

для $a = 1$ можна вважати процес перезаряджання НЕ з початковими умовами $u_{20*} = 1/3$, за яких $\eta = 0,6$, $\Delta W_{2*} = 1/3$.

8. Загалом процеси безпосереднього перезаряджання лінійних НЕ з постійними узагальненими ємностями характеризуються досить низькими енергетичними показниками. Для їхнього підвищення необхідно застосувати регульовані процеси перезаряджання НЕ.

1. *Накопители энергии* / Д.А. Бут, Б.Л. Алиевский, С.Р. Мизюрин, П.В. Васюкевич. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 400 с. 2. Джента Д. *Накопление кинетической энергии* / Пер. с англ. – М.: Мир, 1988. 3. Астахов Ю.Н., Веников В.А., Тер-Газарян А.Г. *Накопители энергии в электрических системах*. – М.: Высш. шк., 1989. 4. Chan C.C., Chau K.T. *Modern Electric Vehicle Technology*. – New York: Oxford Univ. Press, 2001. – 300 p. 5. Пригожин И., Конденуди Д. *Современная термодинамика. От тепловых двигателей до диссипативных структур* / Пер. с англ. – М.: Мир, 2002. – 461 с. 6. Gao L., Dougal R., Liu S. *Power enhancement of actively controlled battery/ultracapacitor hybrid* // IEEE Trans. on Power Electronics. – 2004. – Vol. 19, No. 2. – P. 441–448. 7. Barton J., Infield D. *Energy storage and its use with intermittent renewable energy* // IEEE Trans. on Energy Conversion. – 2005. – Vol. 20, No. 1. – P. 236–243. 8. Ильинский Н.Ф., Рожанковский Ю.В., Горнов А.О. *Энергосбережение в электроприводе*. – М.: Высш. шк., 1989. – 125 с.

УДК 620.92

П.Є. Яковчук, В.Б. Цяпа*, В.І. Комаров, Д.В. Уханська**

Національний університет “Львівська політехніка”,

кафедра ОП, *кафедра ЕАП,

**кафедра ВМ

ГРАФІКИ НАВАНТАЖЕНЬ ТА СТАТИЧНА СТІЙКІСТЬ МАЛИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ

© Яковчук П.Є., Цяпа В.Б., Комаров В.І., Уханська Д.В., 2007

Проаналізовано сучасний стан використання паливних енергетичних ресурсів, графіків електричних навантажень та питання стійкості малих електростанцій. Розглянуто взаємозв'язок цих параметрів у сенсі їх впливу на оптимізацію завдань енергопостачання.

The analysis of the modern state of the use of fuels power resources load-graphs electric and question of firmness of small power-stations is conducted. Intercommunication of these parameters is considered in sense of their influence on optimization of tasks of energy supply.

Постановка проблеми. Сучасні системи енергопостачання промислових об'єктів та міст є фактично не оптимізовані загалом. Існує деяка оптимізація окремих факторів у системах електропостачання за критеріями галузевих міністерств та відомств.

Аналіз останніх досліджень. Проблеми оптимізації систем енергопостачання є досить відомі [1, 2], проте вони ще далекі до проектного вирішення. З розвитком науки і техніки цих задач стає більше і їх зміст змінюється [3].

Задачі досліджень. Враховуючи широкий спектр функцій, що впливають на оптимальний виробіток та споживання електроенергії, в цій роботі поставлена задача розглянути взаємозв'язок статичної стійкості малих електростанцій та графіки навантаження можливих спожи-

вачів. Також необхідно розглянути існуючу структуру споживання паливно-енергетичних ресурсів (ПЕР) та можливі перспективи їх змін.

