

**Magnetic field of extra-high voltage two-circuit cable line with XLPE insulation**

The magnetic field generated by underground two-circuit 330 kV cable line with XLPE insulation is studied. The skin effect and proximity effect in the power cables are analyzed. The distributions of magnetic field on the ground for different distance between the cable circuits are computed and discussed. As shown for the case under consideration, the external magnetic field of cable power line can be reduced down to admissible safety level by using another ways. References 8, figures 6.

**Key words:** underground cable line, extra-high voltage power cables, cross-linked polyethylene (XLPE) insulation, electromagnetic safety, computer modeling.

1. Dubitskii S.D., Greshniakov G.V., Korovkin N.V. Control of magnetic field of underground cable line. *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti SPbPU. Natural and engineering science*. 2017. Vol. 23. No. 3. P. 88–100. (Rus)
2. Kucheriava I.M. Electromagnetic field of underground single-circuit extra-high voltage cable line. *Pratsi Institutu Elektrodynamiky Natsionalnoi Akademii Nauk Ukrainy*. 2018. № 50. P. 92–96. (Rus)
3. Saltykov V.M. Problems of electromagnetic safety on industrial frequency magnetic fields from currents of XLPE insulated cables. 13.02.2018. Site: RusCable.Ru. [https://www.ruscable.ru/article/Problemy\\_elektromagnitnoj\\_bezopasnosti\\_SPE/](https://www.ruscable.ru/article/Problemy_elektromagnitnoj_bezopasnosti_SPE/) (Rus)
4. Electric installation code. Minpalyvo Ukrainy, 2010. 776 p. (Ukr)
5. Greshniakov G.V., Doronin M.V., Korovkin N.V. Combined magnetic shields for cable power lines. *Kabeli i provoda*. 2015. No. 5. P. 8–13. (Rus)
6. Podoltsev A.D., Kucheriava I.M. Multiphysics modeling in electrical engineering. Kyiv: Institute of Electrodynamics, Ukrainian Academy of Sciences, 2015. 305 p. (Rus)
7. Lyach V.V., Molchanov V.M., Santatskii V.G., Kvitsinskii A.A. 330 kV cable line: some aspects of designing. *Promelektro*. 2009. No. 6. P. 27–33. (Rus)
8. Comsol multiphysics modeling and simulation software. <http://www.comsol.com/>

Надійшла 14.11.2018

Received 14.11.2018

УДК 621.3.061; 621.3.051.2.

**МОДЕЛЮВАННЯ РЕЖИМІВ ЕНЕРГОМОСТА УКРАЇНА – ЄВРОСОЮЗ**

**М.С. Сегеда\***, докт. техн. наук, **К.Б. Покровський\*\***, канд. техн. наук, **О.І. Маврін**, канд. фіз.-мат. наук, **В.П. Олійник**, канд. техн. наук

Національний університет «Львівська політехніка», Інститут енергетики та систем керування,  
вул. С. Бандери, 12, Львів, 79013, Україна

e-mail: [mseheda@ukr.net](mailto:mseheda@ukr.net), [kpokrov@gmail.com](mailto:kpokrov@gmail.com), [olherd.i.mavrin@lpnu.ua](mailto:olherd.i.mavrin@lpnu.ua), [svevolkat@gmail.com](mailto:svevolkat@gmail.com)

*Розроблено модель для дослідження усталених режимів та перехідних процесів варіантів схеми енергомоста Україна – Європейський Союз у програмному середовищі Power Factory v.15.2 на основі набору типових моделей елементів мережі. Модель перевірено на результатах контрольних замірів. Показано вплив надлишкової реактивної потужності в схемі мережі на координати режимів та відносно невисоку ефективність шунтових реакторів для її компенсації в умовах застосування синхронного генератора. Запропоновано застосування асинхронізованого генератора для підвищення ефективності роботи енергомоста Україна – Європейський Союз. Бібл. 7, рис. 5, таблиця.*

