

**КОНЦЕПЦІЯ ПОБУДОВИ СТРУКТУРНО МІНЛИВОЇ  
ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНОЇ СИСТЕМИ УКРАЇНИ**

**С.Є. Саух\***, член-кореспондент НАН України  
Інститут проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України,  
вул. Генерала Наумова, 15, Київ, 03164, Україна. E-mail: [ssaukh@gmail.com](mailto:ssaukh@gmail.com).

*Для підтримки сталого функціонування та розвитку енергетичного сектора в умовах терористичних та мілітарних загроз пропонується концепція побудови структурно мінливої електроенергетичної системи (ЕЕС). Структурну мінливість визначено як здатність ЕЕС відтворювати таке різноманіття підсистем і електричних з'єднань між ними, яке надає можливість оператору управляти структурою ЕЕС і, у такий спосіб, забезпечувати стаке функціонування електроенергетики в умовах цілеспрямованих руйнівних дій. Концепція структурно мінливої ЕЕС є стратегією випередження викликів і загроз сталому функціонуванню та розвитку електроенергетики. Для побудови структурно мінливої ЕЕС запропоновано створити регіональні ЕЕС з власними потужностями виробництва, зберігання, розподілу та постачання електроенергії в обсягах, достатніх для споживання населенням, житлово-комунальними господарствами, транспортом та сільським господарством в межах кожного регіону. Встановлення територіальних розмірів окремих підсистем, тобто регіональних ЕЕС, визначено на основі компромісу між необхідною кількістю таких підсистем і з'єднань між ними, які забезпечують бажаний ступінь мінливості ЕЕС, та рівнями капіталізації регіонів, достатніми для підтримки інвестиційних та операційних витрат на відповідні їм регіональні ЕЕС. Передбачається, що національна ЕЕС підтримує регіональні ЕЕС узгодженими обсягами маневрових і резервних потужностей та забезпечує постачання електроенергії підприємствам промислової, будівельної, транспортної та іншим видам економічної діяльності, які мають національне значення та не приєднуються до регіональних ЕЕС. У випадках руйнування окремих регіональних ЕЕС національна ЕЕС, а також неушкоджені сусідні регіональні ЕЕС разом забезпечують потреби потерпілих регіонів в електроенергії. В структурно мінливій ЕЕС мають діяти єдині правила поведінки всіх енергетичних компаній як учасників ринку, які взаємодіють на національному та регіональних рівнях. Для організації такої взаємодії пропонується застосувати декомпозицію торговельних площадок і сформувати розподілений ринок електроенергії з взаємозв'язаних між собою ринку електроенергії верхнього рівня та регіональних ринків електроенергії. Бібл. 12, рис. 6.*

**Ключові слова:** стійкість, структурна мінливість, стабільність, робастність, резильєнтність, довговічність.

**Вступ.** Забезпечення надійного, безпечного та доступного постачання електроенергії має важливе значення для економічного зростання та розвитку. Зазвичай електроенергетична система (ЕЕС) знаходиться під постійними загрозами низки природних, технологічних і антропогенних дій, які можуть спричинити будь-що: від перебоїв у електропостачанні до хронічного дефіциту обсягів електропостачання. Для розробників енергетичної політики, проектувальників і системних операторів надзвичайно важливою є проблема захисту ЕЕС, яка вирішується шляхом планування та інвестування у підвищення сталості функціонування та розвитку енергетичного сектора.

Цілісне планування сталого розвитку енергетичного сектора передбачає визначення майбутніх загроз та критичних навантажень на ЕЕС, а також можливостей готуватися й адаптуватися до них. Планування сталого розвитку електроенергетики передбачає розробку стратегії пом'якшення наслідків реалізації таких загроз.

Сталий розвиток енергетичного сектору забезпечується організаційно-технологічними та технічними рішеннями проблем стійкості, робастності, довговічності та резильєнтності ЕЕС.

Стійкість – це здатність ЕЕС повертатися до усталеного режиму роботи після збурень без переходу до асинхронного режиму [1, 2]. Стійкість ЕЕС визначається як статична та динамічна. Статична стійкість – це здатність ЕЕС повертатися до усталеного режиму після незначних збурень, за

яких зміни режимних параметрів (кут, напруга, потужність) малі проти їхніх середніх значень; динамічна стійкість – це здатність ЕЕС повертатися до усталеного режиму після значних збурень.

