

ОБҐРУНТУВАННЯ ОБЛАСТІ ВИКОРИСТАННЯ КЛАСУ НАПРУГИ 20 КВ У МІСЬКИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ УКРАЇНИ

Р.О. Буйний^{1*}, канд.техн.наук, А.В. Красножон¹, канд.техн.наук, В.В. Зорін^{2**}, докт.техн.наук,
А.О. Квицинський³, канд.техн.наук

¹⁻²Чернігівський національний технологічний університет,

вул. Шевченка, 95, Чернігів, 14035, Україна,

e-mail: buinyiroman@gmail.com,

² НТУУ «КПІ ім. І. Сікорського»,

пр. Перемоги, 37, Київ, 03056, Україна,

e-mail: vla.vla.zo@gmail.com,

³ НППР ОЕС України ДП «НЕК «Укренерго»,

вул. Дорогожицька, 11/8, Київ, 04112, Україна,

e-mail: Kvytysynskiy.AO@ua.energy

Для двопроменевої структури розподільної електричної мережі отримано цільову функцію, яка дає змогу досліджувати вплив як технічних, так і економічних параметрів на ефективність передавання електричної енергії. Під час досліджень встановлено, що застосування класу напруги 20 кВ у міських електричних мережах доцільно тільки тоді, коли вони виконані з використанням трансформаторів потужністю не менше 630 кВА та кабелів із перерізами алюмінієвих жил не менше 240 мм². Отримано аналітичні вирази та побудовано графічні залежності питомої мінімальної щільності електричних навантажень та граничної відстані між трансформаторними підстанціями від тривалості максимальних втрат, за якої доцільно споруджувати розподільну електричну мережу на напругу 20 кВ. Бібл. 6, рис. 3.

Ключові слова: електрична мережа, двопроменева структура, показники економічної ефективності, інтегральний ефект, термін окупності, цільова функція, втрати потужності.

Вступ. Останнім часом у наукових та науково-практичних виданнях постає питання щодо доцільності застосування нового для України класу напруги 20 кВ. Причому у деяких з них показується недоцільність такого класу напруги [4], а у деяких, навпаки [5]. Як у перших, так і других немає достатнього техніко-економічного обґрунтування або ж результати цих робіт викликають сумніви через недостовірність деяких показників, представлених у роботах. Слід зазначити, що у більшості робіт автори не розділяють електричні мережі (ЕМ) на «міські» та «сільські», що принципово невірно, бо структура таких ЕМ кардинально відрізняється через різну щільність електричних навантажень. Також проблемі використання класу напруги 20 кВ присвячено роботи у іноземних виданнях, зокрема [1,6], у яких також не має достатнього обґрунтування, а наведено лише деякі концептуальні загальновідомі ідеї стосовно спорудження нових електричних мереж із достатнім рівнем надійності без урахування їхніх техніко-економічних показників.

Метою статті є техніко-економічне обґрунтування доцільної області використання класу напруги 20 кВ у міських розподільних електричних мережах України.

Основні матеріали дослідження. Основним технічним показником, який характеризує ефективність електропередачі, є річні втрати електричної енергії в електричній мережі [3]

$$\Delta W = \Delta P_{\Sigma \max} \cdot \tau_{\max} + \Delta P_{\Sigma \text{XX}} \cdot 8760, \quad (1)$$

де $\Delta P_{\Sigma \max}$ – сумарні максимальні навантажувальні втрати активної потужності в лініях електропередавання (ЛЕП) та трансформаторах; $\Delta P_{\Sigma \text{XX}}$ – сумарні втрати холостого ходу в розподільних трансформаторах ЕМ; τ_{\max} – час найбільших втрат (час, протягом якого за максимального навантаження втрати електроенергії у системі електропостачання мають таке саме значення, що і за змінного навантаження протягом періоду, що розглядається (за рік)).

Складові втрати потужності у формулі (1) залежать від структури ЕМ та її параметрів. Для техніко-економічного обґрунтування розглянуто двопроменеву структуру ЕМ, яка є основною для систем електропостачання міст. Розрахункова схема одного променя з поточкорозподілом у ній показана на рис. 1. Оскільки в ЕМ відстані між трансформаторними підстанціями (ТП) є незначними, а щільність навантаження є майже однаковою, то у подальших міркуваннях прийнято однаковими перерізи кабелів на ділянках і їхні довжини, а також потужності та завантаження трансформаторів.