Виклад основного матеріалу. На сучасному етапі раціональне і економне витрачання паливно-енергетичних ресурсів набуло величезного значення у всіх без винятку країнах. Обумовлено це насамперед тим, що подальше зростання добування і виробництва палива і енергії, пов'язано з істотним підвищенням капітальних і трудових ресурсів. Не менше значення має і той факт, що енергетична криза, яка різко загострилася в 1973–1974 рр. і охопила практично всі промислово розвинені країни і більшість країн, що розвиваються, не мають в своєму розпорядженні власних ПЕР, спричинила висунення на порядок денний питання про обмеженість ресурсів найякіснішого органічного палива, особливо нафти і природного газу. У новій енергетичній ситуації відбувається швидке зростання цін на паливо на світовому ринку. Все це, разом взяте, примушує по новому поставитись до проблеми використання ПЕР.

Дослідження, виконані в США і в інших промислово розвинених країнах, показали величезні потенційні можливості підвищення ефективності використання і економії ПЕР. Розрахунками, проведеними в міжнародних організаціях, які об'єднують промислово розвинені країни (Європейське економічне співтовариство, Міжнародне енергетичне агентство, Організація економічного співробітництва і розвитку), встановлено, що загальні втрати ПЕР в цих країнах в середньому становлять близько 70 % всього об'єму їх надходження і лише приблизно третина витрачається у кінцевих споживачів як “корисна енергія”. У абсолютних показниках це означає, що з 7 млрд. т умовного палива, витраченого в 1998 р., тільки небагато чим більше 1,8 млрд. т становили “корисну енергію”.

Втрати ПЕР відбуваються по всьому шляху, починаючи від їх добування і виробництва до кінцевого споживання. Свідченням цього можуть слугувати такі дані. За розрахунками Європейського економічного співтовариства (ЄЕС), ККД галузей паливно-енергетичного господарства країн, що входять в це співтовариство, становить: у вугільній промисловості 97 %, газовій 94 %, нафтовій 92 %, коксовій 78 %, електроенергетичній 32 %. Коефіцієнт корисного використання (ККВ) ПЕР в окремих ланках економіки на кінцевій стадії їх споживання може бути визначений з таблиці.

Коефіцієнт корисного використання паливно-енергетичних ресурсів, %

	Комунально-побутове господарство	Промисловість	Транспорт
Західна Європа	42	44	22
ЄЕС	45	55	17
Німеччина	45	55	20

У теперішній час в країнах ЄЕС промисловістю витрачається до 42 % всіх використовуваних ПЕР. Приблизно 43 % всіх витрат ПЕР в промисловості доводиться на три енергоємні галузі – чорну металургію, хімію і алюмінієву промисловість.

Чорна металургія є найбільшим промисловим споживачем ПЕР – близько 25 % всього енергоспоживання в промисловості. Можливості економії енергії в цій галузі визначаються масштабами впровадження нових, менш енергоємних технологій, об'ємами застосування металообробки і ступенем використання вторинних енергетичних ресурсів. Підраховано, що реалізація необхідних заходів в цих трьох напрямках забезпечить в умовах металургійної промисловості протягом найближчих 20 років чисту економію енергії у розмірі 28 %. За даними французьких фахівців, ця економія в умовах Франції в 1995 р. оцінюється в 20 %. Європейська Економічна Комісія ООН вважає, що в чорній металургії економія енергії в об'ємі 20–25 % можлива не тільки з технічного, але і з економічного погляду.

Другим найбільшим промисловим споживачем енергії є хімія – приблизно 15 % всього енергоспоживання в промисловості. У Нідерландах було оголошено про передбачуване зниження

середньої питомої енергоємності основної продукції хімічної промисловості на 15–20% і на 10–15 % по всій галузі. У хімічній промисловості Франції вживаються заходи, які повинні дозволити їй понизити найближчим часом енергоспоживання в галузі на 12,5 %. Загалом по хімічній промисловості країн ЄЕС можливе зниження питомої енергоємності продукції до кінця 2010 року оцінюється в 15 %.

Тому завданням розробки оптимальних систем енергопостачання необхідно надавати максимально можливу увагу [2].

Основними початковими даними під час проектування електрифікації району є, як відомо, очікувані електричні навантаження, величина і характер зміни яких визначають параметри джерел електропостачання і розподільних мереж [4].