Робастність – це здатність ЕЕС зберігати свою функціональність через зміну параметрів системи та невизначеності зовнішніх впливів, зокрема, здійснювати демпфірування коливань потужності шляхом зменшення впливу електромеханічних перехідних процесів, пов'язаних з рухом роторів електричних машин, спричинених порушенням балансу між механічним моментом на валу машини та електромеханічним моментом [2, 3]. Робастність ЕЕС забезпечується створенням адаптивної інфраструктури та системними інноваціями.

Резильєнтність – це здатність ЕЕС та енергетичного сектору загалом адаптуватися до майбутніх загроз та критичних навантажень, а також протистояти, реагувати та швидко відновлюватися після дії таких збурень [4].

Довговічність – це здатність ЕЕС підтримувати виконання поточних і планових ремонтних робіт та робіт з технологічного оновлення енергетичного устаткування, стимулювати розвиток нових джерел та носіїв енергії, здійснювати технологічні переходи, поглиблювати взаємодію між виробниками енергетичних продуктів, забезпечувати умови, необхідні для формування та функціонування ринкових механізмів управління енергетичним сектором.

Як сектор економічної діяльності енергетичний сектор у складі ЕЕС і системи організаційно-технологічного управління та реагування перебуває на шляху сталого розвитку лише в умовах нецілеспрямованих дій шоківих загроз та критичних навантажень [5-8].

В останнє десятиліття число масштабних аварій в ЕЕС неухильно зростало, а їхні наслідки торкалися все більшої кількості людей у багатьох країнах світу. Землетруси, шторми, повені та періоди екстремальної спеки називаються серед основних причин виникнення таких аварій. Захист ЕЕС від природних лих та техногенних катастроф є актуальною проблемою, якою, зокрема, опікується Організація з безпеки і співробітництва в Європі [6].

Цілеспрямовані терористичні та мілітарні загрози енергетичному сектору спостерігаються та реалізуються в багатьох країнах сучасного світу [9]. Через російські ракетні удари у ніч 23 листопада 2022 року в українській енергосистемі сталася системна аварія з масовими аварійними знеструмленнями споживачів в Україні та Молдові. Від української електромережі були відключені Рівненська, Південноукраїнська та Хмельницька атомні електростанції. По завершенню ракетних атак фахівці ДП «НЕК "Укренерго"» приступили до реалізації відповідного протоколу дій по поверненню атомних електростанцій в роботу та разом з компаніями облэнерго застосували резервні схеми постачання електроенергії споживачам. В першу чергу були підключені об'єкти критичної інфраструктури по всій країні: водоканали, теплокомуненерго, системи водовідведення, тощо. Енергетики розпочали поступово відновлювати видачу потужності з атомних електростанцій та передачу електроенергії високовольтними електромережами України та Молдови у вечір 24 листопада 2022 року [10].

Винятковий характер дії подібних загроз, обумовлений метою їхнього планування та реалізації – руйнування цілісності ЕЕС та утворення енергетичних островів з суттєво обмеженими або взагалі відсутніми можливостями виробляти, передавати та постачати електроенергію її споживачам. За таких обставин сукупність технічних рішень лише проблем стійкості, робастності, довговічності та резильєнтності ЕЕС не є достатньою задля забезпечення сталого розвитку енергетичного сектора.

**Мета дослідження** полягає у розробленні концепції структурно мінливої ЕЕС, здатної забезпечувати:

- стале постачання електроенергії населенню, житлово-комунальним господарствам, транспорту та сільським господарствам України в умовах терористичних та мілітарних загроз;
- сталий розвиток регіональних ЕЕС;
- формування ринкових механізмів управління регіональними ЕЕС.

**Структурно мінлива ЕЕС.** Термін «структурна мінливість» застосовується в науках, що вивчають живу природу, і означає різновид змін в будові або діяльності живого організму, які дають можливість йому виживати в умовах його існування. В дослідженнях електроенергетичних систем цей термін застосовується вперше.

