

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ НЕСИМЕТРИЧНОГО РЕЖИМУ НИЗЬКОВОЛЬТНОЇ МЕРЕЖІ ПРИ ОДНОФАЗНОМУ ГЕНЕРУВАННІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ СОНЯЧНОЮ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЄЮ

І.В. Гладь, Я.В. Бацала

ІФНТУНГ; 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15; тел. (0342) 727172,
e-mail: batsala2012@gmail.com

Проведено аналіз якості електроенергії підключених до мережі однофазних фотоелектричних систем в розподільних мережах Прикарпаття. Результати вимірювання показали, що наявність фотоелектричних систем, з'єднаних з мережею, може призвести до зниження параметрів якості напруги живлення, таких як коливання напруги, коефіцієнти гармонічних спотворень, флікер напруги і коефіцієнт потужності. Гармонічні спотворення є ключовою проблемою в локальних мережах через нелінійне навантаження. Згідно з вимірними експериментальними миттєвими значеннями струмів і напруг, які генеруються за допомогою сонячних електростанцій, підраховано струми вищих гармонік. Зроблено порівняння допустимих значень основних параметрів електричної енергії з експериментальними даними. Проведено експериментальні дослідження різних режимів локальної мережі з однофазною генерацією енергії сонячною електростанцією. Показано, критерії впливу параметрів якості сонячних електростанцій на техніко-економічні показники роботи з врахуванням електромагнітної складової.

Ключові слова: сонячна електростанція, інвертор, показники якості, електромагнітна сумісність, стійкість енергосистеми, реактивна потужність, енергоефективність.

Проведен анализ качества электроэнергии подключенных к сети однофазных фотоэлектрических систем в распределительных сетях Прикарпатья. Результаты измерения показали, что наличие фотоэлектрических систем, соединенных с сетью, может привести к снижению параметров качества напряжения питания, таких как колебания напряжения, коэффициентов гармонических искажений, фликер напряжения и коэффициент мощности. Гармонические искажения является ключевой проблемой в локальных сетях из-за нелинейной нагрузки. Согласно измеренных экспериментальных мгновенных значений токов и напряжений, генерируемых с помощью солнечных электростанций подсчитаны токи высших гармоник. Проведено сравнение допустимых значений основных параметров электрической энергии с экспериментальными данными. Проведены экспериментальные исследования различных режимов локальной сети с однофазной генерацией энергии солнечной электростанцией. Указаны, критерии влияния параметров качества солнечных электростанций на технико-экономические показатели работы с учетом электромагнитной составляющей.

Ключевые слова: солнечная электростанция, инвертор, показатели качества, электромагнитная совместимость, устойчивость энергосистемы, реактивная мощность, энергоэффективность.

The article deals with power quality analysis of single phase Photovoltaic Systems on grid in distribution networks of the Precarpathian region. The measurement results have proved that the availability of PV systems on grid can cause power quality problems such as voltage fluctuation, harmonic distortion coefficients, voltage flicker, and power factor. The harmonic distortion is a crucial problem in local networks because of nonlinear loads. The currents of ultraharmonics are calculated according to the measurement of the experimental instantaneous currents and voltages which are generated by solar power plants. The permissible values of electric energy main parameters with experimental data are compared. The experimental research of various modes of the local network with single phase power generated by solar plants is conducted. The influence of quality parameters of solar power plants on the technical and economic parameters of operation considering the electromagnetic component are shown.

Key words: solar power plant, inverter, quality parameters, electromagnetic compatibility, system stability, reactive power, energy efficiency.

Вступ

Енергоемність в нафтовій і газовій промисловості зростає, незважаючи на великі інвестиції в їх модернізацію та вдосконалення, тому необхідно розглядати інноваційні технології, які дозволяють підвищити ефективність роботи та надійність електротехнічних комплексів. Перспективним напрямом є використання сучасних фотоелектричних установок для автономних систем живлення віддалених зон видобування, систем передавання даних та зв'язку, сейсмічного обладнання, дистанційного вимірювання, катодного захисту і багатьох інших допоміжних підсистем.

Зменшення втрат електроенергії в електричних мережах та підвищення енергоефективності об'єктів енергетики є одним з першочергових завдань науковців. Розвиток «зеленої енергетики» дав змогу зменшити залежність від імпортих енергоресурсів, але залишив невирішеним питання пошуку оптимального місця приєднання та потужності альтернативних джерел до енергосистеми. Крім того, при збільшенні розгалуженості локальних електромереж з сонячними електростанціями виникає необхідність керування перетоками потужності через непостійну величину генерування електроенергії.

Актуальність і невирішені питання

Основною метою власника джерела генерування є забезпечення максимального прибутку від реалізації електроенергії, чого можна досягти за умов оптимізації добового режиму груп електростанцій та оптимального керування ними з застосуванням систем автоматизованого керування на базі локальних систем [1]. Ускладнює спільну роботу джерел відновлювальної енергетики з енергосистемою залежність від природних факторів (час доби, хмарність, пора року), проте поєднання певних видів генерації дозволить підвищити їх економічну ефективність.

Експериментальні дослідження підтверджують, що величина потужності джерел відновлювальної енергії впливає на перетоки потужності, а підключення джерела генерування потрібно виконувати максимально близько до споживача, що дозволить мінімізувати втрати при передачі електроенергії. Крім того, за допомогою показників ефективності доцільно визначати максимальну потужність генерування в окремих вузлах, що забезпечить зменшення втрат електроенергії та вирівнювання профілю напруги в електромережі [2, 3].

Постановка завдання

Метою цієї роботи було виявлення проблем під'єднання сонячних електростанцій до мережі, а також вивчення поведінки сонячних фотоелектричних систем та розроблення методики їх підключення до енергосистем та локальних електромереж.

Результати дослідження

Зростання кількості сонячних електростанцій в Україні призвело до підвищення інтересу щодо впливу якості електроенергії, яка генерується фотоелектричними системами, на роботу електрообладнання та викликало необхідність розгляду питань контролю основних параметрів показників якості електроенергії (ПЯЕ) та електромагнітної сумісності (ЕМС) [4]. ЕМС є здатністю обладнання або системи працювати належним чином в електромагнітному середовищі з певним сигналом перешкоди, який не впливатиме на нормовані показники. За даними, опублікованими в американських періодичних виданнях у 2000 році, щорічний економічний збиток у США, який обумовлений низькою якістю електроенергії, складає 30-50 млрд. дол./рік. За експертними оцінками мінімальний збиток від зниженої якості електроенергії загалом в Україні можна оцінити сумою не менше 7,2 млрд. грн. щорічно.

