

<https://doi.org/10.36818/2071-4653-2022-6-1>

УДК 338.28+338.12.017

JEL L63, O33

С. В. Биткін

кандидат технічних наук, доцент, здобувач кафедри електронних та мікроелектронних інформаційних систем Інженерного навчально-наукового інституту ім. Ю. М. Потебні

Запорізького національного університету, м. Запоріжжя

e-mail: sergey.bytkin@gmail.com

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-3583-3371>

Т. В. Критська

доктор технічних наук, професор, завідувачка кафедри електронних та мікроелектронних інформаційних систем Інженерного навчально-наукового інституту ім. Ю. М. Потебні Запорізького національного університету, м. Запоріжжя

e-mail: krytskaja2017@gmail.com

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-6933-0460>

А. І. Мокій

доктор економічних наук, професор, провідний науковий співробітник відділу регіональної економічної політики

ДУ «Інститут регіональних досліджень імені М. І. Долішнього

НАН України», м. Львів

e-mail: amokiy320@ukr.net

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-7556-6135>

ВІДБУДОВА ПРОДУКТИВНОСПРОМОЖНОЇ НАПІВПРОВІДНИКОВОЇ ГАЛУЗІ В КОНТЕКСТІ ПОДОЛАННЯ НЕГАТИВНИХ ТЕНДЕНЦІЙ РОЗВИТКУ ПРОМИСЛОВОСТІ УКРАЇНИ

Імперативом національної конкурентоспроможності і безпеки стає відбудова на якісно новому технологічному рівні військово-економічного сектору України, насамперед виробництва військово-технічної продукції і озброєння, зокрема електронної компонентної бази (ЕКБ). Набуває актуальності відновлення завершеного циклу виробництва напівпровідникових матеріалів, дискретних приладів та інтегральних мікросхем для виготовлення високотехнологічної військової техніки для внутрішніх потреб і на експорт. Вітчизняна електронна промисловість перебуває в глибокій кризі, але в найближчому майбутньому вона має повністю відновитися через невідкладну потребу в найефективніших оборонних технологіях і продукції. Розвиток напівпровідникової галузі потрібно планувати в контексті тенденцій світового ринку мікроелектроніки, яка є стратегічною компонентою військової, економічної та промислової безпеки країн-лідерів і знаходиться в центрі геостратегічних інтересів і глобальної технологічної конкуренції. Відбудова галузі розглядається в контексті головних і часткових факторів продуктивної спроможності, а до головних факторів віднесені напівпровідникові матеріали, виробництво яких слід налагодити за короткий період для виготовлення мікроелектроніки та силових приладів подвійного застосування. Обґрунтовано першочергові заходи, здійснення яких спрямоване на подолання негативних тенденцій промислового розвитку.

Ключові слова: історичні тренди промислового розвитку, повосенне відновлення економіки України, глобальний ринок мікроелектроніки, продуктивна спроможність напівпровідникової галузі, завершений цикл виробництва військово-технічної продукції, електронна компонентна база.

Bytkin S., Krytska T., Mokiy A. RECONSTRUCTION OF A PRODUCTIVELY CAPABLE SEMICONDUCTOR INDUSTRY IN THE CONTEXT OF OVERCOMING NEGATIVE DEVELOPMENT TRENDS OF UKRAINIAN INDUSTRY

The restoration of industry in post-war Ukraine is possible only if the direction of its development corresponds to the current trend of development of the world economy, namely the militarization of the world economy. Thus, the criterion for the success of the Ukrainian economy can be the level of post-war development of industry that produces military equipment and weapons, and these products must be high-tech, such that it has a closed production cycle within the country. So, the urgent task is to find ways to restore and develop the production of semiconductor materials, discrete devices and integrated circuits directly in Ukraine for the manufacture of high-tech military equipment, both for own needs and for export, including in the United States. The main negative trend of the modern and in the recent past historical and economic trend of Ukraine's development is the deindustrialization of its economy, namely the structural inconsistency with modern technological development. The crisis of neoliberal globalization has led not only to the development of deindustrialization trends in developing countries (to which Ukraine belongs), but also to the reduction of the industrial sector in highly developed countries. In Ukraine, the domestic electronic industry is in a deep structural and technological crisis. But in Ukraine, historically, the electronic industry has provided orders

mainly for the defense-industrial complex for the development and manufacture of highly intelligent and high-tech electronic products for military or dual use. In the near future, this trend in the development of the industry will fully recover. The motivation for this is the need for the most effective defence technologies and products, and the driver is global defence spending. It is reasonable to plan the recovery and development of Ukraine's semiconductor industry in the context of changes in the world economy and the global microelectronics market, whose products are a strategic component of the military, economic and industrial base of superpowers and therefore are at the center of conflicting geostrategic interests and at the heart of the global technological race, which will be accompanied by partial deglobalization. Thus, Ukraine has no choice but to resume independent production of electron component base (ECB) for military equipment and weapons. The purpose of this work is a preliminary brief consideration of the fundamental possibility and feasibility of using SiGe as a semiconductor material for the manufacture of microelectronics and dual-use power devices. In Ukraine, an industrial technology for growing single-crystal SiGe has been developed, which allows us to talk about the possibility of its export. In fact, it is necessary to solve a scientific, technical and / or technological problem, which allows us to offer potential customers a product with unique (or at least not widespread) properties and reasonable prices. The possibility of entering the world markets of semiconductor technology, first of all, from a physical and technological point of view, is quite real and should be considered during further research.

Keywords: *the trend of the development of the world economy, the recovery and development of the semiconductor industry of Ukraine, the choice of semiconductor material, the manufacture of microelectronics and dual-use power devices.*

Постановка проблеми. З початку ХХІ ст. відбувається новий етап формування метасистемних характеристик глобальної економіки. Попри відмінності в методологічних підходах до визначення парадигм глобалізації, анти-, альтер-, а останнім часом і деглобалізації чи реглобалізації [1], їхній вплив на суспільні та економічні складники структури національних макросистем і національну безпеку загалом визнається беззаперечним і вагомим не лише в статичному, але й у динамічному вимірі. Т. В. Пауль в огляді наукових публікацій окреслює три сфери здійснення заходів для реглобалізації: економічна взаємозалежність і вільна торгівля; просування демократії; зміцнення міжнародних інституцій та їхніх правил, норм і принципів, доповнюючи їх активізацією внутрішніх можливостей ліберальних держав із союзниками шляхом сприяння стратегії справедливого розподілу доходів, покращення класового й расового розподілу та розвитку навичок населення з нижчим рівнем доходу, отримання маргіналізованими громадами вигоди від ліберального економічного прогресу [1, с. 1616-1617].

Певною мірою ідеться про спроби науковців пояснити шоківі і навіть катастрофічні зрушення, які відбуваються в процесі «глобальної зміни епох» (за М. Шульцем [2]). М. Шульц звертає увагу, що в умовах війни росія стає одним з партнерів Глобального Півдня як найбільший експортер озброєння і зернових в Африку, і підкреслює важливість критичної оцінки дій і надмірний акцент на короткотерміновій безпеці на противагу довгостроковій стабільності. Ще більше вагомими та, головне, з невизначеними у стратегічній перспективі негативними наслідками можна вважати виклики глобального середовища для безпеки розвитку окремих країн і людства загалом. Поняття «глобальне середовище», на нашу думку, істотно відрізняється від усталених трактувань понять «глобалізація», «глобальна економіка», «глобальна економічна інтеграція». Як показано в [3], глобальне середовище ширше та глибше, ніж гео економічний простір, охоплює глобальні інформаційні потоки, де взаємопов'язуються культурно-духовні основи, зокрема релігійні та ментальні, країн-учасниць, а

також глобальні екологічні і техногенні ризики та загрози безпеці розвитку під впливом різних країн та інтернаціональних підприємств з різною величиною і часовими параметрами майбутніх трансакційних витрат на нейтралізацію їхніх наслідків. Глобальне середовище стосується використання не лише природних, земельних, водних, а й просторових (повітряних, космічних, екологічних) ресурсів. Домінантною характеристикою глобального середовища є відсутність інституціонального базису функціонування, що створює об'єктивні передумови для шоківих зрушень, кризових явищ і катастроф. На відміну від глобальної економіки, глобальної економічної інтеграції, світового господарства і міжнародних економічних відносин, яким властиві метасистемні характеристики управління у формі багатосторонньої системи регулювання світової торгівлі і діяльності міжнародних організацій, у глобальному середовищі відсутні будь-які регулятори, проте існують приховані зв'язки між його суб'єктами та об'єктами. Глобальне середовище, його вплив на глобальну економіку та її суб'єктів потребують детального дослідження, особливо в контексті сутнісних характеристик його викликів, які характеризуються ірраціональністю та невизначеністю причин, часу виникнення і масштабів наслідків для суб'єктів у поточному періоді і стратегічній перспективі.