Покажемо, як можна забезпечити сталий розвиток енергетичного сектора в умовах дії терористичних та мілітарних загроз шляхом підтримки організаційно-технологічних та технічних рішень проблеми структурної мінливості ЕЕС.

Структурна мінливість – це здатність ЕЕС відтворювати таке різноманіття підсистем і електричних з'єднань між ними, яке надає можливість оператору управляти структурою ЕЕС і у такий спосіб забезпечувати стає функціонування електроенергетики в умовах цілеспрямованих руйнівних дій.

На рис. 1 відображена контрастність проблем стійкості, резильєнтності, робастності та довговічності ЕЕС, вирішення яких забезпечує сталість розвитку електроенергетики в мирних умовах, а також їхнє доповнення проблемою структурної мінливості ЕЕС, вирішення якої дає змогу підтримувати сталий розвиток електроенергетики в складних умовах терористичних та військових дій.

Декарбонізація є актуальною стратегією розвитку ЕЕС багатьох країн світу. В умовах руйнівних терористичних та мілітарних дій така стратегія розвитку ЕЕС України не є самодостатньою. Потребує обов'язкового втілення ще одна енергетична стратегія – побудова структурно мінливої ЕЕС, тобто такої, цілеспрямоване ураження якої не призводить до тривалого знеструмлення великих груп споживачів.

Нижче представлена концепція структурно мінливої ЕЕС як стратегія випередження викликів і загроз сталому функціонуванню та розвитку електроенергетики.

Побудову структурно мінливої ЕЕС необхідно починати з регіонального рівня. В кожній регіональній ЕЕС мають бути встановлені потужності з виробництва, зберігання, розподілу та постачання електроенергії в обсягах, достатніх для споживання населенням, житлово-комунальними господарствами, транспортом та сільським господарством цього регіону. Забезпечення електроенергією власного регіонального виробництва зазначених категорій споживачів дає можливість максимально убезпечити життєдіяльність кожного регіону від впливу руйнівних дій, спрямованих на ОЕС України або на сусідні регіональні ЕЕС.

Визначення меж ЕЕС регіону встановлюється відповідно до наступних двох чинників. Відповідно до вимог безпеки та надійності електропостачання більший ступінь структурної мінливості ЕЕС, тобто більша сталість функціонування та розвитку електроенергетики досягається у разі поділу національної ЕЕС на регіональні ЕЕС якомога меншого розміру. Разом з тим, кожна регіональна ЕЕС повинна задовольняти попит на електроенергію споживачів, які спроможні відшкодувати експлуатаційні та капітальні витрати регіональних енергетичних компаній. Таким чином, встановлення територіальних розмірів регіональних ЕЕС визначається на основі компромісу між необхідною кількістю таких регіональних ЕЕС і з'єднань між ними, які забезпечують бажаний ступінь мінливості національної ЕЕС, та рівнями капіталізації регіонів, достатніми для підтримки їхніх інвестиційних та операційних витрат на регіональні ЕЕС. На рис. 2 наведено залежності ступеня структурної мінливості національної ЕЕС та рівнів капіталізації регіонів від територіальних розмірів регіональних ЕЕС.

Кожна регіональна ЕЕС може працювати ізольовано в режимі енергетичного острова або у складі національної ЕЕС (ОЕС України).

Національна ЕЕС підтримує регіональні ЕЕС узгодженими обсягами маневрових і резервних потужностей та забезпечує постачання електроенергії підприємствам промислової, будівельної, транспортної та іншим видам економічної діяльності, які мають національне значення і не приєднуються до регіональних ЕЕС. Аналіз тижневих графіків обсягів споживання електроенергії, спрямованих на життєзабезпечення регіонів та на економічну діяльність в Україні показує їхню схожу добову мінливість (рис. 3), але помітну

