

# АНАЛІЗ ВПЛИВУ НЕСИНУСОЇДНОГО СИГНАЛУ ЗМІННОЇ НАПРУГИ ВІД СОНЯЧНОЇ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ НА ЕКСПЛУАТАЦІЙНІ ВЛАСТИВОСТІ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА

<sup>1</sup>Перетятко Ю. В., доц., <sup>2</sup>Реуцький М. О., доц., <sup>3</sup>Ляхова К. М., студентка  
КПІ ім. Ігоря Сікорського, <sup>1</sup>кафедра теоретичної електротехніки, <sup>2</sup>кафедра електромеханіки, <sup>3</sup>кафедра електропостачання

**Вступ.** Відновлювана енергетика (ВЕ) є актуальною і важливою енергетичною галуззю, роль якої в усьому світі з кожним роком зростає. Завдяки сприянню уряду України розвиток сонячної енергетики в останні роки також отримав новий поштовх, що призвело до приросту установленої потужності від ВЕ. Однак збільшення кількості підключень сонячних фотоелементів до енергосистеми впливає на якість електроенергії в мережі [1-7], і важливість поліпшення якості електроенергії залишається актуальною проблемою як для виробників електроенергії, так і для її споживачів, що особливо гостро проявляється в мережах низької напруги. Виникнення несинусоїдних струмів і напруг, несиметрія напруг та її коливання пов'язані з низьким коефіцієнтом потужності нелінійних навантажень з боку споживачів, та високим рівнем гармонік струмів, що виділяються сонячними фотоелектричними інверторами в мережі низької напруги, з боку виробників електроенергії.

Масове застосування малопотужних нелінійних електроспоживачів: побутових електроприладів, засобів комп'ютерної техніки, телекомунікаційних апаратів і т. ін., вносить істотне спотворення синусоїдальних кривих напруг в мережах низької напруги [1-4].

Електрична енергія постійного струму від сонячних батарей надходить на перетворювачі постійного струму у змінний (інвертори), далі вихідна трифазна напруга інверторів подається на трифазний трансформатор, включений за схемою трикутник-зірка, та надходить у енергосистему (рис. 1).

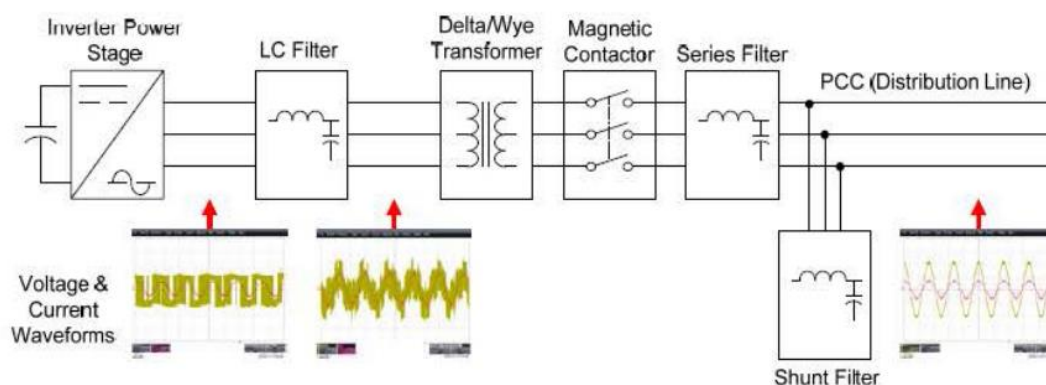


Рисунок 1 – Блок-схема інверторної системи

Теоретичні та експериментальні дослідження [2-4] підтвердили, що основними джерелами гармонічних складових в електромережі є інвертори. Основні показники якості електроенергії від сонячних електростанцій,

показники енергоефективності інверторів, які використовуються на даних станціях та вплив сонячних станцій на роботу електротехнічного обладнання, системи релейного захисту та надійність елементів енергосистеми детально проаналізовані в [2-4, 8, 9].