Останнім часом ці виклики поповнилися трансформацією гібридних форм війни росії з Україною в реальну військову агресію на всій території нашої держави. Незважаючи на безпрецедентний масштаб санкцій проти агресора, йому вдається утримувати стабільність макроекономічного становища, щонайменше на найближчі два-три роки. Відтермінованими в коротко- і навіть середньостроковому часовому періоді можна вважати наслідки розширення санкцій проти експорту енергоресурсів і функціонування високотехнологічних секторів економіки рф. Побіжний аналіз санкційної політики показує її незначний вплив на припинення військових дій і виведення окупаційних військ з України. Становище, яке склалося, відображає реальну безпорадність

багатосторонніх систем регулювання світового порядку й дає змогу зробити висновок про довготривалий характер війни з країною-агресором. Показово, що на багатьох дискусійних платформах провідних наукових і експертних центрів війну розглядають як «Ukrainian crisis», залишаючи поза увагою першопричину – російську агресію. Попри безумовну та широку підтримку України та осуд агресора більшістю країн, спостерігаються неоднозначні процеси в санкційній політиці окремих країн-членів ЄС, домінування національних економіко-політичних інтересів над стратегічними цілями глобальної і мегарегіональної безпеки.

За прогнозними оцінками О. Семененка, І. Чернишової та ін., втрати економіки України внаслідок російської агресії можуть становити понад 60% обсягу ВВП за 2021 р. (за основними групами прямих економічних втрат: житловий фонд – 45%; транспортна інфраструктура – 25%; заводи та підприємства – 12%; аеропорти та аеродроми – 6%; соціальна інфраструктура – 6%; інше – 6%) [4]. На жовтень 2022 р. на дискусійних площадках зниження українського ВВП оцінювалося на рівні 30% за 4-5% економічного спаду в росії. Продовження російсько-української війни, перетворення її на війну на виснаження, нестабільність і непрогнозованість масштабів допомоги Україні партнерами у відновленні економічного та воєнного потенціалу істотно знизить рівень її воєнно-економічної безпеки.

Відбудова на якісно вищому рівні вітчизняної промисловості можлива лише за умови відповідності напрямку її розвитку трендові сучасного етапу розвитку глобальної економіки, насамперед її милітаризації, яка виражається, на думку О. Гількової, в інтенсифікації військових секторів економіки в промислово розвинених країнах [5], а також у милітаризації фундаментальних науково-дослідницьких робіт [6]. А. Леске, розглядаючи супутні та обертальні ефекти інноваційно-інвестиційної активності в оборонній сфері Бразилії, доводить детермінованість позитивного впливу інвестицій в інновації військового призначення на економічне зростання країни [7]. Оборонні дослідження завжди були джерелом технологічного зростання, результати якого використовувалися в промисловості загалом. Звернемо увагу, що основні фундаментальні і прикладні результати досліджень, пов'язані з розвитком аерокосмічної промисловості, атомної енергетики, обчислювальної техніки та інтернету, здійснювалися на технологічній основі напівпровідникової продукції. Вплив на вищезгадані галузі обумовлював очікування від оборонних інновацій «технологічних переливів» (overflows), тобто постійного впровадження військових технологій у цивільне виробництво з отриманням супутнього (spin-off) ефекту, який Т. Кваша вважає найвагомішим чинником інвестиційної активності у військово-економічному секторі, зокрема в промисловому випуску продукції подвійного використання [8].

Можна стверджувати, що критерієм продуктивної спроможності економіки, зокрема її військово-економічного сектору та обумовленої ним

національної безпеки, у середньостроковій перспективі є рівень його післявоєнного розвитку, насамперед випуску високотехнологічної військової техніки та озброєння із завершеним циклом виробництва. Водночас для виробництва засобів протиповітряної, берегової оборони, аерокосмічних та інших військових систем має застосовуватися саме вітчизняна електронна компонентна база (ЕКБ).

У США, як показано в [9], у більшості військово-технічних систем використовуються напівпровідникова електроніка, системні підходи до проектування, розроблення та виготовлення спеціальної техніки, що детально описані в [10]. С. Шивакумар та Ч. Веснер, пов'язуючи виробництво напівпровідників з національною безпекою, наголошують, що звуження американських можливостей у сфері мікроелектроніки є прямою загрозою здатності захищати країну та союзників з використанням інтелектуальних систем озброєння, зокрема протитанкових і зенітних [11]. Ці автори вважають, що за критерієм власних виробничих можливостей американська напівпровідникова галузь має значні прогалини у виробничих ланцюгах. Хоча країна залишається світовим лідером у сфері проектування найсучасніших інтегральних мікросхем (ІС), контролюючи близько 85% світового ринку автоматизації електронного проектування (EDA), проте останніми роками частка виробництва мікросхем у США скоротилася до 10% загально-світової кількості. Сьогодні відсутні можливості виготовлення безпосередньо в країні найсучасніших і найскладніших мікроелектронних виробів з проектною нормою 5-7 нм, які вже виробляють у Тайвані, Республіці Корея та Сингапурі. Деагрегація та офшоринг значної кількості елементів виробництва напівпровідників у США посилює загрози для національної безпеки, пов'язані з нелегальним використанням інтелектуальної власності, впровадженням контрафактних пристроїв, порушенням поставок мікросхем через стихійні лиха або геополітичні конфлікти. Уразливість військово-економічного сектору США до цих ризиків особливо гостро відчувається щодо найсучасніших чіпів, які мають ключове значення для застосування штучного інтелекту (ШІ), генерованого обчислювальними комплексами складного озброєння та військової техніки, який обумовлює революційні технологічні зміни в її використанні в бойових діях. Штучний інтелект дозволяє комп'ютерним системам вирішувати завдання із значно більшими швидкістю і продуктивністю, ніж людські, причому він не втомлюється, не забуває і не підлягає впливу емоцій. Передбачається, що ШІ дає змогу командирам військових підрозділів практично безпомилково приймати рішення на основі швидкої і точної обробки великих масивів даних. На думку С. Шивакумара та Ч. Веснера, масована китайська атака, керована штучним інтелектом, може подолати оборону США завдяки диспропорціям у продуктивності між мікросхемами ШІ і звичайними центральними процесорами (CPU) обчислювальної техніки. Для найсучасніших систем ШІ потрібні мікросхеми з проектними нормами від 7 до 5 нм, виробництво яких