**Ключові слова:** енергомост Україна – Євросоюз, моделювання, реактивна потужність, асинхронізований генератор.

Важливою проблемою розвитку енергосистеми України є проведення заходів для забезпечення переходу на паралельну роботу з енергосистемою Євросоюзу – ENTSO-E. Перспективним етапом такого переходу є увімкнення енергоблока № 2 Хмельницької АЕС до європейської енергосистеми через існуючі лінії електропередавання 750 кВ ХАЕС – Жешув і ХАЕС – Західно-Українська ПС. Для реалізації енергомоста ХАЕС – ENTSO-E [7] необхідно провести комплекс технічних заходів, що передбачає приєднання блока № 2 ХАЕС до схеми Бурштинського острова (рис. 1). Загальна характеристика основних елементів реалізації про-

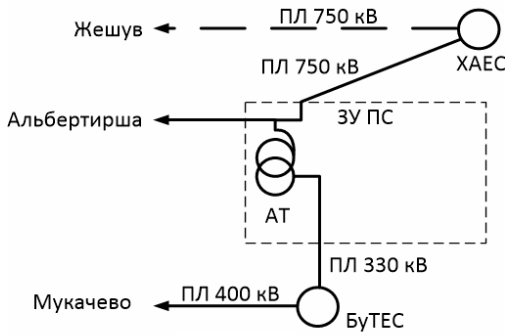


Рис. 1

екту енергомоста ХАЕС – ЕС набуває такого змісту:  
 – для збільшення генеруючої потужності енергосистеми необхідно забезпечити радіальне приєднання двох існуючих повітряних ліній (ПЛ) 750 кВ енергосистеми України до Бурштинського острова та увімкнення блока № 2 Хмельницької АЕС (1000 МВт) до Бурштинського острова;  
 – вжити заходи з відновлення та підвищення ефективності роботи трьох існуючих ПЛ напругою 750 кВ, а саме ПЛ ХАЕС (Україна) – ПС Жешув (Польща), що не використовується вже більше 20 років, за потенціалу пропускної здатності 2000 МВт ХАЕС (Україна) – ПС Західноукраїнська (Україна), ПЛ Західноукраїнська ПС (Україна) – ПС Альбертирша (Угорщина), що знаходяться в робочому стані;

- вжити заходи з перемикання частини ПС Західноукраїнська від української енергосистеми на Бурштинський острів;
- заходи з модернізації ВРП-750 ХАЕС та перемикання на Бурштинський острів.

Проект енергомоста має досягнути запланованих показників експорту електроенергії з енергоблока № 2 ХАЕС і тим забезпечити джерело фінансування будівництва енергоблоків № 3 та 4 на ХАЕС за допомогою довгострокової угоди про продаж електроенергії між інвесторами та українськими партнерами.

Аналіз отриманої інформації дає змогу зробити висновок про можливість застосування кількох режимів роботи схеми видачі потужності блоком № 2 ХАЕС на енергосистему ENTSO-E через ПЛ 750 кВ ХАЕС-Жешув та ХАЕС-Західноукраїнська ПС. Для визначення параметрів режимів енергомоста необхідно розглянути три схеми його роботи:

- схема 1, видача потужності блоком № 2 ХАЕС в енергосистему ENTSO-E двома ПЛ;
- схема 2, видача потужності блоком № 2 ХАЕС в енергосистему ENTSO-E через ПЛ-750 кВ ХАЕС-Жешув;
- схема 3, видача потужності блоком №2 ХАЕС в енергосистему ENTSO-E через ПЛ-750 кВ ХАЕС - Західноукраїнська ПС.

Необхідно зазначити, що встановлені в мережі 750 кВ шунтові реактори (ШР) мають забезпечувати компенсацію 90-100 %-вої зарядної потужності ліній, проте недоліки ШР є різноплановими і носять як технічний, так і економічний характер [3]:

- значний крок регулювання, відносно невелика надійність і обмежене число комутацій не завжди дають змогу ефективно підтримувати необхідні рівні напруги;
- значна вартість і втрати активної потужності суттєво знижують їхню економічну ефективність.