Аналіз вище наведених досліджень дозволяє дійти висновку, що силові електронні перетворювачі/інвертори, які не створюють чистих синусоїдальних сигналів та є складовими ланки при генерації електричної енергії енергоустановками на основі нетрадиційних відновлюваних видів енергії – сонячними електростанціями, вносять гармоніки в систему при підключенні до мережі низької напруги. При незначній потужності таких електрогенеруючих систем вони не викликають значних спотворень форми напруги і струму загальної енергосистеми, в яку відбувається генерація. Але при зростанні потужності цих електрогенеруючих систем, коли вона стає сумірною з потужністю загальної енергосистеми, має місце спотворення форми напруги і струму загальної мережі.

Зокрема зниження якості електричної енергії суттєво погіршує експлуатаційні властивості електромеханічних пристроїв, особливо асинхронних двигунів. У першу чергу це стосується небажаних змін механічних характеристик  $M = f(s)$  асинхронних двигунів. До того ж в них суттєво збільшуються втрати активної потужності, відповідна оплата за спожиту електричну енергію, а також зменшується потужність на валу. Одночасно активні частини під дією збільшених втрат активної потужності перегріваються понад встановлені нормативи [10]. Це призводить до скорочення терміну використання двигунів, збільшення їх аварійності.

**Мета роботи.** Проведення якісного аналізу впливу несинусоїдального сигналу змінної напруги від сонячної електростанції на експлуатаційні властивості асинхронного двигуна.

**Матеріали і результати досліджень.** Показники якості електричної енергії в точці приєднання повинні відповідати міждержавному стандарту «ГОСТ 13109-97. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения» [6].

Існуючими стандартами [6,7] встановлюються певні граничні показники на відхилення основних величин якості електричної енергії від встановлених нормативів.

Згідно стандарту [6] встановлено два види норм якості електроенергії: нормально припустимі і гранично припустимі.

Найбільш суттєвим з них є чотири показники:

- 1) відхилення напруги на виводах приймачів електричної енергії:
  - нормально припустимі  $\pm 5\%$ ,
  - гранично припустимі  $\pm 10\%$ ;
- 2) несинусоїдальність напруги характеризується двома показниками:
  - коефіцієнтом спотворення синусоїдальності кривої напруги,
  - коефіцієнтом  $n$ -ї гармонічної складової напруги;

зокрема коефіцієнти спотворення для  $U_{ном}=0,38$  кВ: нормально припустимі 8,0%, гранично припустимі 12%, для більш високих напруг вони знижуються; нормально припустимі коефіцієнти  $n$ -ї гармонічної залежать від парності гармонік та величини напруги  $U_{ном}$  і становлять від 6 і нижче відсотків; їх гранично припустима величина збільшується в 1,5 рази;

3) несиметрія напруг характеризується також двома показниками:

- коефіцієнтом несиметрії напруг за зворотною послідовністю, нормально і гранично припустимі його значення в точках загального приєднання до електричних мереж становлять 2,0 та 4,0% відповідно;
- коефіцієнтом несиметрії напруг за нульовою послідовністю, нормально і гранично припустимі його значення в точках загального приєднання до чотирьохпровідних електричних мереж з номінальною напругою 0,38 кВ становлять 2,0 та 4,0% відповідно;

4) відхилення частоти, нормально і гранично припустимі його значення становлять  $\pm 0,2$  та  $\pm 0,4$  Гц відповідно.

Допуски державних стандартів на показники якості електричної енергії обумовлені негативними впливами, які виникають при їх перебільшенні.

Негативний вплив наявний навіть у межах нормативних допусків, який можна відслідкувати на прикладі аналізу показників якості для асинхронного двигуна. Так, при допусках  $U_1 = 1,1U_{1ном}$ , усередненому коефіцієнті несинусоїдальності  $k_{нс} = 5\%$ , усередненому коефіцієнті несиметрії напруг  $\varepsilon = 2\%$  та  $f = f_{ном}$ , а також при середньостатистичному рівні навантаження асинхронних двигунів близько  $P_{2\beta} = 0,6P_{2ном}$  їх ККД може знижуватися більше, ніж на 5%.