американськими підприємствами нині не здійснюється. Наприклад, для аерокосмічного та військового застосування виробляються програмовані ІС (Field-programmable gate arrays (FPGA)) [12] з дотриманням проєктних норм близько 10 нм. А тайванська корпорація Taiwan Semiconductor Manufacturing Company Limited (TSMC) буде фабрику ІС в Арізоні, яка, використовуючи елементи ІС, з 2024 р. випускатиме продукцію з проєктними нормами 5 нм. Можна припустити, що до 2024 р. проєктні норми чіпів наблизяться до межі близько 3 нм. Звернемо увагу на те, що залежність від тайванського виробництва чіпів для оборонних систем виходить за межі використання лише штучним інтелектом. Наприклад, імпорتنі чіпи застосовуються у винищувачах F-35 і в широкому асортименті пристроїв «військового класу», що використовуються Міністерством оборони США. Багато оборонних систем США використовують комерційні схемотехнічні та топологічні версії FPGA, яким технологічно додають такі специфічні військово значущі функції, як вищий рівень термічної та радіаційної стійкості. Істотна, якщо не повна, залежність від тайванських виробників чіпів для військового застосування – це важливий чинник тиску уряду США на корпорацію TSMC для перенесення виробництва ІС для військової техніки до Сполучених Штатів. Очевидно, що застосування таких методів мотивації підприємств промислово розвинених країн до релокації чи інвестування у виробництво чіпів у нашу країну нереальне. Утім, це не заперечує актуальності завдання формування системних засобів відбудови безпосередньо в Україні виробництва напівпровідникових матеріалів, дискретних приладів та інтегральних мікросхем для виготовлення високотехнологічної військової техніки для оборонних потреб і розширення експорту їх у розвинені країни, зокрема США.

Аналіз останніх досліджень. Головним негативним наслідком сучасного етапу розвитку України є деіндустріалізація її економіки, структурна невідповідність глобальному технологічному розвитку, недостатня інтегрованість до глобальних виробничих ланцюгів через низький рівень запровадження новітніх технологій виробництва [13]. Криза неоліберальної глобалізації, на думку М. Зверякова, призвела до деіндустріалізації в країнах, що розвиваються, зокрема в Україні [14], а також, як вважає В. Кондратьєв, до звуження індустріального сектору у високорозвинених країнах [15]. За П. Ватманом, основою зростання розвинених економік є автоматизовані підприємства, які використовують промислове обладнання з мікроелектронними пристроями, що забезпечує експоненційний ефект масштабування в геометричній прогресії [16]. У контексті пропонованого нами галузевого підходу до формування, розвитку й реалізації продуктивної спроможності, тобто вибору та аналізу її головних і часткових факторів, звернемо увагу на відмінності між ефектом зростання і масштабування. Зазвичай зростання відбувається лінійно, тобто виробник використовує нові окремі фактори або збільшує їхні обсяги (людський і

фінансовий капітал; наука і технології; матеріальні та енергетичні ресурси; інституціональна та фізична інфраструктура; позаекономічні фактори (культурні, етичні) для збільшення доходу). Натомість, як показує І. Дзюбенко, масштабування – це нелінійний процес, коли дохід зростає без істотного збільшення ресурсів, а завдяки такій найважливішій властивості науково-технологічного фактору, як експоненціальне зростання в разі переходу до інформатизованого середовища з використанням мікроелектроніки [17].

Для зміцнення національної, насамперед військової та економічної, перш за все промислової, безпеки в США прийнято двопартійний закон про інвестування у виробництво напівпровідників (CHIPS and Science Act, який передбачає інвестування 52 млрд дол. США в поживлення виробництва напівпровідників [18]), що надзвичайно важливо для продуктивної спроможності військової промисловості. Наприклад, виготовлення військового пристрою Javelin потребує щонайменше 250 інтегральних схем. Отже, за критерієм економічної безпеки чіпи є технологічним базисом військово-економічного сектору економіки США. Для зіставлення: у КНР обсяги інвестицій у розвиток національного виробництва чіпів становлять понад 150 млрд дол. США. Оскільки значна частина виробництва ІС знаходиться на Тайвані, ризики для американської промисловості, зокрема оборонної, і, отже, для економічної і національної безпеки є істотними. Сьогодні близько 98% загальної кількості ІС, від яких так залежить випуск військово-технічної продукції, виробляється в країнах Азії. Однією з причин цього є недостатнє фінансування в розвитку науки. Якщо 30 років тому інвестиції у «чисті» (фундаментальні та прикладні) дослідження та розробки становили понад 2% обсягу ВВП США, то зараз досягають тільки 0,7% обсягу ВВП.

В Україні електронна промисловість знаходиться в глибокій структурно-технологічній кризі [19]. У минулому електронна промисловість забезпечувала замовлення переважно оборонно-промислового комплексу СРСР з розроблення і виготовлення високоінтелектуальної та наукомісткої електронної продукції військового чи подвійного призначення [20]. У середньостроковій перспективі цей напрям розвитку галузі повністю відновиться, що обумовлено потребою в найефективніших оборонних технологіях і продукції, з тенденцією до зростання загальних витрат на оборону. Мотивацією є потреба в найефективніших оборонних технологіях і продуктах, а драйвером – глобальні витрати на оборону [21]. Хоча темпи зростання світових витрат на оборону незначні, але їхні обсяги істотно впливають на привабливість ринку оборонної продукції. Витрати на оборону у 2020 р. досягнули майже 2 трлн дол. США; очікується, що у 2028 р. вони досягнуть 2,8 трлн дол. США. Значна частина цих витрат спрямовується на щорічне утримання збройних сил, але частка витрат на матеріали, обладнання, НДДКР та навчання, за оцінками, досягне у 2030 р. 900 млрд дол. США. Можна припустити значне зростання обсягів витрат у ланцюги поставок військової радіоелектроніки та ЕКБ. Сегментація

структури використання напівпровідників у системах радіоелектронної боротьби, радіолокації та зв'язку доводить, що найбільшим попитом будуть користуватися арсенід галію (GaAs), нітрид галію (GaN), фосфід індію (InP) і кремній з радіочастотними властивостями, яким є ізовалентно легований германієм кремній (SiGe). Нітрид галію (GaN) вважають альтернативою кремнію для спеціальних застосувань [22]. Це кристалічний структурований напівпровідник, який виготовляється за допомогою металоорганічного хімічного осадження парів (metal-organic chemical vapor deposition (MOCVD)). У цьому процесі галій і азот з'єднуються, утворюючи кристал. Є різні композиції цього синтезу. Наприклад, одна з технологій використовує аміак (NH₃) як джерело азоту та джерело галію, таке як триметилгалій (trimethyl gallium). Для кристалічної структури GaN можливі проблеми з однорідністю (щільність дефектів може досягти 10⁶ см⁻²), але сучасні технології MOCVD дозволяють знижувати їхню концентрацію на 3-4 порядки та отримувати кристали GaN для виготовлення пластин, які можна використовувати безпосередньо в технології. Однією з найбільш значущих переваг нітриду галію перед кремнієм є його більша заборонена зона – для GaN вона дорівнює 3,2 eV, а для Si – лише 1,1 eV, що забезпечує для GaN більшу пробивну напругу й більшу теплову стабільність. Поле пробією для GaN дорівнює 3,3 МВ / см, а для Si – 0,3 МВ / см, що забезпечує придатність широкозонного напівпровідника для високовольтних виробів. Одним з недоліків нітриду галію є його менша теплопровідність – 1,3 Вт / см К проти 1,5 Вт / см К у монокристалічного кремнію. Рухливість електронів нітриду галію є вагомою перевагою використання в радіочастотних компонентах для обробки більш високих частот перемикавання, ніж кремній. Рухомість електронів у Si дорівнює 1500 см²/В с, а в GaN – 2000 см / В с. Проте фізичні властивості GaN можуть обмежувати його використання для низьковольтної ЕКБ (мікросхеми телекомунікаційного обладнання та обчислювальної техніки аерокосмічного обладнання, малопотужні дискретні транзистори, тиристоры та ін.). Орієнтовно можливість використання різних напівпровідникових матеріалів для виготовлення приладів ЕКБ, застосування яких передбачається в різних електричних режимах, оцінюється за залежністю зв'язку максимальної потужності багатопотужних приладових структур із частотою їх перемикавання [23].

