

М. Й. Бурбело
Д. Ю. Лебедь

АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ УНІФІКОВАНОГО РЕГУЛЯТОРА ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ ДЛЯ ЗМЕНШЕННЯ КОЛИВАНЬ НАПРУГИ

Вінницький національний технічний університет

Підвищення якості електроенергії – актуальне завдання розвитку електроенергетики, спрямоване на зниження втрат електроенергії, підвищення терміну служби електрообладнання, забезпечення умов нормального технологічного процесу споживачів електроенергії. У даній статті показано аналіз ефективності застосування уніфікованого регулятора якості електроенергії (УРЯЕ) для мінімізації розмаху коливань напруги (КН), дози флікера та загального гармонічного спотворення в системі розподілу, що, як наслідок, покращує якість електроенергії. Кінцева симуляція дослідження проводиться з використанням MATLAB/Simulink. Для демонстрації продуктивності УРЯЕ проведено аналіз ефективності компенсації коливань напруги та показника флікера. Досліджено УРЯЕ на прикладі генерації активної і реактивної потужності УРЯЕ в мережу та ефективності компенсації пасивних складових струму. Вихідними даними для виконання розрахунків коливань напруги є відомості про параметри електричної мережі та графік випадкового швидкозмінного електричного навантаження, що викликає зміни напруги мережі, розмахи яких можуть досягти великих значень, наприклад, внаслідок включенням асинхронного двигуна з великою кратністю пускового струму. Такі явища зумовлені також технологічними установками з швидкозмінним режимом роботи, що супроводжується накидами та скидами активної та реактивної потужностей такими споживачами як зварювальні апарати тощо. Основною задачею дослідження є підвищення якості електроенергії, підвищення терміну служби електрообладнання та забезпечення умов нормального технологічного процесу споживачів електроенергії. Розглянуто показники, що характеризують КН: розмах зміни напруги (U_t) і доза флікера (P_t). Метою роботи є аналіз ефективності роботи УРЯЕ з швидкозмінним та нелінійним навантаженням.

Ключові слова: коливання напруги; різкозмінне навантаження; якість електричної енергії; графіки електричних навантажень, джерело коливань напруги.

Вступ

Основною метою УРЯЕ є компенсація коливань напруги, реактивної потужності, струму та напруги зворотної послідовності, вищих гармонік та інтергармонік. Іншими словами, УРЯЕ має можливість покращувати якість напруги в точці встановлення в системах розподілу електроенергії або системах промислового електропостачання. Таким чином, УРЯЕ вважається одним із найбільш ефективних рішень для навантажень, чутливих до коливань напруги.

Останні дослідження були спрямовані на використання УРЯЕ для вирішення майже всіх проблем якості електроенергії, наприклад: падіння напруги, збільшення напруги, провалу напруги, корекції коефіцієнта потужності та компенсації гармонік струму та напруги.

На стадії експлуатації електроустановки показник флікера можна виміряти за допомогою спеціальних приладів, а за їх відсутності можна виміряти швидкі зміни напруги мережі, а потім розрахувати показник флікера за методикою [1]. На стадії проектування швидкі зміни напруги та показник флікера повинні визначатися розрахунковим шляхом.

Структура стратегії керування УРЯЕ

УРЯЕ складається з паралельного і послідовного компенсаторів, виконаних на базі інверторів напруги (рис. 1). Паралельний компенсатор використовується для компенсації збурень струму тоді як послідовний компенсатор використовується для усунення збурень напруги.