Правильне визначення електричних навантажень має істотний вплив на техніко-економічні показники запроєктованих електроустановок. Тому цілком природно, що питанням вивчення електричних навантажень і інших режимних показників споживання електроенергії приділяється велика увага.

Якщо в промисловості електричні навантаження достатньо вивчені, то навантаження малих електростанцій фактично не досліджували. Тому електричні навантаження малих електростанцій можна розраховувати, не складаючи добових графіків навантажень споживачів і не застосовуючи багатьох різних коефіцієнтів, а за спрощеною методикою, з урахуванням коефіцієнта попиту. За цією методикою максимальна (розрахункова) потужність (P_M) визначається множенням встановленої потужності $P_{вст}$ споживачів на коефіцієнт споживання, тобто,

$$P_M = P_{вст} k_c. \quad (1)$$

Значення коефіцієнта споживання наводяться в “Керівних вказівках” залежно від величини встановленої потужності. Проте величина коефіцієнта споживання залежить також і від інших чинників характеру роботи споживачів, їх структури тощо. Тому для конкретних умов проектування необхідні уточнення.

Показники режимів електроспоживання визначаються на підставі матеріалів масових обстежень споживачів електроенергії, а також за допомогою зняття графіків електричних навантажень самописними приладами з подальшою їх обробкою методами математичної статистики. Режими електроспоживання вивчаються для кожної характерної групи споживачів, а також при їх сумісній дії [4].

Споживачі можна поділити на комунально-побутові, виробничі і споживачі місцевої промисловості. Перша група об’єднує всі навантаження з освітлення житлових будинків, адміністративних і громадських приміщень, вулиць, а також навантаження, що створюються електропобутовими приладами. До другої групи належать навантаження з освітлення виробничих приміщень, виробничі силові і теплові споживачі. Навантаження споживачів третьої групи мають промисловий характер і під час проектування повинні визначатися індивідуальним обстеженням.

Дослідження графіків навантажень як для комунально-побутової, так і для виробничої груп споживачів проводили на трансформаторних підстанціях або окремих лініях, що живлять певну групу споживачів. Графіки навантажень вивчали на об’єктах з порівняно високим ступенем електрифікації. Для більшості споживачів незалежно від характеру їх роботи ці графіки мають випадковий характер. Режимні показники графіків електричних навантажень коливаються у вельми широких межах навіть для однорідних груп споживачів.

Як показали дослідження, випадкові відхилення показників графіків (максимальна потужність, коефіцієнт заповнення тощо) за 4–7 днів вже не перевищують 10 % від середніх величин при проміжку досліджень 10–15 днів (рис. 1, а, б).

Розкид показів навантажень за годинами ($\gamma = \frac{\sigma}{p}$ де σ – середньоквадратичне відхилення навантаження від її середнього значення за декілька днів становить максимум 5–10 %, а при мінімальних навантаженнях і особливо в денний час – 8–25 %. Це свідчить про необхідність знімати графіки в часі не менше 3–4 днів.

Відхилення випадкових величин навантаження від середньої величини більш ніж за 10 днів може мати вже закономірний характер, пов'язаний з сезонністю, що особливо видно при комунально-побутових (рис. 1, а) і виробничих навантаженнях сезонних споживачів.

Щоб усунути вплив різних випадкових чинників на визначення середніх показників, графіки навантажень на підстанціях знімали протягом 7–10 діб самописними приладами. На окремих підстанціях, щоб виявити зміну показників режимів споживання електроенергії залежно від сезонів, графіки знімали протягом всього року.

