

ОСВІТА З БІОМЕДИЧНОЇ ІНЖЕНЕРІЇ: УКРАЇНСЬКА ТРАЄКТОРІЯ КРІЗЬ ПРИЗМУ СВІТОВОГО ДОСВІДУ. СЬОГОДЕННЯ ТА ПЕРСПЕКТИВИ

Олександр Галкін*

КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, Україна

*Corresponding author: alexfbt@gmail.com

Біомедична інженерія (БМІ) є однією з наймолодших галузей інженерної науки. Спершу інженерна, а згодом і біологічна революції у медицині безповоротно інтегрували інженерів і технологів у систему охорони здоров'я, зробивши нову професію біомедичного інженера її невід'ємною частиною. Відтак було започатковано дискусію щодо змісту, форм і методів освіти з БМІ. Тож надзвичайно актуально обговорити поточний стан і тенденції розвитку освітнього БМІ-простору в США, ЄС та в Україні, визначити проблемні аспекти та перспективи української вищої біоінженерної освіти.

У нашій дискусії ми послуговуватимемо найбільш загальним визначенням БМІ як застосування інженерних принципів і методів у медицині [1]. Для обговорення освітніх аспектів БМІ варто пам'ятати, що сучасні досягнення у фізиці та технічних науках відкривають цілком нові можливості у "роботі" з біологічними системами, а відкриття у біології кінця ХХ – початку ХХІ століття безальтернативно трансформували медицину в біомедицину, а медичну інженерію – в біомедичну інженерію. У нашій дискусії не будемо глибоко занурюватися в аннали БМІ та відповідного освітнього напрямку – зупинимось на тенденціях останніх двох десятиліть.

Публікації з проблем освіти у галузі БМІ за останні 15 років свідчать про продовження інтенсивного обговорення як глобальних, так і регіональних тенденцій і проблем у цій сфері. Зазначимо, що ініціюють такого роду дискусії фахівці як із розвинутих країн [2–7], так і з країн, що розвиваються [8–13]. Ця тема є актуальною і для України [14, 15].

До питання про "походження" біомедичної інженерії. Очевидно, що зміст освітніх програм із підготовки фахівців для будь-якої галузі визначається передусім змістовою областю відпо-

BIOMEDICAL ENGINEERING EDUCATION: UKRAINIAN TRAJECTORY THROUGH THE PRISM OF WORLD EXPERIENCE. STATUS AND PERSPECTIVES

Alexander Galkin*

Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Kyiv, Ukraine

*Corresponding author: alexfbt@gmail.com

Biomedical engineering (BME) is one of the "youngest" fields of engineering science. Engineering and then – biological revolutions in medicine have irreversibly integrated engineers and technologists into the system of healthcare, making a new profession of biomedical engineer its essential part. Thus, the discussion on the contents, forms, and methods of BME education was launched. We therefore consider extremely appropriate to outline the current state and tendencies of BME educational sector in the USA, EU, and Ukraine, and to define the issues and prospects of the BME higher education in Ukraine.

In our discussion we will operate with the most general definition of BME which means the application of engineering principles and methods in medicine [1]. To discuss the educational aspects of BME properly, it is worth keeping in mind that modern achievements in physics and technical sciences open entirely new possibilities in "work" with biological systems, while the discoveries made at the end of XX – beginning of XXI century irreversibly transformed medicine into biomedicine, and medical engineering – into biomedical engineering. In our discussion we are not going to dig deep into the history of BME and corresponding educational field – we turn our attention to the last two decades.

Papers concerning the educational issues in the BME field, published for the last 15 years, prove the continuity of intensive discussing both global and regional tendencies and issues in this area. Note that such discussions are initiated by experts from the developed countries [2–7] as well as from the developing ones [8–13]. This issue is also of great interest in Ukraine [14, 15].

"Origins" of biomedical engineering. It is clear that the contents of academic programs for any knowledge area are defined by the contents of the corresponding sphere of professional activity. In particular, the instructional design of the academic

відповідної сфери професійної діяльності. Тому змістовий дизайн навчання майбутніх біомедичних інженерів має відображати актуальний стан розвитку галузі. Говорячи про український освітній простір: чи був цей принцип реалізований раніше й чи дотримано його сьогодні? Для відповіді на це майже риторичне запитання проаналізуємо характер змін українського законодавства щодо вищої освіти за останні 25 років (табл. 1). До 2006 року в Україні БМІ як освітнього напрямку не існувало, а роботу біомедичних інженерів на підприємствах і в установах, у закладах охорони здоров'я виконували фахівці, які здобували освіту за такими напрямками підготовки, як прикладна фізика, електроніка, електронні апарати, акустотехніка, прилади тощо. Великим прогресивним кроком стало відокремлення в 2006 р. самостійного напрямку підготовки бакалаврів "біомедична інженерія" (в рамках галузі знань "біотехнологія"). За чотири роки було затверджено й перелік спеціальностей для підготовки магістрів за відповідним напрямом. Отже, саме 2006-й рік слід вважати відповідною точкою формування БМІ як самостійного освітнього напрямку в Україні й, відповідно, початком дискусії щодо змістового наповнення програм підготовки біомедичних інженерів. Разом із тим підготовка спеціалістів найвищої кваліфікації (кандидатів і докторів наук) до 2015 року проводилася за окремою номенклатурою спеціальностей, у якій для біомедичної інженерії не було виділено окремого місця. Під час реформи вищої освіти, яка розпочалася прийняттям 2014 року нової редакції Закону України "Про вищу освіту", було суттєво переглянуто перелік галузей знань і спеціальностей, за якими здійснюється підготовка здобувачів вищої освіти. Серед іншого цей перелік 2015-го року став єдиним і спільним для всіх рівнів вищої освіти, включаючи освітньо-науковий і науковий рівні.