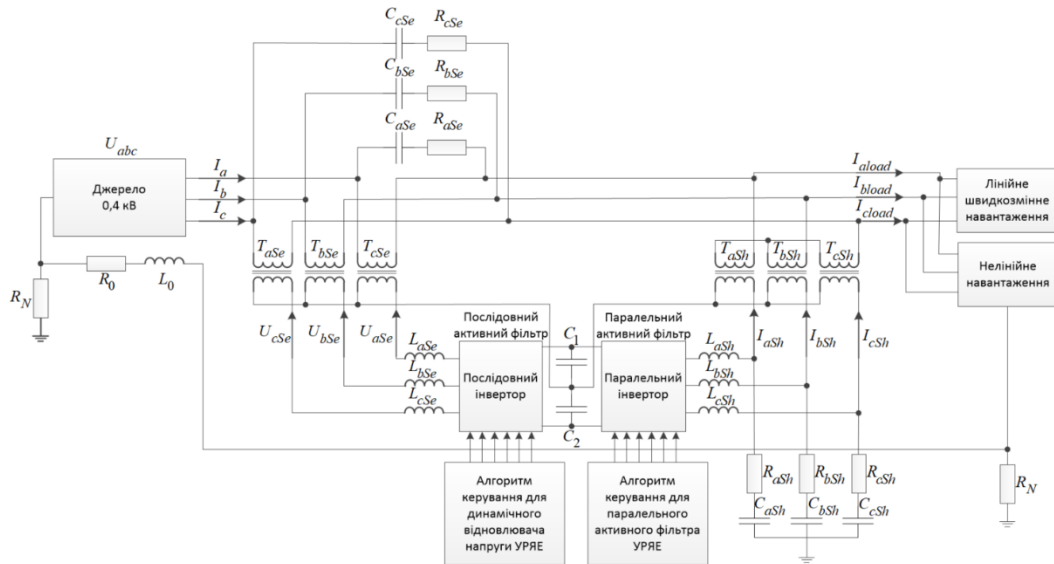


Рис. 1. Структурна схема УРЯЕ

Входи обох інверторів напруги приєднані до двох конденсаторів постійного струму. Кожен з інверторів напруги підключається паралельно та послідовно до системи змінного струму через трансформатори з насиченням. Алгоритм керування активного фільтра та регулятор напруги конденсатора (РНК) в колі керування напругою конденсаторів описаний в [2].

Для моделювання роботи УРЯЕ в режимі компенсації реактивної потужності, вищих гармонік струму, показника флікера та швидкої зміни напруги використана модель з трифазним нелінійним швидкозмінним навантаженням [3].

Еквівалентне однофазне представлення УРЯЕ в системі розподілу електроенергії показано на рис. 2. Спотворена напруга живлення у точці загального з'єднання моделюється сумою двох джерел напруги, а саме основної частоти u_{source} та вищих гармонік $u_{sourceh}$. Нелінійне швидкозмінне навантаження моделюється струмом основної частоти i_{load} та вищих гармонік i_{loadh} , які змінюватимуться випадковим чином.

