

ОПТИМІЗАЦІЯ ГРАФІКІВ ПОГОДИННИХ ВІДКЛЮЧЕНЬ І МОНІТОРИНГ ЇХ ВИКОНАННЯ ОПЕРАТОРОМ СИСТЕМИ РОЗПОДІЛУ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ

Вінницький національний технічний університет

Запропоновано комплексний підхід для формування та реалізації заходів з обмеження електропостачання в умовах дефіциту генерованої потужності в енергосистемі України, що зумовлений військовими діями. Запропоновано програмну реалізацію модулів планування графіків погодинних відключень абонентів (ГПВ), реєстрації дій диспетчерів оператора системи розподілу (ОСР) щодо реалізації ГПВ, графічного відображення ГПВ для інформування населення, внутрішнього контролю за виконанням ГПВ на основі даних автоматизованої системи комерційного обліку електроенергії (АСКОЕ). Розроблено метод та програму оптимізації ГПВ, що забезпечує рівномірність обмеження електропостачання споживачів. Обсяг обмеження визначався співвідношенням прогнозованого електроспоживання та граничного навантаження, доведеного Національною енергокомпанією. Для пошуку оптимального розв'язку використано такі критерії: точність дотримання граничного навантаження має бути максимальною, тривалість відключень окремих абонентів має бути мінімальною, рівномірність часу відключень окремих абонентів має бути максимальною. Для уможливлення практичної реалізації оптимальних рішень було враховано низку обмежень, зокрема наявність споживачів критичної інфраструктури та необхідність підтримання їх резервного живлення, задану періодичність відключень для комунально-побутових споживачів, відмінність рівнів економічних наслідків припинення електропостачання для різних регіонів, поточний стан (поступове зменшення ресурсу) комутаційного обладнання підстанцій розподільних електромереж та ін. Для прогнозування навантаження споживачів застосовано ансамблевий метод Random Forest. Для визначення вагових коефіцієнтів складових цільової функції застосовано методи експертних оцінок та аналізу чутливості. Для пошуку оптимуму використано метод оптимізованого перебору варіантів зі зважуванням. Ефективність запропонованих методів та алгоритмів підтверджено під час промислової експлуатації комплексу програм.

Ключові слова: обмеження електропостачання, графіки погодинних відключень, багатофакторна оптимізація, аналіз чутливості.

Вступ

Повномасштабна військова агресія російської федерації, розпочата 24 лютого 2022 року, мала значний негативний вплив на енергетичний сектор України [1-4]. Через економічну та гуманітарну важливість об'єкти енергетичної інфраструктури стали одними з першочергових цілей для російської армії. Станом на 20 грудня 2022 року росія окупувала, пошкодила або зруйнувала близько 50% встановлених енергетичних потужностей України. Було зруйновано тисячі кілометрів електричних, газових і теплових мереж, трансформаторних підстанцій та інших об'єктів інфраструктури. Через руйнування підприємств, захоплення територій, переселення значної частки населення споживання електроенергії скоротилося на 30-35% порівняно з 2021 р.

Після цілеспрямованих ракетних обстрілів української енергосистеми, які розпочалися 10 жовтня 2022 р., мільйони споживачів електроенергії були тимчасово відключені від електропостачання через бойові дії або віялові відключення. Станом на кінець листопада 2022 року оціночні збитки, завдані українському енергетичному сектору, становили щонайменше \$9,1 млрд. Однак, враховуючи відсутність повної інформації про енергетичні об'єкти на тимчасово окупованих територіях, а також чинні обмеження щодо публікування інформації про руйнування енергооб'єктів, реальні збитки, завдані об'єктам енергетичної інфраструктури країни є значно більшими.