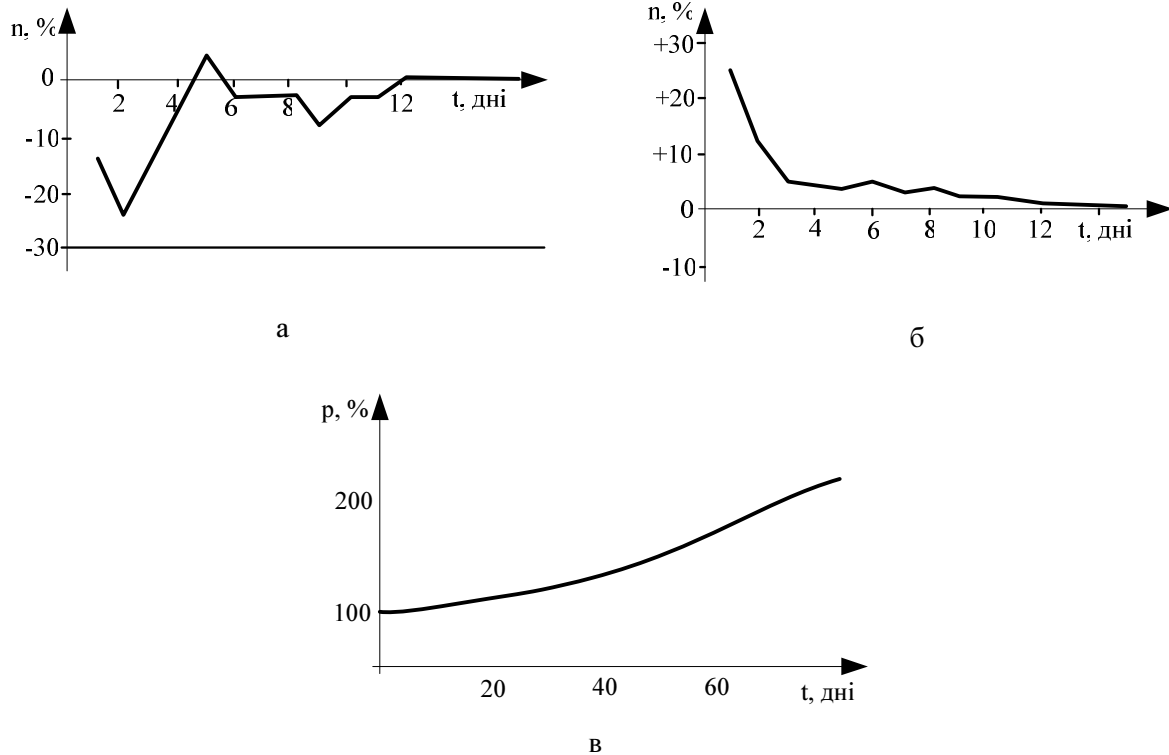


Рис. 1. Залежність відхилень середнього значення максимуму потужності від тривалості зняття графіків навантаження (а, б) і зміна в часі середньодакідних максимумів освітлювально-побутового навантаження (в) (вересень—листопад)

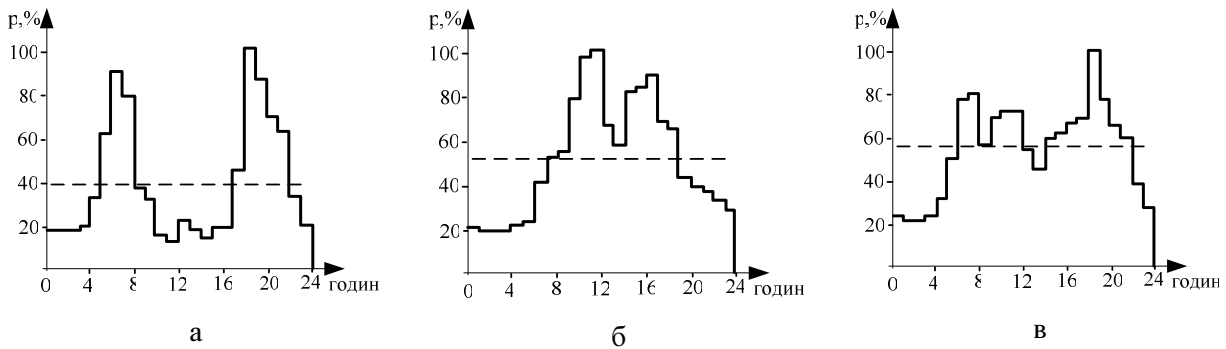


Рис. 2. Графіки навантажень:
а – комунально-побутових ($k_c = 0,27$; $k_{зан} = 0,40$);
б – виробничих ($k_c = 0,25$; $k_{зан} = 0,52$); в – змішаних ($k_c = 0,22$; $k_{зан} = 0,56$)

Дослідження показали, що освітлювальні і силові споживачі беруть різну участь у формуванні графіка навантажень.