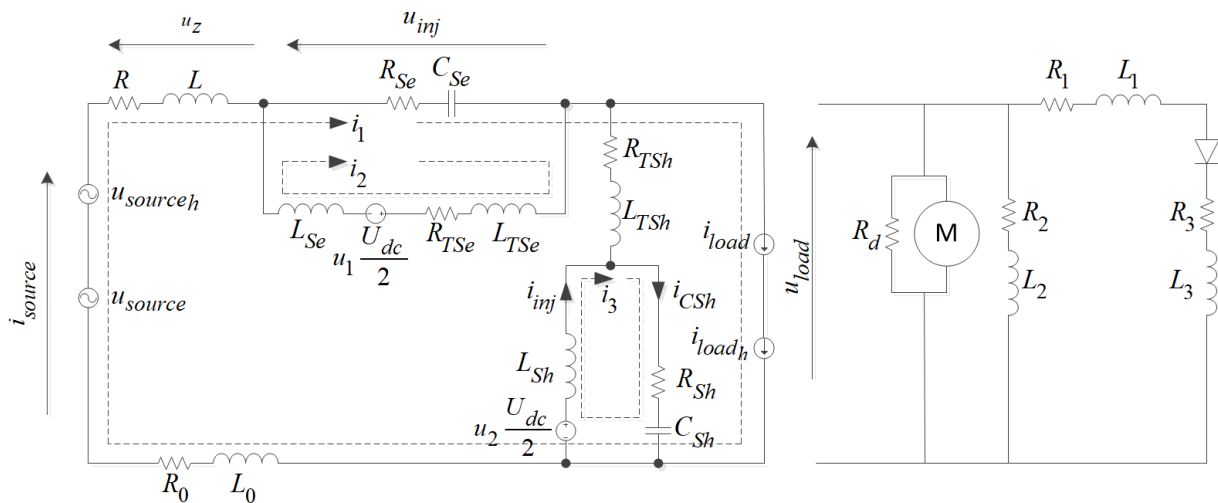


Рис. 2. Еквівалентна однофазна схема заміщення УРЯЕ

Падіння напруги на опорі лінії $R+j \cdot \omega \cdot L$ позначено u_z . Параметри схеми заміщення послідовного та паралельного трансформатора позначено відповідно R_{TSe} , L_{TSe} , R_{TSh} та L_{TSh} . Напруги $u_1 \cdot U_{dc} / 2$ і $u_2 \cdot U_{dc} / 2$ формуються послідовним та паралельним активними фільтрами УРЯЕ відповідно. Їх фільтри нижніх частот моделюються L_{Se} , C_{Se} і R_{Se} , і L_{Sh} , C_{Sh} і

R_{Sh} відповідно. i_{CSh} позначає струм конденсатора витоку шунтового фільтра нижніх частот. u_{inj} позначає введену напругу послідовного активного фільтра, тоді як i_{inj} позначає введений струм паралельного активного фільтра [2].

Як показано в формулі (1), УРЯЕ дозволяє регулювати напругу навантаження u_{load} і синусоїдний струм, що споживається з мережі i_{source} :

$$\begin{aligned} u_{load} &= u_{ref} - u_{inj} - u_{loss} = U_{ref} \sin \omega_1 t - U_{inj} \sin \omega_1 t - U_{loss} \sin \omega_1 t; \\ i_{source} &= i_{load} - i_{inj} = I_{load} \sin \omega_1 t - I_{inj} \sin \omega_1 t; \\ i_{load} &= i_{fp} + i_{fq} + i_{load_h} = I_{fp} \sin \omega_1 t + I_{fq} \cos \omega_1 t + \sum_{i=2}^m I_{load_{hi}} \sin \omega_i t. \end{aligned} \quad (1)$$

де u_{ref} є задана номінальна напруга з амплітудою U_{ref} , I_{source} – амплітуда струму мережі, а ω_1 – основна кутова частота. Нелінійний струм навантаження i_{load} можна розкласти на активний струм основної частоти i_{fp} , реактивний струм основної частоти i_{fq} і струм вищих гармонік i_{load_h} , де I_{fp} , I_{fq} та I_{load_h} є відповідними амплітудами. Індекс m в (1) відноситься до максимального порядку гармонік струму навантаження та напруги мережі [4].

Спотворення напруги мережі та струму навантаження можуть бути повністю компенсовані, щоб вони були чисто синусоїдними. Отже, без урахування втрат потужності, генерована активна потужність існує лише на основній частоті:

$$i_{inj} + i_{fq} + i_{load_h} = 0, \quad (2)$$

$$\frac{2}{T} \cdot \int_{t-T/2}^t u_{load}(t) \cdot i_{inj}(t) dt + \frac{2}{T} \cdot \int_{t-T/2}^t u_{inj}(t) \cdot i_2(t) dt = 0, \quad (3)$$

де i_{inj} і i_{inj} – генеровані активна та реактивна складові струму i_{inj} .

Моделювання та результати дослідження

На рис. 3 показано графік ефективності компенсації пасивних складових струму та генерація активної потужності без урахування втрат за допомогою УРЯЕ.

Аналіз ефективності роботи УРЯЕ показав високий рівень компенсації пасивних складових струму, які майже повністю компенсуються (2) та незначну генерацію активної потужності (3) УРЯЕ.