Таким чином, сформувалися умови, коли наявна енергетична інфраструктура не відповідає поточному електроспоживанню. Темпи відновлення пошкодженої інфраструктури і темпи її повторного руйнування не залишають надії на те, що операційна

безпека електропостачання буде забезпечена. Залучення всіх наявних резервів, включно з аварійною допомогою від ENTSO-E не може гарантувати покриття електроспоживання енергосистеми України, особливо в осінньо-зимовий період. Тому для збереження стійкої синхронної роботи енергосистеми України й можливості забезпечення електропостачання споживачів критичної інфраструктури, військового та військово-промислового комплексу Національної енергокомпанією (НЕК) «Укренерго» впроваджуються обмежувальні заходи: графіки погодинних відключень (ГПВ), графіки аварійних відключень (ГАВ), спеціальні графіки аварійних відключень (СГАВ). Графіки аварійних відключень вводяться у виключних випадках. Відповідно до ГАВ та СГАВ споживачі відключаються від енергосистеми великими масивами (на рівні підстанції 110 кВ і вище), коли іншими засобами стабілізувати роботу енергосистеми не вдається. Основним засобом коригування навантаження для забезпечення стійкої роботи енергосистеми та підтримання резерву маневрових потужностей є планування та впровадження ГПВ.

Отже, *метою досліджень*, результати яких висвітлені у цій роботі, є розроблення методів та програмних засобів для планування ГПВ, інформування споживачів, реєстрування та контролю дій диспетчерів оператора системи розподілу (ОСР) АТ «Вінницяобленерго».

Результати дослідження

Починаючи з лютого 2022 року через руйнування енергогенерувальної та мережевої інфраструктури енергетична система України відчувала постійний дефіцит потужності, особливо маневрового генерування (гідро- та теплових електростанцій). Особливо ситуація загострилася у вересні-жовтні 2022 року, коли через масовані ракетно-бомбові удари було зруйновано значну частину теплових електростанцій та системних підстанцій. Наслідком чергової атаки був повний блекаут енергосистеми України 23 листопада 2022 року.

Досвід роботи енергосистеми в таких умовах призвів до розроблення та впровадження дієвих заходів, які забезпечили її стійкість до цього часу, не зважаючи на постійні масовані ракетно-дронові атаки ворога. Одним з таких заходів є вивільнення резервів маневрового генерування НЕК «Укренерго» шляхом введення погодинних лімітів на потужність споживання ОСР та запровадження ними графіків погодинних відключень.

Обсяги відключення споживачів ОСР визначаються виключно поточним електроспоживанням та доведеними обмеженнями з боку НЕК «Укренерго» (табл. 1). Зростання споживання електроенергії в осінньо-зимовий період року очевидно призводить до зростання обсягів та тривалості обмеження споживачів.

Таблиця 1 – Залежність тривалості обмеження електропостачання споживачів ОСР в залежності від доведених обмежень потужності споживання

Дата	00:00-07:00			07:00-24:00			Середній час за добу без електропостачання, хвилин	Середній час за добу без електропостачання, год./хв.
	Доведений ліміт від НЕК "Укренерго", МВт	Максимальне споживання, МВт	Дефіцит потужності, %	Доведений ліміт від НЕК "Укренерго", МВт	Максимальне споживання, МВт	Дефіцит потужності, %		
03.01.2023	-	305	-	365	398	8%	34	0 год 34 хв
04.01.2023	-	367	-	371	515	28%	95	1 год 35 хв
05.01.2023	-	358	-	371	572	35%	249	4 год 9 хв
06.01.2023	-	334	-	377	428	12%	243	4 год 3 хв
07.01.2023	-	321	-	377	415	9%	3	0 год 3 хв
08.01.2023	-	305	-	375	525	29%	84	1 год 24 хв
09.01.2023	-	428	-	386	650	41%	507	8 год 27 хв
10.01.2023	278	436	36%	360	676	47%	781	13 год 1 хв
11.01.2023	286	487	41%	370	677	45%	818	13 год 38 хв
12.01.2023	285	401	29%	364	642	43%	809	13 год 29 хв
13.01.2023	-	462	-	367	622	41%	623	10 год 23 хв
14.01.2023	-	507	-	365	568	36%	686	11 год 26 хв
15.01.2023	228	399	43%	324	659	51%	674	11 год 14 хв
16.01.2023	248	370	33%	339	608	44%	700	11 год 40 хв

Під час планування ГПВ слід враховувати, що припинення електропостачання зазвичай призводить до припинення, або зниження ефективності функціонування промислового, комунально-побутового та інших секторів економіки. Крім того, негативно впливає на соціальну сферу. Тож для забезпечення максимального ефекту від запровадження ГПВ крім максимальної точності виконання доведених обмежень по ОСР слід враховувати й додаткові фактори. Так, для забезпечення мінімальних збитків для ОСР та мінімізації соціальної напруженості, обсяги та тривалість обмежень, а також невідпуск електроенергії споживачам мають бути мінімально-можливими. Крім того, встановлено, що основною причиною зростання соціальної напруженості є нерівномірність часу відключень для різних абонентів. Ця нерівномірність часто сприймається гостріше ніж зростання тривалості відключень. Тож мінімізація нерівномірності була обрана одним з основних критеріїв ефективності ГПВ.