Стратегування засобів відбудови напівпровідникової галузі України доцільно здійснювати відповідно до трендів розвитку глобального ринку мікроелектроніки, вироби якої (ІМС, планарні дискретні та силові напівпровідникові прилади) є стратегічною компонентою військової, економічної та промислової бази держав-лідерів, знаходяться в центрі геостратегічних інтересів і глобальної технологічної конкуренції [24]. Україна не має іншої альтернативи, ніж відновити вітчизняне виробництво ЕКБ для військової техніки та озброєння. Виникає завдання вибору напівпровідникового матеріалу, відновлення виробництва якого можливе і доцільне в стислі терміни навіть в умовах війни. Ключовим

критерієм вибору матеріалу ЕКБ є технологічність SiGe та GaN. Для широкозонного напівпровідника основна проблема – це технологічний процес його виготовлення, пов'язаний із застосуванням MOCVD [25]. Цей процес має численні переваги та недоліки, передбачає випаровування твердих або рідких прекурсорів (precursors), які є токсичними. Саме тому основним недоліком технології GaN є складність її реалізації. Отже, доцільно припустити, наприклад, що виробництво SiGe на основі традиційних технологій вирощування злитків по Чохральському дасть змогу відновити в Україні виробництво напівпровідникового кремнію і розпочати випуск вітчизняної високотехнологічної промислової продукції, зокрема напівпровідникових матеріалів для експорту, доходи від якого стануть джерелом інвестицій у вітчизняну мікроелектроніку, насамперед військового призначення.

Метою статті є попередній короткий розгляд можливості та доцільності застосування SiGe, з виробництва якого може розпочатися відбудова української напівпровідникової галузі для виготовлення мікроелектроніки та силових приладів подвійного застосування, а також обґрунтування напрямів розвитку й реалізації продуктивної спроможності галузі з визнанням напівпровідникових матеріалів як її ключового фактору.

Основні результати дослідження. Ізовалентно легований германієм кремній (SiGe) вважається одним з найбільш перспективних матеріалів у середньостроковій перспективі (до 2040 р.) з новими функціональними властивостями [26]. У роботі [27] розглядається розвиток промисловості легованого германієм кремнію (silicon germanium (SiGe)), виробництва приладів на його основі, включно з аналізом ринкових тенденцій, технологій та структури виробництва. Наводиться інформація про виробників підкладок (substrates), пластин з нанесеними епітаксійними шарами, обладнання та приладів, під якими розуміють як ІС (integrated circuits, ICs) на основі SiGe, так і дискретні прилади. Розглянуто основні райони виробництва та споживання SiGe – Північна Америка, Японія, Західна Європа та Південно-Східна Азія (Тайвань, Південна Корея, Сингапур, Малайзія), де виробляється та споживається понад 90% обсягів продукції на основі SiGe. Хоча провідним світовим виробником SiGe залишається IBM Microelectronics, на сучасному етапі розвитку глобальної економіки і в інших країнах (КНР, Індія, Австралія, країни Східної Європи) проводяться дослідження та розробки. Виробники напівпровідникової техніки усвідомили, що SiGe є вагомим доповненням до наявних технологічних процесів і дозволяє значно зменшити витрати виробництва. Саме тому на світовому ринку спостерігається тенденція до збільшення продажів техніки з використанням ЕКБ на основі SiGe. Комерційний потенціал ізовалентно легованого кремнію пов'язаний з витісненням високовартісного GaAs у пристроях радіочастотного діапазону. Загалом SiGe є сильним конкурентом інших складних напівпровідників не лише в технічному аспекті, а й за критерієм економічності виробництва. Особливо

ефективним є застосування відносно недорогого SiGe в період рецесії за великих обсягів випуску приладів спеціального застосування, наприклад для телекомунікаційного обладнання. Застосування SiGe замість GaAs у виробництві ІС для роботи в діапазоні передавачів мобільного зв'язку або відмова від карбіду кремнію (SiC) у виробництві силових приладів, що працюють в умовах підвищених температур, продовжує термін життєвого циклу наявних технологій, вимагаючи значно менших витрат за належного рівня функціонування пристроїв і потенційної можливості його поліпшення. Наприклад, ІС на основі SiGe застосовуються для високошвидкісних (близько 40 Gb/s) систем передавання даних, забезпечуючи плановані економічні показники під час їх виробництва. Ключовими сферами застосування компонентів на основі SiGe є такі: мобільна телефонія, включно як з власне апаратами, так і базовими станціями; однокристалні радіоприймальні пристрої комунікаційних систем з високою радіаційною стійкістю; волоконна оптика та відповідні системи; бездротові комп'ютерні мережі та Bluetooth; пристрої зберігання даних у частині лазерних драйверів та електроніки контролю функціонування приводу, що вимагають ІС швидкої дії для систем прецизійного позиціонування в оптичних і магнітних системах; швидкісні системи обробки сигналів для широкого класу обчислювальних задач – від прогнозування погоди в режимі реального часу до використання алгоритмів радарів в anti-stealth технологіях ППО, бортових авіаційних радіолокаційних станціях (таке обладнання вимагає вдосконалених компонентів для власне обчислювальних задач і пристроїв оптичного зберігання даних з високою щільністю); прийнятні з економічного погляду радари запобігання зіткненням на транспортних засобах та інших бортових системах; GPS навігаційні системи для військового та цивільного застосування; пристрої космічного зв'язку для цифрових каналів передавання голосової та телеметричної інформації тощо.

Розвиток виробництва та ринків напівпровідникової продукції безпосередньо пов'язаний із зниженням вартості виробів і збільшенням кількості функцій, що виконуються окремим кристалом. Еволюція ринку в напрямі від спеціалізованих ВІС (ASIC, Application Specific Integrated Circuit) [28] до індивідуальних багатофункціональних пристроїв на основі гетероепітаксialних SiGe біполярних транзисторів (heteroepitaxial bipolar transistor (HBT)) і КМООН схем (complementary metal-oxide-silicon ICs (CMOS)) повністю відповідає трендам мікромініатюризації, низького енергоспоживання та ціни за високого рівня функціональності виробів. Із застосуванням ізовалентного легованого германієм кремнію можливе створення ІС для систем збору розвідувальної інформації з використанням безпілотних літальних апаратів і систем застосування високоточної зброї. До важливих напрямів розвитку мікроелектроніки належить можливість поєднання цифрових та аналогових функцій на одному кристалі з використанням ІС на основі SiGe. Сімейство приладів на основі SiGe – потенційно основа

мікроелектронної промисловості найближчого майбутнього. Ці прилади і, відповідно, матеріал, на основі якого вони виготовлені, повністю вирішують проблему високошвидкісної обробки та передавання інформації в обладнанні мобільного зв'язку та оптоволоконних мережах. SiGe перспективний для використання не тільки в мікросхемах для швидкісного передавання даних, але і для виробництва високопродуктивних аналого-цифрових приладів для глобальної системи супутникового позиціонування (GPS).