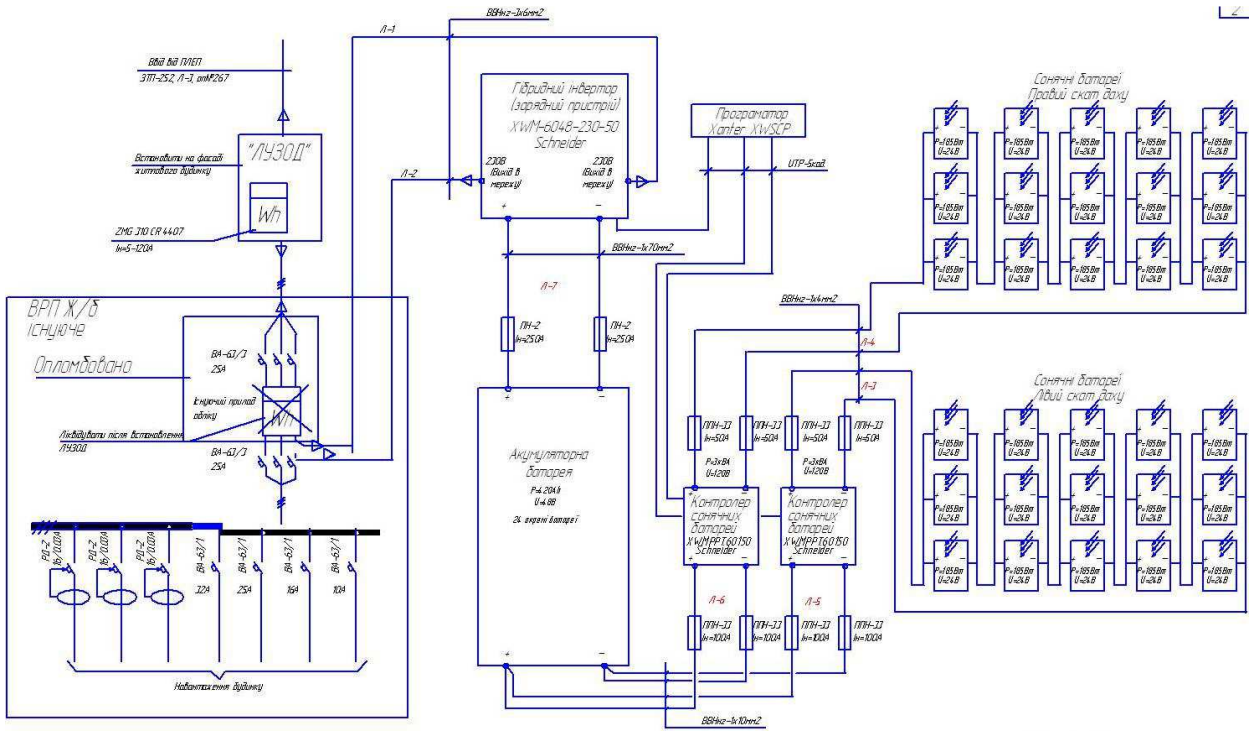
В Прикарпатському регіоні джерела сонячної генерації умовно можна поділити на потужні (понад 1 МВт встановленої потужності) та локальні, які, в свою чергу, можна поділити на однофазні та трифазні.

Розглянемо принцип генерування енергії однофазною сонячною електростанцією (поту-

жністю 5,5 кВт), яка розміщена на даху приватного будинку в селі Побережжя Івано-Франківської області. Сонячна енергія виробляється за допомогою 30-ти сонячних фотомодулів потужністю по 185 Вт, які розміщені на двох секціях даху будинку. За допомогою гібридного інвертора типу XWM-6048-230-50 та контролера сонячних батарей XWMPPT60150 фірми Schneider вироблену електроенергію постачають в мережу або на акумуляторну батарею потужністю 420 А·год. Даний гібридний інвертор серії XW має високі характеристики, ККД і вихідний синусоїдний сигнал напруги. Частина електроенергії споживають споживачі будинку, решта через гібридний інвертор надходить в енергосистему та оплачується виробнику за «зеленим тарифом». Система аналізу даних не потребує значних капіталовкладень, які переважно присутні в джерелах більшої потужності, а всю інформацію про вироблення електроенергії можна зчитати з лічильника (наприклад, ZMG310CR), який запломбований та має можливість доступу та підключення до системи локального устаткування збору і обробки даних (ЛУЗОД). Пам'ять лічильника забезпечує зберігання в регістрах пам'яті показів вимірних значень енергії, активних та реактивних потужностей понад 500 днів. Можливість автоматичного визначення обраного протоколу передачі даних (IEC, DLMS) і висока швидкість передачі (до 38400 біт) істотно знижують витрати на зв'язок і передбачають опцію автоматичного зчитування показів лічильників, використовуючи мобільні мережі 2G або 3G. Модем встановлено під кришку затискачів і заживлено безпосередньо від комунікаційного інтерфейсу лічильника. Оператор має можливість бачити результати роботи обраного джерела генерування за допомогою доступної програми Енергоцентр, яка дає можливість переглядати дані про споживання за різні проміжки часу (як у вигляді таблиць, так і у вигляді графіків); переглядати журнал подій в системі, редагувати інфраструктуру системи та формувати різноманітні звіти в середовищі Excel. За відсутності електроенергії в мережі (аварія на ЛЕП, відмикання через перевищення пікових значень навантаження, що актуально на сьогоднішній день) та неможливості генерування електроенергії за допомогою сонячної системи (хмарність та нічний період) власник даного електро-технічного комплексу отримує електроенергію від акумуляторної батареї, що накопичує заряд під час сонячної погоди.

На рисунку 1 зображено схему підключення однофазного джерела сонячного генерування в приватному будинку, який розташований в Прикарпатському регіоні.