Графік з суто освітлювальним (комунально-побутовий) навантаженням має два явно виражені максимуми – ранішній і вечірній, з провалами в денний і нічний час (рис. 2, а). Тривалість максимумів навантаження становить всього 2–3 год.

Коефіцієнт заповнення графіка з комунально-побутовим навантаженням досить низький: $k_{\text{зап}} = 0,15\text{--}0,4$ і залежить від структури споживачів, тобто оснащеності мереж різними побутовими електроприладами, і його середня величина змінюється протягом року від 100 % в грудні до 60 % в червні–липні (рис. 3).

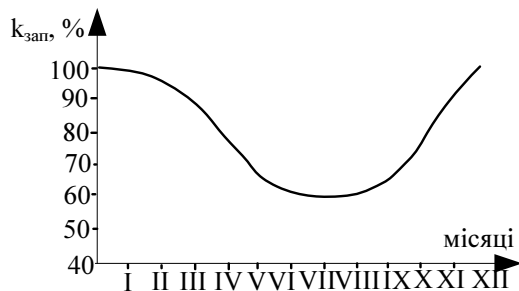


Рис. 3. Річний графік зміни коефіцієнта заповнення $k_{\text{зап}}$

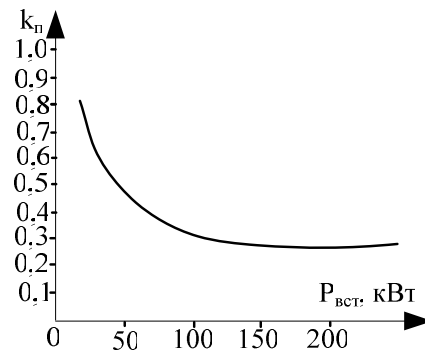


Рис. 4. Залежність коефіцієнта попиту від встановленої потужності споживачів

Характер добового графіка з виробничим (силовим) навантаженням залежить від кількості і потужності електроустановок, технології виробничих процесів, числа змін і деяких інших чинників. При малій кількості споживачів графік навантаження має пилкоподібний характер. При значній кількості електроустановок і особливо під час використання електроенергії для теплових потреб графік навантажень значно вирівнюється і має досить високий коефіцієнт заповнення $k_{\text{зап}} = 0,3\text{--}0,5$. Силові навантаження створюють в основному денний силовий максимум і беруть незначну участь в утворенні вечірнього максимуму (рис. 2, б).

При змішаних навантаженнях абсолютний максимум і характер графіка залежить від співвідношення освітлювальних і силових навантажень, тобто коефіцієнта структури споживачів:

$$k_{\text{стр}} = P_{\text{вст.сил}} / P_{\text{вст.заг}} , \quad (2)$$

де $P_{\text{вст.сил}}$ – встановлена потужність силових споживачів; $P_{\text{вст.заг}}$ – загальна встановлена потужність всіх споживачів.

Графік електричних навантажень для змішаних споживачів показано на рис. 2, в.