Теперішній ринок приладів на основі SiGe базується на поставках невеликих обсягів продукції з високою доданою вартістю. Раціонально доцільна масова поставка дешевших від приладів-конкурентів на основі SiC та GaAs. На основному сегменті ринку (телекомунікаційне обладнання) співіснують виробники, орієнтовані на різні технології. Водночас вирішальним фактором продуктивної спроможності і домінування на ринку залишається ціновий. Економічні причини не дозволять повністю реалізувати технічну перевагу SiGe на ринках з відносно низькими обсягами продажів виробів на його основі, наприклад структур CMOS. Широке застосування SiGe можливе лише виробниками великих обсягів структур CMOS. Прогнозні оцінки ринку приладів на основі SiGe ґрунтуються на припущенні, що у вартісному вираженні відбудеться різке зростання продажів через потребу в недорогих приладах із високою функціональністю. Ринок SiGe технології дуже неоднорідний, на ньому домінують мікросхеми радіочастотного діапазону (wireless amplifier (WA) RFICs) та передавачі для оптоволоконного зв'язку (fiber optic transceiver (FOT) ICs). Для SiGe принципово важливими ринками додатків є ринок мобільних комунікацій і передавання інформації з використанням оптоволоконних мереж, тобто ринки обладнання для обробки сигналів, посилення їх, перемикання за низького рівня шумів та енергоспоживання, відносної дешевизни обладнання. SiGe забезпечує унікальне поєднання технічної та економічної ефективності, що є найбільш привабливою його характеристикою на ринку та передумовою до витіснення GaAs у цій конкуренції. На нашу думку, розвиток ринку SiGe визначатиметься тим, що матеріал зарекомендував себе як ефективна альтернатива Si та GaAs для виробництва біполярних ІС. Можливими напрямками розвитку є виробництво монолітних оптичних ІС і кристалів для мікроелектромеханічних систем (MEMS). Заповнення ринкових сегментів відбуватиметься в гострій конкурентній боротьбі з продукцією на основі GaAs, InP і буде можливим лише на основі кращого поєднання співвідношення «ціна-якість». Домінантним напрямом розвитку найближчими роками є забезпечення елементною базою телекомунікаційного обладнання, військової та аерокосмічної техніки, промислового обладнання. Отже, структура ринку мікросхем на основі SiGe орієнтована на радіочастотний діапазон, що обумовлено фізико-технічними особливостями цього матеріалу.

В Україні розроблено промислову технологію вирощування монокристалічного SiGe [29], проведено експериментально-розрахунковий аналіз його використання для підвищення радіаційної стійкості мікросхем і дискретних приладів аерокосмічного застосування [30], що дозволяє стверджувати про реальну можливість виробництва та експорту ізовалентно легovanого кремнія. Прогнозуючи його використання, потрібно враховувати динамізм структурних змін ринку і технології. З часом використання SiGe зустрінеться із цілеспрямованим удосконаленням технології застосування GaAs, а також широкозонних GaN та SiC. Бізнес на ринку напівпровідникових матеріалів і приладів, особливо для аерокосмічного та військового застосування, через високу привабливість належить до сегмента промислового виробництва з жорстким конкурентним середовищем, схильним до циклічних коливань, впливу ринку ІС широкого застосування, зокрема схем пам'яті. Структура прогнозованого зростання доходу в різних сегментах світового ринку SiGe, включно з телекомунікаційним обладнанням, військовою та аерокосмічною технікою, наведена в [31]. Потрібне додаткове виокремлення сегментів світового ринку наукомісткої напівпровідникової продукції, де є нерозв'язані науково-технічні проблеми, що дають змогу запропонувати потенційному споживачеві товари та технічні рішення з унікальними властивостями, виготовлені на наявному обладнанні. У частині науково-технічних рішень, що задовольняють потреби сучасної мікроелектроніки та сонячної енергетики [32], на експорт можуть бути запропоновані різні матеріали та промислові технології: монокристали кремнію, леговані германієм у діапазоні концентрацій $10^{18} \dots 10^{20} \text{ см}^{-3}$ з керованим вмістом кисню та вуглецю, та технологія виробництва їх для інтегральних схем і дискретних напівпровідникових приладів з підвищеною стійкістю до радіаційних факторів; використання середовища азоту (нарівні та замість використовуваного аргону) у разі кристалізації кремнію для підвищення його механічних властивостей; застосування γ -опромінення для покращення експлуатаційних характеристик тиглів з кварцу та якості без дислокаційних монокристалів кремнію; радіаційно-технологічні процеси у технологіях приладобудування.

Динамізм і невизначеність суспільно-економічних процесів інституціонально нестабільної макросистеми України детермінує використання міждисциплінарного підходу до їх дослідження і стратегування засобів подальшого розвитку з неодмінним дотриманням критеріальних обмежень національної, зокрема воєнної та економічної, безпеки. Саме тому виклад суто технологічних аспектів відновлення виробництва напівпровідників у контексті подолання негативних тенденцій розвитку промисловості України слід поєднати з двома концептуально важливими теоретико-прикладними положеннями економічної теорії.

По-перше, поняття «відновлення» ми розуміємо як відбудову на якісно інших засадах, викладених відомим норвезьким вченим з економічної історії та

економіки розвитку Е. С. Райнертом [33; 34], з акцентом на реіндустріалізацію вітчизняної економіки через активізацію інвестиційної діяльності в раціональних видах економічної діяльності з дедалі більшими доходами, спадною динамікою витрат і нагромадженням науково-технологічної компоненти продукції. Таким критерієм раціональності повністю відповідає напівпровідникова галузь.

По-друге, в основу стратегування реіндустріалізації потрібно покласти її продуктивну спроможність як визначальний чинник забезпечення позицій у глобальній конкуренції, а отже, економічної безпеки країни. Дослідження продуктивної спроможності нації, розпочаті в Україні у 2017 р. А. Філіпенком [35], в умовах війни та повосенної відбудови і в контексті предмета нашого дослідження потребують системного аналізу методичних підходів до вибору факторів продуктивної спроможності, використовуваних: у моделі KLEMS (праця, капітал, енергія, матеріали, послуги тощо); канадськими вченими (проміжні і трудові витрати, витрати відтворювального капіталу, матеріально-виробничі запаси, земельні та інші природні ресурси; поліпшення довкілля; робочий капітал, грошові кошти та інші фінансові інструменти; знансвий капітал, інфраструктура [35, с. 14-15]; у робочих документах ОЕСР («просторові» (агломерації, інфраструктура, географія) і «просторовий» (людський капітал, законодавство про працю, галузевий рівень, інновації та динамізм)) фактори [36]; британськими науковцями з акцентом на регіональній диференціації продуктивності [37]. Концептуальні положення стратегування засобів відновлення, розвитку й реалізації продуктивної спроможності напівпровідникової галузі полягають в активно-агресивному та конкурентному їхньому характері в межах промислової політики, модифікованої до умов воєнного стану і післявоєнного відновлення, і передбачають:

- уникнення рестарту наявних видів економічної діяльності, галузей і підприємств на протигагу сучасним вимогам глобального середовища;
- ідентифікацію наявного факторного потенціалу продуктивної спроможності напівпровідникової галузі з виокремленням такого ключового фактору, як окремі матеріали для виготовлення продукції мікроелектроніки (напівпровідниковий кремній);
- стимулювання інвестицій та імпорту технологій у військово-економічний сектор, насамперед у базисні галузі, до яких належить мікроелектронна промисловість.

Висновки. Для відбудови напівпровідникової галузі, формування її експортного потенціалу насамперед потрібно забезпечити якісно нові конкурентні переваги вітчизняного напівпровідникового кремнію над продукцією іноземних виробників. Отже, потрібне вирішення науково-економічного й технологічного завдання виробництва та пропонування на внутрішньому й зовнішніх ринках продукції з унікальними або не широко поширеними властивостями за прийнятними цінами. Для

організації пріоритетних високотехнологічних виробництв важливим є відповідне інформаційно-аналітичне забезпечення виходу на нові зарубіжні ринки, запропоноване нами в [38; 39]. За Дж.-П. Клеймхансом [40], саме інтегрування в ланцюжки створення вартості можна вважати базисним принципом стратегії освоєння нових сегментів high-tech ринків (наприклад, ринок кремнію з підвищеною радіаційною стійкістю), що виникають у процесі індустріалізації країн без розвинутої промисловості напівпровідникових матеріалів і дискретних приладів. Для вітчизняної промисловості неодмінним є виявлення стратегічно перспективних за факторами продуктивної спроможності експорту нестандартних засобів розроблення технологій у галузі мікроелектроніки та силової електроніки (насамперед радіаційні технології) з використанням методів технологічного маркетингу. Водночас можливість виходу вітчизняної напівпровідникової техніки на світові ринки у фізико-технологічному аспекті досить реальна та має бути підтримана відповідними організаційно-економічними засобами та інститутами державного управління.