Збір даних щодо режимів роботи даного джерела генерування був проведений в період від 1 серпня 2014 року по 31 липня 2015 року. В зимовий період, коли значно зменшується тривалість світлового дня та рівень сонячного випромінювання, значення генерування активної електроенергії відповідно зменшилося до 10 кВт·год на добу, навесні від 5 до 25 кВт·год



07/10-2015-ЕП

Рисунок 1 – Схема підключення однофазного джерела сонячного генерування

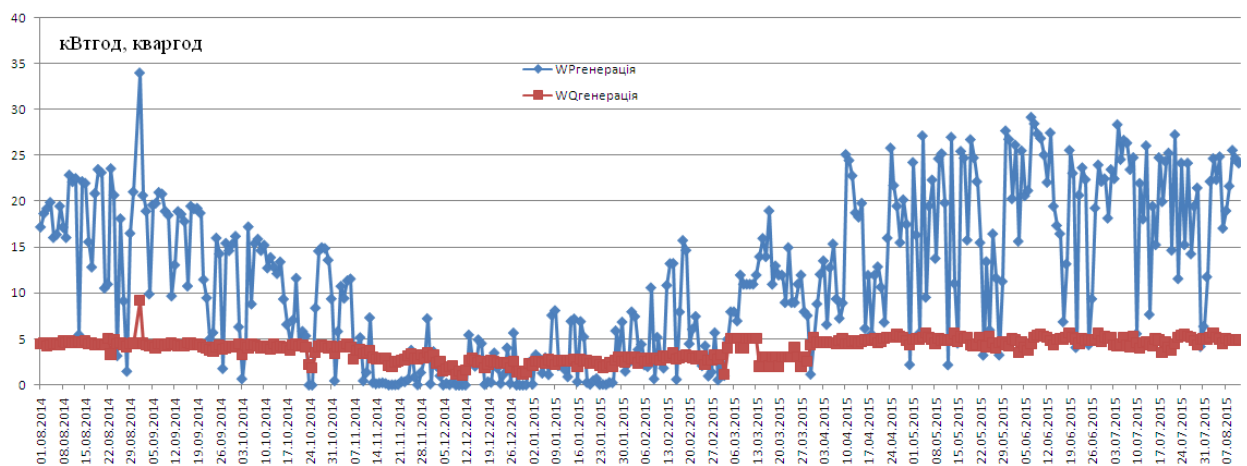


Рисунок 2 – Графік генерування активної та реактивної електроенергії сонячною електростанцією

на добу, восени від 5 до 20 кВт·год на добу, а в літні місяці генерується майже в 5-6 раз більше електроенергії, ніж в зимові місяці (15-30 кВт·год/добу). З червня по липень 2015 року було проведено облік виробленої електроенергії згідно тризонної тарифікації, який показав, що в піковий період виробляється 17 % всієї електроенергії, в напівпіковий період – 82 %, в нічний період (від 23.00 до 7.00) – лише 1 %. Аналіз результатів показав змінний характер кількості генерованої активної електроенергії в мережу, а також наявність генерування реактивної енергії, яка впливає на ПЯЕ.

Крім того, з дослідів видно, що частка реактивної енергії значно зростає в період низького генерування активної електроенергії, а саме,

в зимовий період. На рисунку 3 зображено зміну загальної сумарної величини генерування активної та реактивної енергії в часі за місяць протягом півгодинних інтервалів, яку обліковував лічильник протягом листопада 2014 року. Генерація реактивної потужності сонячними інверторами є важливим кроком для інтеграції фотоелектричних джерел в управління енергосистеми, але потребує більш детального керування між зміню параметрів споживання мережею та рівнем генерування локальних джерел.

Наступним об'єктом дослідження стала менш потужна (2,5 кВт) однофазна дахова сонячна електростанція в Івано-Франківську, яку використовує приватне підприємство. Генерація

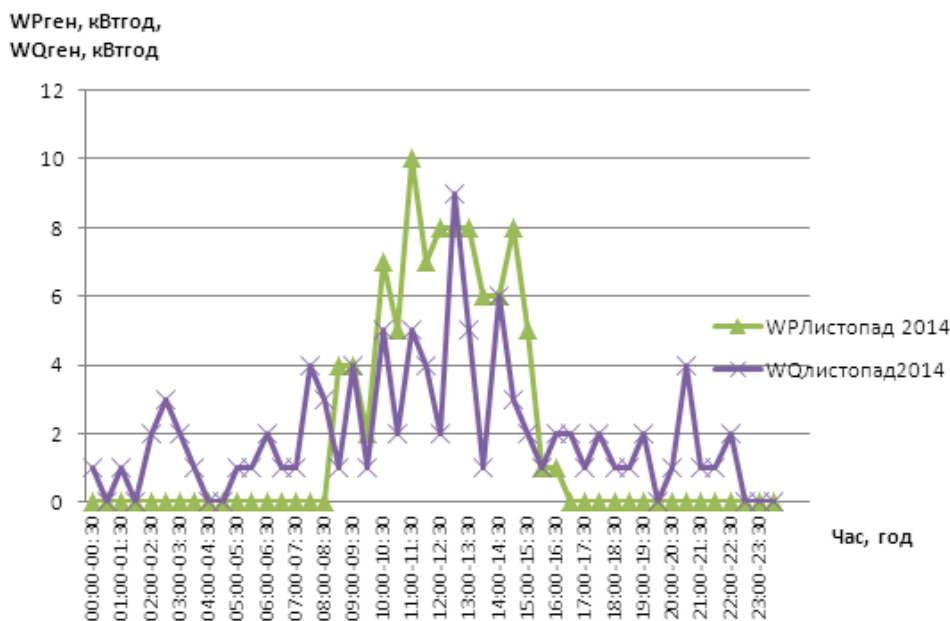


Рисунок 3 – Графік зміни сумарної активної та реактивної енергії на сонячній електростанції в листопаді 2014 року за місяць для півгодинних інтервалів

