

УДК 621.391:006

ТЕНДЕНЦІЇ ЦИФРОВОЇ ОБРОБКИ СИГНАЛІВ ТА СИНХРОНІЗАЦІЇ В ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЦІ НА СУЧАСНОМУ ЕТАПІ

DOI 10.36994/2788-5518-2021-02-02-08

Бірюков М.Л., к.т.н., с.н.с. Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", Київ, Україна. nlbir2@ukr.net,

Тріска Н.Р., к.т.н., с.н.с. Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", Київ, Україна. ntriska@ukr.net

Анотація. У статті проаналізовано та узагальнено основні тенденції та рушійні сили розвитку електроенергетичної галузі на сучасному етапі. Зокрема, розглянуто задачі модернізації існуючих енергосистем для запровадження "інтелектуальних мереж електропостачання" (smart grids) та реалізації положень Концепції "зеленого" енергетичного переходу України до 2050 р. Особливу увагу приділено актуальним завданням цифрової обробки сигналів в інтелектуальних енергосистемах, а також забезпечення об'єктів енергетичної галузі сигналами синхронізації частоти та часу на базі сучасних технічних рішень.

Ключові слова: електроенергетика, інтелектуальні мережі електропостачання, "зелений" енергетичний перехід, цифрова обробка сигналів, синхронізація, точний час, вимірювання частоти, точність.

TRENDS OF DIGITAL SIGNAL PROCESSING AND SYNCHRONIZATION IN THE ELECTRIC POWER INDUSTRY AT THE PRESENT STAGE

Nikolai Biriukov, Ph.D., S.R.F. National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine. nlbir2@ukr.net,

Natalia Triska, Ph.D., S.R.F. National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine. ntriska@ukr.net,

Abstract. The article deals with the actual trends and drivers of the electric power development worldwide and specifically in Ukraine. Deployment of new methods of the electric energy generation and transmission based on the renewable energy concept (primarily in the European Union countries) as well as the energy market liberalization have changed the power systems infrastructure significantly. The current power supply networks modernization is based on the "smart grids" concept involving the advanced digital processing technics and the modern information and communication technologies. The power supply networks and energy market structure in Ukraine should be modified to realize

the Ukraine's 2050 Green Energy Transition Concept. It is important to take into account the both technical and regulatory aspects as well as the existing technical facilities of power systems and possibility of their reconstruction. The role of both traditional and advanced digital processing technics is increasing with the smart grid deployment. The real-time evaluation and advanced processing of the power system electrical parameters (operating frequency, voltage level etc.) is becoming an integral part of the smart grid maintenance in both normal and emergency modes. The article is focused on the actual issues of the digital signal processing at the stage of transition to smart grids. The role of the frequency and time synchronization in smart grids is considered. The smart grid synchronization should be based on the well-proven technical solutions used in telecommunication networks but adopted for the power system needs. It is also noted that some traditional metrics of synchronization signals in telecommunication networks may be used for the digital processing of electrical signals in the modern power systems.

Keywords: smart grids, digital signals processing, synchronization, precise time, frequency measurement, accuracy.

Вступ

Електроенергетику традиційно розглядали як стабільну галузь із повністю сформованими технологічними процесами, що не потребує жодних новацій. Але протягом останніх десятиліть ситуація суттєво змінилась. Трансформація підходів до розвитку енергетики в контексті збереження навколишнього середовища, зокрема, боротьби зі зміною клімату, сформувала в сучасному суспільстві стійкий попит на більш екологічно чисті і водночас дешеві джерела електроенергії. Разом з тим необхідно зберегти високий рівень безпеки електропостачання в умовах фундаментальних змін у структурі виробництва та споживання електроенергії і модернізації економіки з врахуванням потреб сталого розвитку. Це потребує нових концептуальних підходів до розбудови, модернізації та експлуатації енергосистем на базі сучасних технічних рішень з широким використанням інформаційно-комунікаційних технологій (ІКТ).

Аналіз тенденцій та рушійних сил в сучасній електроенергетиці

Протягом ХХ ст. постійне зростання обсягів споживання електричної енергії зумовило стрімкий розвиток технологій генерації та передавання енергії з використанням різних джерел – від традиційних технологій спалювання викопного палива (камінне вугілля, торф, природний газ, нафта) до атомної енергетики та відновлюваних джерел (енергія води, сонця та вітру). Традиційно для транспортування електричної енергії застосовувалися лінії електропередачі змінного струму, але останнім часом зростає частка високовольтних ліній електропередачі постійного струму (HVDC– High Voltage Direct Current), що в значній мірі зумовлене перспективами розвитку морської вітроенергетики [1].

