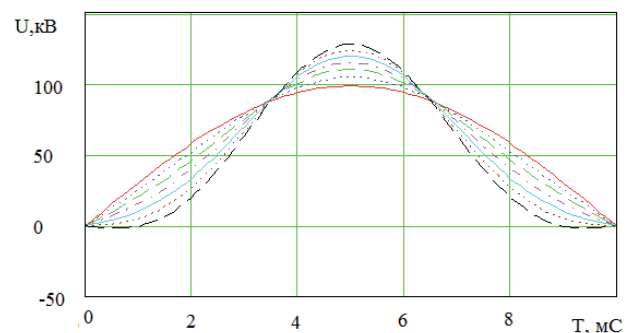


Рис. 6. Миттєві значення напруги на ОПН у разі зростання коефіцієнта спотворення синусоїдності кривої напруги K , від нуля до 36 %

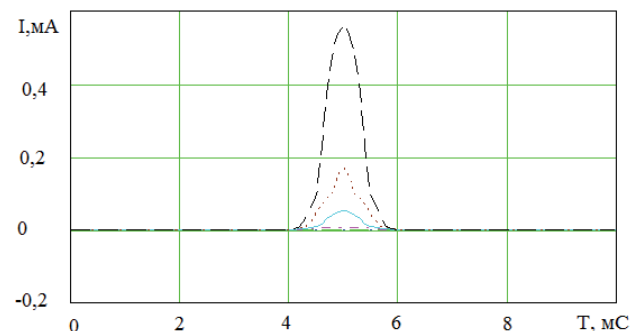


Рис. 7. Миттєві значення струмів ОПН у разі зростання коефіцієнта спотворення синусоїдності кривої напруги K , від нуля до 36 %

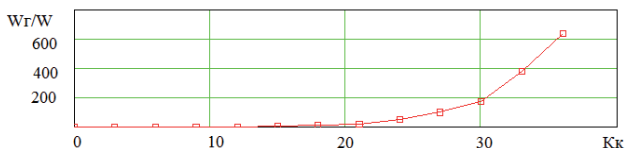


Рис. 8. Зміни відносною енергії, що виділяються в ОПН протягом одного напівперіоду, від коефіцієнта спотворення синусоїдності кривої напруги

На рис. 8 видно, що у разі зростання коефіцієнта спотворення синусоїдності кривої напруги K_i відбувається суттєве зростання відносною енергії, що виділяються в ОПН протягом одного напівперіоду.

На рис. 9 наведено залежності зміни енергії, що виділяються в ОПН протягом одного напівперіоду, від коефіцієнта спотворення синусоїдності кривої напруги у випадках наявності у напрузі ОПН відповідно 2, 3, 5, 7, 11 і 41 гармонік. Залежності отримано у такому порядку:

- для кожної гармоніки спершу досліджено вплив початкової фази вищої гармоніки на кількість енергії, що виділяється в ОПН протягом напівперіоду;
- за результатами розрахунків знайдено початкову фазу вищої гармоніки, за якої в ОПН виділяється найбільша кількість енергії;
- рахуючи початкову фазу вищої гармоніки незмінною, досліджено зміну енергії, що виділяються в ОПН протягом одного напівперіоду, від коефіцієнта спотворення синусоїдності кривої напруги відповідною гармонікою.

Як видно на рис. 9, із зростанням порядкового номеру гармоніки при тому самому значенні коефіцієнта спотворення синусоїдності кривої напруги енергія, що виділяється в ОПН, зменшується (так, наприклад, якщо за наявності другої гармоніки напруги із коефіцієнтом спотворення синусоїдності кривої напруги 30 % протягом напівперіоду в ОПН виділяється 0,014 кДж, то за наявності 11 гармоніки тієї ж інтенсивності — у 5,8 разів менше).

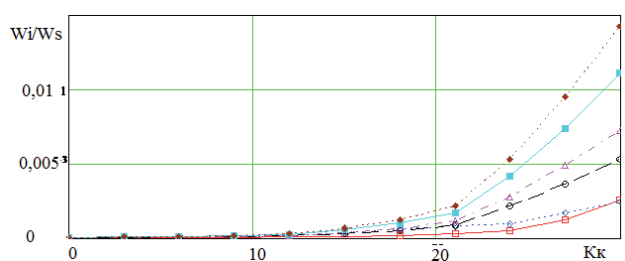


Рис. 9. Зміни енергії, що виділяються в ОПН протягом одного напівперіоду, від коефіцієнта спотворення синусоїдності кривої напруги у випадках наявності у напрузі ОПН відповідно 2, 3, 5, 7, 11 і 41 гармонік