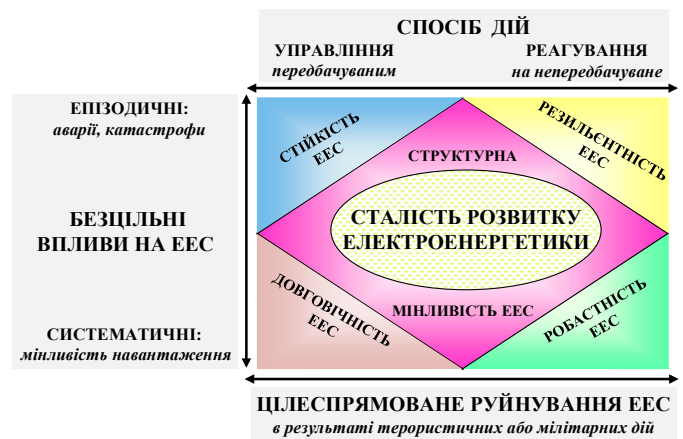


Рис. 1

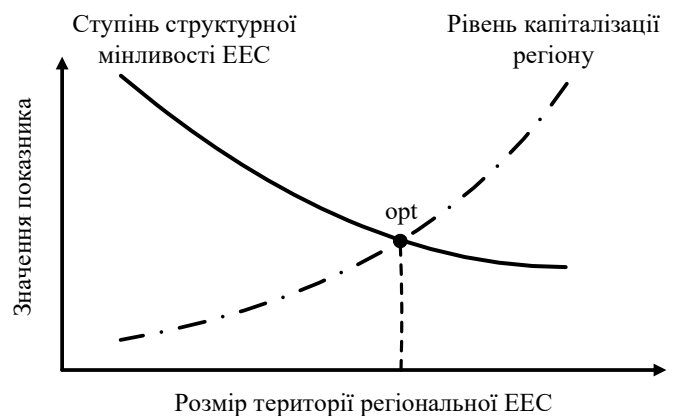


Рис. 2

різницю в динаміці обсягів споживання електроенергії, спрямованих на економічну діяльність в робочі та вихідні дні. Також помітними є розбіжності в обсягах споживання електроенергії, спрямованих на життєзабезпечення окремих регіонів та, відповідно, на їхню економічну діяльність (рис. 4). Тому, особливості споживання електроенергії в регіонах необхідно враховувати під час планування розвитку регіональних ЕЕС та їхньої взаємодії з національною ЕЕС.

На рис. 3 показано тижневі графіки споживання електроенергії населенням, житлово-комунальними господарствами та сільськогосподарським виробництвом (графік синього кольору), а також підприємствами промислової, будівельної, транспортної та інших видів економічної діяльності (графік чорного кольору) в Україні у січні 2019 року.

Структуру обсягів споживання електроенергії в Україні в цілому та в окремих регіонах у січні 2019 року показано на рис. 4 у відсотках.

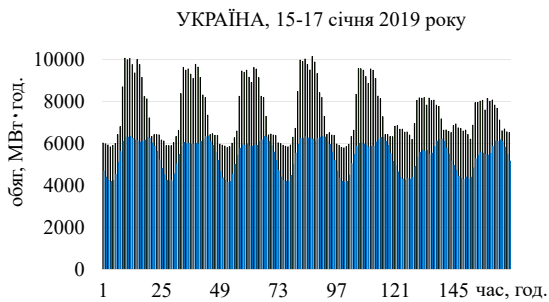


Рис. 3

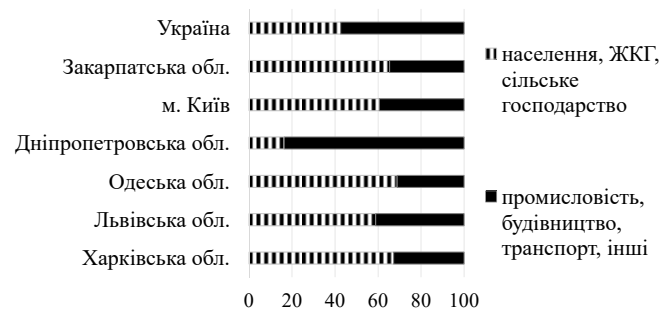


Рис. 4

Якщо в умовах відсутності мілітарних загроз національна ЕЕС забезпечує підтримку регіональних ЕЕС узгодженими обсягами маневрових і резервних потужностей, то у випадках руйнування окремих регіональних ЕЕС національна ЕЕС, а також сусідні регіональні ЕЕС разом забезпечують нагальні потреби потерпілих регіонів в обсягах електроенергії, достатніх для споживання населенням, житлово-комунальними господарствами, транспортом та сільським господарством (рис. 5). Зазначимо, що організація такої оперативної взаємодії національної ЕЕС та регіональних ЕЕС можлива лише в структурно мінливій ЕЕС, яка зберігає властивості сталого функціонування та розвитку в складних умовах терористичних та/або мілітарних загроз.