Тенденції розвитку сучасних енергосистем визначаються не лише технічними можливостями галузі, а й багатьма іншими чинниками екологічного, соціально-економічного та політичного характеру. Так, протягом останніх десятиліть в багатьох розвинених країнах (зокрема, в Європейському

Союзі) електроенергетична галузь пройшла шлях від вертикальної інтеграції (об'єднання виробництва, передавання, а іноді і розподілу електричної енергії під одним управлінням) до сучасного лібералізованого ринку електроенергії, що динамічно змінюється [1, 2]. Це суттєво вплинуло на процеси планування та експлуатації енергосистем, а також на структуру енергетичного балансу. Зокрема, лібералізація енергетичного ринку разом із сприятливим суспільно-політичним кліматом (тенденція декарбонізації економіки, тобто зменшення викидів парникових газів, що виділяються під час спалювання викопного палива і мають негативний вплив на навколишнє середовище) створила сприятливі умови для розвитку виробництва енергії з відновлюваних джерел. Слід зауважити, що важливу роль у розробці та впровадженні відповідних технологій відіграє енергетична політика держави, зокрема, запровадження дієвих схем підтримки та субсидій для проектів в сфері сонячної та вітрової енергетики.

З технічної точки зору, впровадження нових технологій генерації та передавання електричної енергії, а також збільшення кількості учасників енергетичного ринку та взаємозв'язків між ними призводить до ускладнення структури сучасних енергосистем. Для забезпечення надійної та ефективної експлуатації таких систем необхідний інтенсивний та всебічний моніторинг характеристик електричних сигналів з використанням сучасних методів обробки сигналів. Перетворення первинного аналогового сигналу в цифрову форму дозволяє підключати різноманітні вторинні цифрові "інтелектуальні" пристрої, призначені для спостереження, управління, захисту та зв'язку з іншими компонентами системи. Добре відпрацьований математичний апарат цифрової обробки сигналів може бути успішно застосований для вирішення великої кількості практичних задач сучасної енергосистеми – від діагностики та усунення аварійних ситуацій до прогнозування поведінки системи, а також оптимізації процесів маршрутизації та тарифікації [1, 3].

Таким чином, сучасна електроенергетика знаходиться на етапі модернізації інфраструктури та технологічних процесів в рамках концепції створення "інтелектуальних мереж електропостачання" (англійський термін – "smart grid") на базі сучасних інформаційно-комунікаційних технологій (ІКТ). Базові моделі взаємодії різних елементів мережі "smart grid" на засадах ІКТ визначено, зокрема, в Рекомендації Міжнародного Союзу Електрозв'язку (ITU-T) Y.2072 [2].

В різних країнах, залежно від конкретних умов (існуючої інфраструктури, економічної та регуляторної політики держави), модернізація енергосистем відбувається різними темпами і з різними пріоритетами, але загальні тенденції залишаються незмінними. Сучасна енергосистема має забезпечувати високі показники економічної ефективності, надійності та сталості виробництва та розподілу електроенергії з врахуванням змін у структурі споживання, а також зростання частки відновлюваних джерел електроенергії та пов'язаних з цим додаткових перетворень з одного виду енергії в інший [4]. Також мають бути забезпечені можливості для інтеграції різних енергосистем, що передбачає

використання уніфікованих технічних рішень (зокрема, мереж Ethernet/IP та стандартних протоколів). Так, перед енергосистемою України наразі стоїть завдання модернізації інфраструктури для забезпечення можливості приєднання до енергосистем країн ЄС. Враховуючи існуючий стан енергосистеми України, має бути передбачений перехідний період, протягом якого її застарілі елементи (перш за все, підстанції старого зразка) будуть замінені або реконструйовані [5].

