

КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ВИСОКОВОЛЬТНОГО
ЦИФРО-АНАЛОГОВОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА

Ю.Ф. Тесик*, докт.техн.наук, О.Л. Карасинський**, канд.техн.наук, Р.М. Мороз***
Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Перемоги, 56, Київ, 03057, Україна. E-mail: luckyposhta@gmail.com

Запропоновано комп'ютерну модель високовольтного цифро-аналогового перетворювача (ВЦАП) для застосування в портативних метрологічних установках. Описано принцип роботи, наведено схему моделі, графіки вихідних сигналів, досліджено вплив дискретності ВЦАП та опору пропускних ключів на якість вихідного сигналу. Бібл. 9, рис. 3, табл. 1.
Ключові слова: відтворення, метрологічне забезпечення, електроенергія, підсилювачі потужності, цифро-аналогове перетворення, комп'ютерне моделювання.

Вступ. Зростання кількості споживачів призводить до збільшення кількості приладів обліку електроенергії (ПОЕ). Вони підлягають періодичній перевірці, яку проводять центри стандартизації, сертифікації та метрології (ЦСМ) [8] із застосуванням спеціалізованих метрологічних джерел струму і напруги чи генераторів-калібраторів (ГК), відтворюють низку параметрів мережі [9]. Оскільки ПОЕ розташовані розрізнено, виникає потреба в перевірці на місці встановлення і використання споживача електроенергії. Для цього потрібні портативні ГК, які дають змогу контролюючим органам зменшити в кілька разів витрати на проведення перевірки та значно підвищити її оперативність.

Портативні ГК мають бути компактних розмірів та мати незначну масу, при цьому відтворювати синусоїдальні сигнали мережі з малим коефіцієнтом спотворень. Проведені дослідження [1] показали, що маса, габарити та метрологічні характеристики ГК значною мірою визначаються конструкцією вихідних підсилювачів, які працюють у режимі АВ [4], D [7] чи гібридному [6] та містять вихідні низькочастотні трансформатори, 50 % ваги і габаритів однофазного ГК займають вихідний підсилювач напруги та струму, а трифазного – до 80%.

У [2] було запропоновано високовольтний цифро-аналоговий перетворювач (ВЦАП) для точного відтворення синусоїдальної напруги і використання у метрології, зокрема, в портативних ГК. Перетворювач має кілька переваг: відсутність підсилювача, підвищуючого низькочастотного вихідного трансформатора, невеликі масу і габарити. Оцінку впливу на якість вихідного сигналу схемних реалізацій було проведено способом математичного моделювання [3]. Хоча в роботі допущені спрощення, аналітичні вирази для розрахунку вихідного сигналу і рівня спотворень досить складні.

Метою роботи є створення та дослідження комп'ютерної схемотехнічної моделі ВЦАП для підтвердження теоретичних розрахунків [3] та поглибленого дослідження впливу розрядності та характеристик пропускних транзисторних ключів на якість вихідного сигналу, що значно спрощує розробку прецизійних портативних джерел напруги на основі ВЦАП з прогнозованими спотвореннями.

Щоб підтвердити будь-які теоретичні дослідження, потрібно провести фізичне моделювання. Це потребує значних часових та фінансових затрат. Автори пропонують подолати цю проблему на початку замінивши фізичне моделювання комп'ютерним схемотехнічним моделюванням, та представляють комп'ютерну схемотехнічну модель для досліджень.

Для цього використовують операційне середовище NI Multisim, що дає змогу моделювати як цифрову частину схеми регістра, дешифратора, управління вихідними транзисторами перетворювача, їхню роботу, так і аналогову – формування синусоїдального сигналу на навантаженні, його вимірювання і обробку. В цьому середовищі представлено широкий асортимент контрольно-вимірювальних приладів, що відповідають їх реальним аналогам за зовнішнім виглядом та функціональними можливостями [5].

