

Є.В. ГОНЧАРОВ, І.В. ПОЛЯКОВ, В.С. МАРКОВ, Н.В. КРЮКОВА

АНАЛІЗ МОЖЛИВОСТЕЙ ВИКОРИСТАННЯ ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНИХ НАДПРОВІДНИКІВ У ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ

У статті проведено аналіз існуючих технічних рішень щодо використання високотемпературних надпровідникових кабелів у лініях електропередачі. Проаналізовано особливості використання надпровідників у електричних розподільчих мережах. Встановлено переваги використання високотемпературних надпровідників у порівнянні з низькотемпературними надпровідниками. Визначено, що застосування високотемпературних надпровідників, завдяки підвищенням критичним параметрам, забезпечує підвищення потужності ліній електропередачі. З проведеного аналізу виходить, що високотемпературні надпровідникові проводи 2G покоління мають кращі експлуатаційні характеристики, відповідно їх застосування є більш ефективним порівняно з проводами 1G покоління. Розглянуто схему трифазної високотемпературної надпровідникової мережі електропередачі з нейтральним проводом. Проаналізовано умови роботи трифазної електромережі з високотемпературними надпровідниковими кабелями. Визначено, що використання двох жил високотемпературного надпровідникового кабелю розподіленої системи електропередачі забезпечує підвищення пропускної електричної потужності у розподільчих електромережах. Відповідно, підвищується ефективність передачі електроенергії, а також зменшуються втрати потужності на змінному струмі та експлуатаційні витрати. Зазначено, що застосування реактора знижує вимоги до апаратів захисту, полегшує роботу електроустановок, у тому числі генераторів електростанцій, а також знижує вартість обладнання розподільчих електромереж. Зроблений висновок, що найменших втрат потужності у трифазній системі розподіленої електропередачі з використанням високотемпературних надпровідникових кабелів можна досягти при симетричному режимі роботи навантаження. Отримані результати технічного аналізу можуть бути використані для розробки рекомендацій з удосконалення характеристик кабельних ліній електропередачі.

Ключові слова: високотемпературний надпровідник, надпровідниковий кабель, лінія електропередачі, коротке замикання, потужність.

Е.В. ГОНЧАРОВ, И.В. ПОЛЯКОВ, В.С. МАРКОВ, Н.В. КРЮКОВА

АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ СВЕРХПРОВОДНИКОВ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ

В статье проведен анализ существующих технических решений относительно использования высокотемпературных сверхпроводниковых кабелей в линиях электропередачи. Проанализированы особенности использования сверхпроводников в электрических распределительных сетях. Установлены преимущества использования высокотемпературных сверхпроводников в сравнении с низкотемпературными сверхпроводниками. Определено, что применение высокотемпературных сверхпроводников, благодаря повышенным критическим параметрам, обеспечивает повышение мощности линий электропередачи. Из проведенного анализа следует, что высокотемпературные сверхпроводниковые провода 2G поколения имеют лучшие эксплуатационные характеристики, соответственно их применение является более эффективным сравнительно с проводами 1G поколения. Рассмотрена схема трехфазной высокотемпературной сверхпроводниковой сети электропередачи с нейтральным проводом. Проанализированы условия работы трехфазной электросети с высокотемпературными сверхпроводниковыми кабелями. Определено, что использование двух жил высокотемпературного сверхпроводникового кабеля распределительной системы электропередачи обеспечивает повышение пропускной электрической мощности в распределительных электросетях. Соответственно, повышается эффективность передачи электроэнергии, а также уменьшаются потери мощности на переменном токе и эксплуатационные затраты. Показано, что применение реактора снижает требования к аппаратам защиты, облегчает работу электроустановок, в том числе генераторов электростанций, а также снижает стоимость оборудования распределительных электросетей. Сделан вывод, что наименьших потерь мощности в трехфазной системе распределенной электропередачи с использованием высокотемпературных сверхпроводниковых кабелей можно достичь при симметричном режиме работы нагрузки. Полученные результаты технического анализа могут быть использованы для разработки рекомендаций по усовершенствованию характеристик кабельных линий электропередачи.