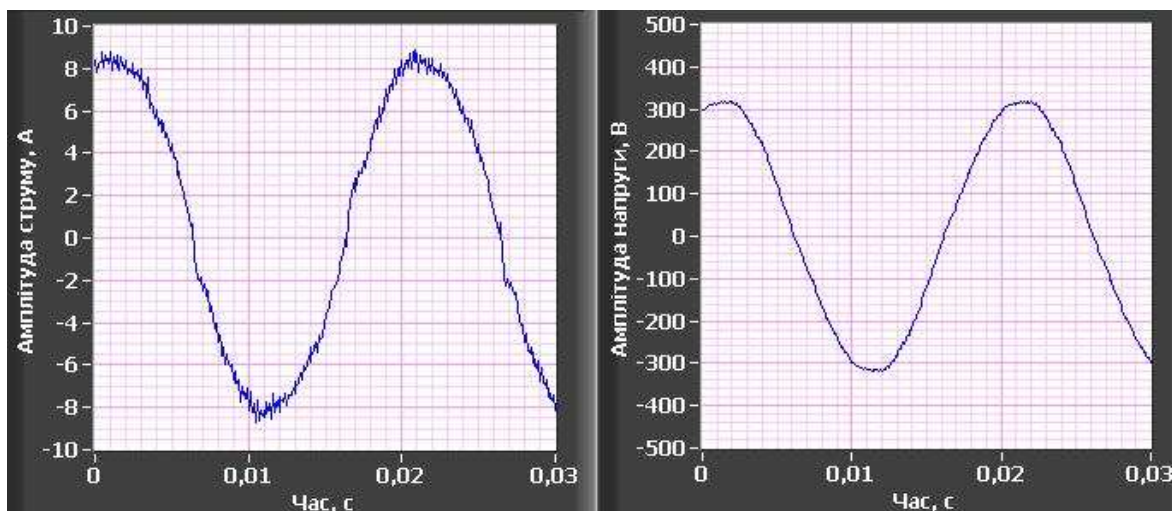


Рисунок 4 – Графік зміни миттєвих значень струму та напруг інвертора

ровану потужність увімкнено в одну з фаз, на якій відсутнє навантаження. З допомогою інформаційно-вимірювального аналізатора якості електроенергії 10 вересня 2015 року о 12.00 проведено дослідження ПЯЕ та визначено сумарний коефіцієнт гармонічних спотворень для мережі підприємства. Результати показали допустимі значення нормованих ПЯЕ на виході інвертора фірми Danfoss, який дає змогу в реальному часі показувати струм, напругу та потужність сонячного джерела, а також значення кількості виробленої електроенергії за добу, місяць, рік та будувати графіки цих значень. Перевагою переносного аналізатора є те, що можна безпосередньо на об'єкті на моніторі ноутбука бачити графіки миттєвих значень струмів і напруг та записати ці значення в файл, а за наявності відповідних програм проводити опрацювання даних з більш детальним аналізом [4].

Дослідження на ввіді розподільного пристрою даного можуть бути поділені на кілька етапів. На першому етапі (12.31 – 12.42) сонячна електростанція виробляє 1,2 – 1,4 кВт і приєднана до фази В, до якої більше нічого крім неї не приєднано. До фази А і С підключені малопотужні споживачі підприємства, більшість з яких створюють нелінійне навантаження (комп'ютери, принтери, освітлення та мікрохвильова піч). На другому етапі досліджень (12.43 до 12.54) сонячна електростанція вимкнена. На третьому етапі досліджень (12.54 до 13.04) сонячну електростанцію було підключено до фази С, а сумарна потужність генерування та споживання цієї фази наблизилась до нуля, тобто кількість генерації в певні моменти ставала рівною кількості споживання. Графік зміни активної потужності в часі у трьох фазах підприємства та сумарної потужності (чорний колір) зображено на рисунку 5.