Модернізація енергосистем здійснюється на базі концепції "цифрової підстанції", що передбачає обмін даними між елементами підстанції (реєстраторами аварійних повідомлень, пристроями релейного захисту та автоматики – РЗА, вимірювальними пристроями тощо) відповідно до вимог стандарту IEC 61850-8-1 (ДСТУ IEC/TR 61850-1:2013 Комунікаційні мережі та системи на підстанціях. Частина 1. Вступ і огляд). В цих умовах зростає роль сучасних методів цифрової обробки електричних параметрів енергосистеми на всіх етапах виробництва та передавання електроенергії

Концепція «зеленого» енергетичного переходу України до 2050 р.: основні напрямки модернізації та подальшого розвитку електроенергетики

Основні напрямки розвитку енергетичної галузі України на найближчі десятиріччя базуються на загальносвітових і, в першу чергу, європейських тенденціях "зеленої" енергетики та забезпечення сталого розвитку економіки. Для реалізації цих завдань Міністерством енергетики України (Міненерго) розроблено План заходів з реалізації етапу "Реформування енергетичного сектору (до 2020 року) "Енергетичної стратегії України на період до 2035 року "Безпека, енергоефективність, конкурентоспроможність" (затверджений Розпорядженням КМУ № 497-р від 06.06.2018), а також Концепцію "зеленого" енергетичного переходу України до 2050 р [6] (оприлюднена на сайті Міненерго 21.01.2020 р.). Концепція [6], зокрема, передбачає:

- підвищення енергоефективності виробництва електроенергії за рахунок впровадження екологічних, відновлювальних джерел електроенергії (ВДЕ), частка котрих повинна скласти до 70 % до 2050 року за умови економічно обґрунтованої вартості та раціонального використання інших ресурсів;

- декарбонізацію (зменшення енергоємності та вуглецеємності) економіки в цілому і, в першу чергу, енергетичної сфери;

- підвищення ефективності управління транспортуванням та розподілом електроенергії (ЕЕ) з метою зменшення імпорту за рахунок зменшення втрат та споживання ЕЕ майже на 50 % економії;

- розбудову сучасних ринків енергетики України з високим ступенем відкритості та конкретності та їх інтеграцію з європейськими ринками;

- наукові дослідження та інновації, а також поглиблення співпраці науки і бізнесу з актуальних питань "зеленого" енергетичного переходу).

Реалізація цих та інших сучасних завдань неможлива без суттєвої модернізації електроенергетичного комплексу (ЕЕК) України. Декарбонізація енергетики призведе до значного збільшення ролі децентралізованого електропостачання, що вимагатиме запровадження та використання сучасних технологій, пов'язаних з управлінням попитом, розподіленими генерацією та накопиченням. Стрімке збільшення кількості енергетичних об'єктів, зв'язків та ускладнення енергетичних систем потребуватиме принципово нової технологічної платформи і розгортання інтелектуальних мереж електропостачання на базі сучасних цифрових технологій та інформаційно-комунікаційних систем. Діджиталізація електричних мереж дозволить більш широко і надійно використовувати об'єкти відновлюваної енергетики, технології накопичення енергії, динамічного ціноутворення, та залучати споживачів до управління попитом, дистанційного та "інтелектуального" керування енергоспоживанням. Розвиток інтелектуальних енергетичних мереж має супроводжуватись належною увагою до забезпечення їхньої кібербезпеки з метою протидії ризикам дестабілізації роботи енергетичних систем та надійності енергопостачання [6].

Особливості цифрової обробки сигналів в сучасних енергосистемах

Інфраструктура інтелектуальних мереж електропостачання ("smart grid") має формуватися на базі уніфікованих технічних рішень та сучасних методів цифрової обробки сигналів з врахуванням особливостей об'єктів ЕЕК. Для розробки ефективних технічних рішень слід чітко розуміти, як відбувається обробка сигналів в сучасній електроенергетиці. Іншими словами, необхідно визначити, які параметри (і з якою точністю) слід вимірювати, і які методи підходять для цього найкраще, а також які джерела завад можуть бути ідентифіковані [4].

В умовах активного впровадження інтелектуальних мереж електропостачання традиційні та удосконалені інструменти цифрової обробки сигналів набувають особливого значення. Електричні параметри необхідно розглядати в більш складних умовах, враховуючи додаткові частотні складові, які можуть викликати сильні коливання та вплинути на результати вимірювань. Більш того, непередбачуваність поведінки складної енергосистеми та неможливість контролю всіх її параметрів у всіх місцях зумовлює необхідність застосування відповідних аналітичних засобів оцінювання параметрів системи [3]. Таким чином, оцінювання та додаткова обробка електричних параметрів енергосистеми стають невід'ємною частиною її технічної експлуатації.