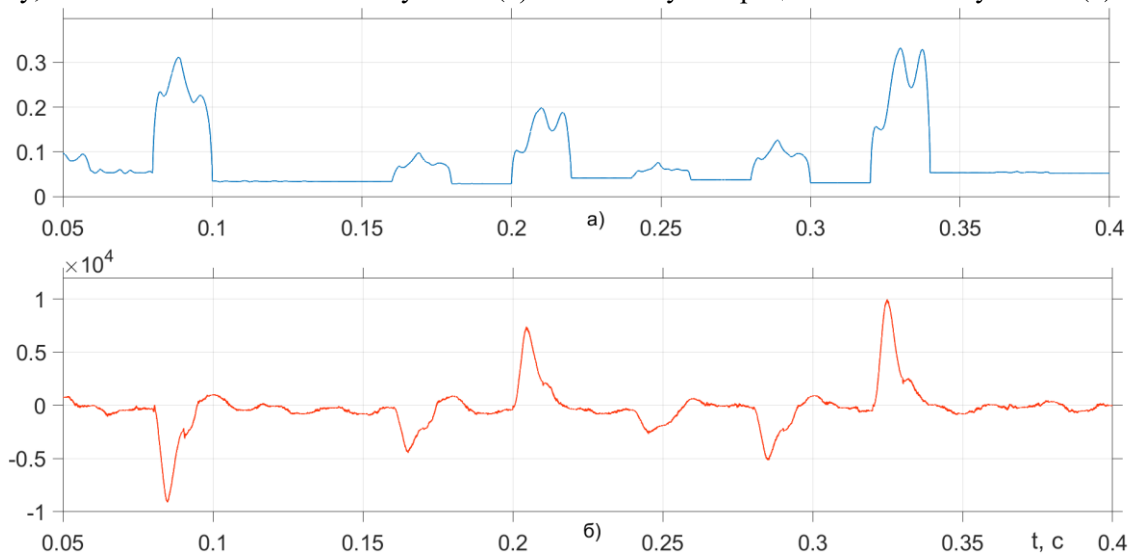


Рис. 3. Графіки зміни: а) пасивних складових струму; б) генерованої активної потужності

За графіком зміни напруги (рис. 4) визначаються числові характеристики розмахів зміни напруги $\delta U(t_i)$:

$$\delta U(t_i) = U_i - U_{i+\Delta t}; \delta U(t_i) = \frac{U_i - U_{i+\Delta t}}{U_i} \cdot 100\% . \quad (4)$$

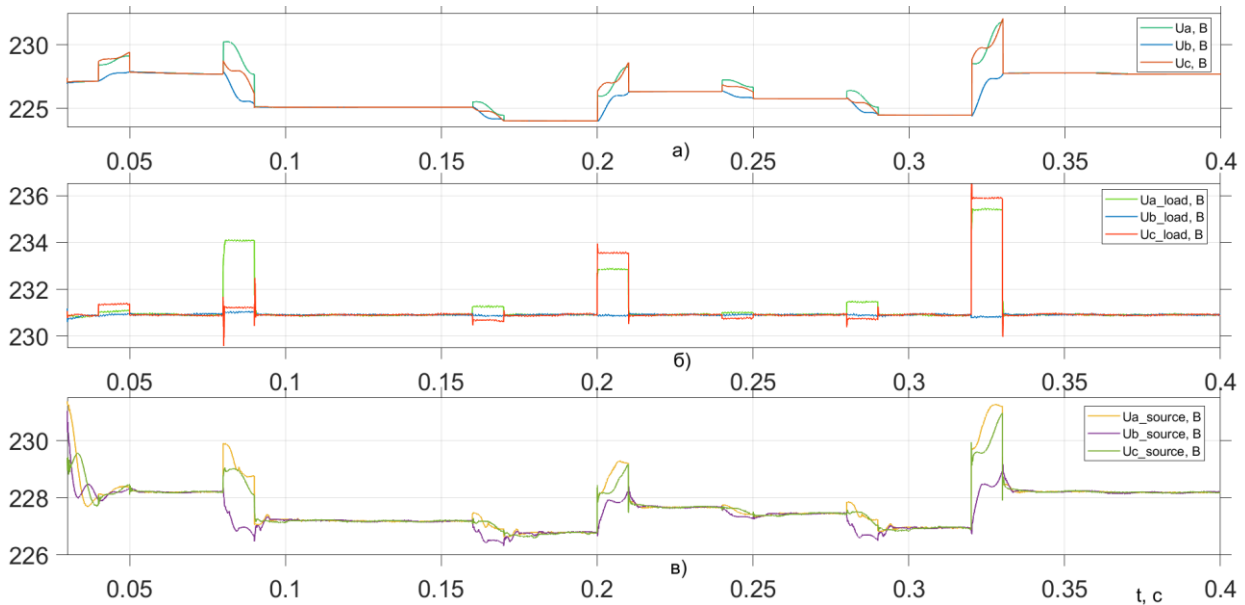


Рис. 4. Графіки зміни середньоквадратичного значення напруги: а) навантаження до ввімкнення УРЯЕ; б) навантаження після ввімкнення УРЯЕ; в) мережі після ввімкнення УРЯЕ

За методикою [1, 5] для кожного розмаху $\delta U(t_i)$ обчислюють дозу флікера P_{Sti} , а потім результуючу дозу флікера P_{St} на інтервалі 10 хв.