Отже, останні на сьогодні зміни законодавства щодо номенклатури освітніх спеціальностей стали серйозним викликом для вищої школи України, який передбачав серйозну трансформацію освітніх програм, що повною мірою стосувалося й спеціальності "Біомедична інженерія". У цьому сенсі варто зупинитися на таких обставинах. Навіть із появою в 2006 році в освітньому просторі України БМІ як окремого напрямку заклади вищої освіти (ЗВО)

program for future biomedical engineers must reflect the real state of the field's development. Speaking about the Ukrainian educational space: Was this principle realized earlier and is it followed through today? In order to answer this almost rhetorical question, it is worth to analyze the character of changes in Ukrainian legislation in terms of higher education, which happened for the last 25 years (Table 1). Until 2006 there was no BME educational field in Ukraine. The functions of biomedical engineers at enterprises and healthcare institutions were conducted by workers, who obtained education in such fields as applied physics, electronics, electronic instrumentation, acoustical engineering, instrumentation, etc. A big step forward was the separation of an independent field of study for bachelors "biomedical engineering" (in scopes of the field of knowledge "bioengineering") in 2006. Within 4 years the list of specialties for training of masters in the corresponding field was also approved. Thus, 2006 we may consider the starting point of BME becoming an independent educational field in Ukraine and consequently – the beginning of discussion concerning the contents' formation of academic programs for future biomedical engineers. At the same time, the training of experts of the highest quality (PhD and Doctor of Sciences) in 2015 was conducted according to separate nomenclature, which didn't include biomedical engineering as a separate field. During the reform of higher education, beginning with the approval of a newly amended version of the Law of Ukraine "On higher education", the list of fields of knowledge and specialties, according to which the training of students of higher education establishments (HEEs) is conducted, was revisited considerably. This list as of 2015 was the only and unified for all the levels of higher education, including the scientific and academic levels.

So the last changes in today's legislation concerning the nomenclature of academic fields of study were a serious challenge to the institute of higher education of Ukraine, envisaging a serious transformation of academic programs, this transformation also fully covered the specialty "Biomedical engineering". Taking this into account it is worth to dwell on this topic a little bit more.

Even with the emergence of BME in the educational space of Ukraine in a form of separate academic field higher educational establishments continued to train experts in the adjacent fields

Таблиця 1: Поступ освіти з біомедичної інженерії в Україні (1997–2015 рр.)

1997 рік (бакалаврат і магістратура) ¹	2006 рік (бакалаврат) ²	2010 рік (магістратура) ³	2011 рік (аспірантура та докторантура) ⁴	2015 рік (усі рівні вищої освіти) ⁵
Напрямок підготовки Спеціальність	Галузь знань Напрямок підготовки	Напрямок підготовки Спеціальність	Галузь науки Група спеціальностей Спеціальність	Галузь знань Спеціальність
<p>Прикладна фізика <i>Медична фізика</i></p> <p>Електроніка <i>Фізична та біомедична електроніка</i></p> <p>Електронні апарати <i>Біотехнічні та медичні апарати і системи</i></p> <p>Акустотехніка <i>Медичні акустичні та біоакустичні прилади і апарати</i></p> <p>Прилади <i>Медичні прилади і системи</i></p>	<p>Біотехнологія <i>Біомедична інженерія</i></p>	<p>Біомедична інженерія <i>Біомедична інженерія</i></p> <p><i>Біотехніка та біосумісні матеріали</i></p> <p><i>Інформаційні технології в біомедицині</i></p>	<p>Технічні науки <i>Прилади</i> Біологічні та медичні прилади і системи</p> <p>Технічні науки <i>Радіотехніка та телекомунікації</i> Медична та біологічна інформатика і кібернетика</p> <p>Медичні науки <i>Клінічна медицина</i> Трасплантологія та штучні органи</p> <p>Медичні науки <i>Теоретична медицина</i> Біомеханіка</p> <p>Медичні науки <i>Теоретична медицина</i> Медична та біологічна інформатика і кібернетика</p>	<p>Хімічна та біоінженерія <i>Біомедична інженерія</i></p>

¹Постанова Кабінету Міністрів України від 24 травня 1997 р. № 507 “Про перелік напрямів та спеціальностей, за якими здійснюється підготовка фахівців у вищих навчальних закладах за відповідними освітньо-кваліфікаційними рівнями”.

²Постанова Кабінету Міністрів України від 13 грудня 2006 р. № 1719 “Про перелік напрямів, за якими здійснюється підготовка фахівців у вищих навчальних закладах за освітньо-кваліфікаційним рівнем бакалавра”.

³Постанова Кабінету Міністрів України від 27 серпня 2010 р. № 787 “Про затвердження переліку спеціальностей, за якими здійснюється підготовка фахівців у вищих навчальних закладах за освітньо-кваліфікаційними рівнями спеціаліста і магістра”.

⁴Наказ Міністерства освіти і науки, молоді та спорту України від 14.09.2011 р. № 1057 “Про затвердження Переліку наукових спеціальностей”.

⁵Постанова Кабінету Міністрів України від 29 квітня 2015 р. № 266 “Про затвердження переліку галузей знань і спеціальностей, за якими здійснюється підготовка здобувачів вищої освіти”.