Список використаних джерел

1. Paul T. V. Globalization, deglobalization and reglobalization: adapting liberal international order. *International Affairs*. 2021. Vol. 97(5). Pp. 1599-1620. DOI: <https://doi.org/10.1093/ia/iab072>
2. Шульц М. Глобальная смена эпох. *IPG*: сайт. 29.04.2022. URL: <https://www.ipg-journal.io/rubriki/vnesnjajapolitika-i-bezopasnost/globalnaja-smena-ehpokh-1492>
3. *Конкурентні стратегії безпеки розвитку України у глобальному середовищі*: монографія / ДУ «Інститут регіональних досліджень імені М. І. Долишнього НАН України»; ред. А. І. Мокій. Львів, 2019. 872 с.
4. Семененко О., Чернишова І., Таран О., Романченко О., Онофрійчук П., Пекуляк Р. Економічні наслідки російсько-української війни для України та Росії. *Sciences of Europe*. 2022. № 96. С. 13-20. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.6809720>
5. Гилькова О. Н. *Милитаризация мировой экономики: понятие, причины и признаки*: монографія. Чебоксары: Издательский Дом «Среда», 2020. 188 с.
6. Гилькова О. Н. Милитаризация науки и ее влияние на развитие экономики. *Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Экономика и право*. 2018. № 1. С. 78-81.
7. Leske A. D. C. A review on defense innovation: from spin-off to spin-in. *Brazilian Journal of Political Economy*. 2018. Vol. 38(2) (151). Pp. 377-391. DOI: <https://doi.org/10.1590/0101-31572018v38n02a09>
8. Кваша Т. *Світові наукові та технологічні тренди у сфері забезпечення національної безпеки*. К.: УкрІНТЕЛ, 2019. 107 с. URL: <https://mon.gov.ua/storage/app/media/innovatsii-transfer-tehnology/2021/09/30/Svitovi.nauk.tekhn.trend.sfer.zabezp.nats.bezp-2019.30.09.pdf>
9. *Weapon Systems Handbook 2020-2021*. Office of the assistant Secretary Of the Army (Acquisition, Logistic and Technology), 2021. 103 Army Pentagon, Room 2E532 Washington, DC 20310-0103.
10. *Handbook of Military Industrial Engineering* / Ed. by A. B. Badiru, A. U. Thoma. CRC Press, 2009. 830 p. URL: <https://ftp.idu.ac.id/wp-content/uploads/ebook/ip/BUKU%20INDUSTRIAL%20ENGINEERING/Handbook-of-Military-Industrial-Engineering.pdf>
11. Shivakumar S., Wessner Ch. Semiconductors and National Defense: What Are the Stakes? *CSIS*: Website. 8.06.2022. URL: <https://www.csis.org/analysis/semiconductors-and-national-defense-what-are-stakes>
12. What is an FPGA? *FPGA*: Website. 2022. URL: <https://www.xilinx.com/products/silicon-devices/fpga/what-is-an-fpga.html>
13. Стратегія економічної безпеки України на період до 2025 року. Затверджено Указом Президента України від 11.08.2021 р. № 347/2021. *Президент України*: сайт. URL: <https://www.president.gov.ua/documents/3472021-39613>
14. Звєряков М. І. Глобалізація і деіндустріалізація: зміст, суперечності та способи їх розв'язання. *Економіка України*. 2017. № 11. С. 3-16.
15. Кондратьев В. Б. Проблемы деиндустриализации в США. *Перспективы*. 2019. № 3(19). С. 130-147. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=41304579>
16. Whatman P. Growth vs scaling: What's the difference and why does it matter? *Spendesk*: Website. 15.03.2022. URL: <https://www.spendesk.com/en-ru/blog/growth-vs-scaling>
17. Дзюбенко И. Б. Экспоненциальные технологии и организации как фактор роста высокотехнологического бизнеса. *Сборник статей IV Международной научно-практической конференции «Science and technology innovations»*. Петрозаводск: Новая Наука, 2020. С. 47-52. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44126810>
18. Remarks by President Biden in Meeting with CEOs and Labor Leaders on the Importance of Passing the CHIPS Act. *The White House*: Website. 26.07.2022. URL: <https://www.whitehouse.gov/briefing-room/speeches-remarks/2022/07/26/remarks-by-president-biden-in-meeting-with-ceos-and-labor-leaders-on-the-importance-of-passing-the-chips-act>
19. Передерій С. Л. Питання розвитку електронної промисловості України на інноваційній основі. *Економічний вісник Донбасу*. 2013. № 3(33). С. 242-249.
20. Амоша О. І., Саломатіна Л. М., Передерій С. Л. *Розвиток електронної промисловості України на інноваційній основі*: монографія / Ін-т економіки пром-сті НАН України. Київ, 2014. 254 с.
21. Higham E. Defense Market Trends and the Impact on Semiconductor Technology. *Microwave Journal*: Website. 14.12.2021. URL: <https://www.microwavejournal.com/articles/37284-defense-market-trends-and-the-impact-on-semiconductor-technology>
22. Silicon vs. Gallium Nitride (GaN): Properties & Applications in Semiconductors. *Arrow*: Website. 21.01.2020. URL: <https://www.arrow.com/en/research->

and-events/articles/gan-vs-silicon-semiconductor-materials-compared

23. Игнатов А. Н. *Нанoeлектроника. Состояние и перспективы развития*: учеб. пособие. М.: ФЛИНТА, 2012. 360 с.

24. Rapp H. P., Möbert J. *Extraordinary semiconductor cycle triggered by one-time events, cyclical and geopolitical effects*. Frankfurt am Main, Germany, 2022. URL: https://www.dbresearch.com/PROD/RPS_EN_PROD/PROD000000000522983/Extraordinary_semiconductor_cycle_triggered_by_one.PDF?undefined&reaload=HkCwkrQ/v/tpEMUS/J9NiYuQH/UtgvnVo77j99oLiRLPj6~WPF6UBib363SqQBA

25. What Are The Advantage and Disadvantages of MOCVD? *University Wafer*: Website. 2022. URL: <https://www.universitywafer.com/advantage-disadvantages-mocvd.html>

26. Crystal Growth Technology. The Japan Society of Applied Physics, 2022. URL: https://www.google.com.ua/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&frm=1&source=web&cd=2&cad=rja&uact=8&ved=0CCYQFjABahUKewicjvyjJrJAhXGCCwKHx4eBQQ&url=https%3A%2F%2Fwww.jsap.or.jp%2Fenglish%2Fimages%2Facademic_roadmap%2Farm_e_09.pdf&usq=AFQjCNGIXtWXP53r7IiRQ5U3fE_rvbK4A&bvm=bv.107763241.d.bGg

27. *Silicon Germanium Materials & Devices – A Market & Technology Overview to 2006* / ed. R. Szweda. Elsevier Science, 2002. 418 p.

28. Бондаренко І. М., Бородин О. В., Карнаушенко В. П. *Сучасна компонентна база електронних систем*: навч. посіб. Харків: ХНУРЕ, 2020. 268 с.

29. Критская Т. В. *Современные тенденции получения кремния для устройств электроники*: монография. Запорожье: ЗГИА, 2013. 353 с.

30. Быткин С. В. *Конкурентная разведка конъюнктурно-технологических перспектив традиционного и high-tech экспорта Украины*: монография. Запорожье: ЗДІА, 2017. 276 с.

31. Revenue of the silicon germanium materials and devices market worldwide in 2016 and 2021, by end-user (in million U. S. dollars). *Statista*: Website. 2021. URL: <https://www.statista.com/statistics/911545/global-silicon-germanium-materials-and-devices-market-revenue-by-end-user>

32. Быткин С. В., Критская Т. В. Экспорт полупроводниковых материалов как перспективное направление продаж на мировом рынке. *Управленческие технологии в решении современных проблем развития социально-экономических систем*: монография. Донецк: ДонНТУ, 2011. С. 169-176.