Ключевые слова: высокотемпературный сверхпроводник, сверхпроводниковый кабель, линия электропередачи, короткое замыкание, мощность.

YE.V. HONCHAROV, I.V. POLYAKOV, V.S. MARKOV, N.V. KRYUKOVA

ANALYSIS APPLICATION POSSIBILITIES OF HIGH-TEMPERATURE SUPERCONDUCTORS IN ELECTRIC NETWORKS

In the article the technical analysis of existing constructive decisions concerning use of high-temperature superconducting cables is carried out. The features of the use of superconductors in electrical distribution networks are analyzed. The advantages of using high-temperature superconductors in comparison with low-temperature superconductors are established. It is determined that the use of high-temperature superconductors, due to the increased critical parameters, provides an increase in the power of transmission lines and energy saving. From the analysis it follows that high-temperature superconductor wires of 2G generation have better operational characteristics, respectively, their use is more efficient compared to wires of 1G generation. A scheme of a three-phase high-temperature superconducting power transmission network with a neutral wire is considered. The working conditions of a three-phase power network with high-temperature superconducting cables are analyzed. It is determined that the use of two cores of a high-temperature superconducting cable of a distributed power transmission system provides an increase in the throughput of electric power in distribution electric networks. Accordingly, the efficiency of electric power transmission is increased, as well as the loss of AC power and operating costs are reduced. It is shown that the use of the reactor reduces the requirements for protection devices, facilitates the operation of electrical installations, including generators of power plants, and also reduces the cost of distribution networks equipment. It is indicated that the smallest power loss in a three-phase distributed power transmission system using high-temperature superconducting cables can be achieved with a symmetrical load operation mode. The results of technical analysis can be used to develop recommendations for improving the characteristics of cable power lines.

Keywords: high-temperature superconductor, superconducting cable, power transmission line, short-circuit, power.

Вступ. З відкриттям явища надпровідності з'явилась теоретична можливість передавати електричну енергію майже без втрат потужності. Явище надпровідності полягає у відсутності активного опору при протіканні електричного струму, що дозволяє значно підвищити ефективність передачі електроенергії на значні відстані. Труднощі полягають у тому, що для цього необхідне охолодження до наднизьких температур.

Низькотемпературні надпровідникові (НТНП) матеріали мають достатньо невисокі значення критичного струму, при якому втрачається надпровідність. Однак, значні капітальні витрати на низькотемпературні надпровідникові матеріали (температура рідкого гелію), прокладання та кріостатування кабельної лінії, холодильну техніку, зробили низькотемпературні надпровідникові лінії електропередачі економічно невіддільними.

З появою високотемпературних надпровідних (ВТНП) матеріалів (охолодження до температури рідкого азоту) розробки надпровідних ліній електропередачі суттєво наблизились до промислового впровадження.

Переваги рідкого азоту у порівнянні з рідким гелієм:

- значно менша вартість холодоагенту (на два порядки);
- простіше транспортувати холодоагент до споживача;
- більш проста та надійна конструкція ємностей для перевезення холодоагенту;
- більш висока питома теплота паротворення рідкого азоту у порівнянні з гелієм. Відповідно, для охолодження надпровідника потрібно менший об'єм холодоагенту;
- менша вартість та складність виробництва рідкого азоту.

Використання високотемпературних надпровідників у силових кабелях ліній електропередачі визнано в світовій практиці, оскільки це дозволяє вирішити проблеми передачі великих потоків електроенергії. Збільшення потужності розподільчих електромереж у декілька разів можливе шляхом заміни традиційних силових кабелів на високотемпературні надпровідникові при знижених енерговитратах та без трансформації напруг.

Аналіз відомих досліджень. Так, наприклад, раніше у IBM вже досліджували перспективу використання низькотемпературних надпровідників з матеріалу Nb_3Sn (табл. 1) для створення потужних електричних кабелів [1].

Таблиця 1 – Критичні температури НТНП

Сполука	Критична температура T_c , К
$NbTi$	9,5-10,5
Nb_3Sn	18,1-18,5
NbN	14,5-17,8

Мета розробки – передача по кабелю постійного струму потужності 100 ГВт (100 кВ, 500 кА) на відстань близько 1000 км, з криогенним охолодженням рідким гелієм по всій довжині кабелю. Такий кабель був спроможний транспортувати майже половину всієї електроенергії, яка вироблялась у США, якби виникла

потреба у такому щільному потоці електроенергії. Аналогічні проекти розглядалися і у країнах ЄС.