Будь-який вимірюваний первинний синусоїдальний сигнал (напруги або струму), залежно від цілей дослідження, можна змінити таким чином, щоб форма сигналу відображала його характерні властивості. Спотворення форми сигналу в енергосистемах по своїй природі є нестаціонарними, оскільки зумовлені постійними змінами конфігурації системи, типів та рівнів навантаження. Часто нестаціонарним є навантаження енергосистеми, особливо промислове обладнання з електронним управлінням. Через

численні пуски та гальмування таке навантаження може викликати постійні зміни амплітуди сигналів струму. Введення нестаціонарних токів не буде проблемою для системи з потужною шиною, але на слабкій шині може зумовити нестаціонарні спотворення форми сигналу напруги.

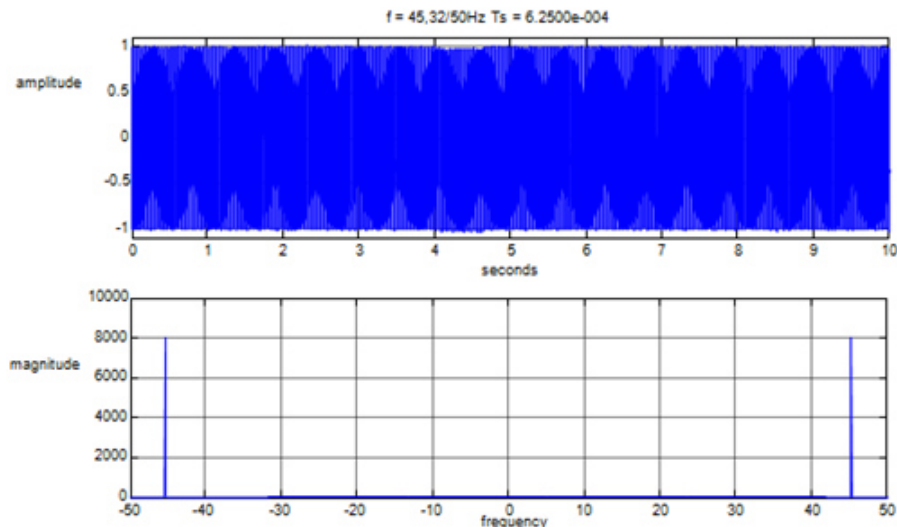


Рис. 1. Результати моделювання типового сигналу в енергосистемі з частотою 45,32 Гц за наявності амплітудних та фазових завод

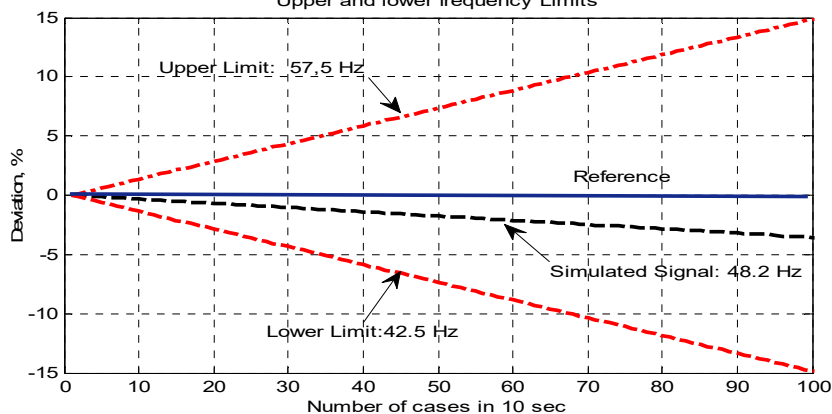


Рис. 2. Результати моделювання нормованих поточних значень частоти (серія зі 100 вимірювань)

Нестационарний характер спотворень форми сигналу вимагає точного інструменту аналізу, а його візуалізація є необхідною для оцінювання якості електроенергії, наприклад, для визначення впливу гармонік на електронні пристрої та встановлення обмежень для нестаціонарних гармонік. Відслідковування часових змін гармонік дозволяє оцінити процеси підвищення температури та пов'язаного з ним старіння обладнання.

Окрім спотворень форми, в сигналах енергосистеми спостерігаються й інші типи спотворень, які необхідно виявляти та класифікувати для визначення можливих причин та способів їх усунення. Очевидно, що ці типи сигналів мають нестационарний характер, тому для виявлення та класифікації спотворень слід використовувати частотно-часовий аналіз.

Одним з базових параметрів енергосистеми, що підлягає вимірюванню й аналізу, є основна частота, яка використовується для визначення робочого стану системи і контролю якості електроенергії, а також є основою для оцінювання інших параметрів (зокрема, амплітуди та фази сигналів струму та напруги), управління потужністю, захисту засобів генерації, налаштування релейного захисту та відновлення навантаження [7].