Table 1: Progress of biomedical engineering education in Ukraine (1997–2015)

1997 (Bachelor and Master degrees)	2006 (Bachelor degree) ²	2010 (Master degree) ³	2011 (PhD and Doctor of Sciences) ⁴	2015 (all levels of higher education) ⁵
Field of study <i>Specialty</i>	Field of knowledge <i>Field of study</i>	Field of study <i>Specialty</i>	Field of science <i>Group of specialties Specialty</i>	Field of knowledge <i>Specialty</i>
<p>Applied physics <i>Medical physics</i></p> <p>Electronics <i>Physical and biomedical electronics</i></p> <p>Electronic instrumentation <i>Biotechnical and medical devices and systems</i></p> <p>Acoustical engineering <i>Medical acoustical and bioacoustic apparatus and devices</i></p> <p>Instruments <i>Medical devices and systems</i></p>	<p>Biotechnology <i>Biomedical engineering</i></p>	<p>Biomedical engineering <i>Biomedical engineering</i></p> <p><i>Biotechnics and biocompatible materials</i></p> <p><i>IT in biomedicine</i></p>	<p>Technical sciences <i>Devices</i> Biological and medical devices and systems</p> <p>Technical sciences <i>Radiotechnics and telecommunications</i> Medical and biological informatics and cybernetics</p> <p>Medical sciences <i>Clinical medicine</i> Transplantology and artificial organs</p> <p>Medical sciences <i>Theoretical medicine</i> Biomechanics</p> <p>Medical sciences <i>Theoretical medicine</i> Medical and biological informatics and cybernetics</p>	<p>Chemical and biological engineering <i>Biomedical engineering</i></p>

¹Decree of the Cabinet of Ministers of Ukraine dated May, 24, 1997 "On the list of fields of study and specialties, according to which the training of students of higher educational establishments on the corresponding academic levels is conducted".

²Decree of the Cabinet of Ministers of Ukraine dated December, 13, 2006 No. 1719 "On the list of fields of study, according to which the training of students of higher educational establishments on the academic level of bachelor is conducted".

³Decree of the Cabinet of Ministers of Ukraine dated August, 27, 2010 No. 787 "On the list of fields of study, according to which the training of students of higher educational establishments on the academic levels of specialist and master is conducted".

⁴Order of the Ministry of Education of Ukraine dated September 14, 2011 No. 1057 "On approval of the List of scientific specialties".

⁵Decree of the Cabinet of Ministers of Ukraine dated 29 April 2015 No. 266 "On approval of the list of fields of study and specialties, according to which the training of students of higher educational establishments is conducted".

до 2015 року продовжували готувати фахівців за спорідненими напрямками (прикладна фізика, електроніка, електронні апарати, акустотехніка, прилади тощо). Такого роду освітні програми могли або трансформуватися в програми з БМІ, або залишитись у “традиційних” галузях знань (зокрема, Електроніка та телекомунікації, Автоматизація та приладобудування, Природничі науки). У першому випадку відбувалося суттєве оновлення всіх циклів підготовки здобувачів, насамперед – циклу професійної підготовки. Такі освітні програми мали, фактично, змінити свою парадигму: адже у БМІ “замовником” будь-якого інженерного чи технологічного рішення є живий об’єкт. І такий живий об’єкт (насамперед – людина, пацієнт) є не “окремим випадком”, а головною фігурою, для задоволення потреб якої й реалізуються відповідні розробки. У цьому сенсі важливим є питання формування предметної області БМІ, яка була би позбавлена “атавізмів” та увібрала б найновітніші досягнення біології й фундаментальної медицини. Остання обставина потребує окремого обговорення.

Напрями біомедичної інженерії та “проблеми” предметної області. БМІ є, без сумніву, поліфілетичною, збірною, галуззю, яка увібрала в себе ознаки більш усталених напрямів [14, 16]:

- *хімічної (біохімічної) інженерії* (молекулярна, клітинна, тканинна інженерія, біоматеріали тощо);
- *електричної та електронної інженерії* (біоелектронна інженерія, оптико-електронна інженерія тощо);
- *комп’ютерної інженерії* (біомедичні зображення, біоінформатика тощо);
- *механічної інженерії* (біомеханіка, біотранспорт тощо).

Співвідношення різних блоків професійної підготовки в освітніх програмах – дискусійне питання, яке є відповідальністю ЗВО, проте будь-яка освітня програма з БМІ має передбачати освітні компоненти, що формують компетентності з усіх перелічених напрямів. Говорячи про нормативний контекст, варто пам’ятати, що в Україні спеціальність “Біомедична інженерія” віднесена до галузі знань “Хімічна та біоінженерія”, що чітко визначає пріоритетність біологічної (біоінженерної) компоненти.

(applied physics, electronics, electronic instrumentation, acoustical engineering, instrumentation, etc.). Such academic programs could be transformed into programs with BME or stay in “traditional” fields of knowledge (as in Electronics and telecommunications, Automation and instrumentation, natural sciences). In the first case, there was a substantial renewal of all the cycles of education, first and foremost – the cycle of professional training. These academic programs have actually changed their paradigm, as in case of BME the “customer” of any technological or engineering solution is a living object. And such living object (first and foremost this is a person, patient) is not a “separate case”, but its central figure, whose needs are to be satisfied with the corresponding developments. In this case the formation of BME subject field was of utmost importance, as it should be devoid of any “leftovers” and consist of the state of the art achievements of biology and fundamental medicine. The last circumstance requires additional discussion.

BME fields and “issues” of the subject field.

BME is, undoubtedly, a polyphyletic heterogeneous field, which is comprised of peculiarities of more traditional fields [14, 16]:

- *Chemical (biochemical) engineering* (molecular engineering, cell engineering, and tissue engineering, biomaterials, etc.);
- *Electrical and electronic engineering* (bioelectronic engineering, electrooptic engineering, etc.);
- *Computer engineering* (biomedical imagery, bioinformatics, etc.);
- *Mechanical engineering* (biomechanics, bio-transporting, etc.);

The issue of the ratio between various parts of professional training in academic programs is still controversial, as it is the responsibility of HEE, but any academic program shall envisage educational components, that form the skills set of *all* the aforementioned fields. Speaking about the legislative context it is worth to remember that in Ukraine the specialty “Biomedical engineering” is a part of the field of knowledge “Chemical and biological engineering”, which set a clear priority of biological (bioengineering) component.

Various configurations of content blocks of academic programs form different basic BME specializations (which correspond to specific professional tasks on a world labour market): Biomedical electronics; biomechatronics; biomedical instruments

Різна конфігурація змістових блоків освітніх програм формує різні базові спеціалізації БМІ (які відповідають спеціалізованим завданням професіоналів на світовому ринку праці): біомедична електроніка; біомехатроніка; біомедичні інструменти; біоматеріали; клітинна, тканинна та генетична інженерія; біомеханіка; біоніка; клінічна інженерія; медичні зображення; реабілітаційна інженерія; біонанотехнології; нейронна інженерія [16].