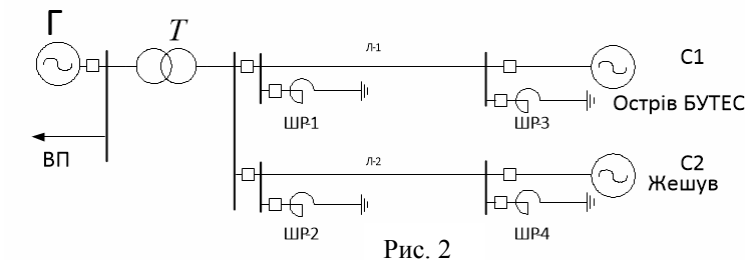


Рис. 2

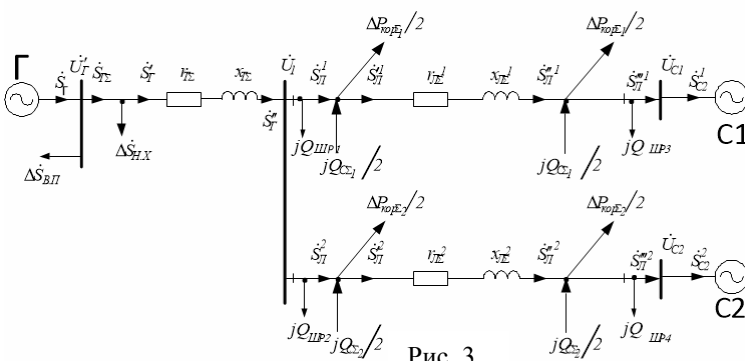


Рис. 3

Це свідчить про те, що в мережі 750 кВ не завжди можна підтримувати внутрішній баланс реактивної потужності, а надлишки потужності перетікають у мережі нижчої напруги. Рівні споживання реактивної потужності синхронних генераторів за значного активного навантаження можуть перевищувати допустимі з умов нагрівання торцевих зон сталі статора і стійкості.

В умовах частих пусків, циклічних змін навантаження і високих значень  $\cos\phi$  мали місце пошкодження крайніх пакетів осердя статорів турбогенераторів і обмотки. Вжиті технічні заходи, спрямовані на покращення вентиляції пакетів сталі статора, їхнє пресування, сприяли деякому зниженню загального рівня пошкоджень, однак повного усунення пошкоджень отримати не вдалося [6]. У зв'язку із зазначеним для кожного з визначених режимів роботи схеми мережі необхідно передбачити можливість планового чи аварійного вимкнення шунтових реакторів ПЛ1 та ПЛ2.

На підставі вихідної інформації можна

отримати розрахункову схему приєднання блока № 2 ХАЕС до ВРП-750 кВ (рис. 2) та заступну (рис. 3) схему енергомоста Україна – Євросоюз [1, 5].

Відповідно до розрахункової схеми енергомоста, що передбачає зв'язок блока № 2 ХАЕС з енергосистемами Бурштинського острова та Євросоюзу, враховуємо дві енергосистеми, що еквівалентуються ЕРС, значення яких задається в межах  $\pm 5\%$ . Схему моделі мережі енергомоста Україна – Євросоюз у програмі PowerFactory показано на рис. 4.

Перевірку моделі енергомоста Україна – Євросоюз у програмі PowerFactory проведено на контрольних замірах Західної електроенергетичної системи НЕК «Укренерго». Додатково розрахунки перехідних режимів роботи схеми в частині комутації шунтових реакторів співставлено з результатами [4] розрахунків подібних режимів, що показує високе співпадіння.

У результаті порівняння заміряних та розрахункових координат режимів схеми можна зробити висновок про адекватність моделі та реальної електричної мережі. Незначні відхилення розрахункових координат можна пояснити розбіжностями у параметрах реального обладнання (генератора, блочного трансформатора, шунтового реактора) та розрахункових параметрів.