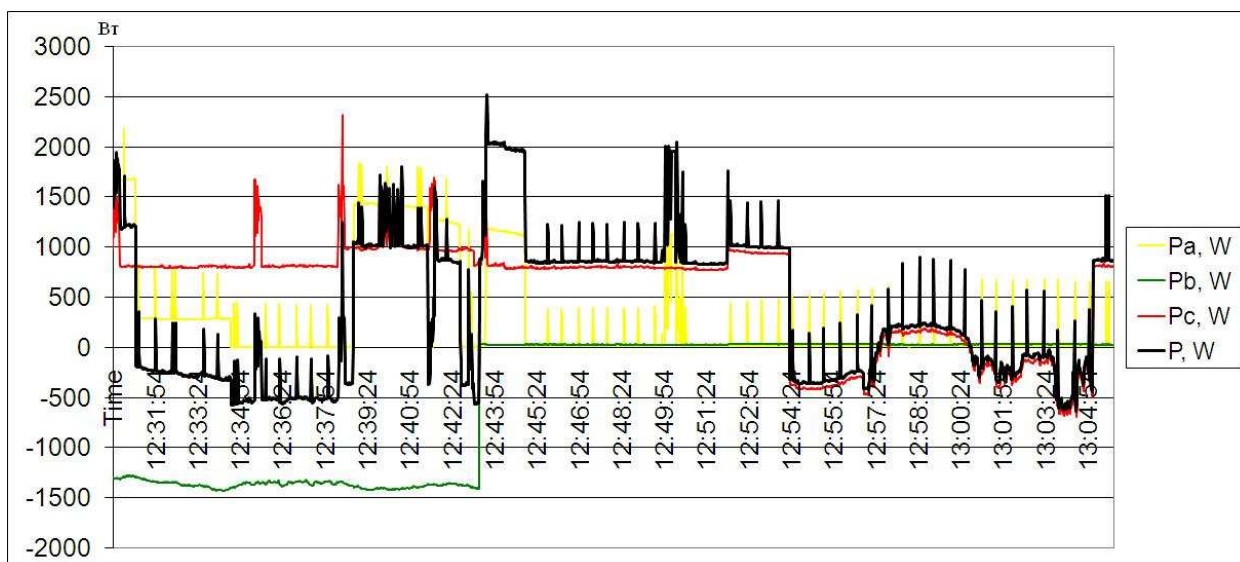


Рисунок 5 – Графік зміни активної потужності у трьох фазах підприємства

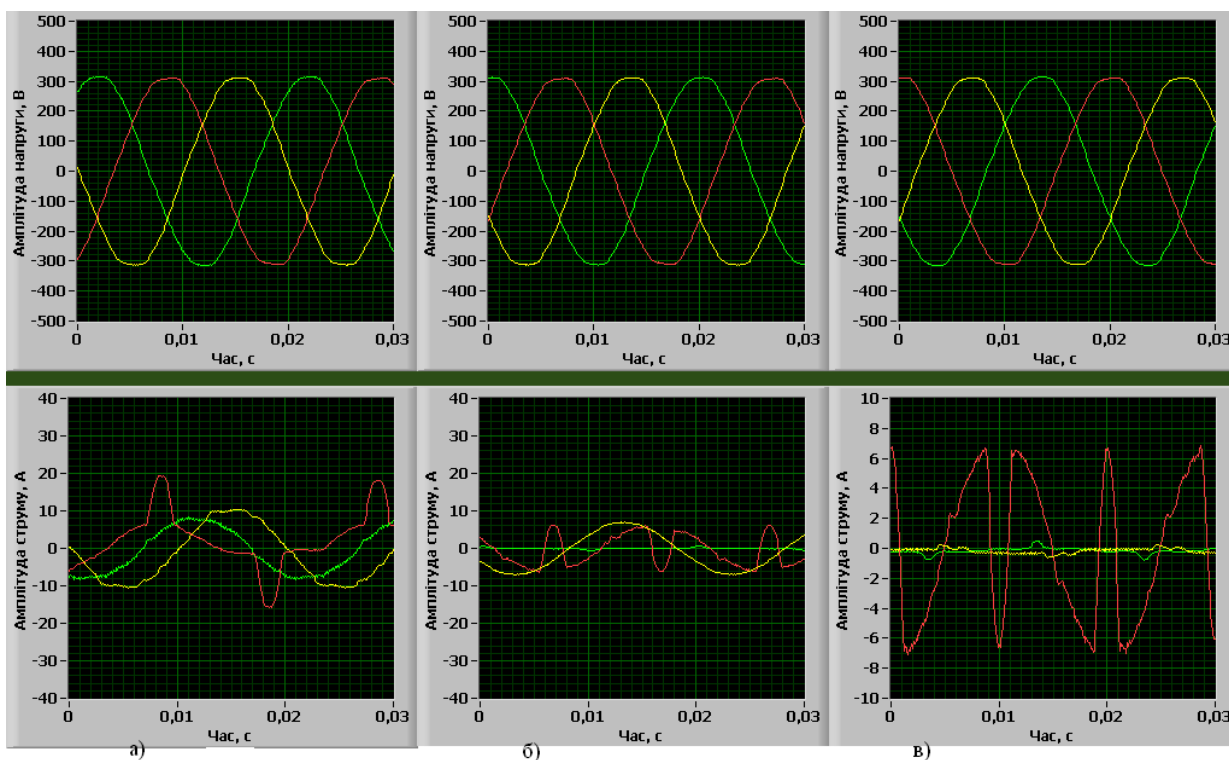


Рисунок 6 – Графіки зміни миттєвих значень струму та напруги у трьох фазах підприємства

На рисунку 6 зображено графіки зміни миттєвих значень струму та напруги у трьох фазах підприємства на трьох етапах дослідження. З рисунку 6 (а) помітно, що на першому етапі досліджень (генерування в фазі В, зелений колір) крива струму "відстає" від кривої напруги на 180° , але має синусоїдний характер. Крива струму фази С, до якої підключено комп'ютери, має гармонічну складову. На рисунку 6 (б) та (в) показано криві струмів в трьох фазах при підключенні сонячної електростанції до фази С. Одночасно змінюється кількість генерованої та спожитої електроенергії, які додаються, а форма синусоїди струму в фазі С має деформовану і обрізану вершину.

Високочастотні гармонічні складові в системах генерування сонячної енергії можуть істотно вплинути на рівень струму та напруги мережі. Основні причини виникнення гармонік напруги і струму досить різні. Гармонічні складові струму мережі можуть бути створені навантаженням, яке оснащено електронними пристроями, що поглинають поточні високочастотні складові. Ці гармонічні складові можуть бути зменшені тільки безпосередньо біля навантажень. Існують так звані «зони резонансу», коли вихідна потужність інвертора дорівнює потужності навантаження мережі, що призводить до входження в небезпечні режими роботи мережі. Цей ефект присутній у фотоелектричних установках через перемикання високочастотних

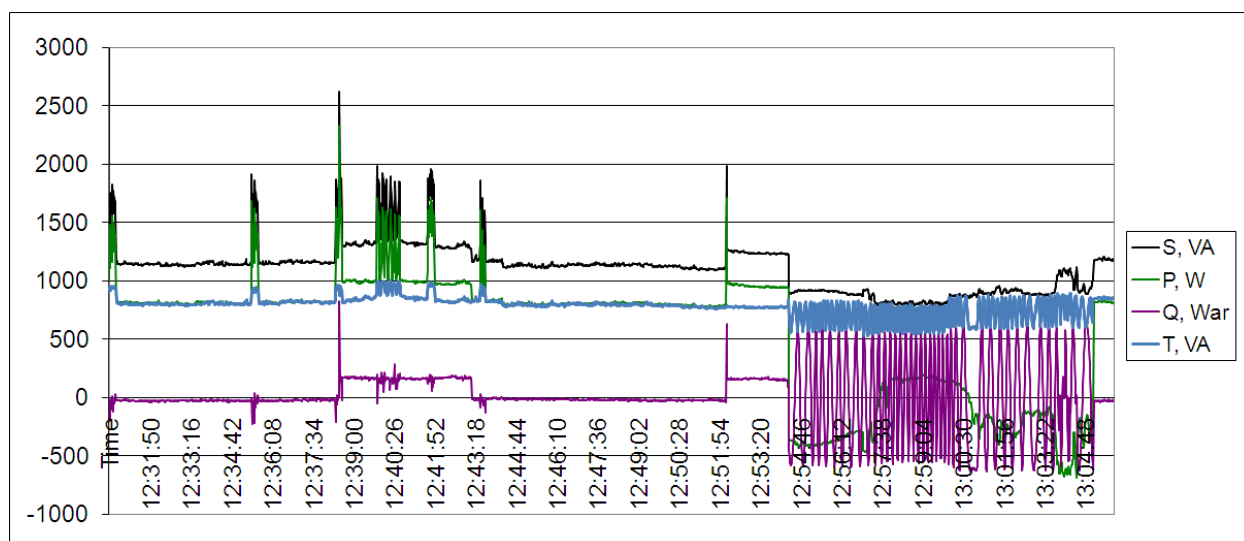


Рисунок 7 – Графіки зміни повної, активної та реактивної потужностей зсуву і спотворення підприємства

перетворювачів, де присутній емнісний зв'язок між фотоелектричними установками, кабелями, електронними пристроями і заземленням [5].