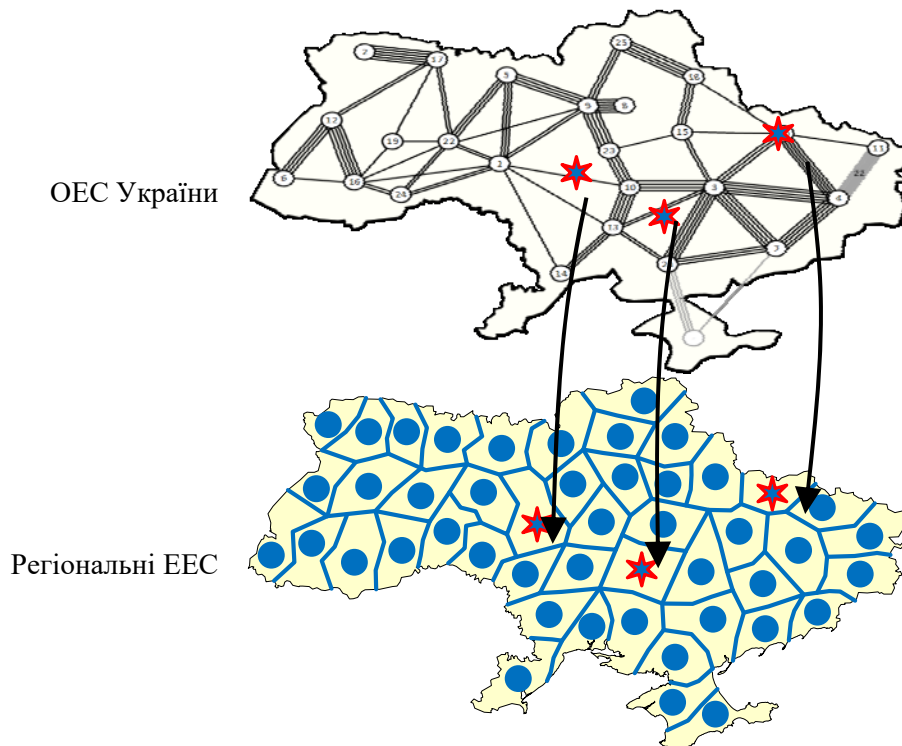


Рис. 5

Можливості застосування в структурно мінливій ЕЕС діючих організаційно-технологічних та технічних рішень проблем стійкості, резильентності, робастності та довговічності існуючих ЕЕС мають бути предметом окремого дослідження, яке необхідно виконувати на етапі планування розвитку електроенергетики.

Взаємодію ОЕС України та регіональних ЕЕС в умовах цілеспрямованого руйнування трьох регіональних ЕЕС, позначених зірками, зображено на рис. 5. Покриття дефіциту електроенергії в зруйнованих регіональних ЕЕС забезпечують національна ЕЕС та сусідні вцілілі регіональні ЕЕС, позначені кругами в межах своїх територій.

В структурно мінливій ЕЕС України мають діяти єдині правила поведінки всіх енергетичних компаній як учасників ринку, які взаємодіють на національному та на регіональних рівнях. Для організації такої взаємодії необхідно застосовувати механізми декомпозиції торговельних площадок [11]. Схема взаємодії торговельних площадок в умовах декомпозиції ринку електроенергії (РЕЕ) показана рис. 6.



Рис. 6

Декомпозиція торговельних площадок передбачає формування розподіленого ринку електроенергії у складі ринку електроенергії верхнього рівня (РЕЕ-В) та регіональних ринків електроенергії (РЕЕ-Р) і організацію взаємодії між ними. На кожній торговельній площадці РЕЕ-Р здійснюється як торгівля електроенергією, виробленою у відповідній регіональній ЕЕС для споживання населенням, житлово-комунальними господарствами, транспортом та сільським господарством, так і торгівля послугами з розподілу та постачання цієї електроенергії.