Для можливості практичної реалізації ГПВ під час їх планування необхідно враховувати особливості функціонування промисловості, міського господарства, транспортної інфраструктури тощо. Тож у постановку задачі було введено низку обмежень, зокрема:

– доведені обмеження електроспоживання змінюються протягом доби (рис. 1). Отже, необхідно забезпечити можливість планування різних обсягів відключення для різних часових інтервалів;

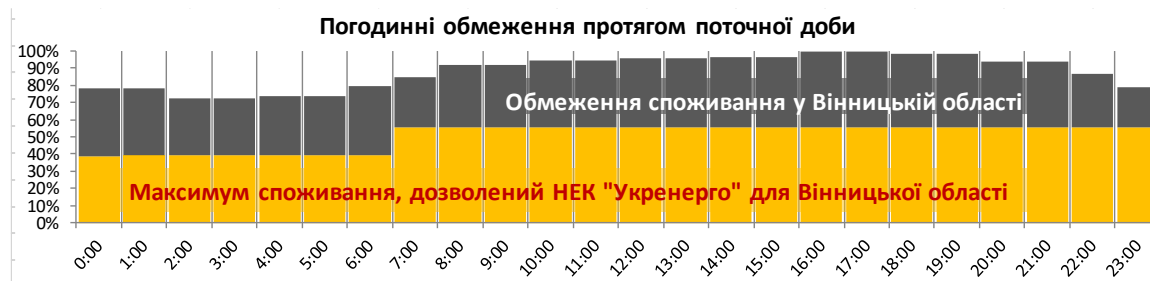


Рис. 1 – Приклад графіка навантаження абонентів ОСР та його обмеження з боку НЕК «Укренерго»

– графіки відключення повинні мати чітку періодичність, щоб абонент мав можливість планувати свої дії (рис. 2). Випадкові зміни у графіку можуть бути лише у бік зменшення тривалості відключення;

– тривалість подачі електроенергії не повинна бути меншою за 2 години поспіль.

Зменшення тривалості припустиме лише у разі накладання аварійних ситуацій на ГПВ, або введення графіків аварійних відключень чи СГАВ;

– графіки відключення для заданої групи абонентів мають періодично коригуватися для того, щоб відключення не припадали постійно на «критичні» години: з 06:00 до 10:00 та з 18:00 до 22:00;

– з переліку абонентів ОСР, що підлягають плановому відключенню, необхідно вилучити споживачів, які згідно рішення Обласної військової адміністрації належать до підприємств й установ критичної інфраструктури;

– враховуючи, що відключення груп абонентів здійснюється за допомогою вимикачів ліній 20-6 кВ, які відходять від розподільних пристроїв підстанцій 110(35)/20-6 кВ, наявність на лінії хоча б одного споживача критичної інфраструктури забезпечує іншим споживачам імунітет до планового відключення. Винятком є абоненти критичної інфраструктури, які мають резервне живлення у вигляді генераторів, або сонячних електростанцій з накопичувачами енергії;

– слід враховувати відмінність економічних наслідків припинення електропостачання для різних підприємств та установ, відмінність соціальних наслідків для різних абонентів. Наприклад слід виділяти в окрему категорію лінії, що забезпечують живлення будинків з електроопаленням та електроплитами. Слід враховувати рівень впливу на суспільну думку різних районів області;

– слід враховувати поточний стан та залишковий ресурс комутаційного обладнання підстанцій розподільних електромереж. Запровадження ГПВ збільшує кількість спрацювань такого обладнання в тисячі разів, що призводить до швидкого спрацювання його паспортного ресурсу, виходу вимикачів з ладу та неможливості повернення електропостачання абонентам відповідно до ГПВ.