Підставляючи у формулу (1)

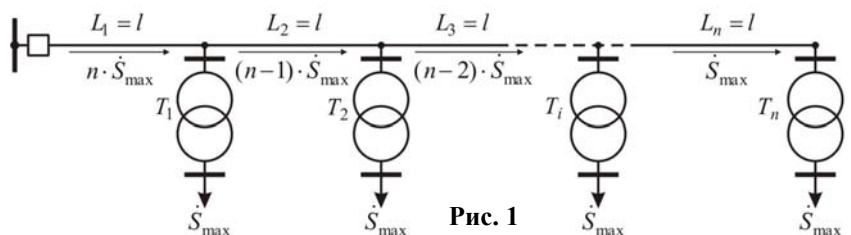


Рис. 1

загальновідомі вирази для втрат потужності у ЛЕП та трансформаторах на ділянках розрахункової схеми, отримуємо

$$\Delta W = \left(\frac{S_{\max}^2}{U^2} \cdot \frac{\rho}{F} \cdot l \cdot \frac{\sum_{m=0}^{n-1} (n-m)^2}{1000} + n \cdot \Delta P_{K3} \cdot \beta^2 \right) \cdot \tau_{\max} + n \cdot \Delta P_{XX} \cdot 8760, \quad (2)$$

де S_{\max} – максимальна розрахункова повна потужність навантаження i -ї ТП; U – номінальна напруга ЕМ; ρ – питомий опір матеріалу жили кабелю; F – переріз кабелю; l , n – відстань між ТП та їхня кількість у ЕМ відповідно; $m=0,1,2,\dots,n-1$; ΔP_{K3} , ΔP_{XX} – втрати короткого замикання та холостого ходу трансформатора; β – коефіцієнт завантаження трансформатора.

Під час переходу на більш високий клас напруги, наприклад, з 10 до 20 кВ, втрати електричної енергії зменшуються на величину

$$\delta w = \Delta W_{10} - \Delta W_{20}, \quad (3)$$

де ΔW_{10} , ΔW_{20} – річні втрати електроенергії в електричній мережі 10 та 20 кВ відповідно.

Аналіз паспортних даних трансформаторів 10/0,4 та 20/0,4 кВ показав, що втрати короткого замикання ΔP_{K3} та холостого ходу ΔP_{XX} мають деякі регресійні залежності з їхньою номінальною потужністю S_{TH}

$$\begin{cases} \Delta P_{K310} = 0,86 + 0,011 \cdot S_{TH}; & \Delta P_{XX10} = 0,18 + 0,002 \cdot S_{TH}; \\ \Delta P_{K320} = 1,14 + 0,01 \cdot S_{TH}; & \Delta P_{XX20} = 0,24 + 0,0009 \cdot S_{TH}, \end{cases} \quad (4)$$

що дозволяє розрахувати величину δw за спрощеним виразом

$$\delta w = \left[3,68 \cdot 10^{-6} \cdot S_{TH}^2 \cdot \frac{\rho}{F} \cdot l \cdot \sum_{m=0}^{n-1} (n-m)^2 + n \cdot (0,72 \cdot S_{TH} - 141) \cdot 10^{-3} \right] \cdot \tau_{\max} + n \cdot (11,51 \cdot S_{TH} - 480). \quad (5)$$

У формулі (5) також враховано те, що у режимі максимальних навантажень кожний трансформатор у двопробеневій схемі повинен бути завантажений не більше ніж на 70% ($\beta = 0,7$).

Необхідно враховувати такі технічні обмеження:

- втрату напруги в ЛЕП, яка, згідно з діючими нормами, не повинна перевищувати 8%.

Для наведеної вище розрахункової схеми було отримано загальний вираз для розрахунку втрати напруги

$$\Delta U_{\Sigma} = \frac{\beta \cdot S_{TH} \cdot \cos \varphi}{10 \cdot U^2} \cdot (r_0 + x_0 \cdot \operatorname{tg} \varphi) \cdot l \cdot \frac{1}{2} \cdot n \cdot (n-1); \quad (6)$$

- допустимий струм за нагрівом на головній ділянці кабелю $I_{\text{дон}}$, який буде обмежувати кількість ТП, підключених до двопробеневої схеми у післяаварійному режимі, визначається з нерівності

$$n < U \cdot I_{\text{дон}} / S_{TH}; \quad (7)$$

- струми термічної стійкості жил кабелів та їхніх екранів.

Згідно з діючими нормами при виборі економічного критерію для прийняття рішень рекомендується за основний показник використовувати інтегральний ефект IE_t за t років

$$IE_t = \sum_{k=1}^t \frac{E_k}{(1+D)^k} - K, \quad (8)$$

де E_k – економічний ефект у k -му році; K – капіталовкладення; D – норма дисконту.