33. Reinert E. S., Ghosh J., Kattel R. *Handbook of Alternative Theories of Economic Development*. 2018. 848 p. URL: <https://www.e-elgar.com>

34. *Smart Specialization: theory and brief case studies*. A Report to The European Commission, Directorate General JRC, JRC Seville. April 2018. Prof. Erik S. Reinert, The Other Canon Foundation, Norway & Tallinn University of Technology, Estonia.

35. Філіпенко А. С. Продуктивна спроможність нації: соціально-економічний вимір. *Матеріали Міжнародної наукової конференції «Продуктивна*

спроможність нації: приклад України» (Інститут міжнародних відносин Київського національного університету імені Тараса Шевченка, 29 червня 2017 р., м. Київ). 2017. С. 13-14.

36. Tsvetkova A., Ahrend R., Martins J. O., Lembcke A., Knutsson P., Dylan J., Terzidishttps N. The spatial dimension of productivity: Connecting the dots across industries, firms and places. *OECD Regional Development Working Papers*. 2020. DOI: <https://dx.doi.org/10.1787/ba5edb47-en>

37. Don Webber J., Hudson J., Boddy M., Plumridge A. Regional productivity differentials in England: Explaining the gap. *Regional Science*. 2009. Vol. 88(3). Pp. 609-621. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1435-5957.2008.00209.x>

38. Коваленко О. В., Биткін С. В., Големба В. Є., Балюра Ю. О. Роль інформаційно-аналітичних джерел у забезпеченні безпеки функціонування підприємства. *Науковий вісник Херсонського державного університету. Серія: Економічні науки*. 2015. Вип. 14. Ч. 2. С. 81-86.

39. Биткін С. В. Конкурентна розвідка як технологія практичного забезпечення національної зовнішньоекономічної безпеки. *Стратегічні пріоритети*. 2016. № 3(40). С. 206-212.

40. Kleinhans J. P. Testimony before the U. S. *China Economic and Security Review Commission. Hearing on “U. S. China Competition in Global Supply Chains”*. 2022, June 9. URL: https://www.uscc.gov/sites/default/files/2022-06/Jan-Peter_Kleinhans_Testimony.pdf

References

1. Paul, T. V. (2021). Globalization, deglobalization and reglobalization: adapting liberal international order. *International Affairs*, 97(5), 1599-1620. DOI: <https://doi.org/10.1093/ia/iab072>

2. Schulz, M. (2022, Apr 29). Global'naya smena epokh [A global change of eras]. *IPG*: Website. Retrieved from <https://www.ipg-journal.io/rubriki/vneshnjajapolitika-i-bezopasnost/globalnaja-smena-ehpokh-1492> [in Russian].

3. Mokiy, A. I. (Ed.) (2019). *Konkurentni stratehiyi bezpeky rozvytku Ukrainy u hlobal'nomu seredovyschi [Competitive strategies for the security of Ukraine's development in the global environment]*. Lviv: Dolishniy Institute of Regional Research of NAS of Ukraine. [in Ukrainian].

4. Semenenko, O., Chernyshova, I., Taran, O., Romanchenko, O., Onofriychuk, P., & Pekulyak, R. (2022). Ekonomichni naslidky rosiys'ko-ukrayins'koyi viyny dlya Ukrainy ta Rosiyi [Economic consequences of the Russian-Ukrainian war for Ukraine and Russia]. *Sciences of Europe*, 96, 13-20. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.6809720> [in Ukrainian].

5. Gilkova, O. N. (2020). *Militarizatsiya mirovoy ekonomiki: ponyatiye, prichiny i priznaki [Militarization of the world economy: concept causes and signs]*. Cheboksary: Sreda Publishing House. [in Russian].

6. Gilkova, O. N. (2018). Militarizatsiya nauki i yeye vliyaniye na razvitiye ekonomiki [Militarization of science and its influence on the development of economics]. *Sovremennaya nauka: aktual'nyye problemy*

- teorii i praktiki. Seriya: Ekonomika i pravo – Sovremennaya nauka: actual problems of theory and practice. Series: Economics and Law, 1, 78-81. [in Russian].
7. Leske, A. D. C. (2018). A review on defense innovation: from spin-off to spin-in. *Brazilian Journal of Political Economy*, 38(2) (151), 377-391. DOI: <https://doi.org/10.1590/0101-31572018v38n02a09>
8. Kvasha, T. K. (2019). Svitovi naukovi ta tekhnolohichni trendy u sferi zabezpechennya natsional'noyi bezpeky [World scientific and technological trends in the field of national security]. K.: UkrISTEL. Retrieved from <https://mon.gov.ua/storage/app/media/innovatsii-transfer-tehnologiy/2021/09/30/Svitovi.nauk.tekhn.trend.sfer.zabezp.nats.bezp-2019.30.09.pdf> [in Ukrainian].
9. Office of the assistant Secretary Of the Army (Acquisition, Logistic and Technology) (2021). *Weapon Systems Handbook 2020-2021*. 103 Army Pentagon, Room 2E532 Washington, DC 20310-0103.
10. Badiru, A. B., & Thoma, A. U. (Eds.) (2009). *Handbook of Military Industrial Engineering*. CRC Press. Retrieved from <https://ftp.idu.ac.id/wp-content/uploads/ebook/ip/BUKU%20INDUSTRIAL%20ENGINEERING/Handbook-of-Military-Industrial-Engineering.pdf>
11. Shivakumar, S., & Wessner, Ch. (2022, Jun 8). Semiconductors and National Defense: What Are the Stakes? *CSIS*: Website. Retrieved from <https://www.csis.org/analysis/semiconductors-and-national-defense-what-are-stakes>
12. What is an FPGA? (2022). *FPGA*: Website. Retrieved from <https://www.xilinx.com/products/silicon-devices/fpga/what-is-an-fpga.html>
13. Stratehiya ekonomichnoyi bezpeky Ukrainy na period do 2025 roku [Strategy of economic security of Ukraine for the period up to 2025] (2021). Approved by Decree of the President of Ukraine 2021, Aug 11, 347/2021. *President of Ukraine*: Website. Retrieved from <https://www.president.gov.ua/documents/3472021-39613> [in Ukrainian].
14. Zveryakov, M. I. (2017). Hlobalizatsiya i deindustrializatsiya: zmist, superechnosti ta sposoby yikh roz' yazannya [Globalization and deindustrialization: content, contradictions and ways to resolve them]. *Ekonomika Ukrainy – Economy of Ukraine*, 11, 3-16. [in Ukrainian].
15. Kondratyev, V. B. (2019). Problemy deindustrializatsii v SSHA [Problems of deindustrialization in the USA]. *Perspektivy – Prospects*, 3(19), 130-147. Retrieved from <https://elibrary.ru/item.asp?id=41304579> [in Russian].
16. Whatman, P. (2022, Mar 15). Growth vs scaling: What's the difference and why does it matter? *Spendesk*: Website. Retrieved from <https://www.spendesk.com/en-eu/blog/growth-vs-scaling>
17. Dzyubenko, I. B. (2020). Eksponentsial'nyye tekhnologii i organizatsii kak faktor rosta vysokotekhnologichnogo biznesa [Exponential Technologies and Organizations as a Factor in the Growth of High-Tech Business]. In *Sbornik statey IV Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Science and technology innovations» [Proceedings of the IV International Scientific and Practical Conference «Science and technology innovations»]* (pp. 47-52). Petrozavodsk: New Science. Retrieved from <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44126810> [in Russian].
18. Remarks by President Biden in Meeting with CEOs and Labor Leaders on the Importance of Passing the CHIPS Act (2022, Jul 26). *The White House*: Website. Retrieved from <https://www.whitehouse.gov/briefing-room/speeches-remarks/2022/07/26/remarks-by-president-biden-in-meeting-with-ceos-and-labor-leaders-on-the-importance-of-passing-the-chips-act>
19. Perederiy, S. L. (2013). Pytannya rozvytku elektronnoyi promyslovosti Ukrainy na innovatsiyniy osnovi [Issues of development of the electronic industry of Ukraine on an innovative basis]. *Ekonomichnyy visnyk Donbasu – Economic Bulletin of Donbass*, 3(33), 242-249. [in Ukrainian].
20. Amosha, O. I., Salomatina, L. M., & Perederiy, S. L. (2014). *Rozvytok elektronnoyi promyslovosti Ukrainy na innovatsiyniy osnovi [Development of the electronic industry of Ukraine on an innovative basis]*. Kyiv: Institute of Industrial Economy of NASU. [in Ukrainian].
21. Higham, E. (2021, Dec 14). Defense Market Trends and the Impact on Semiconductor Technology. *Microwave Journal*: Website. Retrieved from <https://www.microwavejournal.com/articles/37284-defense-market-trends-and-the-impact-on-semiconductor-technology>
22. Silicon vs. Gallium Nitride (GaN): Properties & Applications in Semiconductors (2020, Jan 21). *Arrow*: Website. Retrieved from <https://www.arrow.com/en/research-and-events/articles/gan-vs-silicon-semiconductor-materials-compared>
23. Ignatov, A. N. (2012). *Nanoelektronika. Sostoyaniye i perspektivy razvitiya [Nanoelectronics. State and Prospects of Development]*. M.: FLINTA. [in Russian].
24. Rapp H. P., & Möbert, J. (2022). *Extraordinary semiconductor cycle triggered by one-time events, cyclical and geopolitical effects*. Frankfurt am Main, Germany. Retrieved from https://www.dbresearch.com/PROD/RPS_EN-.PROD/PROD0000000000522983/Extraordinary_semiconductor_cycle_triggered_by_one.PDF?undefined&realload=HkCwkrQ/v/tpEMUS/J9NiYuQH/UtgvnVo77j99oLiRLPj6~WPF6UBib363SqQBA
25. What Are The Advantage and Disadvantages of MOCVD? (2022). *UniversityWafer*: Website. Retrieved from <https://www.universitywafer.com/advantage-disadvantages-mocvd.html>
26. Crystal Growth Technology (2022). The Japan Society of Applied Physics. Retrieved from https://www.google.com.ua/url?sa=t&rc=j&q=&esrc=s&frm=1&source=web&cd=2&cad=rja&uact=8&ved=0CCYQFjABahUKewicjvyjgJrJAhXGCCwKHX4eBQQ&url=https%3A%2F%2Fwww.jsap.or.jp%2Fenglish%2Fimages%2Facademic_roadmap%2Farm_e_09.pdf&usg=AFQjCNGlxTwXP53r7iIRQ5U3fE_rvbK4A&bvm=bv.107763241,dbGg
27. Szweda, R. (Ed.) (2002). *Silicon Germanium Materials & Devices – A Market & Technology Overview to 2006*. Elsevier Science.