Формування рівноваги між попитом і пропозицією обсягів купівлі та продажу електроенергії на кожному регіональному ринку забезпечує формування цін на РЕЕ-Р, менших або рівних цінам на РЕЕ-В.

Якщо ціни на РЕЕ-Р не перевищують ціну на РЕЕ-В, а обсяги виробництва та споживання електроенергії у регіональній ЕЕС є збалансованими, то потреби у використанні послуг з передачі цих обсягів електроенергії та їх диспетчеризації в національній ЕЕС не виникає, і тому вартість зазначених послуг є нульовою. За цих умов ціни на РЕЕ-Р будуть різними в різних регіонах, але меншими ціни на РЕЕ-В.

Якщо ціна на РЕЕ-Р не перевищує ціну на РЕЕ-В, а обсяги виробництва та споживання електроенергії в регіональній ЕЕС є такими, що формують дефіцит електроенергії, який покривається за рахунок її поставок з національної ЕЕС, то ціна на дефіцитному РЕЕ-Р буде підвищуватися та наближатися до ціни на РЕЕ-В. Якщо дефіцит електроенергії буде покриватися за рахунок її поставок з сусідніх регіональних ЕЕС, які мають профіцит обсягів виробництва електроенергії, то ціна на дефіцитному РЕЕ-Р буде змінюватися під впливом цін на сусідніх РЕЕ-Р.

Якщо ціна на РЕЕ-Р не перевищує ціну РЕЕ-В, а обсяги виробництва та споживання електроенергії в регіональній ЕЕС є такими, що формують профіцит електроенергії, то останній акцептується або сусідніми дефіцитними регіональними ЕЕС, або національною ЕЕС. Акцепт національною ЕЕС можливий лише у тому разі, якщо різниця в цінах на РЕЕ-Р та на РЕЕ-В дає змогу компенсувати витрати регіонального оператора на послугу з передачі відповідних обсягів



електроенергії та їх диспетчеризації в національній ЕЕС. За цих умов обсяги виробництва в регіональній ЕЕС будуть зменшуватися як і ціна на РЕЕ-Р.

Якщо ціна продажу електроенергії на РЕЕ-Р перевищує ціну на РЕЕ-В, то попит на електроенергію в регіональній ЕЕС задовольняється її поставками з національної ЕЕС по ціні на РЕЕ-В. При цьому не акцептуються обсяги продажу електроенергії на РЕЕ-Р з ціновою пропозицією, вищою ціни на РЕЕ-В.

Декомпозиція торговельних площадок дає можливість запровадити ринкові механізми контролю за сталістю функціонування та розвитку окремих регіональних ЕЕС з метою підтримки необхідного рівня структурної мінливості ЕЕС в цілому.

Розроблення математичних моделей регіональних ЕЕС та процесів їхньої взаємодії з ОЕС України є необхідною умовою планування сталого розвитку структурно мінливої ЕЕС. На сьогодні завершено розроблення математичної моделі регіональних ЕЕС з великими частками виробництва електроенергії установками ВЕС, СЕС та АЕС на малих модульних реакторах або міні-АЕС, що взаємодіють з системами збереження енергії. Таким чином створено інструмент планування розвитку генеруючих потужностей в перспективних регіональних ЕЕС [12].

**Висновки.** Запропонована концепція побудови структурно мінливої ЕЕС спрямована на її модернізацію та забезпечення сталого функціонування й розвитку електроенергетичної галузі. Концепція визначає шляхи досягнення трьох цілей:

- стале забезпечення електроенергією населення, житлово-комунальних господарств, транспорту та сільських господарств регіонів України в умовах терористичних і мілітарних загроз;
- планування та розвиток регіональних ЕЕС, зокрема генеруючих потужностей, що використовують відновлювані джерела енергії;
- формування розподіленого ринку електроенергії та ринкових механізмів управління ЕЕС, здатних функціонувати в особливих умовах терористичних і мілітарних загроз.