Фотоелектричні системи повинні відповідати чинним стандартам якості електроенергії, проте із зміною рівня сонячної інсоляції зменшується потужність генерування сонячної системи, а при підключенні великої кількості таких систем до мережі під час пікового попиту таке зниження може чинити великий вплив на основні ПЯЕ. Проте, більш корисним інструментом для оцінки якості електроенергії сонячних джерел генерування, які містять гармонічні складові сигнали, є сумарний коефіцієнт гармонічних спотворень (THD). Для нього європейський стандарт EN 50160 [6] накладає обмеження на загальну напругу гармонічних спотворень на рівні 8 % від номінальної напруги, у тому числі до 40-ї гармоніки. Стандарт МЕК 61727 [6], в якому розглядають вимоги до інтерфейсу між фотоелектричними системами і утилітами, накладає обмеження на сумарний струм гармонічних спотворень, рівний 5 %. Варто зазначити, що існують додаткові стандарти МЕК, наприклад, МЕК 61000-3-2,12, які застосовані до систем низької напруги, а також визначають максимальні межі для окремих гармонік струму.

На підставі проведених досліджень [6,7], можна зробити висновок, що THD напруги в процесі досліджень практично завжди знаходиться в межах норми, а THD струму відповідає нормам, коли потужність фотоелектричних перетворювачів близька до номінальної. Крім того, може змінюватися значення коефіцієнта потужності, який зменшується до значень нижче допустимих меж протягом часу низької сонячної інсоляції. Реактивна потужність може істотно змінюватися впродовж дня. Відсутність належного контролю за зміною реактивної потужності може викликати різні проблеми в роботі розподільної мережі. Швидкі зміни активної та реактивної потужності, яку віддають фотоелектричні системи в локальну електромере-

жу, при дуже високій щільності ввімкнення таких систем, можуть викликати швидке перемикавання конденсаторів. У зв'язку з цим, такі стрибки напруги і коливання можуть відбуватися з непередбачуваною амплітудою і тривалістю. Такі перехідні процеси призводять до виходу з ладу чутливого електронного обладнання або мінімізації тривалості роботи елементів мережі, якщо амплітуда перехідного сигналу перевищує певні межі. Таким чином, бажано зменшити імовірність виникнення таких перехідних процесів.

При дослідженнях на фотоелектричній системі в Івано-Франківську при генеруванні в фазу В коефіцієнт потужності і реактивна потужність практично не змінювалися, однак при переключенні даної системи генерування в фазу С відбулося коливання значень реактивних потужностей зсуву та спотворення, яке припинилося після вимкнення інвертора. Крім того, вимірювальний комплекс зафіксував таке ж коливання значення коефіцієнта потужності, що може призвести до проблем з засобами компенсації реактивної потужності. Значення сумарного коефіцієнта гармонічних спотворень на першому етапі досліджень в фазі В під час генерування становило 5-7 %, а на третьому етапі під час генерації в фазу С THD струму збільшився до діапазону 21-31 %, що не відповідає нормованим значенням.

Вирішення задачі узгодження параметрів електротехнічних комплексів, що містить джерело локальної генерації відновлювальної енергетики, дозволить покращити роботу електротехнічного обладнання, систем релейного захисту та автоматики та підвищить надійність та енергоефективність елементів енергосистеми.

Для найбільш ефективного визначення впливу фотоелектричної системи на мережу розрахунок доцільно проводити комплексним методом, згідно з яким частка впливу на ПЯЕ залежить від точки приєднання до енергосистеми. Відповідно, локальні джерела генеруван-

ня, які віддають енергію в мережу 0,4 кВ, відносять до першого рівня генерації. Другий рівень генерування – це мережі 6 (10) кВ після трансформації напруги.

Щоб врахувати вплив сонячних джерел генерування на мережу, необхідно визначити динамічний комплексний опір мережі, який змінюється в часі

$$Z = \frac{U(t)}{i(t)} = \sqrt{R_K^2 + (k\omega L - \frac{1}{k\omega C})^2}, \quad (1)$$

де $U(t)$ - миттєві значення напруги,

$i(t)$ - миттєві значення струмів,

R_K - активний опір,

L - індуктивність,

C - ємність,

k - порядковий номер гармоніки,

ω - частота,

тож згідно з рівнянням (1) можна виявити умо-

ву резонансу $k\omega L = \frac{1}{k\omega C}$ [5].

Як первинні перетворювачі енергії з сонячної в електричну використовують фотомодулі з різними вольт-амперними характеристиками (ВАХ). За формою ВАХ близька до режиму джерела струму, залежність напруги фотоперетворювача від величини сонячної інсоляції мінімальна. У випадку комутації струму фотомодулем і передачею в мережу з стандартним допуском відхилення напруги 5 %, режим роботи інвертора можна регулювати, змінюючи кут ввімкнення IGBT модулів, регулювання якого призводить до збільшення кількості вищих гармонік напруги. Лінія, яка з'єднує вихід інверторів та енергосистему, є сукупністю активного і реактивного опорів ліній електропередачі (Z_n) для гармонік n -го порядку. Гармонічний струм n -го порядку через опір Z_n створює напругу з гармонічними складовими, яка має більші спотворення при більшому опорі системи. Особливістю електричних мереж з несинусоїдними напругами є зміна характеру спотворень струму та напруг при зміні характеру опору мережі. При незначному активному, але значно більшому індуктивному опорі напруга першої і k -ої гармоніки може бути записана так:

$$U_1 = X_L I_1 = \omega L I_1; U_K = X_{LK} I_{1K} = k\omega L I_{1K}, \quad (2)$$

відповідно коефіцієнт спотворення кривої

$$K_{СП} = \frac{I_K}{I_1} = \frac{U_K}{kU_1}. \quad (3)$$

В колах з індуктивним опором відношення амплітуд гармонік струму в k раз менше за відношення тих же амплітуд гармонік напруги. Відповідно, збільшення значення індуктивного опору мережі, до якої згенеровано несинусоїдну напругу, призведе до згладжування кривої струму. Протилежна реакція мережі буде при практично ємнісному опорі

$$I_{1m} = \omega C U_{1m}; I_{1Km} = k\omega C U_{1Km}, \quad (4)$$

відповідно коефіцієнт спотворення кривої

$$K_{СП} = \frac{kU_K}{U_1}, \quad (5)$$

тобто відношення амплітуд гармонік струму в k раз більше від відношення амплітуд гармонік напруг і при збільшенні ємнісної складової крива струму буде більш спотворена.