Вихідними даними для розрахунку є рівні флікера, що вимірюються за допомогою флікерметра – приладу, в якому моделюється крива чутливості (Амплітудно-частотна характеристика) органу зору людини [6].

Короткочасну дозу флікера (P_{St}) можна визначити розрахунковим шляхом, роблячи вимірювання на інтервалі спостереження $T_S = 10$ хв. При цьому застосовується наступна формула:

$$P_{St} = \sqrt{0,0314 \cdot P_{0,1} + 0,0525 \cdot P_{1s} + 0,0657 \cdot P_{3s} + 0,28 \cdot P_{10s} + 0,08 \cdot P_{50s}} , \quad (5)$$

де $P_{0,1}, P_{1s}, P_{3s}, P_{10s}, P_{50s}$ – рівні флікера, значення яких було перевищено протягом 0,1; 1; 3; 10; та 50 % часу за інтервал спостереження T_s . Індекс "s" у формулі вказує на згладжені значення P_1, P_3, P_{10}, P_{50} . Згладжені значення розраховують за такими формулами [7]:

$$P_{1s} = (P_{0,7} + P_1 + P_{1,5}) / 3; P_{3s} = (P_{2,2} + P_3 + P_4) / 3; P_{10s} = (P_6 + P_8 + P_{10} + P_{13} + P_{17}) / 5; P_{50s} = (P_{30} + P_{50} + P_{80}) / 3. \quad (6)$$

Результати розрахунку короткочасної дози флікера представлено в таблиці 1.

Таблиця 1 – Значення короткочасної дози флікера

Змінна	P_{stload}	$P_{stsource}$ (УРЯЕ)	P_{stload} (УРЯЕ)
Значення	3,3873	1,34875	0,694558

Висновки

Виконані в роботі експериментальні та теоретичні дослідження дозволяють зробити наступний висновок. Робота межі з УРЯЕ забезпечує стабільне підтримання напруги навантаження без коливань напруги. Генерація активної потужності УРЯЕ підтримується в мінімальних значеннях за винятком перехідних процесів під час перемикавання навантаження. Показник флікера не перевищує

допустимого значення в мережі та досягає мінімальних значень в навантаженні. Впровадження УРЯЕ в розподільні мережі дозволить підвищити надійність і збільшити фактичний термін служби обладнання розподільчого мережевого комплексу, а також дає можливість проведення запобіжних коригувальних заходів щодо підвищення якості електричної енергії.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] ГОСТ 13109-97 Електрична енергія. Сумісність технічних засобів електромагнітна. Норми якості електричної енергії в системах електропостачання загального призначення. - Україна, 2012.
- [2] Бурбело М. Й., Лебедь Д. Ю., Лещенко О. Р., Оптимізація часу заряду/розряду конденсаторів активного фільтра під час коливань напруги. Вісник Хмельницького національного університету, вип. 4, ст. 58-63, 2022.
- [3] H. Fujita, and H. Akagi, "The unified power quality conditioner: The integration of series and shunt-active filters," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 13, no. 2, pp. 315–322, Mar. 1998.
- [4] Qianming Xu, Fujun Ma, Zhixing He, Huagen Xiao, "Analysis and Control of M3C-Based UPQC for Power Quality Improvement in Medium/High-Voltage Power Grid," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 31, no. 12, december 2016
- [5] Raphael J. Millnitz dos Santos, Jean Carlo da Cunha, Marcello Mezaroba, "A Simplified Control Technique for a Dual Unified Power Quality Conditioner," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 61, no. 11, november 2014.
- [6] Paul Horowitz, Winfield Hill, The Art of Electronics, Third Editio, Cambridge University Press, 2015, ISBN: 978-0-521-80926-9.
- [7] ДСТУ EN 61000-4-15:2018 Електромагнітна сумісність. Частина 4-15. Методики випробування та вимірювання. Флікерметр. Технічні вимоги до функціонування та конструкції.