Для аналізу наслідків зниження якості електроенергії у межах стандартів обрано асинхронний двигун 4А280S4У3 з номінальними даними при синусоїдальній напрузі живлення і нульових показниках відхилення якості електричної енергії:

$$U_{1ном} = 220В; P_2 = 110кВт; \eta_{ном} = 0,92;$$

$$\cos\phi_{1ном} = 0,9; \text{ сумарні втрати-} \sum p_{ном} = 10кВт.$$

Сума втрат активної потужності при рівні навантаження  $\beta = 0,6$  та сталій напрузі живлення:

$$\sum p_{\beta} = a + [\beta^2 k + 1 - k^2] \cdot b_1 + \beta^2 b_2 + c =$$

$$= 0,25 + [0,36 \cdot 0,81 + 1 - 0,81] \cdot 0,45 + 0,36 \cdot 0,2 + 0,1 = 0,642 \sum p_{ном}$$

Де при прийнятому розподілі втрат в номінальному режимі:

втрати в сталі:  $a = 0,25 \sum p_{ном}$ ; втрати в міді первинної обмотки:  $b_1 = 0,45 \sum p_{ном}$

; втрати в обмотці ротора:  $b_2 = 0,2 \sum p_{ном}$ ; механічні втрати:  $c = 0,1 \sum p_{ном}$ ;

коефіцієнт потужності:  $k = 0,9$  та рівень навантаження:  $\beta = 0,6$ . При переводі в абсолютні значення сумарні втрати при коефіцієнті навантаження  $\beta = 0,6$  і нульових відхиленнях величин якості електричної енергії становлять  $\sum p_{\beta} = 6,42кВт$ . ККД складає

$$\eta_0 = \frac{\beta P_{2ном}}{\beta P_{2ном} + \sum P_{\beta_0}} = \frac{0,6 \cdot 110}{0,6 \cdot 110 \cdot 6,42} = 0,91.$$

Розрахунок реальних втрат активної потужності, які будуть у цьому двигуні при вказаних вище гранично допустимих відхиленнях якості електричної енергії призводить до зниження ККД на 5%, :

$$\eta_p = \eta_0 - 5\% = 0,91 - 0,05 = 0,86.$$

Виходячи з умов, що відповідні значення ККД

$$\eta_0 = 1 - \frac{\sum P_{\beta_0}}{0,6 P_{2ном} + \sum P_{\beta_0}}, \quad \eta_p = 1 - \frac{\sum P_{\beta_p}}{0,6 P_{2ном} + \sum P_{\beta_p}},$$

можна визначити

$$\sum P_{\beta_p} = \sum P_{\beta_0} \frac{\eta_0}{\eta_p} \cdot \frac{(1 - \eta_p)}{(1 - \eta_0)} = 10,4 \text{ кВт}.$$

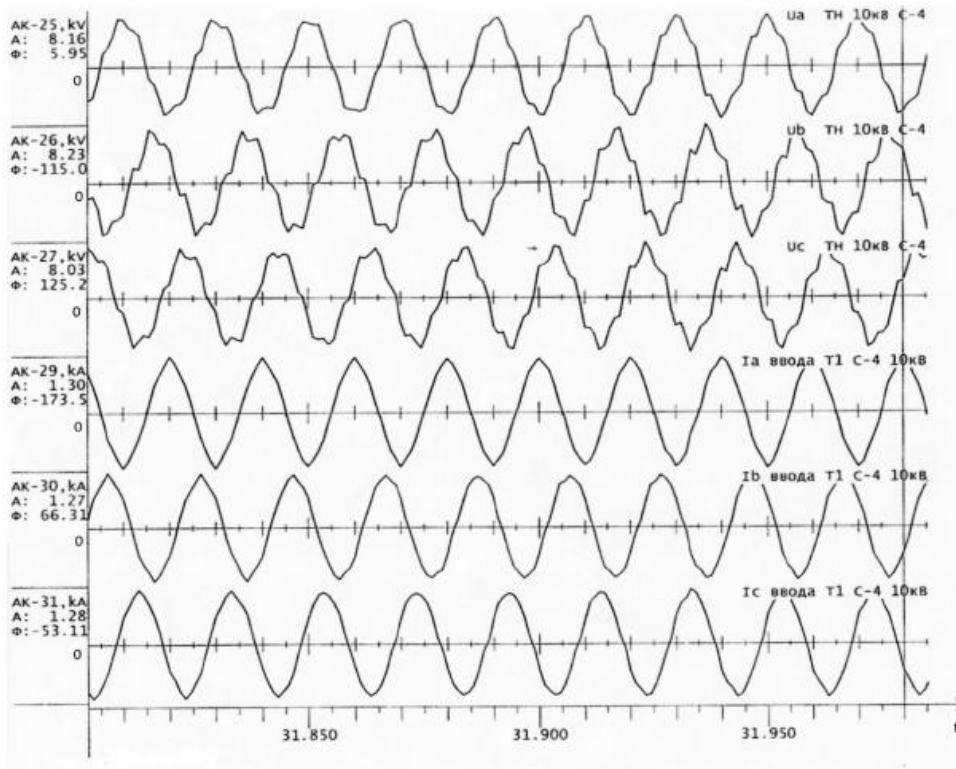
Таким чином, при вище наведених відхиленнях якості електричної енергії та рівні навантаження  $\beta = 0,6$  сумарні втрати потужності в асинхронному двигуні є більшими, ніж у номінальному режимі при нульових відхиленнях якості електричної енергії. Експлуатація двигуна за таких умов при більш високих рівнях навантаження призведе до його перегріву та виходу з ладу.