Слід зазначити, що сучасні методи цифрової обробки сигналів дозволяють отримати значно більше інформації про стан мережі, ніж це було раніше. В якості прикладу на рис. 1 продемонстровано сигнал з фактичною частотою 45,32 Гц (при номінальному значенні 50 Гц). На верхньому графіку представлено форму модельованого сигналу, отриману з частотою дискретизації $f_s = 1,6$ кГц, а на нижньому – основні спектральні складові цього сигналу на частотах близько 45 Гц. Такий метод є зручним для оперативного оцінювання частоти в мережі.

Під час досліджень методів цифрової обробки сигналів в сучасних енергосистемах слід враховувати такі фактори [3,4].

Під час оцінювання основної частоти енергосистеми компроміс між точністю та часом збіжності методу оцінювання частоти залежить від конкретної задачі. Так, в задачах управління та захисту, де головну роль відіграє час оцінювання, певна похибка може бути прийнятною, якщо вона не спотворює кінцевий результат. Однак в задачах моніторингу основною проблемою є забезпечення високої точності вимірювання частоти.

В енергосистемах спостерігаються перехідні процеси та аномальні умови, тому криві напруги та струму не будуть чисто синусоїдальними. Традиційні методи оцінювання частоти (зокрема, алгоритми, засновані на переходах через нуль), можуть давати велику похибку [3]. Тому необхідно розробляти більш швидкі та точні методи оцінювання частоти спотворених та нестационарних сигналів.

Аспекти синхронізації в сучасних енергосистемах

Одним з важливих напрямків створення сучасних інтелектуальних енергосистем є забезпечення об'єктів енергетичної галузі сигналами синхронізації частоти та часу на базі сучасних технічних рішень.

Традиційні методи контролю та вимірювань в енергосистемах (зокрема, система контролю SCADA) засновані на стандарті IEC 60870, який передбачає абсолютну точність фіксації часу порядку ± 1 мс. Така точність може бути досягнута традиційними засобами, наприклад, за допомогою мережевого протоколу часу NTP (Network Time Protocol). Однак для опрацювання "великих

даних" (технологія "Big Data") та синхронізованих вимірювань векторів синусоїдальних величин (так званих "синхрофазорів") необхідна більш висока точність. Вимірювання виконують в сусідніх контрольних точках, порівнюючи результати за поточними значеннями дискретних відліків (до 4096 відліків за період), для чого потрібна високоточна синхронізація моментів вимірювань – абсолютна похибка початкової фази шкал часу вимірювачів має бути $\leq \pm 1$ мкс. Тому сучасна концепція "цифрової підстанції" передбачає використання протоколу точного часу PTPv2 за стандартом IEEE 1588-2008, а точніше – спеціалізованого "енергетичного профілю" цього протоколу (Power Profile), що визначається стандартом IEEE C37.238-2017 [8].

В цих умовах актуальним завданням є впровадження мережі синхронізації ЕЕК України з врахуванням як міжнародного досвіду, так і особливостей інфраструктури вітчизняної енергосистеми. Окрім детального опрацювання технічних та проектних рішень із забезпечення синхронізації частоти та часу, необхідно приділити значну увагу розробці методик оцінювання відповідності параметрів синхронізації встановленим вимогам. На всіх етапах цієї роботи доцільно застосовувати технічні рішення з синхронізації, що добре зарекомендували себе в телекомунікаційних мережах, з врахуванням особливостей об'єктів ЕЕК.

З іншого боку, деякі методи та математичний апарат, що традиційно використовуються для оцінювання параметрів сигналів синхронізації в телекомунікаційних мережах, можуть бути застосовані для вирішення завдань цифрової обробки та поглибленого дослідження сигналів сучасних енергосистем. Так, за допомогою метрик сигналів синхронізації, не чутливих до лінійної нестационарності процесів (наприклад, функцій родини дисперсії Алана), можна оцінити потужність та спектральні властивості модулюючих коливань [4]. Питання використання традиційних метрик цифрової обробки сигналів синхронізації в сучасних енергосистемах потребують подальшого вивчення.

Висновки

Для розгортання "інтелектуальних мереж електропостачання" (smart grids) та реалізації положень Концепції "зеленого" енергетичного переходу України до 2050 р. необхідна модернізація електроенергетичного комплексу (ЕЕК) України на базі сучасних інформаційно-комунікаційних технологій.