Але з часом з'ясувалось, що технічна можливість створення низькотемпературних надпровідних кабельних ліній все ж таки не є достатньою умовою для їхньої реалізації. Тому сучасні розробки зі створення надпровідникових ліній електропередачі великих потужностей спрямовані на використання високотемпературних надпровідних матеріалів.

Новим стимулом для розробок з'явилось створення у середині 90-х років високотемпературних надпровідників 1G покоління – багатожилевих проводів на основі керамік вісмутової системи в срібній оболонці, що виготовляють методом технології “порошок у трубі” [2]. Виробництво стрічкових високотемпературних надпровідних проводів на основі $Bi-2223$ було налагоджено в США, ЄС, Китаї та ін. [3].

Високотемпературні надпровідники 1G перевищують аналогічні показники низькотемпературних надпровідників за значенням критичного струму, вони виготовляються у срібній матриці на основі таких матеріалів:

- сполука $Bi_2Sr_2CaCu_2O_x$ у срібній оболонці ($Bi-2212/Ag$), з критичною температурою $T_c \approx 90$ К;
- сполука $Bi-2223/Ag$ має $T_c = 107$ К.

Паралельно була освоєна “плівкова” технологія виготовлення високотемпературних надпровідних проводів 2G покоління, коли плівкові покриття на базі ітрієвої сполуки $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ ($YBaCuO$) осаджуються на довгі металеві стрічки в безперервному процесі.

Характеристики високотемпературних надпровідних проводів 2G покоління $YBaCuO$ у порівнянні з проводами 1G покоління $Bi-2223$ подано на рис. 1.

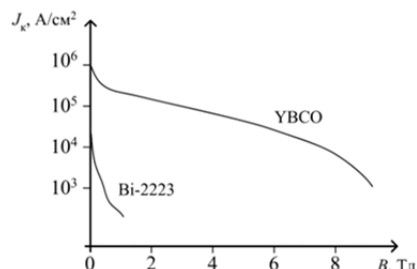


Рис. 1. Критична щільність струму $j_c(B)$ у залежності від індукції магнітного поля для ВТНП 1G і 2G покоління

Крім того, проводи 2G мають добрі механічні властивості, що дозволяє створювати обмотки для роботи у сильних магнітних полях. Тому на теперішній час 2G проводи є найбільш вдалою та ефективною альтернативою порівняно з 1G. Для більш широкого застосування в пристроях зі змінним магнітним полем втрати потужності на змінному струмі у надпровіднику можуть бути зменшені за рахунок застосування багатожилевий структури проводів методом скрайбування. Отже, використання високотемпературних надпровідників 2G покоління є досить актуальним технічним рішенням. Крім того, потенціал проводів на базі високотемпературних надпровідників 2G покоління ще не повністю розкритий і розробки з покращення їх критичних параметрів тривають [4].

Основною перевагою високотемпературних надпровідних ліній електропередачі є їх здатність при температурі рідкого азоту 65–70 К передавати високі

потужності (більше 1 ГВА) з мінімальними електричними втратами при напругах 64–128 кВ, за рахунок високої критичної щільності струму ($j_k > 100 \text{ А/мм}^2$). При відстанях більше 2–3 км передача енергії по високотемпературним надпровідним кабелям є вже менш ефективною, що пов'язано з втратами на змінному струмі. У зв'язку з цим розробка високотемпературних надпровідних ліній на постійному струмі є достатньо економічно актуальною.

Таким чином, основними перевагами силових високотемпературних надпровідних кабелів є високе струмове навантаження при напругах 10–20 кВ, що дає значну економію капітальних витрат, малі втрати потужності, непотрібність проміжних підстанцій, екологічну чистоту (відсутність масла, мінімальний електромагнітний і тепловий вплив) [5].