Відповідно до рівності Парсеваля [10] середнє значення теплової потужності, що виділяється в ОПН, дорівнює сумі середніх потужностей окремих гармонік:

$$P = \sum_{k=0}^{\infty} P_k. \tag{5}$$

Таким чином, існує можливість оцінювати вплив різних гармонік на тепловий баланс ОПН [11]. Виконаний

аналіз режиму роботи ОПН 110 за наявності в мережі вищих гармонік показав, що з урахуванням виразу (5) при відповідності напруги ГОСТ 13109 тепловий баланс ОПН не порушується на протязі довгого часу, що підтверджує його працездатність в період експлуатації. Однак при роботі в мережах з великим вмістом гармонійних коливань може наступити порушення теплового балансу ОПН, що призведе до виходу його з ладу.

6. Висновки

1. Проведені розрахунки показують, що у разі відповідності підведеної до ОПН напруги вимогам ГОСТ 13109 несинусоїдність напруги не утворює загрози для роботи ОПН протягом тривалого періоду.
2. Показано, що ОПН не може нормально працювати при дії в мережі квазістаціонарних перенапруг.
3. Розраховані струми скрізь ОПН за різних початкових фазах гармонійних коливань.
4. Наведена методика дає змогу оцінити вплив якості напруги на спроможність ОПН підтримувати тепловий баланс в процесі експлуатації. При виборі ОПН необхідно проводити розрахунки перенапруг у заданій мережі, що дасть можливість точно врахувати їх вплив на ОПН.

Література

1. СОУ-Н ЕЕ 40.12-00100227-47:2011. Обмежувачі перенапруг нелінійні напругою 110–750 кВ. Настанова щодо вибору та застосування [Текст]: Затв. Наказом № 136 МЕВ України 19.05.2011; розроб. НТУУ «КПІ». — Чинний від 2011-08-17. — Київ: ДП «НЕК» «Укренерго», 2011. — 48 с.
2. СОУ-Н МЕВ 40.1-00100227-67:2012. Обмежувачі перенапруг нелінійні напругою 6–35 кВ. Настанова щодо вибору та застосування у розподільчих установках [Текст]: Затв. Наказом № 515 МПЕ України, 13.07.2012; розроб. ДП НДВІВН Славянськ. — Введ. 11.10.2012.
3. Выбор, испытание и применение металлооксидных ограничителей перенапряжений в сетях среднего напряжения. Правила выбора [Текст] / ABB HighVoltage Technologies Ltd. — Швейцария, Ветинген, Май 1994. — 52 с.
4. Металлооксидные ограничители перенапряжений. Выбор ограничителей перенапряжений и их применение в распределительных сетях среднего напряжения [Текст] / Тайко Электроникс Райхем Гмбх. — Киев, 2011. — 18 с.
5. Васюра, Ю. Ф. Оценка величины энергии, рассеиваемой на варисторах ОПН, установленных в сетях собственных нужд электростанций, при замыканиях на землю [Текст]: материалы Международной научно-технической конференции / Ю. Ф. Васюра, А. В. Вильнер, А. В. Вычегжанин // Перенапряжения и надежность эксплуатации электрооборудования. — С-Пб: ПЭИПК, 2001. — Вып. 1. — 156 с.
6. МУ 34-70-163/87. Методические указания по предотвращению феррорезонанса в распределительных устройствах напряжением 110–750 кВ с электромагнитными трансформаторами напряжения и выключателями, содержащими емкостные делители напряжения [Текст] / Министерство энергетики и электрификации СССР. — М.: СПО Союзтехэнерго, 1987. — 10 с.
7. Гриб, О. Г. Работа средств защиты от перенапряжения при наличии в электрических сетях высших гармоник [Текст] / О. Г. Гриб, С. Ю. Шевченко, Д. А. Гапон, Т. С. Иерусалимова, Р. В. Жданов // Вісник НТУ «ХПИ». — Харків, 2014. — № 41(1084).
8. Жежеленко, И. В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий [Текст] / И. В. Жежеленко. — М.: Энергоатомиздат, 2000. — 331 с.
9. ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения [Текст]. — Введ. 01.07.2014. — М.: Стандартинформ, 2014. — 16 с.