1. Стійкість енергосистем. Керівні вказівки. К.: ОЕП ГРІФРЕ, 2002. 23 с.
2. Буткевич О.Ф., Кириленко О.В., Леньга О.В., Лук'яненко Л.М., Павловський В.В., Стелюк А.О., Чижевський В.В. Забезпечення стійкості енергосистем та їх об'єднань. К.: Ін-т електродинаміки НАН України, 2018. 320 с.
3. Кодекс системи передачі. Затверджено Постановою НКРЕКП № 309 від 14.03.2018. 201 с.
4. Stout S., Lee N., Cox S., Elsworth J., Leisch J. Power sector resilience planning guidebook. U.S. Department of Energy's NREL and USAID. 2019. 82 p. URL: <https://www.nrel.gov/docs/fy19osti/73489.pdf> (date accessed at 25.05.2023).
5. Stirling A. From Sustainability, through Diversity to Transformation: towards more reflexive governance of technological vulnerability. *Vulnerability in Technological Cultures: new directions in research and governance*. MIT Press, 2014. Pp. 305–332.
6. Protecting Electricity Networks from Natural Hazards. Organization for Security and Co-operation in Europe (OSCE), 2016. 124 p. URL: <https://www.osce.org/secretariat/242651> (date accessed at 25.05.2023).
7. Lei S., Wang C., Hou Y. Power Grid Resilience against Natural Disasters: Preparedness, Response, and Recovery. Wiley-IEEE Press, 2023. 336 p. URL: <https://www.wiley.com/en-ae/Power+Grid+Resilience+against+Natural+Disasters%3A+Preparedness%2C+Response%2C+and+Recovery-p-9781119801498> (date accessed at 25.05.2023).
8. Behnert M., Bruckner T. Causes and effects of historical transmission grid collapses and implications for the German power system. *Research Report*. Beiträge des Instituts für Infrastruktur und Ressourcenmanagement. 2018. No 3. 17 p. URL: <https://www.econstor.eu/handle/10419/190501>. (date accessed at 25.05.2023).
9. Mitoulis S.-A., Argyroudis S., Panteli M., Fuggini C., Valkaniotis S., Hynes W., Linkov I. Conflict-resilience framework for critical infrastructure peacebuilding. *Sustainable Cities and Society*. 2023. Vol. 91. 104405. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2023.104405>.
10. НЕК Укренерго. Телеграм. 2022. URL: <https://t.me/Ukrenergo/1725> (date accessed at 25.05.2023).
11. Saukh S., Borysenko A. Modelling of market equilibrium on the basis of Smart Grid market system decomposition. Proc. 7th International Conference on *Energy Smart Systems*. Kyiv, Ukraine, 12-14 May, 2020. Pp. 358–362. DOI: <https://doi.org/10.1109/ESS50319.2020.9160333>.
12. Saukh S., Borysenko A. Mathematical Model of a Local Grid with Small Modular Reactor NPPs. *Nuclear & Radiation Safety*. 2022. No 1. Pp. 44–52. DOI: [https://doi.org/10.32918/nrs.2022.2\(94\).05](https://doi.org/10.32918/nrs.2022.2(94).05).

## CONCEPT OF BUILDING A STRUCTURALLY VARIABLE POWER SYSTEM OF UKRAINE

S.Ye. Saukh

G.E. Pukhov Institute for Modelling in Energy Engineering of the National Academy of Sciences of Ukraine,  
15, General Naumov Str., Kyiv, 03164, Ukraine, e-mail: [ssaukh@gmail.com](mailto:ssaukh@gmail.com)