При використанні методу симетричних складових для розрахунку параметрів системи можна зробити висновок, що при ємнісному опорі мережі крива струму буде спотворюватися більше. При певних параметрах мережі може виникнути явище резонансу напруги. Якщо потужності СЕС будуть співрозмірні з потужностями традиційних джерел, то при коливаннях частоти за певних значень довжини ліній електропередач можливе погіршення якості електроенергії. Як наслідок, виникають перевантаження розподільчих мереж через збільшення діючої величини струму, перевантаження нульових діючих провідників через додавання гармонік 3-го порядку, спотворення напруг, що, в свою чергу, зумовлює зниження робочого ресурсу чутливих споживачів, перевантаження, вібрацію і старіння робочих електричних апаратів. Наявність коливань потужності СЕС впливає на нелінійні параметри системи [5].

Для техніко-економічної оцінки роботи фотоелектричної станції доцільно використати цільову функцію оптимізації COE (Cost of Energy) – вартість електроенергії на виході з установки, а також загальний прибуток від продажу електроенергії TIOES (Total Income of Energy Sold)

$$TIOES = \Pi_{\Delta W} - B_M - TAC - Z_{EMC}, \quad (6)$$

де $\Pi_{\Delta W}$ - річний прибуток від проданої електроенергії за «зеленим тарифом»,

B_M - ціна річної спожитої електроенергії з мережі,

TAC (Total Annualized Cost) - сумарна вартість коштів, затрачених на фотоелектричну станцію, її встановлення та експлуатацію з врахуванням інфляції та ставки дисконтування,

Z_{EMC} - збитки від несинусоїдності та несиметрії через роботу фотоелектричної електростанції.

Електромагнітна складова збитку від втрат електроенергії може мати кілька складових: збитки від несинусоїдальності, несиметрії та флікера [7]:

$$Z_{EMC} = Z_{NSIN} + Z_{NS} + Z_F. \quad (7)$$

Додаткові втрати активної потужності зумовлені несинусоїдністю

$$\Delta P_{NSIN} = \frac{\Delta P_H}{Z_{1*}} \sum_{n=2}^s \frac{U_{H*}}{n\sqrt{n}},$$

де ΔP_H - номінальні втрати активної потужності в струмоведучих частинах обладнання, кВт,

$Z_{1*} = \frac{Z_1}{Z_H}$ - відносний повний опір елемента мережі струму основної гармоніки,

$U_{H*} = \frac{U_n}{U_H}$ - відносне значення напруги n -ої гармоніки,

n – число гармонік, яке розглядається.

З врахуванням втрат через несинусоїдальність річні збитки, зумовлені втратами потужності через несинусоїдальність:

$$Z_{NSIN} = \beta T_C \Delta P_{NSIN} 10^3 + \Delta I_P K_P, \quad (8)$$

де ΔI_P - нормативний коефіцієнт відрахування на реновацію від капітальних затрат K ,

β - вартість втрат електроенергії,

T_C - час роботи електрообладнання.

Додаткові втрати від несиметрії

$$\Delta P_{NS} = \frac{U^2_{Hr_2}}{Z_2^2} \alpha_U^2, \quad (9)$$

де r_2 і Z_2 - активний і повний опір елементів системи електропостачання струму зворотної послідовності,

α_U^2 - коефіцієнт несиметрії, відповідно річний збиток від несиметрії

$$Z_{NS} = \beta T_C \Delta P_{NS} 10^3 + \Delta I_P K_P. \quad (10)$$

Даний розрахунок дасть змогу більш коректно врахувати розмір прибутку від продажу електроенергії.

Також на особливу увагу заслуговує вирішення питання особливості обліку однофазного генерування сонячної енергії в мережу. Крім явища виникнення несиметрії струмів та напруг, яке також негативно впливає на роботу мережі, деякі підприємства мають вирішувати проблеми з обліком виробленої енергії. Якщо власник встановлює сонячну фотоелектричну установку, то без договору щодо невикористаної енергії, яка генерується в мережу, він повинен заплатити за її надлишок. За якою ціною у вас приймуть мережі віддану електроенергію і чи приймуть взагалі - залежить від місцевих правил. Існують декілька шляхів вирішення даної проблеми:

1. Використання автономної системи з акумуляторами, які будуть заряджатися і розряджатися щодня, без підключення до мережі. Циклічні режими роботи акумуляторів з періодичними або постійними глибокими розрядами різко скорочують термін служби акумуляторів.

2. Підключити систему до мережі через гібридний інвертор, який може давати пріоритет для сонячних батарей при живленні навантаження. Цей варіант можливий і працездатний і донедавна єдиним способом забезпечити використання енергії від сонячних батарей не тільки під час аварій на мережах, але й тоді, коли мережа є. Недолік даної організації електропостачання - необхідність наявності в системі акумуляторів, гібридного інвертора, контролера заряду для сонячних батарей. Перевага - ви отримуєте резервну систему електропостачання, яка може живити ваше навантаження при аваріях в енергомережах. Потрібно враховувати, що не всі гібридні інвертори можуть забороняти передачу надлишків електроенергії від сонячних батарей в мережу. Якщо такої функції заборони немає, то енергія може проходити через лічильник назад в мережу.

3. Використовувати мережевий фотоелектричний інвертор і двонаправлені лічильники електроенергії. Цей варіант найбільш оптимальний і надійний. Електроенергія від сонячних батарей перетворюється в змінний струм з максимальною ефективністю і споживається в момент генерування. Немає втрат на заряджання-розряджання акумуляторів. Такий метод застосовується там, де за віддану в мережу електроенергію платять за підвищеним тарифом або враховують у загальному балансі споживання (тобто фактично приймають назад за роздрібною ціною за кВт·год). Лічильники можуть бути багатотарифними. Двонаправлені лічильники враховують віддану електроенергію в окремому регістрі і не додають її до спожитої. Фактично, надлишки електроенергії даруються місцевим електричним мережам. Можна використовувати двонаправлений індукційний лічильник, який може крутитися у зворотний бік, якщо триває віддача електроенергії в мережу. Але і він уже знятий з виробництва, і в нових або модернізованих будинках його встановити вже неможливо.