Наразі предметна область БМІ як освітньої галузі в Україні визначається стандартом вищої освіти (СВО) для відповідного рівня вищої освіти. Взагалі – чи потрібні СВО? Якщо реалізовувати модель автономії ЗВО у відкритому суспільстві з вільним ринком освітніх послуг і ринком праці, то потреби у СВО, тим більше обов'язкових до виконання, немає. Разом із тим у період глибинних трансформацій вищої освіти, які розпочалися в Україні в 2014-му році, функціонування СВО є виправданим. Започатковані зміни стосуються, зокрема, імплементації принципів автономії університетів і студентоцентричності, запровадження кращих світових практик акредитації освітніх програм, створення номенклатури галузей знань і спеціальностей *de novo*. Аргументом, що свідчить на користь функціонування інституту СВО у середньостроковій перспективі, є й недосконалість ринку освітніх послуг та кризові явища на ринку праці в Україні [17–19]. Усі згадані обставини роблять особливо важливим і відповідальним формування відповідних СВО. Їх місія – не тільки зафіксувати стан речей у вітчизняній галузі, але й стимулювати ЗВО до викладання принципів найбільш сучасних і перспективних технологій. Так, наприклад, запуску всіх вітчизняних бізнес-проектів із тканинної інженерії передувало навчання та стажування відповідних співробітників у профільних центрах у США та країнах ЄС. На жаль, українські ЗВО і наукові установи не змогли забезпечити відповідну навчально-методичну базу.

Вважаємо вкрай корисним розпочати дискусію щодо удосконалення вже затверджених СВО з БМІ для бакалаврського та магістерського рівнів. Така дискусія має бути широкою, професійною та неспішною. БМІ, як і будь-яка галузь діяльності, що пов'язана з охороною здоров'я, є дуже чутливою до регу-

біоматеріали; cellular, tissue and genetic engineering; biomechanics; bionics; clinical engineering; medical imagery; rehabilitation engineering; biotechnology; neural engineering [16].

For now, the subject area of BME as an academic field in Ukraine is stipulated by the Standard of higher education (SHE) for a corresponding cycle of education. Do we really need SHE? If we implement an autonomous model of HEE in an open community with a free market of educational services, and labor market, there will be no need in SHE as well in such SHEs, obligatory for following. At the same time, during the period of transformation of higher education, started in 2014, the restrictions imposed by the SHE are justified. The changes touch the sphere of implementing the principles of universities' autonomy and student-centric approach, implementation of the best world's procedures of accreditation of academic programs, creation of nomenclature of fields of knowledge and specialties *de novo*. The argument in favour of functioning of SHE institute in the middle-term perspective is the imperfection of the market of educational services and crisis events on the labour market of Ukraine [17–19]. All the aforementioned circumstances stipulate the importance and high level of responsibility when it comes to the formation of corresponding SHEs. Their mission is not only to pinpoint the state of things in the domestic field, but also to stimulate HEEs to teach the principles of the most modern and promising technologies. For example, the launch of all domestic business-projects in the sphere of tissue engineering was preceded by the studies and internships of workers responsible in special centers of the US and EU countries. It is pity that Ukrainian HEEs and scientific facilities were not able to provide a suitable scientific and methodological background.

We deem it highly useful to start the discussion concerning the improvement of the already approved SHEs in BME for bachelor and master cycles of higher education. This discussion shall be wide, professional and meticulous. BME just like any other healthcare-connected sphere of activity is very sensitive to regulatory policy both on the national and international levels.

That's why it would be efficient to design the contents of the academic programs for them to provide the implementation of engineering and design works with BME objects with *various* technical

ляторної політики – як на національному, так і на міжнародному рівні. Тому, наприклад, було б доцільно у нормативному змісті підготовки здобувачів передбачити реалізацію інженерних, конструкторських та інших робіт з об'єктами БМІ з дотриманням *різних* технічних регламентів, що стосуються *всього* переліку відповідних об'єктів (у т.ч. Технічного регламенту щодо медичних виробів для діагностики *in vitro*, Технічного регламенту щодо активних медичних виробів, які імплантують, тощо). Натомість варто прибрати зі стандарту посилання на державні системи сертифікації продукції та атестації виробництва, які були скасовані в Україні в 2017 році в рамках процедур гармонізації українського законодавства із законодавством ЄС. Окрім цього, вважаємо за необхідне доповнити фахові компетентності здатністю організовувати виробництво, зберігання і транспортування медичних виробів та інших об'єктів БМІ, а також внести відповідні зміни й до нормативного змісту підготовки здобувачів. Наразі у СВО рівня бакалавра у формулюванні предметної області до об'єктів вивчення та діяльності серед іншого віднесено й виробництво медичної техніки та виробів медико-біологічного призначення, проте відповідні компетентності не передбачені.

Освітні програми з біомедичної інженерії: США, ЄС та Україна. Для аналізу освітнього простору США в галузі БМІ скористаємося даними Accreditation Board for Engineering and Technology (ABET), інституції в США, що проводить акредитацію освітніх програм у галузі прикладних і природничих наук, обчислювальної техніки, інженерії та інженерних технологій [20]. Отже, у базі даних ABET міститься інформація про 132 освітні програми університетів США бакалаврського рівня за напрямом “Bioengineering and Biomedical Engineering” (рис. 1). Важливим є той факт, що майже чверть зі згаданих освітніх програм більшою мірою орієнтовані на біологічну компоненту (субнапряма “Bioengineering”). Переважна більшість (82 %) з усіх освітніх програм були вперше акредитовані (засновані) після 2000-го року (рис. 2). Стрімкий ріст кількості освітніх програм за останні 20 років є, очевидно, наслідком проривних відкриттів у фізиці, біології та інженерних науках наприкінці ХХ століття.

regulations, covering *all* the range of corresponding objects (including the Technical regulation for medical devices for *in vitro* diagnostics, Technical regulation for active medical devices, used for implantation, etc.) At the same time, it would be relevant to remove from the standard all the references to the certification systems which were cancelled in Ukraine in 2017 in scopes of the procedure of harmonizing the Ukrainian legislation with the EU one. In addition, we think it would be effective to broaden the list of skills set with the ability to organize the production, storage, and transporting of medical products and other BME objects and add necessary amends to the legislative framework of the curriculum contents. At this moment the bachelor's cycle SHE in the part of introducing of the subject area, the objects of studying and research activity there is the production of medical equipment and products of medical and biological purpose among other clauses, but corresponding skills sets are not defined.