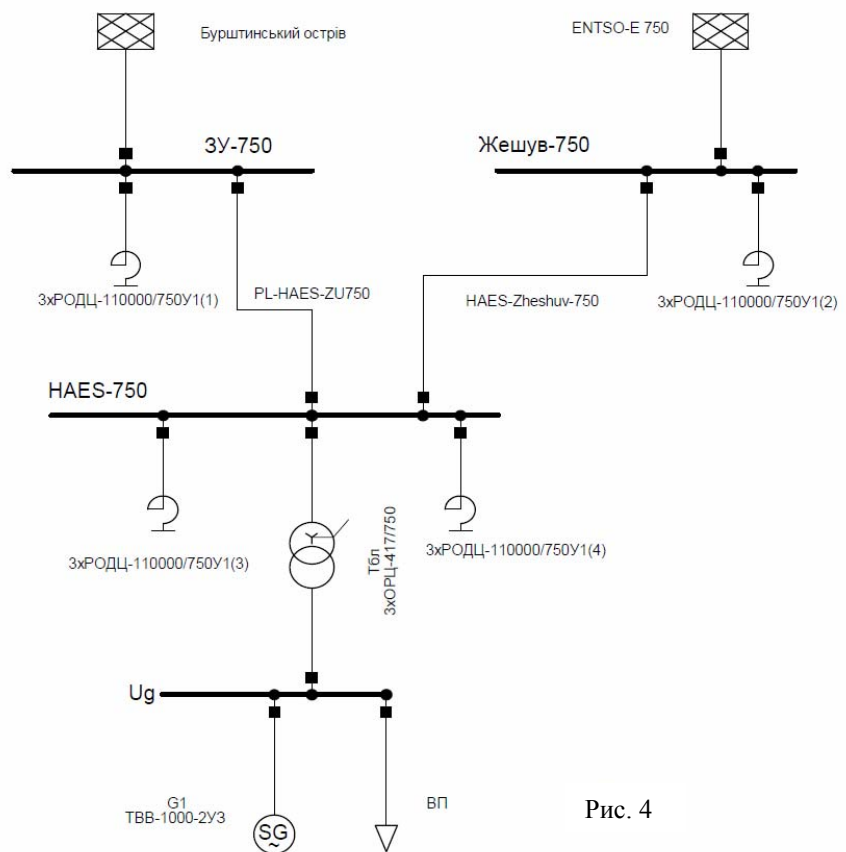


Рис. 4

Координата режиму, од. вим.	Схема №1		Схема №2		Схема №3	
	Вимкнення ШР1	Вимкнення ШР1 та ШР2	Вимкнення ШР1	Вимкнення ШР1 та ШР2	Вимкнення ШР1 та ШР3	Вимкнення всіх ШР
$P_{г}$ , МВт	1000	1000	1000	1000	1000	1000
$Q_{г}$ , Мвар	36	36	309	309	36	36
$U_{г}$ , в.о.	1,12	1,12	1,03	1,03	1,02	1,02
$P_{тв}$ , МВт	943,4	943,4	943,3	943,4	943,3	943,4
$Q_{тв}$ , Мвар	86,6	86,6	164,8	164,8	101,8	101,7
$U_{1}$ , в.о.	1,18	1,18	1,05	1,05	1,08	1,08
$P_{с}$ , МВт	885,0	886,8	922,2	924,1	614,9	616,8
$Q_{с}$ , Мвар	879,5	1209,5	240,2	570,2	487,2	817,1
$U_{с}$ , в.о.	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0