Наприклад, у Південній Кореї розробляється струмопровідна мережа на надпровідниках, що охолоджуються рідким азотом, довжиною декілька десятків кілометрів. Ця лінія, має з'єднати столицю м. Сеул з пригородом. Очікувана потужність передачі електроенергії підвищиться у сотні разів при тому ж діаметрі поперечного перерізу провідника.

Також у США, Японії, ЄС та інших країнах ведуться інтенсивні розробки технологій виробництва довгомірних високотемпературних надпровідникових кабелів. Таким чином, перспектива передачі електроенергії по довгомірним високотемпературним надпровідним кабелям є дуже енергетично привабливою [6].

Мета статті. Метою статті є аналіз існуючих схемних і конструктивних рішень та особливостей щодо використання високотемпературних надпровідників у лініях електропередачі. Задача роботи – аналіз технічних можливостей використання високотемпературної надпровідникової кабельної лінії електропередачі для розподіленої передачі електроенергії постійним струмом.

Можливості використання ВТНП кабелів. Особливості використання надпровідникових кабелів пов'язані з виникненням аварійних струмів, що перевищують значення критичного струму і надпровідник втрачає надпровідність та переходить у нормальний стан. При цій зміні стану фази будуть відбуватися значні Джоулеві втрати тепла, що можуть викликати вигорання надпровідникових проводів. Збільшення температури буде призводити до випаровування холодоагенту, який перебуває в порожнечах у межах проводів, що буде викликати “азотне роздування” надпровідникових проводів і знижувати їх критичні параметри. Більше того, випар холодоагенту може викликати пробій діелектрика, що призведе до значних ушкоджень.

Відповідно до аналізу можливостей використання високотемпературних надпровідних кабелів та особливостей їх роботи у номінальному режимі, розглянемо напівперіодну передачу електроенергії. Кабельна система високотемпературної надпровідної лінії електропередачі забезпечить підвищення ефективності та енергозбереження шляхом розподіленої передачі електроенергії по двох жилах надпровідникового кабелю. Використання кабелю, який має дві надпровідні жили з двох шарів високотемпературних надпровідників, що розділені шаром ізоляційного слою, по яких відбувається по чергову передача електроенергії крізь випрямний блок з двох вентилів, зменшує

втрати потужності. Суть розподіленої кабельної системи надпровідної лінії електропередачі (рис. 2) полягає у використанні двожилового високотемпературного надпровідного кабелю, з випрямним блоком, який включено у кожен фазу електричної мережі.

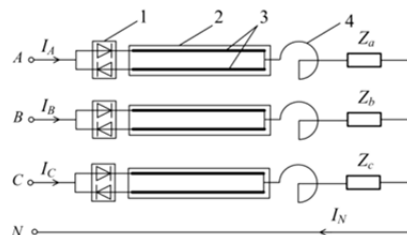


Рис. 2. Електрична схема заміщення трифазної надпровідникової мережі електропередачі

Кожна лінія кабелів трьох фаз розміщується у власному кріостаті, заповненому холодоагентом (азотом), що за рахунок автономності ліній спрощує експлуатацію та ремонт [7].

При номінальному режимі роботи електричної мережі фазний струм протікає крізь випрямний блок 1, де розподіляється по надпровідних жилах 3, які розміщено у єдиному кріостаті 2, та подається крізь струмообмежувальний реактор 4, призначений для захисту від короткого замикання, на навантаження Z_a , Z_b , Z_c . Передача електроенергії здійснюється по двох надпровідникових жилах 3 по чергово кожний напівперіод. При виникненні струму короткого замикання реактор обмежує величину аварійного струму [8].

Для обмеження струмів використовуються багато різновидів реакторів, які за своїм призначенням підрозділяються на реактори струмообмежувальні, пускові для синхронних компенсаторів та ін. Реактор, що представляє собою котушку з великим незмінним індуктивним і малим активним опором, встановлюють на кабельних лініях, що відходять, або в колі понижуючих трансформаторів потужних станцій і підстанцій. Він призначений для обмеження струмів короткого замикання і підтримки напруги на шинах при аварійному режимі [9].

При короткому замиканні з реактором струм короткого замикання значно менше, чим у мережі без реактора, оскільки загальний індуктивний опір у першому випадку більше (за рахунок реактивного опору реактора).