Враховуючи обмежені можливості диспетчерів розподільних мереж щодо дистанційного, або ручного (персоналом підстанцій) комутування приєднань 20-6 кВ, планування та реалізація ГПВ виконується не для окремих абонентів, а для груп ліній 20-6 кВ, які об'єднуються в черги ГПВ. Черги поділяються на підчерги для досягнення вищої точності виконання доведених обмежень на споживання електроенергії. Наприклад, якщо окрема черга ГПВ об'єднує споживачів загальною максимальною потужністю 9 МВт, то її введення для покриття дефіциту в 5 МВт призведе до необґрунтованого недовідпуску електроенергії, збільшення тривалості відключення абонентів та збитків для ОСР. Якщо в такій черзі виділити 3 підчерги по 3 МВт, то покриття зазначеного дефіциту двома підчергами з трьох зменшить негативні наслідки ГПВ, адже частина абонентів не втратить живлення. Таким чином, доцільно всі лінії 20-6 кВ, які не живлять абонентів критичної інфраструктури поділити на шість черг ГПВ (рис. 2), кожен з яких поділити на 3 підчерги (рис. 3).

Для оптимізації графіка планових відключень необхідно визначити стан кожної з 18 підчерг (рис. 3) на кожну годину доби для кожної структурної одиниці ОСР з урахуванням наведених вище критеріїв оптимальності та обмежень.

Черги	Тривалість відключень з 01.01.2023, годин	Години														Очікувана тривалість відключень на кінець доби, годин	
		00:00	02:00	04:00	06:00	08:00	10:00	12:00	14:00	16:00	18:00	20:00	22:00	24:00			
		02:00	04:00	06:00	08:00	10:00	12:00	14:00	16:00	18:00	20:00	22:00	24:00				
1 черга	257,5		42%												13%		272,3
2 черга	257,8		33%	42%											13%		272,5
3 черга	256,8	96%	92%		54%	46%						92%					271,3
4 черга	257,0		92%		46%	58%											271,4
5 черга	257,2	58%	63%	96%	83%		96%	88%	92%						13%		272,0
6 черга	257,1	25%	54%				83%	96%	96%	92%		96%			96%	13%	271,7

Рис. 2 – Приклад звіту про виконання графіка погодинних відключень на рівні ОСР



Рис. 3 – Приклад звіту про виконання графіка погодинних відключень на рівні окремого адміністративного району

З формулювання постановки задачі та активних обмежень видно, що це задача нелінійної, багатофакторної оптимізації, з дискретними оптимізованими змінними. Враховуючи дискретність змінних та відносно невелику їх кількість для вирішення задачі було використано метод оптимізованого перебору зі зважуванням.

Для забезпечення чіткої періодичності відключень та з урахуванням мінімально-допустимої тривалості увімкнення електропостачання в 2 години, на кожному двогодинному інтервалі ГПВ призначається основна та додаткові черги. Наприклад, на рис. 2 для інтервалу 00:00-02:00 основною є черга 3, а додатковими 4-6. За наявності завдання на обмеження залучається основна черга. Якщо її не достатньо, залучаються додаткові. Порядок їх залучення визначається потужністю та тривалістю попередніх відключень кожної з них. Вага параметрів потужності та тривалості відключення для поточного кроку визначається на підставі аналізу чутливості цільової функції. Таким чином забезпечується адаптивність залучення черг до заданого обсягу розвантаження з підтриманням мінімальної тривалості відключення абонентів.

Враховуючи вплив рішення щодо введення черги чи підчерги ГПВ протягом певної години, на рішення для наступних годин та загальний критерій оптимальності (рівномірність тривалості відключення підчерг на кінець доби), перебір варіантів починається з «критичних» ранішніх та вечірніх годин так, щоб протягом суміжних діб відключення в ці періоди за можливості не повторювалися.

Для зменшення тривалості відключення абонентів певної підчерги ГПВ протягом доби, після завершення формування графіка здійснюється додатковий прохід під час якого для кожного годинного інтервалу оцінюються всі доступні комбінації підчерг та оцінюється відповідність їх потужності заданому обмеженню, а також оцінюється рівномірність тривалості відключення підчерг для прийнятого рішення і комбінації, яка розглядається. Якщо певне рішення виявиться кращим, воно приймається як остаточне.