Щоб обрати найбільш ефективні методи цифрової обробки сигналів, що застосовуються для управління, захисту та моніторингу інтелектуальних енергосистем, необхідно розуміти поведінку системи та її параметрів як у штатному режимі, так і в аварійних або нетипових ситуаціях. Тому важливим аспектом побудови сучасних енергосистем є дослідження методів оцінювання електричних параметрів, заснованих на різних методах обробки сигналів.

Ефективність багатьох технологічних процесів та систем управління в сучасній енергосистемі напряму залежить від синхронізації, і з появою нових

функцій та робочих процесів “цифрової підстанції” роль синхронізації зростатиме. Для забезпечення об’єктів енергетичної галузі сигналами синхронізації частоти та часу доцільно застосовувати технічні рішення, що добре зарекомендували себе в телекомунікаційних мережах, з врахуванням особливостей об’єктів ЕЕК. Крім того, методи та математичний апарат, що традиційно використовуються для оцінювання параметрів сигналів синхронізації в телекомунікаціях, можуть знайти застосування в процесах цифрової обробки сигналів сучасних енергосистем.

Література

1. Dirk, Van Hertem For Offshore and Supergrid of the Future/. Van Hertem Dirk , OriolGomis-Bellmunt, Jun LiangHVDC Grids. – Wiley-IEEE Press, 2016. – 528 p.
2. ITU-T Recommendation Y.2072 (05/2018) Framework for an energy-sharing and trading platform.
3. Paulo Fernando ,Ribeiro. Power systems signal processing for smart grids/: Paulo Fernando Ribeiro, Carlos Augusto Duque, Paulo Márcio da Silveira, Augusto Santiago Cerqueira.- John Wiley and Sons Ltd.- 2014.
4. Бирюков, Н.Л. Некоторые задачи оценивания частоты в современных энергосистемах/ Н.Л. Бирюков, Н.Р. Триска, М.Л. Шварц// The 11th International scientific and practical conference – Priority directions of science and technology developmentII (July 11-13, 2021) SPC – Sci-conf.com.uaII, Kyiv, Ukraine. 2021. – p. 158-165.
5. СОУ НЕК 35.101:2018 Загальні технічні вимоги до автоматизованих систем керування технологічними процесами (АСК ТП) підстанцій 220 – 750 кВ ОЕС України. – Київ, 2018.
6. Концепція «зеленого» енергетичного переходу України до 2050 р. (оприлюднена на сайті Міненерго 21.01.2020).
http://mpe.kmu.gov.ua/minugol/control/publish/article?art_id=245435079.
7. Правила улаштування електроустановок. Муненерговугілля України, 2017. – 617 с.
8. IEEE C37.238-2011/2017, “IEEE Standard Profile for Use of IEEE 1588 Precision Time Protocol in Power System Applications”, IEEE, 2011/2017.

References

1. Dirk, Van Hertem, OriolGomis-Bellmunt, Jun LiangHVDC Grids: For Offshore and Supergrid of the Future. – Wiley-IEEE Press, 2016. – 528 p.
2. ITU-T Recommendation Y.2072 (05/2018) Framework for an energy-sharing and trading platform.
9. Paulo Fernando ,Ribeiro. Power systems signal processing for smart grids/: Paulo Fernando Ribeiro, Carlos Augusto Duque, Paulo Márcio da Silveira, Augusto Santiago Cerqueira.- John Wiley and Sons Ltd.- 2014.
3. Biriukov N.L. Nekotoryie zadatchi ozenivania chastoty v sovremennykh energosystemach/ N.L. Biriukov., N.R. Triska , M. L.Schwartz// The 11th International scientific and practical conference – Priority directions of science and technology developmentII (July 11-13, 2021) SPC – Sci-conf.com.uaII, Kyiv, Ukraine. 2021. – p. 158-165.
4. SOU NEK 35.101:2018 Zagalnyi technichni vymogy do avtomatizovanykh system keruvannya technologitchnymy processamy (ASK TP) pidstantziy 220 – 750 kV OES Ukrainy. – Kyiv, 2018.
5. Konzeptzia «zelenogo» energetychnogo perechodu Ukrayiny do 2050 r. (opryludnena na sajti Minenergo 21.01.2020).
http://mpe.kmu.gov.ua/minugol/control/publish/article?art_id=245435079.
6. Pravyla ulashtuvannya elektroustanovok. Minenergovugilla Ukrainy, 2017. – 617 s.
8. IEEE C37.238-2011/2017, “IEEE Standard Profile for Use of IEEE 1588 Precision Time Protocol in Power System Applications”, IEEE, 2011/2017.