*To support the sustainable functioning and development of the energy sector in the conditions of terrorist and military threats, the concept of building a structurally variable electric power system (EPS) is proposed. Structural variability is defined as the ability of the EPS to reproduce such a variety of subsystems and electrical connections between them, which enables the operator to manage the structure of the EPS and, in this way, ensure the stable operation of the electric power industry in conditions of purposeful destructive actions. The concept of a structurally changing EPS is a strategy for anticipating challenges and threats to the sustainable functioning and development of the electric power industry. In order to build a structurally variable EPS, it is proposed to create regional EPSs with their own capacities for production, storage, distribution and supply of electricity in volumes sufficient for consumption by the population, housing and communal services, transport and agriculture within each region. The establishment of the territorial dimensions of individual subsystems, i.e. regional EPS, is determined on the basis of a compromise between the necessary number of such subsystems and connections between them, which ensure the desired degree of variability of the EPS, and the capitalization levels of the regions sufficient to support investment and operating costs for the corresponding regional EPS. It is assumed that the national EPS supports the regional EPS with agreed amounts of maneuvering and reserve capacities and ensures the supply of electricity to enterprises of industrial, construction, transport and other types of economic activity that are of national importance and do not join the regional EPS. In cases of destruction of individual regional power plants, the national power plant, as well as undamaged neighboring regional power plants, together provide the electricity needs of the affected regions. In the structurally variable EPS, uniform rules of behavior of all energy companies as market participants interacting at the national and regional levels should apply. For the organization of such interaction, it is proposed to apply the decomposition of trading platforms and form a distributed electricity market from interconnected upper-level electricity market and regional electricity markets. References 12, figures 6.*

**Keywords:** sustainability, structural variability, stability, robustness, resilience, durability.

1. Stability of energy systems. Guidelines. Kyiv: OEP GRIFRE, 2002. 23 p. (Ukr)
2. Butkevich O.F., Kirylenko O.V., Lenga O.V., Lukyanenko L.M., Pavlovsky V.V., Stelyuk A.O., Chizhevskiy V.V. Ensuring the stability of energy systems and their associations. Kyiv: Instytut Elektrodynamiky Natsionalnoi Akademii Nauk Ukrainy, 2018. 320 p. (Ukr)
3. Transmission System Code. Approved by Resolution of the NKREKP. No 309. 14.03.2018. 201 p. (Ukr)
4. Stout S., Lee N., Cox S., Elsworth J., Leisch J. Power sector resilience planning guidebook. U.S. Department of Energy's NREL and USAID. 2019. 82 p. URL: <https://www.nrel.gov/docs/fy19osti/73489.pdf> (date accessed at 25.05.2023).
5. Stirling A. From Sustainability, through Diversity to Transformation: towards more reflexive governance of technological vulnerability. *Vulnerability in Technological Cultures: new directions in research and governance*. MIT Press, 2014. Pp. 305–332.
6. Protecting Electricity Networks from Natural Hazards. Organization for Security and Co-operation in Europe (OSCE), 2016. 124 p. URL: <https://www.osce.org/secretariat/242651> (date accessed at 25.05.2023).
7. Lei S., Wang C., Hou Y. Power Grid Resilience against Natural Disasters: Preparedness, Response, and Recovery. Wiley-IEEE Press, 2023. 336 p. URL: <https://www.wiley.com/en-ae/Power+Grid+Resilience+against+Natural+Disasters%3A+Preparedness%2C+Response%2C+and+Recovery-p-9781119801498> (date accessed at 25.05.2023).
8. Behnert M., Bruckner T. Causes and effects of historical transmission grid collapses and implications for the German power system. *Research Report*. Beiträge des Instituts für Infrastruktur und Ressourcenmanagement. 2018. No 3. 17 p. URL: <https://www.econstor.eu/handle/10419/190501>. (date accessed at 25.05.2023).
9. Mitoulis S.-A., Argyroudīs S., Panteli M., Fuggini C., Valkaniotis S., Hynes W., Linkov I. Conflict-resilience framework for critical infrastructure peacebuilding. *Sustainable Cities and Society*. 2023. Vol. 91. 104405. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2023.104405>.
10. NEK Ukrenergo. Telegram. 2022. URL: <https://t.me/Ukrenergo/1725> (date accessed at 25.05.2023).
11. Saukh S., Borysenko A. Modelling of market equilibrium on the basis of Smart Grid market system decomposition. Proc. 7th International Conference on *Energy Smart Systems*. Kyiv, Ukraine, 12-14 May, 2020. Pp. 358-362. DOI: <https://doi.org/10.1109/ESS50319.2020.9160333>.
12. Saukh S.Ye., Borysenko A.V. Mathematical Model of a Local Grid with Small Modular Reactor NPPs. *Nuclear & Radiation Safety*. 2022. No 1. Pp. 44–52. DOI: [https://doi.org/10.32918/nrs.2022.2\(94\).05](https://doi.org/10.32918/nrs.2022.2(94).05)

Надійшла 21.06.2023