Розглянемо ВЦАП [2] з вихідною напругою $U_{вих}$ для мереж номінальною напругою 3×57.7 В для вторинних вимірювальних кіл. Відповідно до ГОСТ 13109-97 необхідно відтворювати номінальну напругу з діапазоном відхилення $\pm 20\%$ з коефіцієнтом несинусоїдальності (спотворень) K_{gr} не більше 2% та перенапруги величиною $1,47 U_{вих}$, з похибкою відтворення менше 2%. Так, ВЦАП для фазної напруги має бути сформований з мінімальної кількості опорних джерел і задовольняти вказаним вимогам. Відповідно до [2] має бути достатньо п'яти опорних джерел для відтворення, проте рівень спотворень $K_{gr} = 1,2\%$ розрахований за (19) з [3] для мак-

© Тесик Ю.Ф., Карасинський О.Л., Мороз Р.М., 2019
ORCID ID: *<https://orcid.org/0000-0001-6567-1436> ; **<https://orcid.org/0000-0002-5323-8106> ;
*** <https://orcid.org/0000-0002-4292-8160>

симального рівня сигналу, а для розрахунку спотворень номінального значення вказаний вираз не є коректним. Щоб отримати необхідні дані, застосуємо комп'ютерне моделювання.

Дослідимо вплив розрядності ВЦАП на якість вихідної напруги $U_{вих}$ для заданих вимог та отримаємо оптимальну кількість опорних джерел. Для дослідження роботи ВЦАП запропоновано комп'ютерну схемотехнічну модель ВЦАП з включеними в її кола віртуальними вимірювальними приладами, датчиками (рис. 1).

Отримання вхідного двійкового коду D імітує аналого-цифровий перетворювач DD1, який перетворює аналоговий синусоїдальний сигнал частотою 50 Гц з функціонального генератора XFG1 та тактується генератором прямокутних імпульсів XFG1. Рівень вихідного сигналу можна змінювати, задаючи амплітудне значення в генераторі XFG1. Так, змодельовано фізичний цифровий генератор на мікропроцесорі, що формує двійковий код синусоїди. Отриманий код потрапляє на регістр, який складається з двох чотири розрядних селектор-мультиплексорів DD2, DD3 та резистора R22. Код з регістра передається на дешифратор, сформований з елементів «виключаючого чи» DD4, DD5A, DD5B, DD5C, резисторів R1 – R21, комутуючих транзисторів Q1 – Q7. Код з дешифратора потрапляє на схеми комутації вихідними ключами-транзисторами T1 – T7 та шунтуючих ключів-транзисторів T11, T12, .. T72. Схеми комутації (СК) забезпечують розв'язку цифрової керуючої частини та вихідних кіл ВЦАП. Імітвано СК за допомогою оптопар DA5 – DA11, резисторів R34 – R47, джерел напруг живлення G1 – G14, що представляють собою моделі розв'язаних перетворювачів постійної напруги DC/DC.