Формування ГПВ виконується на добу наперед після отримання обмежень на споживання від НЕК «Укренерго». Таким чином для оптимізації ГПВ необхідно мати інформацію щодо сумарного графіка споживання ОСР на наступну добу. Для прогнозування таких графіків себе добре зарекомендували методи регресійного аналізу числових рядів, зокрема комбінація методів ARIMA (Autoregressive Integrated Moving Average) [5]. Однак застосування ГПВ спотворює реальну картину електроспоживання і традиційні методи виявляються не ефективними. Тому для прогнозування графіка споживання на наступну добу було використано ансамблевий метод машинного навчання Random Forest.

Для навчання моделі використовувалися ретроспективні дані, які містили інформацію про зафіксовані погодинні графіки електроспоживання та реалізовані диспетчерами ГПВ,

перераховані у значення сумарної потужності. Оптимальна глибина ретроспективи не перевищувала 3 місяців, що зумовлено значною відмінністю характеру обмежень, що накладаються на сумарне електроспоживання, а також неможливістю отримання «чистих» даних без впливу ГПВ. В якості додаткової опорної інформації використано ретроспективу електроспоживання відповідних періодів коли ГПВ не запроваджувалися. Ці дані підвищують якість прогнозу підсилюючи вплив природної зміни характеру електроспоживання ОСР протягом року.

Інформування абонентів щодо ГПВ на наступну добу виконується в кількох формах. Одна з них, це автоматичне формування та викладення на сайті ОСР графіків відключень у вигляді наведених на рис. 2 для компанії в цілому, та у вигляді рис. 3 – для окремого адміністративного району. Графік на рис. 2 дає змогу визначити періоди часу, протягом яких відключення будуть, або не будуть виконуватися з високою імовірністю для черги, до якої прив'язано адресу абонента. Графік на рис. 3 дає детальну інформацію щодо часу й тривалості відключень конкретної підчерги, до якої прив'язано адресу абонента у відповідному населеному пункті. На графіку відображаються лише сині та білі області, які свідчать, відповідно, про планове відключення, або наявність електропостачання.

За підсумками доби, що минула параметри графіків відключень (рис. 3) уточнюються. Зокрема деталізується інформація про позапланове постачання електроенергії (жовті області), дійсну тривалість і причини відключень абонентів: відключення через впровадження ГПВ, впровадження графіка аварійних відключень, СГАВ, або відключення пов'язане з аварією в електромережах ОСР. Крім того, окремими програмними модулями отримуються дані комерційного обліку електроенергії по лініях 20-6 кВ і перевіряється відповідність між графіками відпуску електроенергії по них та підтвердженими диспетчером графіками відключень. У разі невідповідності автоматично формується звіт із зазначенням відповідальних осіб за порушення під час реалізації ГПВ.

Розроблений комплекс програмних засобів впроваджено у АТ «Вінницяобленерго», що забезпечило можливість максимально організовано пройти період значного дефіциту потужності 2022-2024 років. На даний час на основі запропонованих алгоритмів групою програмного супроводу АТ «Вінницяобленерго» реалізовано відповідні WEB-застосунки для інформаційної підтримки дій диспетчера під час планування та реалізації ГПВ.

Висновки

Відповідно до ситуації в енергетичній галузі України, що склалася через масовані ракетно-дронові удари по електростанціях та мережевій інфраструктурі, актуальною стала задача планування та впровадження графіків погодинних відключень абонентів ОСР для забезпечення стійкості та синхронної роботи енергосистеми України.

В роботі наведено результати вирішення комплексної задачі, пов'язаної з оптимізацією, інформуванням та контролем впровадження ГПВ. Враховуючи особливості постановки задачі оптимізації ГПВ для її розв'язання було використано метод оптимізованого перебору варіантів з наступним зважуванням. Встановлено, що повторний прохід оптимізованим графіком зі зважуванням прийнятих рішень забезпечує зменшення тривалості відключень без погіршення точності виконання обмежень за потужністю споживання ОСР.