Тоді капітальні вкладення на будівництво мережі з n ТП і КЛ будуть розраховуватися за формулою

$$K = n \cdot (C_T + C_{PY} + C_{KL} \cdot l), \quad (9)$$

де C_T – вартість трансформаторів; C_{PY} – вартість розподільних установок; C_{KL} – вартість 1 км КЛ.

Для зменшення кількості змінних у цільовій функції у роботі [2] отримано регресійні залежності вартостей трансформаторів від їхньої номінальної потужності S_{TH} та вартостей кабелів з ізоляцією зі зшитого поліетилену від перерізу їхніх жил F та екранів $F_{\text{екр}}$ для 10 та 20 кВ відповідно

$$\begin{cases} C_{T10} = 1,48 + 0,004 \cdot S_{TH}, \text{ тис.}\$; & C_{KL10} = 7,344 + 0,053 \cdot F + 0,317 \cdot F_{\text{екр}}, \text{ тис.}\$/\text{км}; \\ C_{T20} = 1,85 + 0,005 \cdot S_{TH}, \text{ тис.}\$; & C_{KL20} = 9,68 + 0,058 \cdot F + 0,31 \cdot F_{\text{екр}}, \text{ тис.}\$/\text{км}. \end{cases} \quad (10)$$

Як відомо, затрати на спорудження електричної мережі напругою 20 кВ будуть більшими, а втрати електричної енергії меншими, ніж для 10 кВ. Тому для техніко-економічних розрахунків був використаний порівняльний інтегральний ефект по відношенню до мережі з більш низьким класом напруги. Це дало змогу не враховувати у капіталовкладеннях однакові складові для мереж 10 та 20 кВ.

Електрична мережа, збудована на напрузі 20 кВ у порівнянні з 10 кВ, дасть річний економічний ефект

$$\delta E_k = E_{k20} - E_{k10} = C_0 \cdot \delta w - p_a \cdot (K_{20} - K_{10}), \quad (11)$$

де C_0 – вартість втрат 1 кВт·год електроенергії; p_a – амортизаційні відрахування.

Отже порівняльний інтегральний ефект за t років буде розраховуватися за формулою

$$\Delta E_t = \sum_{k=1}^t \frac{\Delta E_k}{(1+D)^k} - (K_{20} - K_{10}). \quad (12)$$

Формула (12) з урахуванням обмежень (6) та (7) є виразом цільової функції, яка містить як технічні, так і економічні параметри та дає змогу визначити область використання класу напруги 20 кВ.

Для отримання мінімальних щільностей електричних навантажень $p_{num.min}$, за яких доцільно застосувати клас напруги 20 кВ, у електричній мережі виділено «зону дії» ТП у вигляді кола з деяким радіусом, що складає половину відстані між сусідніми ТП – $l/2$. Знаючи потужності трансформаторів S_{TH} та відстані між ТП l , за яких доцільно споруджувати мережу на напрузі 20 кВ, за середнього коефіцієнта потужності навантажень на ТП $\cos \varphi_{сер}$ (прийнятий 0,85) отримуємо

$$p_{num.min} = 5,6 \cdot S_{TH} \cdot \cos \varphi_{сер} / \pi \cdot l^2 = 1,5 \cdot S_{TH} / l^2. \quad (13)$$

З виразу (12) можна визначити залежність граничної довжини ЛЕП між ТП від тривалості максимальних втрат τ_{max} у разі, коли є прийнятним термін досягнення однакового інтегрального ефекту (прийнятий рівним 10 рокам) для трансформаторів з потужністю S_{TH} та перерізів жил кабелів F

$$\begin{cases} l_{cp} = f(S_{TH}, F, \tau_{max}); \\ \Delta E_{10} = 0. \end{cases} \quad (14)$$

Підставляючи значення l_{cp} у формулу (13), можна отримати аналітичні вирази $p_{num.min} = f(\tau_{max})$ за різних l_{cp} , які є функцією S_{TH} та F . Залежності виду $l_{cp} = f(\tau_{max})$ та $p_{num.min} = f(\tau_{max})$ для ЕМ з трансформаторами 630 та 1000 кВА та кабелями з алюмінієвими жилами 240, 300 та 400 мм² зображені на рис. 2 та 3.