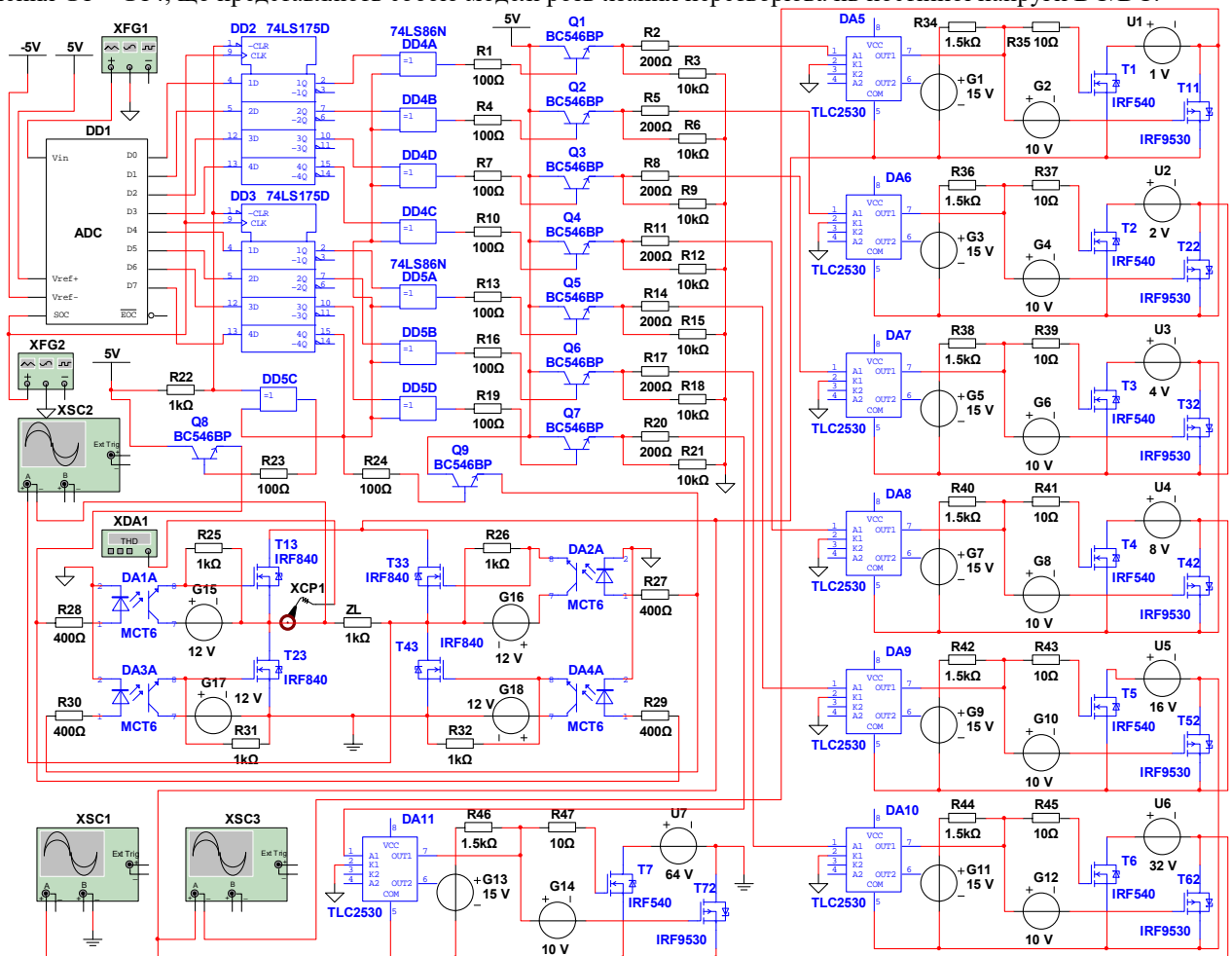
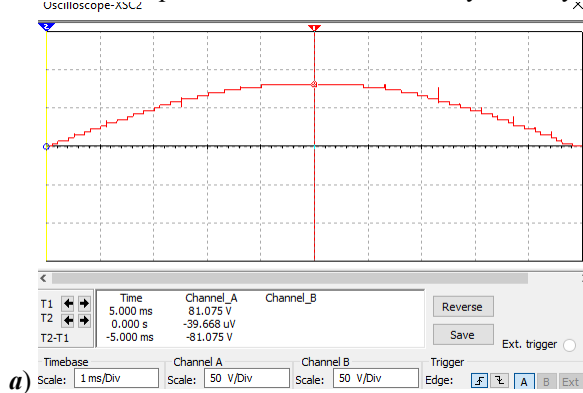


Рис. 1

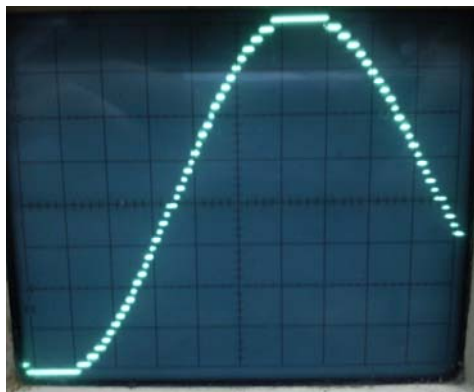
Джерела опорних постійних напруг U_1, U_2, \dots, U_n [3] представлені джерелами $U1 - U7$. Схема комутації мосту складеться з оптопар DA1A – DA4A, елемента «виключаючого чи» DD5C, транзисторів Q8 – Q9, резисторів R23 – R32. Відповідно, транзисторний міст складається з транзисторів T13, T23, .. T43, а вихідний сигнал отримується на резисторі навантаження ZL. До виходу мосту підключений осцилограф XSC2, що використовується для візуального спостереження і вимірювання параметрів вихідної напруги, крім того, в коло вихідного навантаження ввімкнено датчик струму XDA1, який підключений до аналізатора спотворень XDA1, що вимірює гармонічні спотворення вихідного сигналу. Датчик струму необхідно використовувати для того, щоб виміряти спотворення аналогового сигналу на навантаженні, який створюється з імпульсного, що потрапляє на вхід мосту відносно вихідної загальної шини. Осцилограф XSC1 включений на вхід мосту, а осцилограф XSC3 у даному випадку – на вихід ключа першого розряду для спостереження форми напруги. В процесі моделювання осцилограф XSC3 підключається до виходу кожного розряду, що дає змогу підібрати оптимальне управління та тип транзистора. Запропонована модель має сім опорних джерел і дає можливість сформувати семирозрядне