За конструктивними особливостями обмотки відомі реактори з кабельною обмоткою, дисковою, обмоткою зі стрічкового провідникового матеріалу, з радіальним або аксіальним напрямком намотування. По виду ізоляції також розрізняють сухі та маслонापовнені реактори. Відомі також струмообмежувальні реактори з покращеними характеристиками завдяки використанню надпровідних обмоток [10].

Також досягти найбільш ефективного використання трифазної кабельної високотемпературної надпровідникової мережі електропередачі з нейтральним проводом можна при симетричному режимі роботи навантаження.

Це можливо, якщо комплексні опори фаз споживачів будуть рівні між собою $Z_\phi = Z_\phi \cdot e^{j\phi} = Z_a = Z_b = Z_c$, тобто рівні модулі фазних опорів і кути зсуву фаз $\phi = \phi_a = \phi_b = \phi_c$, що визнача-

ють характер навантаження в кожній фазі.

При цьому комплексні діючі значення лінійних струмів також рівні між собою $I_A = I_B = I_C$, відповідно рівні між собою і комплексні діючі значення фазних струмів $I_a = I_b = I_c$ (векторна діаграма рис. 3).

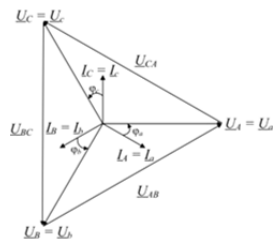


Рис. 3. Векторна діаграма трифазної симетричної мережі електропередачі

Таким чином, сума фазних струмів у нейтральному проводі дорівнюватиме нулю $I_N = I_A + I_B + I_C = 0$.

Висновки. Підвищення щільності струму у кабельних лініях електропередачі можливе завдяки використанню високотемпературних надпровідників, які мають кращі параметри, на відміну від низькотемпературних надпровідників.

З огляду технічних характеристик високотемпературних надпровідників, використання проводів 2G покоління є більш ефективним у порівнянні з 1G проводниками.

Таким чином, можливо підвищити ефективність передачі електроенергії шляхом використання двожилового високотемпературного надпровідникового кабелю, а також зменшити втрати потужності на змінному струмі та експлуатаційні витрати.

Список літератури

1. Garwin R.L. Superconducting lines for the transmission of large amounts of electrical power over great distances / R.L. Garwin, J. Matisoo // Proceedings of the IEEE. – 1967. – Vol. 55, № 4. – P. 538–548.
2. HTS materials for electric power application / A. Shikov, I. Akimov, A. Nikulin, et al. // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. – 2000. – Vol. 10, № 1. – P. 1126–1129.
3. Иванов-Смоленский А.В. Перспективы развития электромеханики в XXI веке / А.В. Иванов-Смоленский, И.П. Копылов, Е.М. Лопухина // Электротехника. – 2000. – № 8. – С. 1–4.
4. Effect of Mn Addition on In-Field Behavior of IBAD/MOCVD Gd-YBCO Second Generation HTS Tapes / R.J. Mensah, G. Majkic, Chen Yimin, et al. // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. – 2009. – Vol. 19, № 3. – P. 3216–3220.
5. Гончаров Є.В. Перспективи використання надпровідних ліній електропередачі / Є.В. Гончаров, І.В. Поляков, Н.В. Крюкова // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: XXVI міжн. наук.-практична конф. (microCAD-2018), 16-18 травня: тези доп. Ч.ІІ / НТУ "ХПІ", Харків. – 2018. – С. 66.