Для прогнозування погодинного графіка сумарного навантаження на добу наперед було застосовано метод Random Forest. За результатами практичних експериментів встановлено, що оптимальною глибиною ретроспективи для прогнозування на добу наперед є 3 місяці. Використання в якості опорних даних ретроспективи електроспоживання у періоди коли ГПВ не запроваджувалися, підвищують якість прогнозування.

Розроблені методи та алгоритми було впроваджено в промислову експлуатацію в АТ «Вінницяобленерго», а також покладено в основу комплексу WEB-застосунків для

інформаційної підтримки дій диспетчера під час планування та реалізації ГПВ.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Task Force, “*Ukrainian energy sector e valuation and damage assessment – I (as of August 24, 2022)*”, 2022, https://www.energycharter.org/fileadmin/DocumentsMedia/Occasional/20220829_UA_sectoral_evaluation_and_damage_assessment_final.pdf
- [2] Task Force, “*Ukrainian energy sector evaluation and damage assessment – II (as of September 24, 2022)*”, 2022, https://www.energycharter.org/fileadmin/DocumentsMedia/Occasional/2022_09_30_UA_sectoral_evaluation_and_damage_assessment_Version_II.pdf
- [3] Task Force, “*Ukrainian energy sector e valuation and damage assessment – III (as of October 24, 2022)*”, 2022, https://www.energycharter.org/fileadmin/DocumentsMedia/Occasional/2022_10_24_UA_sectoral_evaluation_and_damage_assessment_Version_III.pdf
- [4] Task Force, “*Ukrainian energy sector evaluation and damage assessment – IV (as of November 24, 2022)*”, 2022, https://www.energycharter.org/fileadmin/DocumentsMedia/Occasional/2022_11_24_UA_sectoral_evaluation_and_damage_assessment_Version_IV.pdf
- [5] Box, G. E. P., Jenkins, G. M., & Reinsel, G. C. *Time Series Analysis: Forecasting and Control*. John Wiley & Sons. (2015).
- [6] Breiman, L. *Random Forests*. *Machine Learning* 45, 5–32 (2001). <https://doi.org/10.1023/A:1010933404324>

Кулик Володимир Володимирович — д-р техн. наук, доцент, професор кафедри електричних станцій і систем, e-mail: kulyk.v.v@vntu.edu.ua
Вінницький національний технічний університет.

Optimization of hourly outage schedules and monitoring of their implementation by the electricity distribution system operator

Vinnitsya National Technical University

An integrated approach is proposed for the formation and implementation of measures to limit power supply in the conditions of a shortage of generated power in the power system of Ukraine caused by military operations. The software implementation of modules for planning schedules of hourly customer outages (SHO), registration of actions of dispatchers of the distribution system operator (DSO) on the implementation of SHO, graphical display of SHO for informing the population, internal control over the implementation of SHO based on data from the automated system of commercial electricity metering (ASCEM) is proposed. A method and program for optimizing the SHO was developed to ensure uniformity of power supply restrictions to consumers. The volume of the limitation was determined by the ratio of the projected electricity consumption and the maximum load, as determined by the National Energy Company. To find the optimal solution, the following criteria were used: the accuracy of compliance with the maximum load should be maximized, the duration of outages for individual customers should be minimal, and the uniformity of outages for individual customers should be maximized. To enable the practical implementation of optimal solutions, a number of constraints were taken into account, including the presence of critical infrastructure consumers and the need to maintain their backup power supply, a given frequency of outages for household consumers, different levels of economic consequences of power outages for different regions, the current state (gradual decrease in resource) of switching equipment at distribution power substations, etc. The ensemble Random Forest method was used to forecast consumer load. To determine the weighting coefficients of the components of the objective function, the methods of expert evaluation and sensitivity analysis were used. To find the optimum, the method of optimized search of options with weighting is used. The effectiveness of the proposed methods and algorithms has been confirmed during the industrial operation of the complex of programs.

Keywords: power supply constraints, hourly outage schedules, multifactor optimization, sensitivity analysis.

Volodymyr Kulyk — Associate Professor, Professor of the Department of Power Plants and Systems, e-mail: kulyk.v.v@vntu.edu.ua