значення амплітуди U_0 вихідного сигналу. Зниження розрядності імітується установкою нульових значень опорних джерел молодших розрядів U_1, U_2 , інші значення розраховуються як зазначено у [3]. Модель дає змогу змоделювати вихідний сигнал і його спотворення для ВЦАП розрядністю від п'яти до семи та різних значень амплітуди вихідного сигналу.

Після проведення моделювання ВЦАП для п'ятирозрядної амплітуди вихідного сигналу отримано значення спотворень для заданого діапазону амплітудних значень напруги (таблиця, колонка 1). Встановлено, що спотворення номінальної напруги більші за 2% та не задовольняють поставленим вимогам. Для порівняння

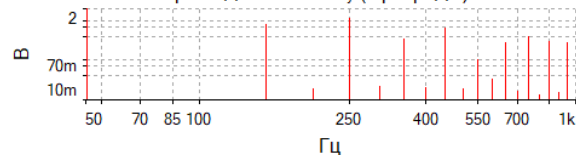


а)



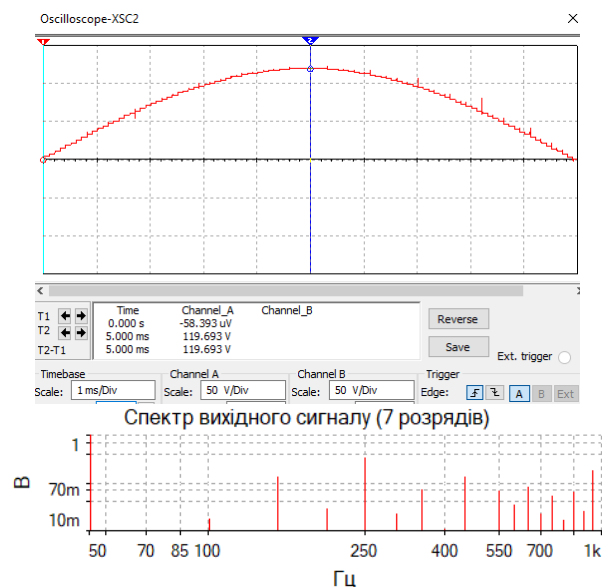
б)

Спектр вихідного сигналу (5 розрядів)



в)

Рис. 2



Спектр вихідного сигналу (7 розрядів)

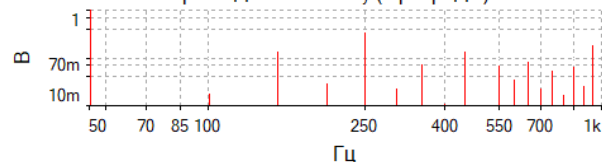


Рис. 3

результатів моделювання був створений експериментальний зразок ВЦАП на п'ять розрядів, проведено вимірювання спотворень (таблиця, колонка 2). На рис. 2, а – 2, в показано осцилограму вихідного сигналу за умови використання п'ятирозрядного ВЦАП, змодельовану і зняту з експериментального зразка, та спектр відповідно. Отримані дані співпадають з результатами моделювання, що вказує на валідність комп'ютерної моделі.

Проте вони свідчать, що рівень квантування недостатній для даних умов, тому потрібно збільшити розрядність відтворення амплітуди вихідного сигналу, що має призвести до зниження спотворень. З аналізу результатів дослідження, наведених у таблиці (колонка 3 та 4), видно, що тільки ВЦАП на сім розрядів повністю задовольняє задані умови.