4. Використовувати систему з віддачею електроенергії в мережу спільно з WATTrouter. Надлишки електроенергії можуть надходити як від гібридних інверторів з дозволеною віддачею в мережу, так і від фотоелектричних інверторів. На відміну від всіх перерахованих вище випадків, електроенергія від сонячних батарей використовується повністю і з максимальною ефективністю, віддачі електроенергії в мережу немає. Це є найкращим варіантом організації електропостачання з сонячними батареями, за винятком під'єднання до енергосистеми згідно з «зеленим тарифом». Можна використовувати практично будь-які лічильники. WATTrouter має 6 виходів, до яких можна підключити 6 різних навантажень (скерувати надлишки електроенергії на нагрівання басейну, на водяні насоси, на живлення кондиціонерів, освітлення та обігрівання приміщень в холодний період).

5. Мережеві фотоелектричні інвертори з давачем струму, який встановлюють на виході лічильника і регулювання процесу генерування, здійснюють залежно від наявності надлишків електроенергії. Такі мережеві інвертори мають можливість підключення окремого блоку, що відслідковує надлишки, і дає команду інвертору знизити ступінь генерування. Є кілька варіантів вирішення цієї задачі. Наприклад, німецькі інвертори Steca вимагають, крім спеціального інвертора і пристроїв стеження за надлишками застосовувати ще й спеціальний лічильник. Ін-

Література

вертори SMA також вимагають спеціальну систему моніторингу. При цьому німецькі інвертори не можуть повністю обмежити віддачу в мережу, тому у них немає такого завдання, і час регулювання у них досить великий. Вартість китайських інверторів може бути істотно менша (Sofarsolar, Growatt), проте все ж комплект мережевого інвертора і додаткового контролера коштує дорожче, ніж просто мережевий інвертор. Це рішення, хоча і запобігає віддачі енергії в мережу, має великий недолік - неповне використання енергії від сонячних батарей [8].

Проте всі вище перераховані способи не зможуть дати прибутку, який забезпечує держава за генерування за «зеленим тарифом», а оформити технічну документацію для під'єднання до мережі стає ще простіше з допомогою спеціалізованих фірм та навчальних сайтів.

Перспективним напрямком подальших досліджень є моделювання роботи сонячних електростанцій та дослідження їх впливу на параметри якості електроенергії локальних електротехнічних комплексів при динамічній зміні навантаження приєднаної енергосистеми, а також коливному характері генерування джерел сонячної енергії.

Висновки

1. Для отримання максимального прибутку від виробництва сонячної електроенергії доцільно врахувати електромагнітну складова збитку від втрат електроенергії, яка складається з величини втрат від несинусоїдальності та несиметрії виробленої електроенергії. Зменшивши ці складові можна отримати підвищення енергоефективності електротехнічного комплексу з відновлювальними джерелами.

2. Використання ІВ АПК дає змогу в реальному часі проводити експериментальні дослідження енергетичних параметрів та показників якості електроенергії сонячних електростанцій та виявити негативний вплив сонячної електростанції на параметри електричної мережі та роботу електротехнічного обладнання.

3. Використання інверторів при певних параметрах мережі може спричинити резонансні процеси та коливання реактивної потужності, що негативно впливає на роботу електротехнічного обладнання. Для запобігання входженню в аварійні режими необхідно проводити експериментальні дослідження роботи сонячних електростанцій з симулюванням зміни характеру навантаження мережі та встановлювати спеціальні фільтри.

1 Лежнюк П. Д. Оптимізація режиму розподільних електричних мереж з розосередженими джерелами електроенергії. [Текст] / П. Д. Лежнюк, О. А. Ковальчук, В. В. Кулик // Наукові праці Донецького національного технічного університету. – 2011. – № 11(186). – С. 250-254.

2 Кузьмик О. В. Аналіз впливу розосередженого генерування на режим роботи розподільних електричних мереж. [Текст] / О. В. Кузьмик, В. О. Комар // Вісник НТУУ «КПІ». Серія «Гірництво». – 2014. – № 25. – С. 108-113.

3 Кулик В. В. Дослідження ефективності сумісної експлуатації локальних електричних мереж з ВДЕ та систем централізованого електропостачання [Текст] / В. В. Кулик, О. Б. Бурікін, Ю. В. Малогулко // Вісник НТУУ «КПІ». Серія «Гірництво». – 2014. – № 5. – С. 113-120.

4 Бацала Я. В. Аналіз показників якості електроенергії сонячної електростанції. [Текст] / Бацала Я. В., Гладь І. В., Ніколін У. М. // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 2013. – № 4(49). – С. 81-89.

5 Бекиров Э.А. Анализ энергетических параметров систем электроснабжения при использовании возобновляемых источников энергии [Текст] / Э.А. Бекиров // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. – 2013. – № 8 (114). – С. 230-237.

6 Сиромаха С.С. О необходимости учета режима работы и импеданса системы электроснабжения при моделировании резонанса токов [Текст] / С.С.Сиромаха, Д.С. Осипов, В.Т. Черемисин // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 5. – 8 с. – Режим доступа до журн.: <http://www.science-education.ru/ru/article/view?id=15252>

7 Пивняк Г. Г. Расчеты показателей электромагнитной совместимости: учеб. пособие / Г.Г. Пивняк, И.В. Жежеленко, Ю.А. Папаика ; М-во образования и науки Украины, Нац. горн. ун-т. – Д. : НГУ, 2014. – 113 с.

8. WATTrouter. Режим доступу: <http://www.watrouter.ru/>

Стаття надійшла до редакційної колегії
24.05.17

Рекомендована до друку
професором **Костишиним В.С.**
(ІФНТУНГ, м. Івано-Франківськ)
професором **Николайчуком Я.М.**
(Тернопільський національний технічний
університет, м. Тернопіль)