28. Bondarenko, I. M., Borodin, O. V., & Karnausenko, V. P. (2020). *Suchasna komponentna baza elektronnykh system [Modern component base of electronic systems]*: Manual. Kharkiv: KhNURE. [in Ukrainian].
29. Kritskaya, T. V. (2013). *Sovremennyye tendentsii polucheniya kremniya dlya ustroystv elektroniki [Modern tendencies of obtaining silicon for electronic devices]*. Zaporozhye: ZSEA. [in Russian].
30. Bytkin, S. V. (2017). *Konkurentnaya razvedka kon'yunktorno-tehnologicheskikh perspektiv traditsionnogo i high-tech eksporta Ukrainy [Competitive intelligence of conjuncture and technological prospects of traditional and high-tech exports of Ukraine]*. Zaporizhzhya: ZSEA. [in Russian].
31. Revenue of the silicon germanium materials and devices market worldwide in 2016 and 2021, by end-user (in million U. S. dollars) (2021). *Statista*: Website. Retrieved from <https://www.statista.com/statistics/911545/global-silicon-germanium-materials-and-devices-market-revenue-by-end-user>
32. Bytkin, S. V., & Kritskaya, T. V. (2011). Eksport poluprovodnikovyykh materialov kak perspektivnoye napravleniye prodazh na mirovom rynke [Export of semiconductor materials as a promising direction of sales in the world market]. In *Upravlencheskiye tekhnologii v reshenii sovremennykh problem razvitiya sotsial'no-ekonomicheskikh sistem [Managerial technologies in solving modern problems of development of socio-economic systems]* (pp. 169-176). Donetsk: DonNTU. [in Russian].
33. Reinert, E. S., Ghosh, J., & Kattel, R. (2018). *Handbook of Alternative Theories of Economic Development*. Retrieved from <https://www.e-elgar.com>
34. *Smart Specialization: theory and brief case studies*. A Report to The European Commission, Directorate General JRC, JRC Seville (2018, Apr). Prof. Erik S. Reinert, The Other Canon Foundation, Norway & Tallinn University of Technology, Estonia.
35. Filipenko, A. S. (2017). Produktivna spromozhnist' natsiyi: sotsial'no-ekonomichnyy vymir [Productive capacity of the nation: socio-economic dimension]. In *Materialy Mizhnarodnoyi naukovoyi konferentsiyi «Produktivna spromozhnist' natsiy: pryklad Ukrainy» (Instytut mizhnarodnykh vidnosyn Kyyivs'koho natsional'noho universytetu imeni Tarasa Shevchenka, 29 chervnya 2017 r., m. Kyiv) [Proceedings of the International Scientific Conference «Productive Capacity of Nations: An Example of Ukraine» (Institute of International Relations, Taras Shevchenko National University of Kyiv, June 29, Kyiv) (pp. 13-14)*. [in Ukrainian].
36. Tsvetkova, A., Ahrend, R., Martins, J. O., Lembcke, A., Knutsson, P., Dylan, J., & Terzidishttps, N. (2020). The spatial dimension of productivity: Connecting the dots across industries, firms and places. *OECD Regional Development Working Papers*. DOI: <https://dx.doi.org/10.1787/ba5edb47-en>
37. Don Webber, J., Hudson, J., Boddy, M., & Plumridge, A. (2009). Regional productivity differentials in England: Explaining the gap. *Regional Science*, 88(3), 609-621. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1435-5957.2008.00209.x>
38. Kovalenko, O. V., Bytkin, S. V., Holemba, V. Ye., & Balyura, Yu. O. (2015). Rol' informatsiyno-analitychnykh dzherel u zabezpechenni bezpeky funktsionuvannya pidpryemstva [The role of information and analytical sources in ensuring the safety of the enterprise]. *Naukovyy visnyk Khersons'koho derzhavnoho universytetu. Seriya: Ekonomichni nauky – Scientific Bulletin of Kherson State University. Series: Economic Sciences*, 14:2, 81-86. [in Ukrainian].
39. Bytkin, S. V. (2016). Konkurentna rozvidka yak tekhnolohiya praktychnoho zabezpechennya natsional'noyi zovnishn'oeconomichnoyi bezpeky [Competitive intelligence as a technology of practical support of national foreign economic security]. *Stratehichni priorytety – Strategic Priorities*, 3(40), 206-212. [in Ukrainian].
40. Kleinhans, J. –P. (2022, Jun 9). Testimony before the U. S. China Economic and Security Review Commission Hearing on «U. S. China Competition in Global Supply Chains». Retrieved from https://www.uscc.gov/sites/default/files/2022-06/Jan-Peter_Kleinhans_Testimony.pdf

Статтю підготовлено в межах виконання відомчої науково-дослідної теми "Детермінанти зростання продуктивної спроможності економіки регіонів України" (ДР № 0122U002057).

Надійшло 09.11.2022 р.