REFERENCES

- [1] HOST 13109-97 Elektrychna enerhiia. Sumisnist tekhnichnykh zasobiv elektromahnitna. Normy yakosti elektrychnoi enerhii v systemakh elektropostachannia zahalnoho pryznachennia. - Ukraina, 2012.
- [2] Burbelo M. Y., Lebed D. Yu., Leshchenko O. R., Optymizatsiia chasu zariadu/rozriadu kondensatoriv aktyvnoho filtra pid chas kolyvan napruhy. Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu, vyp. 4, st. 58-63, 2022.
- [3] H. Fujita, and H. Akagi, "The unified power quality conditioner: The integration of series and shunt-active filters," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 13, no. 2, pp. 315–322, Mar. 1998.
- [4] Qianming Xu, Fujun Ma, Zhixing He, Huagen Xiao, "Analysis and Control of M3C-Based UPQC for Power Quality Improvement in Medium/High-Voltage Power Grid," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 31, no. 12, december 2016
- [5] Raphael J. Millnitz dos Santos, Jean Carlo da Cunha, Marcello Mezaroba, "A Simplified Control Technique for a Dual Unified Power Quality Conditioner," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 61, no. 11, november 2014.
- [6] Paul Horowitz, Winfield Hill, The Art of Electronics, Third Editio, Cambridge University Press, 2015, ISBN: 978-0-521-80926-9.
- [7] DSTU EN 61000-4-15:2018 Elektromahnitna sumisnist. Chastyna 4-15. Metodyky vyprobuvannia ta vymiriuvannia. Flikermetr. Tekhnichni vymohy do funktsiuvannia ta konstruksii.

Бурбело Михайло Йосипович – д.т.н., професор, завідувач кафедри ЕСЕМ, e-mail: burbelomj@gmail.com;

Лебедь Денис Юрійович – аспірант кафедри ЕСЕМ: 4e15b.lebyd@gmail.com.

Вінницький національний технічний університет

M. J. Burbelo
D. Y. Lebed

ANALYSIS OF THE WORKING EFFICIENCY OF THE UNIFIED POWER QUALITY REGULATOR TO CHANGE VOLTAGE FLUCTUATIONS

Vinnitsia National Technical University

Improving the quality of electricity is an urgent task for the development of the electric power industry, aimed at reducing electricity losses, increasing the service life of electrical equipment, and ensuring conditions for the normal technological process of electricity consumers. This article shows the analysis of the effectiveness of the application of a unified power quality regulator (UPQR) to minimize the range of voltage fluctuations (VQ), flicker dose and general harmonic distortion in the distribution system, which, as a result, improves the quality of electricity. The final simulation of the study is carried out using MATLAB/Simulink. To demonstrate the performance of URYAE, an analysis of the effectiveness of compensation of voltage fluctuations and the flicker indicator was carried out. URYAE was studied on the example of generation of active and reactive power of URYAE into the network and efficiency of compensation of passive current components. The initial data for performing calculations of voltage fluctuations are information on the parameters of the electrical network and a schedule of a random, rapidly changing electrical load, which causes changes in the network voltage, the swings of which can reach large values, for example, due to the inclusion of an asynchronous motor with a large starting current. Such phenomena are also caused by technological installations with a rapidly changing mode of operation, which is accompanied by active and reactive

power surges and discharges by consumers such as welding machines, etc. The main objective of the study is to improve the quality of electricity, increase the service life of electrical equipment and ensure the conditions for the normal technological process of electricity consumers. The indicators characterizing the KN were considered: the range of voltage change (U_t) and the flicker dose (P_t). The purpose of the work is to analyze the efficiency of the URYAE with rapidly changing and non-linear load.

Keywords: voltage fluctuations; sharply variable load; quality of electrical energy; graphs of electric loads, source of oscillations.

Burbelo Mykhailo Josephovich – Doctor of Technical Sciences, Professor of Department of Electrical Systems of Power and Energy Management, e-mail: burbelomj@gmail.com;

Lebed Denys Yuriiovych – graduate student of the department: 4e15b.lebyd@gmail.com