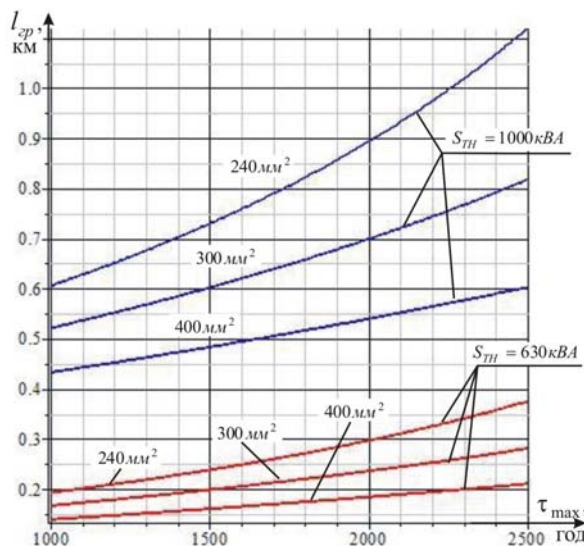


Рис. 2

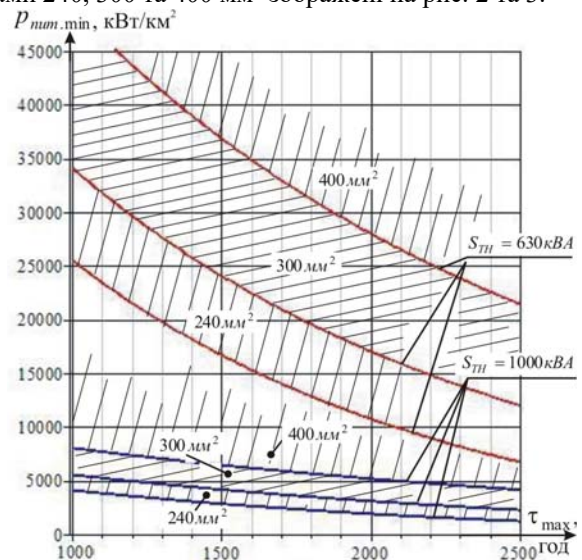


Рис. 3

Аналіз наведених вище графічних залежностей дає змогу зробити наступні висновки:

1. Застосування напруги 20 кВ у міських ЕМ може бути виправданим у разі застосування трансформаторів з одиничною потужністю 630 та 1000 кВА та кабелів з перерізом алюмінієвої жили не менше 240 мм².
2. За граничної відстані між ТП 800 м та тривалості максимальних втрат 2500 год/рік електрична мережа повинна бути побудована за класом напруги 20 кВ з трансформаторами одиничною потужністю 1000 кВА, кабелями з перерізом алюмінієвої жили не менше ніж 300 мм². При цьому мінімальна щільність електричних навантажень буде складати близько 2,5 МВт/км², що трохи перевищує середнє її значення для м. Києва, що свідчить про обмеженість застосування класу напруги 20 кВ тільки великими містами.
3. Отримана цільова функція та графічні залежності дозволяють визначати доцільність застосування класу напруги 20 кВ за будь-яких вхідних параметрів з урахуванням технічних обмежень.

1. Асташев Д.С., Бедретдинов Р.Ш., Кисель Д.А., Соснина Е.Н. Применение напряжения 20 кВ для распределительных сетей России. *Вестник НГИЭИ*. 2015. № 4(47). С. 6-9.

2. Буйний Р.О., Перепечений В.О., Зорін В.В. Регресійні залежності вартісних показників елементів електричних мереж напругою 10-35 кВ. *Вісник НТУ ХПИ*. Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. 2017. № 7 (1229). С. 18-23. DOI: <https://doi.org/10.20998/2413-4295.2017.07.03>

3. Зорін В.В., Штогрин Є.А., Буйний Р.О. Електричні мережі та системи. Ніжин: Аспект-Поліграф, 2011. 248 с.

4. Лях В.В., Палайда О.Б. Питання необхідності переходу на клас напруги 20 кВ або питання без відповідей. *Енергетика та електрифікація*. 2016. № 9-10. С. 3-4.
5. Циганенко Б.В., Кирик В.В. Лінгвістична модель критерію переведення розподільної мережі на напругу 20 кВ. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2016. № 5. С. 58-67.
6. Borsevskis O., Gavrilovs G. 20 kV Voltage Adaptation Problems in Urban Electrical Networks. URL: <http://egdk.ttu.ee/> (дата звернення: 26.09.2017.).