Academic biomedical engineering programs in the USA, EU, and Ukraine. With the view to analyze the educational space of the USA in BME field we may use the data of the Accreditation Board for Engineering and Technology (ABET), the US institution, dealing with accreditation of academic programs in the sphere of applied and nature sciences, computation, engineering and engineering solutions [20]. Thus, the database of ABET contains information about all the 132 bachelor academic programs of the USA in the field “Bioengineering and Biomedical Engineering” (Fig. 1). It is important to mention the fact that almost a quarter of the mentioned academic programs was biology-oriented to its major extent (subfield “Bioengineering”). The majority (82%) of these academic programs got their first accreditation (were founded in) after 2000 (Fig. 2). The swift growth of the number of academic programs within the last 20 years is, obviously, the result of major breakthroughs in physics, biology, and engineering sciences at the end of the XX century.

The number of bachelor BME academic programs of the countries of EU and UK is 102 positions (according to the data by Institute of Biomedical Technology, Greece [21]), 15% of which are specializing in bioengineering. As opposed to bachelor programs, the master academic programs (145 positions) are characterized by a wider range of specializing, i.e., many of them are focused on separate branches of BME, for example [21]:

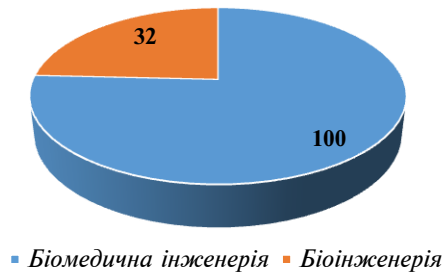


Рисунок 1: Бакалаврські освітні програми університетів США за напрямом "Bioengineering and Biomedical Engineering", що акредитовані АБЕТ, США

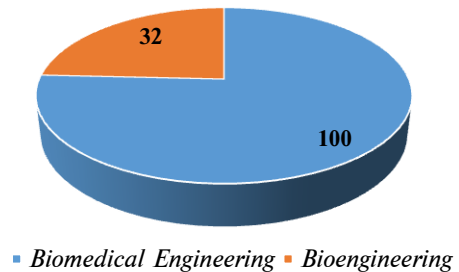


Figure 1: Bachelor academic programs of the US universities with the subject area "Bioengineering and Biomedical Engineering", accredited by ABET, USA

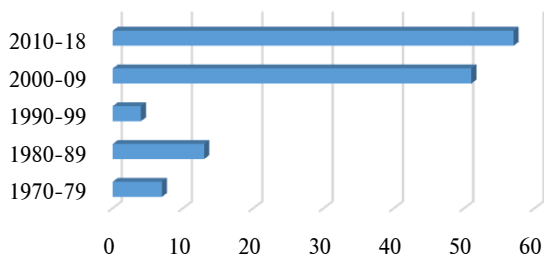


Рисунок 2: Кількість бакалаврських освітніх програм університетів США за напрямом "Bioengineering and Biomedical Engineering", що акредитувалися АБЕТ у різні роки

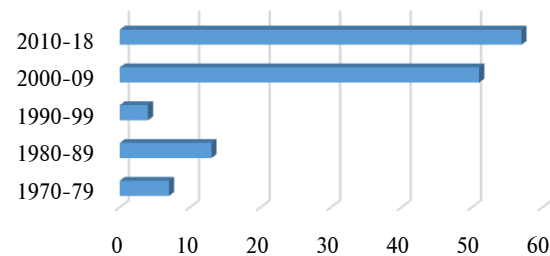


Figure 2: The number of bachelor academic programs of the US universities with the subject area "Bioengineering and Biomedical Engineering", accredited by ABET in different periods

Бакалаврські освітні програми країн ЄС та Сполученого Королівства за напрямом БМІ налічують 102 позиції (згідно з даними Institute of Biomedical Technology, Греція [21]), 15% з яких мають біоінженерну спрямованість. На відміну від бакалаврських, магістерські освітні програми (145 позицій) характеризуються ширшим спектром спеціалізованості – з них чимало таких, що сфокусовані на окремих напрямках (спеціалізаціях) БМІ, наприклад [21]:

- Bioelectronics and Nanotechnology (Бельгія, Hasselt University);
- Biomaterials and Tissue Engineering (Фінляндія, Tampere University);
- Biomedical and Acoustical Engineering (Польща, West Pomeranian University of Technology);
- Biomedical Materials and Devices (Португалія, Universidade de Aveiro);
- Biomedical Micro- and Nanodevices (Фінляндія, Tampere University);
- Biomedical, Biomechanics and Bioelectronics Engineering (Сполучене Королівство, Brunel University London);
- Bionics Engineering (Італія, University of Pisa);

- Bioelectronics and Nanotechnology (Belgium, Hasselt University);
- Biomaterials and Tissue Engineering (Finland, Tampere University);
- Biomedical and Acoustical Engineering (Poland, West Pomeranian University of Technology);
- Biomedical Materials and Devices (Portugal, Universidade de Aveiro);
- Biomedical Micro- and Nanodevices (Finland, Tampere University);
- Biomedical, Biomechanics and Bioelectronics Engineering (United Kingdom, Brunel University London);
- Bionics Engineering (Italy, University of Pisa);
- Biotechnology and Bioengineering (Spain, Universidad Miguel Hernández);
- Computational Biomedical Engineering (Spain, Pompeu Fabra University);
- Industrial Bioengineering (Italy, University "Tor Vergata" of Roma);
- International Biometrics (Optics, Vision, Image and Multimedia) (France, Université Paris-Est Créteil);