Один з характерних показників режимів споживання електроенергії – коефіцієнт попиту і річна кількість годин використання максимальної і встановленої потужностей. Коефіцієнт попиту ($k_{\text{п}}$) враховує коефіцієнти корисної дії, завантаження і каталожної неузгодженості для електродвигунів, одночасність введення електроприймачів окремих груп, поєднання максимумів навантаження між групами електроприймачів, а також втрати потужності в дротах лінії і трансформаторах і виражається відношенням розрахункової потужності (півгодинного максимуму потужності) до номінальної встановленої потужності групи електроприймачів $P_{\text{вст}}$:

$$k_{\text{п}} = P_{\text{м}} / P_{\text{вст}} . \quad (3)$$

За максимальне прийнято півгодинне навантаження, оскільки проміжок часу в півгодини найближчий до трьох постійних часу нагрівання часто вживаних провідників малих і середніх перетинів. З метою одноманітності розрахункової методики півгодинний максимум навантаження приймається для вибору всіх елементів електропостачання.

Коефіцієнт попиту залежить в основному від кількості споживачів, величини їх встановленої потужності, характеру роботи споживачів, їх структури і інших чинників. Найбільше впливає на величину коефіцієнта попиту кількість і величина встановленої потужності споживачів (рис. 4). Як видно з рис. 4, коефіцієнт попиту змінюється в широких межах (0,7–0,27) при малих встановлених потужностях споживачів і залишається практично постійним при сумарній потужності споживачів понад 150, кВт.

На коефіцієнт попиту силових споживачів істотно впливає тип споживачів, технологія виробництва і деякі інші чинники. Середньоквадратичне відхилення коефіцієнта попиту виробничих споживачів набагато вище ніж комунально-побутових і досягає 30–40 %.

Річна кількість годин використання максимальної потужності на споживчих підстанціях залежить від багатьох чинників – структури споживачів, величини їх встановленої потужності, технології виробництва, матеріального і культурного рівня життя населення тощо – і знаходиться в межах 1500–3000 год (нижчі межі – для побутових навантажень, вищі – для змішаних). Для районних підстанцій 35/10 кВ річна кількість годин використання максимуму дорівнює в середньому по Україні 3700 год.

На ефективність використання встановленої потужності малих електростанцій великий вплив мають не тільки графіки навантажень, а також умови статичної стійкості.

Тому розглянемо просту систему, що складається із станції, зв'язаною лінією передачі або мережею, що містить навантаження, подані постійним опором, з шинами незмінної напруги ($U = \text{const}$; $\omega = \omega_0 = \text{const}$). Припустимо, що електромагнітний момент генератора одержує малі зміни відповідно до малих відхилень ротора від положення рівноваги, а обертовий момент первинного двигуна залишається при цьому незмінним.

Характеристика залежності потужності від кута $P = f(\delta)$ при зроблених допущеннях та при незмінній ЕРС $E = E_q$, тобто при постійності струму збудження, визначатиметься виразом (рис. 5)

$$P_{Eq} = \frac{E_q \cdot U}{X_{d\Sigma}} \sin \delta. \quad (4)$$

Розглядаючи малі відхилення кута δ , характеристику $P = f(\delta)$ в області точки a будемо заміняти прямою, приймаючи приріст потужності $\Delta P = \Delta \delta \operatorname{tg} \epsilon$.

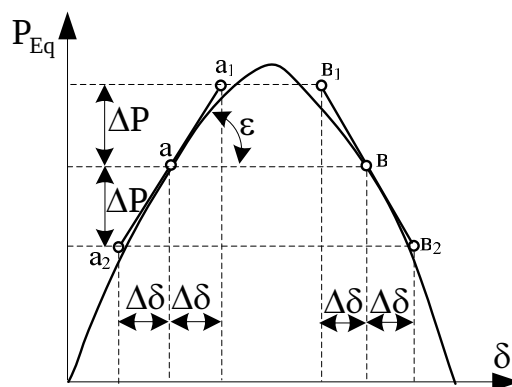


Рис. 5. Малі відхилення від положення рівноваги

Така лінеаризація не є єдиною можливою, але вона є найпоширенішою. При прийнятій лінеаризації початкових рівнянь часткова похідна від потужності за кутом, узята в цій точці, характеризує нахил лінії a_2-a_1 : $\operatorname{tg} \epsilon = dP/d\delta$. Тоді рівняння вільного руху для малих збурень (малих відхилень $\Delta\delta$) можна записати у вигляді

$$T_j \frac{d^2 \Delta\delta}{dt^2} = -\Delta P = -\Delta\delta \frac{\partial P}{\partial \delta}, \quad (5)$$

де $\Delta P = P - P_t$; P_t – зміна потужності турбіни залежно від кута δ (кута вибігу ротора); T_j – інерційні параметри системи.