УДК 621.316.11

ОБОСНОВАНИЕ ОБЛАСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ КЛАССА НАПРЯЖЕНИЯ 20 КВ В ГОРОДСКИХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ

Р.А. Буйный¹, канд.техн.наук, **А.В. Красножон¹**, канд.техн.наук, **В.В. Зорин²**, докт.техн.наук, **А.А. Квицинский³**, канд.техн.наук

¹ Черниговский национальный технологический университет,

ул. Шевченко, 95, Чернигов, 14035, Украина,

e-mail: buinyiroman@gmail.com

² НТУУ «КПИ им. И. Сикорского»,

пр. Победы, 37, Киев, 03056, Украина,

e-mail: vla.vla.zo@gmail.com,

³ НПЦР ОЭС Украины ГП «НЭК «Укрэнерго»,

ул. Дорогожицкая, 11/8, Киев, 04112, Украина,

e-mail: Kvytsynskvi.AO@ua.energy

Для двухлучевой структуры распределительной сети получено целевую функцию, которая позволяет исследовать влияние технических и экономических параметров на эффективность передачи электрической энергии. Установлено, что применение класса напряжения 20 кВ в городских электрических сетях целесообразно лишь тогда, когда они выполнены на трансформаторах мощностью не менее 630 кВА и кабелях с сечением алюминиевых жил не менее 240 мм². Получены аналитические выражения и построены графические зависимости удельной минимальной плотности нагрузок и предельного расстояния между трансформаторными подстанциями от продолжительности максимальных потерь, при которых целесообразно строить распределительную сеть на напряжении 20 кВ. Библ. 6, рис. 3.

Ключевые слова: электрическая сеть, двухлучевая структура, показатели экономической эффективности, интегральный эффект, срок окупаемости, целевая функция, потери мощности.

JUSTIFICATION FOR USE OF VOLTAGE CLASS 20 KV IN URBAN ELECTRICAL NETWORKS

R.O. Buinyi¹, **A.V. Krasnozhan¹**, **V.V. Zorin²**, **A.O. Kvytsynskiy³**

¹ Chernihiv National University of Technology,

str. Shevchenka, 95, Chernihiv, 14035, Ukraine,

e-mail: buinyiroman@gmail.com,

² NTUU «I. Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»,

pr. Peremohy, 37, Kyiv, 03056, Ukraine,

e-mail: vla.vla.zo@gmail.com,

³ Research & design center for development of the IPS of Ukraine,

str. Dorohozhytska, 11/8, Kyiv, 04111, Ukraine,

e-mail: Kvytsynskvi.AO@ua.energy

For biradial power supply networks it was derived an objective function that allows to analyze the effect of technological and economic factors on the efficiency of power supply. It was found that utilizing the voltage class of 20 kV in the urban power supply networks would be efficient only when they are constructed with transformers of unit capacity 630 kVA and aluminum cables of 240 mm² or larger cross-section. Analytic expressions were derived and visualizations were created to analyze minimal specific density of electric load and maximum distance between electric substations for which construction of power supply network of 20 kV is justified as a function of allowed outage time for the network. References 6, figures 3.

Key words: power supply network, biradial structure, economic efficiency, integral effect, payback period, objective function, power loss.

1. Astashev D.S., Bedretdynov R.Sh., Kysel D.A., Sosnyina E.N. 20 kV Voltage Appling of Russian Electric Distribution Networks. *Vestnyk NHIEI*. 2015. No 4(47). Pp. 6-9. (Rus)

2. Buinyi R., Perepechenyi V., Zorin V. Regression relationships for costs of facilities in electrical power networks 10-35 kV. *Visnyk NTU KhPI. Series: New solutions in modern technologies*. 2017. No 7 (1229). Pp.18-23. DOI: <https://doi.org/10.20998/2413-4295.2017.07.03>. (Ukr)

3. Zorin V.V., Shtogryn E.A., Buinyi R.O. Electrical power networks and systems. Nizhyn: Aspekt-Poligraf, 2011. 248 p. (Ukr)

4. Liakh V.V., Palaida O.B. Questions need to move to 20 kV voltage class or question unanswered. *Enerhetyka ta elektrifikatsiia*. 2016. No 9-10. Pp. 3-4. (Ukr)

5. Tsyhanenko B.V., Kyryk V.V. Linguistic Model of Criterion of Transfer of Distributive Network on Voltage 20 kV. *Visnyk Vinnytskoho politekhnichnoho instytutu*. 2016. No 5. Pp. 58-67. (Ukr)

6. Borsevskis O., Gavrilovs G. 20kV Voltage Adaptation Problems in Urban Electrical Networks.

URL: <http://egdk.ttu.ee/> (accessed 26.09.2017).

Надійшла 02.03.2018
Остаточний варіант 18.05.2018