- Biotechnology and Bioengineering (Іспанія, Universidad Miguel Hernández);
- Computational Biomedical Engineering (Іспанія, Pompeu Fabra University);
- Industrial Bioengineering (Італія, University "Tor Vergata" of Roma);
- International Biometrics (Optics, Vision, Image and Multimedia) (Франція, Université Paris-Est Créteil);
- Medical Physics and Clinical Engineering (Ірландія, Trinity College Dublin);
- Molecular Bioengineering (Німеччина, Technische Universität Dresden);
- Nanomedicine and Structural Biology (Франція, Institut Polytechnique de Grenoble);
- Prosthetics &/or Orthotics Rehabilitation (Сполучене Королівство, University of Strathclyde Glasgow).

В Україні освітні програми з БМІ реалізуються у 12-ти університетах (табл. 2), причому магістерські програми, на кшталт ситуації в університетах ЄС, також більш диверсифіковані за тематичною спрямованістю.

Структура освітніх програм розвинутих країн підкреслює недосконалість реалізованої наразі в Україні системи обов'язкових до виконання СВО, адже немала частка освітніх програм у країнах ЄС, Сполученому Королівстві та США (особливо у випадку магістерських програм) має виражений міжгалузевий характер, коли програма охоплює значні блоки предметних галузей таких спеціальностей, як "Біомедична інженерія", "Біотехнології та біоінженерія", "Прикладна фізика та наноматеріали", "Комп'ютерні науки", "Електроніка", "Технології медичної діагностики та лікування" тощо. Такого роду освітні програми мали б мізерні шанси бути акредитованими з боку Національного агентства із забезпечення якості вищої освіти.

Відзначимо, що галузеві нормативні документи [22] передбачають можливість акредитації так званих міждисциплінарних освітніх програм. Проте, зважаючи на вимоги Закону України "Про вищу освіту" щодо обсягів дисциплін вільного вибору з боку студентів та вимоги самих СВО щодо мінімальних обсягів їх реалізації в освітніх програмах, принцип міждисциплінарності не має шансів на практичну реалізацію.

Говорячи про характер українських освітніх програм з БМІ, варто звернути увагу на те, що не всі можливі спеціалізації БМІ представлені в освітньому просторі України. "Внутрішні" причини цього є цілком очевидними

- Medical Physics and Clinical Engineering (Ірландія, Trinity College, Dublin);
- Molecular Bioengineering (Germany, Technische Universität Dresden);
- Nanomedicine and Structural Biology (France, Institut Polytechnique de Grenoble);
- Prosthetics &/or Orthotics Rehabilitation (United Kingdom, University of Strathclyde Glasgow).

In Ukraine the academic BME programs are implemented in 12 universities (Table 2), and notably the master's programs just as those in the EU and more diversified in terms of subject division.

The structure of academic programs of developed countries highlights the imperfections of Ukrainian system of obligatory SHEs, as a great part of academic programs in the EU, UK, and the US (especially in case with master programs) clear interdisciplinary character, when the program covers substantial blocks of subject fields of such spheres as "Biomedical engineering", "Biotechnologies and bioengineering", "Applied physics and nanomaterials", "Electronics", "Technologies of medical examination and treatment", etc. Such kind of academic programs have small chances of obtaining accreditation from the National Agency for Higher Education Quality Assurance.

It should be mentioned that subject regulatory documents [22] envisage the possibility of accreditation of so-called interdisciplinary academic programmes. But taking into account the requirements of the Law of Ukraine "On higher education" concerning the number of optional disciplines, that students can choose, and the requirements of SHE concerning the minimal amount of their presence in academic programs, the interdisciplinary principle cannot be implemented to its full extent.

Speaking about the nature of Ukrainian BME academic programs it is worth to note that not all possible subject fields of BME are realized in the Ukrainian educational space. "Internal" reasons are quite obvious (a substantial number of academic programs are the "descendants" of programs, dealing with electronics and instrumentation), but this situation requires corresponding state policy concerning the support, development of BME in Ukraine and pro-active approach of business (employers) and trade unions.

The performed review of academic programs urges us to discuss the issue of uniqueness of academic programs. It should be mentioned that the uniqueness of an academic program is not an

Таблиця 2: Українські освітні програми з біомедичної інженерії

Заклад вищої освіти	Випускова кафедра	Освітні програми
Вінницький національний технічний університет	Біомедичної інженерії	Біомедична інженерія (бакалавр, доктор філософії) Інтелектуальні штучні імпланти та медичні апарати в біоінженерії (магістр)
Державний вищий навчальний заклад “Приазовський державний технічний університет”	Біомедичної інженерії	Біомедична інженерія (бакалавр)
Державний вищий навчальний заклад “Ужгородський національний університет”	Квантової електроніки	Біомедична інженерія (бакалавр)
Державний університет “Житомирська політехніка”	Біомедичної інженерії та телекомунікації	Біомедичний комп’ютинг (бакалавр) Біомедична інженерія (магістр)
Національний авіаційний університет	Біокібернетики та аерокосмічної медицини	Біомедична інженерія (бакалавр, магістр)
Національний аерокосмічний університет ім. М.Є. Жуковського “Харківський авіаційний інститут”	Радіоелектронних та біомедичних комп’ютеризованих засобів та технологій	Біомедична інженерія (бакалавр) Біомедична інформатика та радіоелектроніка (бакалавр, магістр)
Національний технічний університет України “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”	Біомедичної інженерії Трансляційної медичної біоінженерії	Медична інженерія (бакалавр, магістр) Регенеративна та біофармацевтична інженерія (бакалавр, магістр) Біомедична інженерія (доктор філософії)
Національний університет “Львівська політехніка”	Електронних засобів інформаційно-комп’ютерних технологій	Біомедична інженерія (інтернет речей) (бакалавр) Біомедичні та медичні апарати та системи (магістр)
Одеський національний політехнічний університет	Загальної та медичної фізики	Біомедична інженерія (бакалавр)
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя	Біотехнічних систем	Біомедична інженерія (бакалавр, магістр, доктор філософії)
Харківський національний технічний університет сільського господарства імені Петра Василенка	Біомедичної інженерії та теоретичної електротехніки	Біомедична інженерія (бакалавр, доктор філософії)
Харківський національний університет радіоелектроніки	Біомедичної інженерії	Біомедична інженерія (бакалавр, магістр) Ортопедичні технології та інженерія (бакалавр, магістр)