U_0, V	$K_{gr}, \%$			
	1	2	3	4
$1,47U_{вих} = 119,65$	1,41	1,41	0,78	0,56
Ном. значення: 81,36	2,11	2,18	1,32	0,71
-20% ном. знач.: 65,08	3,62	3,70	2,1	0,85

Отримані осцилограма вихідного сигналу та спектр показані на рис. 3. Підвищення розрядності значно знижує рівень низькочастотних гармонік та зменшує ступінчастість амплітуди вихідного сигналу. Тому при створенні ВЦАП для відтворення напруги з потрібним рівнем спотворень у широкому діапазоні необхідно збільшити рівень квантування на два розряди.

Було проведено дослідження впливу опору пропускних ключів на якість вихідного сигналу для семи розрядного ВЦАП. У результаті моделювання отримано коефіцієнт спотворень максимального вихідного сигналу на рівні 0,56%, а розраховане значення становить 0,23%, що вказує на те, що комп'ютерна модель враховує більше факторів. При цьому використано транзистори з опором 0,2 Ом. При застосуванні транзисторів з мінімальним опором 0,06 Ом результат моделювання – 0,27%, при застосуванні широкодоступних транзисторів з опором 0,8 Ом – 1,11 %. Це вказує на те, що значення опору пропускних ключів T11, T22, .. T72 однозначно впливає на якість вихідного сигналу. Збільшення опору призводить до погіршення якості вихідного сигналу, як і зазначено у [3]. Крім цього, представлена модель дає змогу підібрати потрібну комбінацію транзисторних ключів з різними характеристиками транзисторів, щоб отримати мінімальні спотворення вихідного сигналу.

Висновок. Розроблена комп'ютерна модель є максимально наближеною до реальної та використовує математичні моделі реально існуючих компонентів. Виконане моделювання підтверджує теоретичні розрахунки [3]. Досліджено вплив розрядності ЦАП на якість вихідного сигналу; рекомендовано збільшити розрядність

для зниження спотворень у діапазоні $\pm 20\%$ від номінальної напруги. Досліджено вплив опору пропускних транзисторних ключів на якість вихідного сигналу та встановлено, що зменшення опору призводить до покращення якості вихідного сигналу на навантаженні. Запропонована модель дала змогу значно зменшити обсяги фізичного моделювання, що суттєво скоротило матеріальні та часові витрати при створенні ВЦАП із прогнозованими спотвореннями сигналів. У результаті спростилося промислове виробництво ГК, що дало можливість забезпечити метрологічні установи вітчизняними калібрувальними засобами.

1. Мороз Р.Н., Тесик Ю.Ф. Сравнительный анализ характеристик измерительных усилителей мощности, применяемых в метрологическом оборудовании. *Праці ІЕД НАН України*. 2014. Випуск 37. С. 114 – 124.
2. Таранов С.Г., Тесик Ю.Ф., Карасинский О.Л., Мороз Р.Н. Развитие принципов построения высоковольтных цифро-аналоговых преобразователей. *Технічна електродинаміка*. 2014. № 4. С. 64–66.
3. Тесик Ю.Ф., Мороз Р.М. Математична модель високовольтного цифро-аналогового перетворювача для розрахунку спотворень вихідного синусоїдального сигналу. *Технічна електродинаміка*. 2016. № 3. С. 85–90
4. Чухломин И.Е. Принципы построения калибратора переменного напряжения и тока повышенной точности. III научная конференция аспирантов и докторантов: Научный поиск. Технические науки. Издательский центр ЮУрГУ, 2011. Т. 2. С. 149-151.
5. Хернитер Марк Е. Multisim 7. Современная система компьютерного моделирования и анализа электронных устройств. М.: ДМК Пресс. 2006. 488 с.
6. Lavric H., Voncina D. A precision hybrid amplifier for voltage calibration systems. *MIDEM 34(2004)1*. Pp. 37 – 42
7. Zajec P., Nastran J. Power calibrator using switched mode voltage source. *IEEE Transactions on instrumentation and measurement*. 2000. Vol. 49. No 4. Pp. 790-794.
8. Метрологічне забезпечення приладів обліку електроенергії. URL: <http://www.bcdst.kiev.ua/index.php/home/827-2014-08-20-06-55-29> (accessed 07.11.2017)
9. 6105A, 6100B Electrical Power Quality Calibrator. URL: <https://eu.flukecal.com/products/electrical-calibration/electrical-calibrators/6105a-6100b-electrical-power-quality-calibrat> (accessed 08.11.2017)