Проведення якісних досліджень, визначених метою роботи, здійснено для обраного асинхронний двигун 4A280S4Y3 на вхід якого подано несинусоїдний сигнал, отриманий з боку низької напруги трифазного трансформатора, згідно досліджень [2] (рис. 2, а).

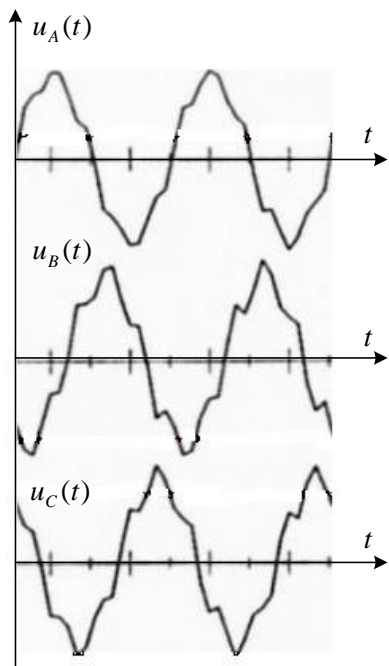
За результатами уточненого розрахунку гармонічного складу осцилограми (рис. 2, б) напругу по фазі А подано рядом Фур'є до 15 гармоніки:

$$\begin{aligned} u_A(t) = & 183.800\sqrt{2} \sin(\omega t + 11.327^\circ) + 15.911\sqrt{2} \sin(2\omega t - 156.122^\circ) + \\ & 9.583\sqrt{2} \sin(3\omega t + 17.170^\circ) + 5.876\sqrt{2} \sin(4\omega t - 39.572^\circ) + \\ & + 9.369\sqrt{2} \sin(5\omega t + 8.531^\circ) + 5.817\sqrt{2} \sin(6\omega t - 182.539^\circ) + \\ & + 6.006\sqrt{2} \sin(7\omega t + 44.700^\circ) + 3.389\sqrt{2} \sin(8\omega t - 149.581^\circ) + \\ & + 3.389\sqrt{2} \sin(9\omega t - 225.283^\circ) + 1.356\sqrt{2} \sin(10\omega t - 230.194^\circ) + \\ & + 1.3090\sqrt{2} \sin(11\omega t - 221.057^\circ) + 1.230\sqrt{2} \sin(12\omega t - 233.284^\circ) + \\ & + 0.444\sqrt{2} \sin(13\omega t - 179.183^\circ) + 1.903\sqrt{2} \sin(14\omega t + 80.319^\circ) + \\ & + 0.661\sqrt{2} \sin(15\omega t - 74.109^\circ). \end{aligned}$$

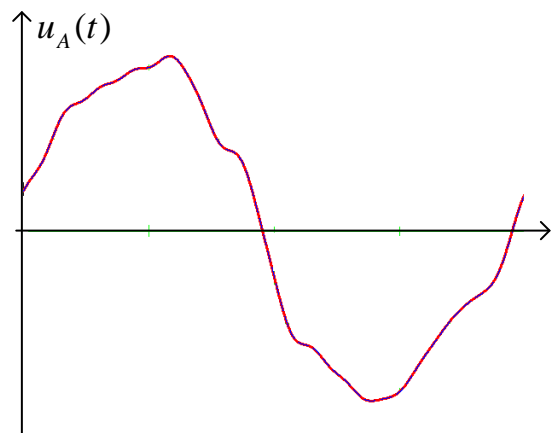
Отримані результати, представлені часовою діаграмою  $u_A(t)$  на рис. 2, в, повністю узгоджуються із осцилограмою реальної фазної напруги (рис. 2, б).