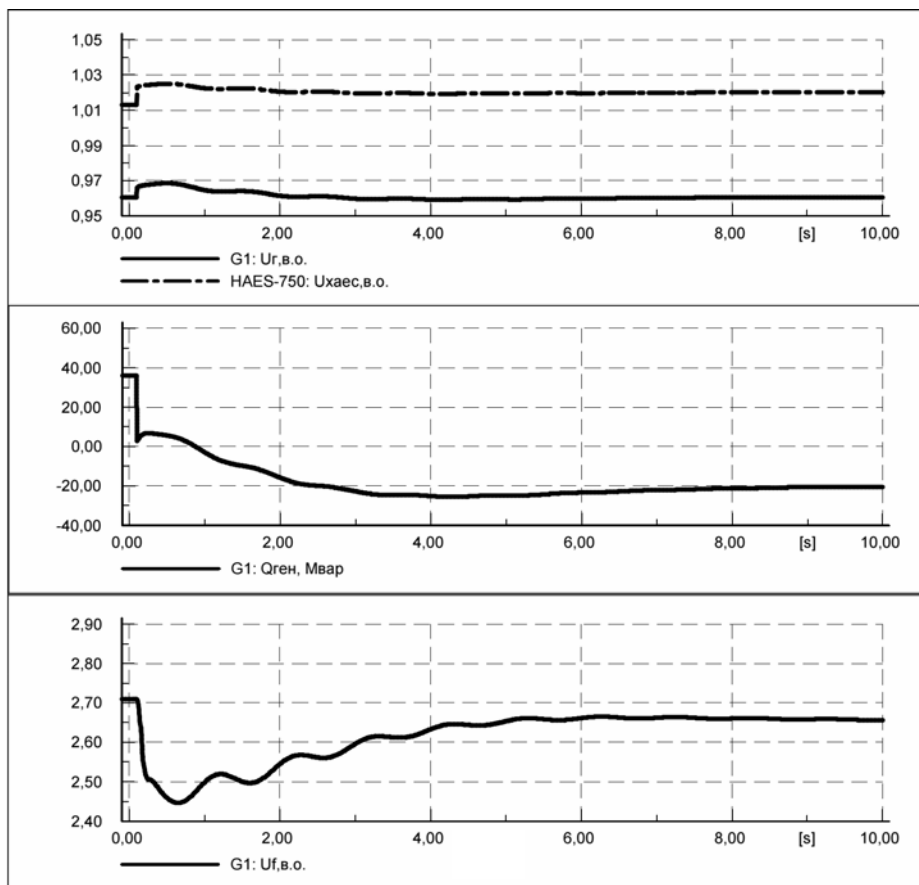


Рис. 5

У результатах розрахунків (таблиця) усталених режимів наведено вибірку більш характерних режимів, що демонструють обмеження щодо споживання реактивної потужності синхронним генератором [5] на період часу вимкнення ШР у різних комбінаціях. З метою виявлення таких режимів моделювалися можливі комбінації вимкнення ШР без вимкнення ПЛ.

Для забезпечення надійності та ефективності енергосистеми в періоди денного та нічного зниження навантаження, коли найбільше проявляють себе

надлишки реактивної потужності [3, 5], необхідно застосувати асинхронізований турбогенератор потужністю 1000 МВт, досвід проектування якого має завод «Електроважмаш», Україна [2]. Такий генератор ефективно працює в режимах глибокого споживання реактивної потужності без ризиків втрати стійкості.

Результати процесу вимкнення ШР-2 на ПС Жешув наведено на рис. 5. Показано, що в результаті спрацювання автоматичного регулятора збудження в перехідному процесі, генератор переходить у режим споживання реактивної потужності, що обмежує надійність та ефективність роботи синхронних генераторів на противагу асинхронізованому генератору, у якого більші можливості в сфері споживання реактивної потужності.

Отримані результати моделювання усталених режимів та перехідних процесів вибраних схем енергомоста Україна – ЕС з урахуванням можливих ремонтних станів схем (введення в ремонт приєднань шунтових реакторів ПЛ-750 кВ) дають змогу зробити висновки про помітний вплив надійності шунтових реакторів на нормальність режимів схем мережі, допустимість застосування повної схеми № 1 (та її ремонтного варіанта за вимкнення ШР-2) видачі потужності на шини 750 кВ ПС «Жешув» з мінімальним запасом за споживанням реактивної потужності. Для схеми № 2 визначено можливість застосування як повної схеми, так і всіх варіантів вимкнення ШР ПЛ-750 кВ. У таких режимах забезпечуються нормальні рівні напруг та достатні запаси за реактивної потужності. Для схеми № 3 визначено допустимість повної схеми з відповідним запасом за реактивної потужності, для варіанта ремонтної схеми є можливість застосування варіанта відімкнення ШР2 та ШР4 за мінімального запасу реактивної потужності. Застосування асинхронізованого генератора в умовах зазначених схем дасть змогу значно підвищити надійність роботи енергомоста за рахунок зниження проблеми впливу низької надійності шунтових реакторів на режим енергосистеми, що потребує економічного обґрунтування з урахуванням дещо більшої вартості асинхронізованого генератора.

1. DIgSILENT PowerFactory 15, Tutorial. DIgSILENT, 2015. 97 p. Ліц. 0009718.
2. Зозулін Ю.В., Антонов О.Є., Бичік В.М., Боричевський А.М., Кобзар К.О., Лівшиць О.Л., Ракогон В.Г., Роговий І.Х., Хаймович Л.Л., Чередник В.І. Створення нових типів та модернізація діючих турбогенераторів для теплових електричних станцій. Харків: Колегіум, 2011. 223 с.
3. Здановский В.Г., Миняйло А.С., Кривый В.В. Опыт эксплуатации асинхронизированного турбогенератора АСТГ-200. *Электрические станции*. 1993. № 1. С. 37–41.
4. Konoval V., Prytula R., Skrypnyk O. Static stability analysis of power systems. *Electrical Engineering*. 2015. No 82. Pp. 11–19.
5. Сегеда М.С. Електричні мережі та системи. Львів: Видавництво Національного університету Львівська політехніка, 2009. 488 с.
6. Sehed M., Minyailo O., Pokrovskyy K. Limitations in the economic distribution of reactive power between the generators. *Przegląd Elektrotechniczny*, 2013. No 89(6). Pp. 299–300.
7. Пілотний проект «Енергетичний міст «Україна – Європейський Союз» – крок до енергетичної незалежності України. ХАЕС, 2017. URL: <http://www.xaec.org.ua/pdf/pres201701261049.pdf> (дата звернення 21.02.2018).