10. Зевеке, Г. В. Основы теории цепей [Текст]: учебник для вузов / Г. В. Зевеке, П. А. Ионкин, А. В. Нетушил, С. В. Стахов. — 5-е изд., перераб. — М.: Энергоатомиздат, 1989. — 528 с.
11. Шевченко, С. Ю. Метод визначення спроможності обмежувача перенапруг нелінійного поглинати енергію без втрати теплового балансу [Текст] / С. Ю. Шевченко // Електро-техніка та електромеханіка. — Харків, 2015. — № 4.

АНАЛИЗ РЕЖИМА РАБОТЫ ОГРАНИЧИТЕЛЕЙ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ ПРИ ВЛИЯНИИ НЕСИНУСОИДАЛЬНОГО НАПРЯЖЕНИЯ

В статье рассмотрена работа ограничителя перенапряжений нелинейного в режимах квазистационарных перенапряжений и выявлено, что подобная работа практически невозможна. Выполненные расчеты энергии, что рассеивает ограничитель перенапряжений нелинейный при воздействии напряжения, в составе которой имеют место высшие гармоники. Расчеты проведены на базе вольт-амперной характеристики ограничителя перенапряжений нелинейного, которая позволяет определить

значения токов при наличии в сети напряжения с содержанием гармонических колебаний.

Ключевые слова: ограничитель перенапряжений нелинейный, вольт-амперная характеристика, тепловые режимы, гармонические колебания.

Шевченко Сергій Юрійович, кандидат технічних наук, доцент, професор кафедри передачі електричної енергії, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Україна, e-mail: syurik42@rambler.ru.

Шевченко Сергей Юрьевич, кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры передачи электроэнергии, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», Украина.

Shevchenko Sergey, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Ukraine, e-mail: syurik42@rambler.ru

УДК 681.121:621.643.8

DOI: 10.15587/2312-8372.2015.46985

Білінський Й. Й.,
Гладишевський М. В.

РОЗРОБКА УЛЬТРАЗВУКОВОГО МЕТОДУ ВИМІРЮВАННЯ ШВИДКОСТІ ПЛИННИХ СЕРЕДОВИЩ

В статті проведено короткий аналіз основних ультразвукових методів і засобів контролю витрат рідких і газоподібних середовищ. Запропоновано математичну модель поширення ультразвукової хвилі в плинному середовищі та ультразвуковий метод вимірювання швидкості плинних середовищ на її основі. Приведена структурна схема ультразвукового вимірювача швидкості потоку на основі амплітудно-частотного методу.

Ключові слова: витратомір, контроль витрат, ультразвук, швидкість звуку, частота, ближня зона.

1. Вступ

Акустичні витратоміри засновані на використанні того чи іншого акустичного ефекту, якому швидкість поширення плинного середовища змінює той чи інший параметр звукової хвилі. Оскільки, практично усі акустичні витратоміри працюють в діапазоні ультразвукових (УЗ) коливань, тому називаються ультразвуковими.

На сьогодні відомо три основних ультразвукових методи за різницею принципом роботи та витратоміри на їх основі. До них відносяться фазові витратоміри (вимірювання різниці фазових зсувів ультразвукових коливань, що направляються по потоку і проти нього); частотні витратоміри (вимірювання різниці частот повторення коротких імпульсів чи пакетів ультразвукових коливань, що направляються одночасно по потоку і проти нього); часово-імпульсні витратоміри (безпосереднє вимірювання різниці часу проходження коротких імпульсів, що направляються по потоку і проти нього) [1].

Кожен з вищенаведених методів мають певні недоліки, основними з яких є низька точність за рахунок відсутності стабільної структури та пульсації потоку, а також неточністю у реєстрації положення початку імпульсного сигналу, обумовлена розмиттям фронту

наростання сигналу, залежність чутливості, а отже частоти імпульсного сигналу від розмірів трубопроводу, складність обробки сигналу у зв'язку з використанням багатоканальної структури ультразвукового витратоміра (УЗВ) [2, 3].

Метою роботи є розробка методу вимірювання витрат, який забезпечує високу точність вимірювання та оснований на різницевому принципі визначення частот поширення ультразвукової хвилі.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Ультразвукові витратоміри використовуються в промисловості для вимірювання об'ємної витрати рідин вже протягом 20 років і з недавніх часів для вимірювання об'ємної витрати газів. Перша пропозиція щодо застосування ультразвуку для вимірювання об'ємної витрати наводиться в німецькому патенті 1928 року [4]. Однак, тільки з розвитком п'єзоелектричних перетворювачів за останні 40 років УЗВ набули неабиякої привабливості й засновані на використанні того чи іншого акустичного ефекту, що виникає при проходженні акустичних коливань через потік плинного середовища.