а)



б)



в)

Рисунок 2 – Осцилограми напруг та струмів

Незважаючи на несинусоїдність та несиметрію фазних напруг, поданих на осцилограмах (рис. 2, а), аналіз впливу несинусоїдного сигналу на експлуатаційні властивості асинхронного двигуна проводився на базі гармонічного складу несинусоїдальної напруги фази А (рис. 2, б).

Коефіцієнт спотворення фазної напруги перевищує припустимі норми відхилення напруги у 2,5 рази:

$$k_{\text{сп}u_A} = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^{\infty} U_{(k)}^2}}{U_{(1)}} 100\% = 12.6\%.$$

Аналіз амплітудно-частотної характеристики (рис. 3) показав, що дослідження достатньо проводити до 7-ї гармоніки.

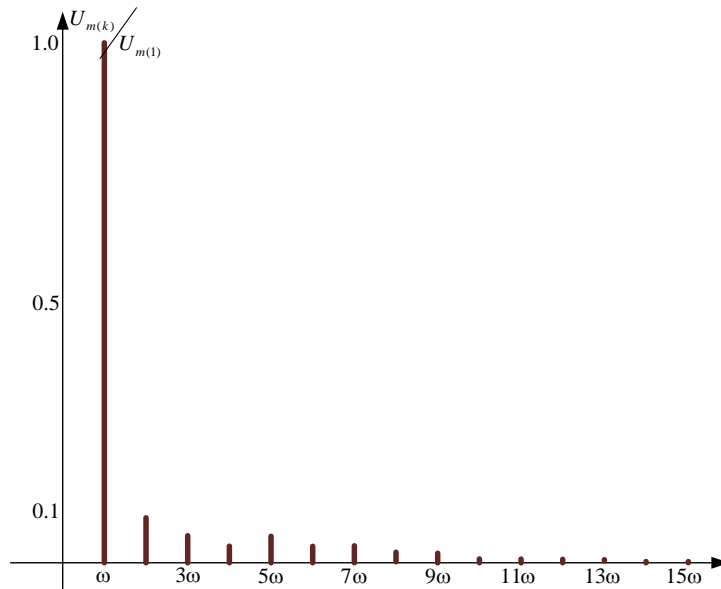


Рисунок 3 – Амплітудно-частотна діаграма гармонічного складу напруги фази А

Для проведення дослідження використано Т-подібну схему заміщення однієї фази асинхронного двигуна, представлену на рис. 4.

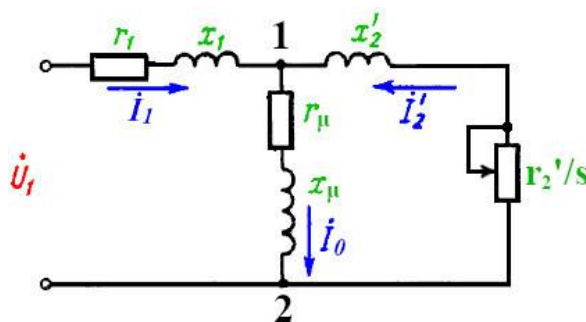


Рисунок 4 – Т-подібна схема заміщення асинхронного двигуна

Параметри схеми заміщення асинхронний двигун 4A280S4Y3 (рис. 4) обрано згідно [11]:

$r_1, x_1$  – активний та реактивний опори обмотки статора;

$r_2'' = \frac{r_2'}{s}, x_2'$  – активний та реактивний опори обмотки ротора;

$x_\mu$  – реактивний опір еквівалентний основному потоку взаємоіндукції.