Table 2: Academic programs in biomedical engineering in Ukraine

Higher Educational Institution	Graduate Chair	Academic Programs
Vinnitsia National Technical University	Biomedical engineering	Biomedical engineering (bachelor, PhD) Intellectual artificial implants and medical instruments in bioengineering (master)
State Higher Education Institution "Pryazovskyi State Technical University"	Biomedical engineering	Biomedical engineering (bachelor)
State Higher Educational Institution "Uzhhorod National University"	Quantum electronics	Biomedical engineering (bachelor)
Zhytomyr Polytechnic State University	Biomedical engineering and telecommunications	Biomedical computing (bachelor) Biomedical engineering (master)
National Aviation University	Biocybernetics and aerospace medicine	Biomedical engineering (bachelor, master)
H.E. Zhukovsky National Aerospace University Kharkiv Aviation Institute	Radio-electronic and biomedical computer devices and technologies	Biomedical engineering (bachelor) Biomedical informatics and radio electronics (bachelor, master)
National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"	Biomedical engineering Translational medical bioengineering	Medical engineering (bachelor, master) Regenerative and biopharmaceutical engineering (bachelor, master) Biomedical engineering (PhD)
Lviv Polytechnic National University	Electronic instruments of information and computer technologies	Biomedical engineering (Internet of things) (bachelor) Biomedical and medical instruments and systems (master)
Odessa National Polytechnic University	General and medical physics	Biomedical engineering (bachelor)
Ternopil Ivan Puluj National Technical University	Bioengineering systems	Biomedical engineering (bachelor, master, PhD)
Kharkiv Petro Vasylenko National Technical University of Agriculture	Biomedical engineering and theoretical electrical engineering	Biomedical engineering (bachelor, PhD)
Kharkiv National University of Radio Electronics	Biomedical engineering	Biomedical engineering (bachelor, master) Orthopedic technologies and engineering (bachelor, master)

(відчутна кількість актуальних освітніх програм є “нащадками” програм підготовки з електроніки та приладобудування), проте така ситуація вимагає відповідної державної політики щодо підтримки та розвитку БМІ в Україні, а також активнішої позиції бізнесу (роботодавців) і професійних спілок.

Проведений огляд освітніх програм спонукає нас обговорити й питання унікальності/особливості освітніх програм. Зазначимо, що унікальність освітньої програми не є критерієм оцінювання якості освітньої програми згідно із законодавством України [22]. Водночас під час акредитації освітніх програм з боку Національного агентства із забезпечення якості вищої освіти при оцінюванні проектування та цілей освітніх програм передбачено визначення їх особливостей або унікальностей (за наявності) [23]. Баланс типовості/унікальності у формулюванні цілей програми може залежати від її предметної сфери, місії ЗВО, бачення розробників [23]. Очевидно, що предметна спрямованість освітньої програми не може вважатися єдиною ознакою унікальності (особливості). Так, наприклад, 59 зі 102 освітніх програм університетів країн ЄС та Сполученого Королівства мають назву “Biomedical Engineering” та охоплюють всі науково-інженерні аспекти галузі. Унікальність кожної конкретної освітньої програми визначається комплексом характеристик за кожним із критеріїв її оцінювання.

На нашу думку, за останні 15 років в Україні відбувся помітний позитивний поступ у галузі вищої освіти з біомедичної інженерії, що адресується не тільки до появи окремої відповідної спеціальності, але й її віднесення до галузі знань “Хімічна та біоінженерія”. Остання обставина має вкрай важливе ідеологічне значення для формування змісту предметної області БМІ. Загальні риси у характері освітніх програм із БМІ в Україні та в розвинутих країнах багато в чому збігаються. Хоча у вищій школі в Україні представлено не всі спеціалізації БМІ, що існують у світі. Не в останню чергу подальший прогресивний поступ цієї освітньої галузі пов’язаний із модернізацією СВО, а також із цілеспрямованою державною політикою, спрямованою на підтримку та розвиток галузі, активною позицією бізнесу, професійних асоціацій та інших стейкхолдерів.

evaluation criterion of academic program's quality, as it is stated in Ukrainian legislation [22]. At the same time, during the accrediting process from the National agency for Higher Education Quality Assurance the process of defining the academic programs' peculiarities or unique features (should there be any) is also envisaged [23]. The balance of generic character/uniqueness in formulating the targets of the academic program may depend on its subject area, HEE's mission, the creators' vision [23]. It is clear that subject focus of the academic program cannot be deemed as the only sign of uniqueness (distinctiveness). For example, 59 out of 102 academic programs of EU and UK universities are titled "Biomedical engineering" and cover all scientific and engineering aspects of the field. The uniqueness of each academic program is defined by the set of characteristics, stipulated by evaluation criteria,

In our opinion, for the last 15 years, there was a substantial positive shift in the sphere of BME higher education, which is proven not only by emergence of a separate subject field but also it being a part of field of knowledge "Chemical and bioengineering". The last circumstance has an extremely important ideological value for the formation of the contents of BME subject area. General traits in the contents of BME academic programs in Ukraine and developed countries coincide to a great degree. Even though the list of BME specialties, present in Ukraine, isn't the same list of BME fields, existing in the world. Last but not least, further progress of this sphere of education is closely connected to the renovation of standard of higher education and set state policy, aimed at support and development of the sphere; to the pro-active approach of business, professional associations, and other stakeholders.