6. Гончаров Є.В. Технології розвитку електроенергетичних систем / Є.В. Гончаров, І.В. Поляков, Н.В. Крюкова // Теоретичні та прикладні аспекти радіотехніки і приладобудування: матеріали III Всеукраїнської науково-технічної конференції, 8-9 червня ТНТУ, Тернопіль – 2017. – С. 203–205.
7. Пат. 134679 України, МПК H01B 12/00. Надпровідниковий кабель розподіленої електропередачі / Гончаров Є.В.; Поляков І.В.; власник патенту НТУ "ХПІ". – № у 201900568; заявл. 21.01.19; опубл. 27.05.19, Бюл. № 10.
8. Electric Transmission Superconducting Cable Line / E.V. Goncharov, I.V. Polyakov, N.V. Kryukova, V.V. Nikitin // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: XXVII міжн. наук.-практична конф. (microCAD-2019), 15-17 травня: тези доп. Ч.ІІ / НТУ "ХПІ", Харків. – 2019. – С. 68.
9. Чунихин А.А. Электрические аппараты: Общий курс. Учебник для вузов. – 3-е изд., перераб и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1988, 720 с.
10. Стернин В.Г., Карпенский А.К. Сухие токоограничивающие реакторы – М.- Л., изд. Энергия, 1965, 256 с.

References (transliterated)

1. Garwin R.L., Matisoo J. Superconducting lines for the transmission of large amounts of electrical power over great distances. Proceedings of the IEEE. – 1967. – Vol. 55, № 4. – P. 538–548.
2. Shikov A., Akimov I., Nikulin A. HTS materials for electric power application. IEEE Transactions on Applied Superconductivity. – 2000. – Vol. 10, No 1. – P. 1126–1129.
3. Ivanov-Smolensky A.V., Kopylov I.P., Lopukhina E.M. Perspektivy razvitiya elektromekhaniki v XXI veke [Prospects for the development of electromechanics in the 21st century]. Electrical Engineering. – 2000. – No 8. – P. 1–4.
4. R.J. Mensah, G. Majkic, Chen Yimin, et al. Effect of Mn Addition on In-Field Behavior of IBAD/MOCVD Gd-YBCO Second Generation HTS Tapes. IEEE Transactions on Applied Superconductivity. – 2009. – Vol. 19, No 3. – P. 3216–3220.
5. Kryukova N.V., Goncharov E.V., Polyakov I.V. Perspektivy'vy'vy'kory'stannya nadprovodny'x liniy elektropredachi [Prospects of usage of superconducting electrical transmissions lines]. Information technology, science, engineering, technology, education, health: XXVI Int. sci. Practical Conf. (microCAD-2018), 16-18 May. – Kharkiv: NTU "KhPI" – 2018. – P. 66.
6. Goncharov E.V., Polyakov I.V. Kryukova N.V. Teknologiyi rozvy'tku elektroenergety'chny'x sy'stem [Technologies of development of electric power systems]. Proceedings of the III National Sci.-Techn. Conf. «Theoretical and Applied Aspects in Radio Engineering and Instrument making», Ternopil, 08-09 June. – Ternopil: TNU – 2017. – P. 203–205.
7. Goncharov E. V., Polyakov I.V. Nadprovodny'kovy'j kabel' rozpodilenoji elektropredachi [Superconducting cable of distributed power transmission]. Patent UA, no 134679, 2019.
8. Goncharov E.V., Polyakov I.V., Kryukova N.V., Nikitin V.V. Electric Transmission Superconducting Cable Line. Information technology, science, engineering, technology, education, health: XXVII Int. sci. Practical Conf. (microCAD-2019), 15-17 May. – Kharkiv: NTU "KhPI" – 2019. – P. 68.
9. Chunikhin A.A. Electric devices: General course. Textbook for high schools. – 3rd ed., Revised and add. – Moscow: Energoatomizdat, 1988, 720 p.
10. Sternin V.G., Karpensky A.K. Dry current-limiting reactors – Moscow-Leningrad, ed. Energy, 1965, 256 p.

Поступила (received) 16.09.2019

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Гончаров Євген Вікторович (Гончаров Евгений Викторович, Honcharov Yevgen Viktorovich) – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", доцент кафедри загальної електротехніки; м. Харків; тел.: (057) 707-64-27.

Поляков Ігор Володимирович (Поляков Игорь Владимирович, Polyakov Igor Vladimirovich) – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри загальної електротехніки.

Марков Владислав Сергійович (Марков Владислав Сергеевич, Markov Vladislav Sergeevich) – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри загальної електротехніки.

Крюкова Наталія Валеріївна (Крюкова Наталья Валерьевна, Kryukova Natalia Valerievna) – кандидат технічних наук, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри загальної електротехніки.