УДК 621.3.061; 621.3.051.2

**М.С. Сегеда**, докт. техн. наук, **К.Б. Покровский**, канд. техн. наук, **О.И. Маврин**, канд. физ.-мат. наук, **В.П. Олійник**, канд. техн. наук

Национальный университет «Львівська політехніка»,  
ул. С. Бандери, 12, Львов, Украина, 79013

#### **МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЖИМОВ ЭНЕРГОМОСТА УКРАИНА – ЕВРОСОЮЗ**

*Разработана модель установившихся режимов и переходных процессов вариантов схемы энергомоста Украина – Европейский Союз в программной среде Power Factory v.15.2 на основе набора типовых моделей элементов сети. Математическая модель проверена на результатах контрольных измерений. Показано влияние излишков реактивной мощности в схеме сети на параметры режимов и относительно невысокую эффективность шунтирующих реакторов для её компенсации в условиях использования синхронного генератора. Предложено использование асинхронизированного генератора для повышения эффективности работы схемы. Библ. 7, рис. 5, таблица.*

**Ключевые слова:** энергомост Украина–Евросоюз, математическое моделирование, реактивная мощность, асинхронизированный генератор.

**M. Sehed, K. Pokrovskij, O. Mavrin, V. Oliynyk**

Lviv Polytechnic National University,  
12, Bandera street, Lviv, 79013, Ukraine

#### **MODELING OF UKRAINE –EUROPEAN UNION ENERGY BRIDGE MODES**

*The power bridge of Ukraine – EU model for static regimes and transient processes for variants of the scheme is developed in software environment of Power Factory v.15.2 based on a set of model network elements. The mathematical model is tested on the results of control measurements. The influence of excess reactive power in the network scheme on the coordinates of the modes and relatively low efficiency of shunt reactors for its compensation in conditions of application of the synchronous generator is shown. The use of an asynchronized generator for increasing the efficiency of the scheme is proposed. References 7, figures 5, table.*

**Key words:** powerbridge of Ukraine – EU, mathematical modelling, reactive power, asynchronized generator.

1. DIgSILENT PowerFactory 15, Tutorial. DIgSILENT, 2015. 97 p.
2. Zozulin Ju.V., Antonov O.E., Bychik V.M., Borychevskiy A.M., Kobzar K.O., Livshits O.L., Rakogon V.G., Rogovyi I.H., Haimovich L.K., Cherednik V.I. Creation of new types and modernization of existing turbine generators for thermal power stations. Kharkiv: Kolegium, 2011. 223 p. (Ukr)
3. Zdanovskiy V.G., Minyailo A.S., Kriviy V.V. Experience in operating an asynchronized turbogenerator ASTG-200. *Elektricheskie stantsii*. 1993. No 1. Pp. 37–41. (Rus)
4. Konoval V., Prytula R., Skrypnyk O. Static stability analysis of power systems. *Electrical Engineering*. 2015. No 82. Pp. 11–19.
5. Sehed M.S. Electrical networks and systems. Lviv: Vydavnytstvo Natsionalnoho universitetu Lvivska polytechnika, 2009. 488 p. (Ukr)
6. Sehed M., Minyailo O., Pokrovskyy K. Limitations in the economic distribution of reactive power between the generators. *Przegląd Elektrotechniczny*, 2013. No 89 (6). Pp. 299–300.
7. Pilot project «power bridge "Ukraine-European Union" – a step towards the energy independence of Ukraine. HAES, 2017. URL: <http://www.xaec.org.ua/pdf/pres201701261049.pdf>. (Ukr)

Надійшла 26.11.2018  
Received 26.11.2018