References

- [1] What is Biomedical Engineering? [Internet]. Eambes.org. 2021 [cited Mar 14 2021]. Available from: <https://eambes.org/About-EAMBES/Biomedical-Engineering>
- [2] Thompson LA, Adebayo AS, Nian Z, Haghani S, Dowell K, Shetty D. Building a more diverse biomedical engineering workforce: Biomedical engineering at the university of the district of Columbia, a historically black college & university. *Annu Int Conf IEEE Eng Med Biol Soc.* 2016 Aug;2016:4325-8. DOI: 10.1109/EMBC.2016.7591684
- [3] Krishnan SM. Academic program models for undergraduate biomedical engineering. *Annu Int Conf IEEE Eng Med Biol Soc.* 2014;2014:5145-8. DOI: 10.1109/EMBC.2014.6944783
- [4] White JA, Gaver DP, Butera RJJr, Choi B, Dunlop MJ, Grande-Allen KJ, et al. Core competencies for undergraduates in bioengineering and biomedical engineering: Findings, consequences, and recommendations. *Ann Biomed Eng.* 2020 Mar;48(3):905-912. DOI: 10.1007/s10439-020-02468-2
- [5] Linsenmeier RA, Saterbak A. Fifty years of biomedical engineering undergraduate education. *Ann Biomed Eng.* 2020 Jun;48(6):1590-615. DOI: 10.1007/s10439-020-02494-0
- [6] Lhotska L. Biomedical engineering as health care profession. *Annu Int Conf IEEE Eng Med Biol Soc.* 2007;2007:5937-40. DOI: 10.1109/IEMBS.2007.4353699
- [7] Pallikarakis N, Bliznakov Z, Miklavcic D, Jarm T, Magjarevic R, Lackovic I, et al. Promoting harmonization of BME education in Europe: the CRH-BME Tempus project. *Annu Int Conf IEEE Eng Med Biol Soc.* 2011;2011:6522-5. DOI: 10.1109/IEMBS.2011.6091609
- [8] Magjarevic R, Lackovic I, Bliznakov Z, Pallikarakis N. Challenges of the biomedical engineering education in Europe. *Annu Int Conf IEEE Eng Med Biol Soc.* 2010;2010:2959-62. DOI: 10.1109/IEMBS.2010.5626263
- [9] Lin KP, Kao T, Wang JJ, Chen MJ, Su FC. Education of biomedical engineering in Taiwan. *Annu Int Conf IEEE Eng Med Biol Soc.* 2014;2014:5153-5. DOI: 10.1109/EMBC.2014.6944785
- [10] Abu-Faraj ZO. Project Alexander the Great: a study on the world proliferation of bioengineering/biomedical engineering education. *Annu Int Conf IEEE Eng Med Biol Soc.* 2008;2008:2873-6. DOI: 10.1109/IEMBS.2008.4649802
- [11] Azpiroz-Leehan J, Martinez LF, Urbina MEG, Cadena MM, Rock SE. Critical assessment and outlook for the 50 biomedical engineering undergraduate programs in Mexico. *Annu Int Conf IEEE Eng Med Biol Soc.* 2015;2015:3973-6. DOI: 10.1109/EMBC.2015.7319264
- [12] Azpiroz-Leehan J, Martinez LF, Urbina MEG, Cadena MM, Sacristan E. Defining new aims for BME programs in Latin America: the case of UAM-Iztapalapa. *Annu Int Conf IEEE Eng Med Biol Soc.* 2016 Aug;2016:4333-6. DOI: 10.1109/EMBC.2016.7591686
- [13] Martínez Licon F, Azpiroz-Leehan J, Urbina MEG, Cadena MM. Managing new directions for a 38 year old undergraduate BME program. *Annu Int Conf IEEE Eng Med Biol Soc.* 2013;2013:3146-50. DOI: 10.1109/EMBC.2013.6610208
- [14] Yatsenko VP, Maksymenko VB. The concept of development of the educational direction "Biomedical Engineering" in Ukraine. *Kyiv Polytechnic.* 2007;13:5.
- [15] Maksymenko V, Biloshytska O, Ovcharenko G, Yurieva K. Actual tasks of biomedical engineering in Ukraine. *Biomedical Engineering and Technology.* 2020;3:1-5. DOI: 10.20535/2617-8974.2020.3.195550
- [16] Bioengineering and biomedical engineering in Europe – Overview, Education, Standards and Professional Competences [Internet]. Ortho-eman.ro. 2021 [cited Mar 14, 2021]. Available from: http://ortho-eman.ro/data/_uploaded/docs/report-e-BME-Europe.pdf
- [17] Kvasha OS. Labor market in Ukraine: analysis of the current state and prospects. *Mathematical methods, models, and information technologies in economics.* 2018;22:1074-9.
- [18] Yashchuk TA. Features of the functioning of the market of educational services of higher education in Ukraine in modern conditions. *Economy Finances Right.* 2017; 4(1):26-9.
- [19] Ukraine in the international market of higher education services [Internet]. old2.niss.gov.ua. 2021 [cited Mar 14, 2021]. Available from: <https://amspub.abet.org/aps/name-search?searchType=institution>
- [20] BME Programs – INBIT [Internet]. Inbit.gr. 2021 [cited Mar 14, 2021]. Available from: https://www.inbit.gr/en/bme_programs/
- [21] Regulations on the accreditation of educational programs, according to which the training of students of higher educational establishments is conducted. Ministry of Education and Science of Ukraine. 2019. No. 977.
- [22] Recommendations for the application of criteria for assessing the quality of the educational program approved by National Agency for Quality Assurance in Higher Education. Kyiv: Orion; 2020. 66 p.