УДК 621.317

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ЦИФРО-АНАЛОГОВОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

Ю.Ф. Тесик, докт.техн.наук, **О.Л. Карасинский**, канд.техн.наук, **Р.Н. Мороз**

Институт электродинамики НАН Украины,

пр. Победы, 56, Киев, 03057, Украина.

E-mail: luckyposhta@gmail.com

Предложена компьютерная модель высоковольтного цифро-аналогового преобразователя (ВЦАП) для применения в портативных метрологических установках. Описан принцип действия, приведена схема модели, графики выходных сигналов, исследовано влияние дискретности ВЦАП и сопротивления пропускных ключей на качество выходного сигнала. Библиография: 9, рис. 3, табл. 1.

Ключевые слова: воспроизведение, метрологическое обеспечение, электроэнергия, усилители мощности, цифро-аналоговое преобразование, компьютерная модель.

COMPUTER SIMULATION OF HIGH-VOLTAGE DAC

Yu.F.Tesik, O.L.Karasinskii, R.N.Moroz

Institute of Electrodynamics National Academy of Sciences of Ukraine,

pr. Peremohy, 56, Kyiv, 03057, Ukraine.

E-mail: luckyposhta@gmail.com

A computer model of a high-voltage digital-to-analog converter (HVDAC) for use in portable metrological installations is proposed. The principle of operation is described, the scheme of the model, the output signals are shown, the influence of the discreteness of the HVDAC and the resistance of the access keys on the quality of the output signal is investigated. References 9, figures 3, table 1.

Key words: reproduction, metrological provision, electricity, power amplifiers, voltage digital-analog conversion, computer simulation.

1. Moroz R.N., Tesik Yu.F. Comparative analysis of performance measuring power amplifiers applied in generators-calibrators and metrological equipment. *Pratsi Instytutu Elektrodynamiky Natsionalnoi Akademii Nauk Ukrainy*. 2014. Vol. 37. Pp. 114 – 124. (Rus)
2. Taranov S.G., Karasinskii O.L., Tesik Yu.F., Moroz R.N. Development of principles of construction of switching reference voltages of high-voltage DAC. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2014. № 4. Pp. 64–66. (Rus)
3. Moroz R.N., Tesik Yu.F. Mathematical model of high voltage DAC for estimation of distortion of the output sinusoidal signal. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2016. № 3. Pp. 85–90. (Ukr)
4. Chukhlomin I.E. Principles of calibrator AC voltage and current of high accuracy. III nauchnaia konferentsiia aspirantov i doktorantov: Nauchnyi poisk. Tekhnicheskie nauki. Izdatelskii tsentr YuUrGU, 2011. Vol. 2. Pp. 149-151. (Rus)
5. Herniter M.E. Modern system of computer simulation and analysis of electronic devices. Moskva: DMK Pres, 2006. 488 p. (Rus)
6. Lavric H., Voncina D. A precision hybrid amplifier for voltage calibration systems. *MIDEM 34(2004)1*. Pp. 37 – 42
7. Zajec P., Nastran J. Power calibrator using switched mode voltage source. *IEEE Transactions on instrumentation and measurement*. 2000. Vol. 49. No 4. Pp. 790-794.
8. Metrological support of electricity metering devices. URL: <http://www.bcdst.kiev.ua/index.php/home/827-2014-08-20-06-55-29> (accessed 07.11.2017)
9. 6105A, 6100B Electrical Power Quality Calibrator. URL: <https://eu.flukecal.com/products/electrical-calibration/electrical-calibrators/6105a-6100b-electrical-power-quality-calibrat> (accessed 08.11.2017)

Надійшла 02.03.2018

Остаточний варіант 11.07.2018