Під час проведення аналізу враховано особливості розрахунку трифазних кіл при дії несинусоїдної симетричної фазної напруги. У разі, якщо коло володіє значним індуктивним опором, то напруги першої та  $k$ -ї гармонік подаються у вигляді:

$$U_{L(1)} = \omega LI_{(1)}, \quad U_{L(k)} = k\omega LI_{(k)},$$

а коефіцієнт спотворення враховано співвідношенням

$$\frac{I_{(k)}}{I_{(1)}} = \frac{1}{k} \frac{U_{L(k)}}{U_{L(1)}}.$$

Зважаючи на пряму подачу несинусоїдної напруги на асинхронний двигун, повний опір однієї фази був розрахований за виразом

$$Z_{A(k)} = r_1 + jkx_1 \frac{(r_2'' + jkx_2') \cdot jkx_{\mu}}{r_2'' + jk(x_2' + x_{\mu})}$$

Зі зміною порядку гармонік, змінюється частота і реактивний опір та, як результат, виявляться процентний вміст гармонік у кривих струму двигуна. За результатами розрахунку отримано коефіцієнти спотворення струмів у асинхронному двигуні:

$$k_{\text{сп}1} = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^{\infty} I_{1(k)}^2}}{I_{1(1)}} 100\% = 9.7\%, \quad k_{\text{сп}2} = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^{\infty} I_{2(k)}'^2}}{I_{2(1)}'} 100\% = 9.9\%,$$

$$k_{\text{сп}0} = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^{\infty} I_{0(k)}^2}}{I_{0(1)}} 100\% = 4.5\%.$$

Слід звернути увагу, що збільшення відхилення показників спотворення струму в машині, пов'язане з наявністю вищих гармонік та високих частот, призводить до збільшення втрати у сталі машини та спричиняє появу поверхневого ефекту в обмотках, який призводить до збільшення його активного опору та, як наслідок, до збільшення втрат в обмотках.

**Висновки.** Аналіз досліджень показав, що існуючі моделі фільтрів не враховують повною мірою параметри основних елементів електричної мережі і не дозволяють визначити рівні вищих гармонік струмів і напруг на затискачах окремих електроприймачів, підключених до мережі електропостачання. Для компенсації гармонічних складових необхідно підключення П-подібного фільтра вдосконаленої конфігурації.

Подальший розвиток наукових досліджень з розробки ефективних моделей та методик визначення кількісних і якісних характеристик струмів і напруг та їх вплив на роботу обладнання залишається актуальним завдань сучасної електроенергетики.

### Перелік посилань

1. Избранные вопросы несинусоидальных режимов в электрических сетях предприятий : [монография] / И. В. Жежеленко [и др.]; ред. И. В. Жежеленко. - М. : Энергоатомиздат, 2007. - 294 с.
2. Бекиров Э.А. Возобновляемая энергетика Симферополь: ИТ «АРИАЛ», 2016. — 384 с.
3. Аналіз показників якості електроенергії сонячної електростанції [Електронний ресурс] / Я. В. Бацала, І. В. Николин У. М. Гладь // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. - 2013. - № 4. - С. 81-90.
4. Ahsan, S.M.; Khan, H.A.; Hussain, A.; Tariq, S.; Zaffar, N.A. Harmonic Analysis of Grid-Connected Solar PV Systems with Nonlinear Household Loads in Low-Voltage Distribution Networks. Sustainability 2021, 13, 3709. <https://doi.org/10.3390/su13073709>
5. Шидловский, А. К. Высшие гармоники в низковольтных электрических сетях / А. К. Шидловский, А. Ф. Жаркин. – Киев : Наукова думка, 2005. – 209 с.
6. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – К., Госстандарт Украины, 1999
7. IEEE 519-2014. IEEE recommended practice and requirements for harmonic control in electric power systems. In IEEE Standards Association; IEEE Power and Energy Society: Piscataway, NJ, USA, 2014; p. 29
8. Chidurala, A.; Saha, T.K.; Mithulananthan, N.; Bansal, R.C. Harmonic emissions in grid connected PV systems: A case study on a large scale rooftop PV site. In Proceedings of the 2014 IEEE PES General Meeting|Conference & Exposition, National Harbor, MD, USA, 27–31 July 2014; pp. 1–5.
9. Elkholy, A. Harmonics assessment and mathematical modeling of power quality parameters for low voltage grid connected photovoltaic systems. Sol. Energy 2019, 183, 315–326.
10. Немцев, Г. А. Влияние высших гармонических составляющих на работу асинхронных двигателей / Г. А. Немцев, Е. А. Селезнев, Л. А. Шестакова // Вестн. Чуваш. ун-та. – 2014. – № 2. – С. 46–51.
11. Справочник по электрическим машинам /под ред. И.П. Копылова и Б.К. Клокова. М., “Энергоатомиздат”, 1988.