Оскільки при зроблених допущеннях P залежить тільки від кута δ , то:

$$\frac{\partial P}{\partial \delta} = \frac{dP}{dt} = c_1. \quad (6)$$

Іноді c_1 називають синхронізуючою потужністю і позначають $S_{Ed} = c_1$.

Замінивши знак диференціювання символом оператора Лапласа, отримаємо:

$$T_j p^2 \Delta\delta + c_1 \Delta\delta = 0. \quad (7)$$

Звідси знаходимо невідому змінну величину $\Delta\delta$:

$$\Delta\delta = \frac{0}{T_j p^2 + c_1}. \quad (8)$$

Розв'язок такого рівняння буде невизначеність і знайти числові залежності $\Delta\delta = f(t)$ не вдається. Проте це дозволяє виявити характер руху системи без знаходження абсолютних значень координати $\Delta\delta$.

Знаменник рівняння (8) є характеристичним рівнянням, розв'язком якого є

$$p_{1,2} = \pm \sqrt{\frac{-c_1}{T_j}}.$$

При додатному значенні синхронізуючої потужності c_1 обидва корені будуть уявними, при від'ємному значенні – дійсними.

У першому випадку процес має вигляд, показаний на рис. 6, а і характеризується рівнянням:

$$\Delta\delta = A_1 \sin \gamma t + A_2 \cos \gamma t = A_0 \sin(\gamma t + \psi) = A_0 \sin\left(\frac{2\pi t}{T_0} + \psi\right). \quad (9)$$

$$\text{де } \gamma = \sqrt{\frac{c_1}{T_j}}; \quad T_0 = \sqrt{\frac{T_j}{c_1}}; \quad A_0 = \sqrt{A_1^2 + A_2^2}; \quad \psi = \arctg \frac{A_2}{A_1}.$$

Виявлені внаслідок дослідження незагасаючі коливання в реальній системі, яка має властивості демпфування і втрати на тертя, будуть загасаючими, тобто система буде стійкою.

У другому випадку, тобто при $c_1 < 0$ (рис. 6, б), розв'язок рівняння має вигляд: $\Delta\delta = A_1 e^{p_1 t} + A_2 e^{p_2 t}$, де одна з складових, яка відповідає позитивному кореню, буде безперервно збільшуватися, і відповідно система вийде з умови рівноваги. При цьому під час порушення стійкості не буде коливань: він буде аперіодичним. У разі збереження стійкості характер коливань $\Delta\delta = f(t)$ залежатиме від навантаження генераторів. Оскільки період коливань $T_0 = 2\pi \sqrt{\frac{T_j}{c_1}}$, то при збільшенні навантаження і зменшенні синхронізуючої потужності $c_1 = \partial P / \partial \delta$ він збільшуватиметься і в межах, при $P = P_m$ стане нескінченно великим, тобто процес порушення стійкості повинен відбуватись аперіодично і достатньо повільно.

У розглянутому випадку порушення стійкості можливе лише аперіодичне і границя потужності збігається з границею стійкості: при $P = P_m$ коефіцієнт c_1 , залишаючись дійсним, змінює знак, що означає порушення стійкості роботи. Кут $\delta_{кр}$, який відповідає максимальній потужності і порушенню стійкості, буде 90° при суто реактивному опорі мережі, яка зв'язує неявнополосний генератор з шинами незмінної напруги. У решті випадках величина $\delta_{кр}$ дещо відрізняється від 90° , але зазвичай ця різниця невелика: вона залежить від співвідношення $\frac{x_d}{x_q}, \frac{x_d}{x_c}, \frac{r_c}{x_d}$.

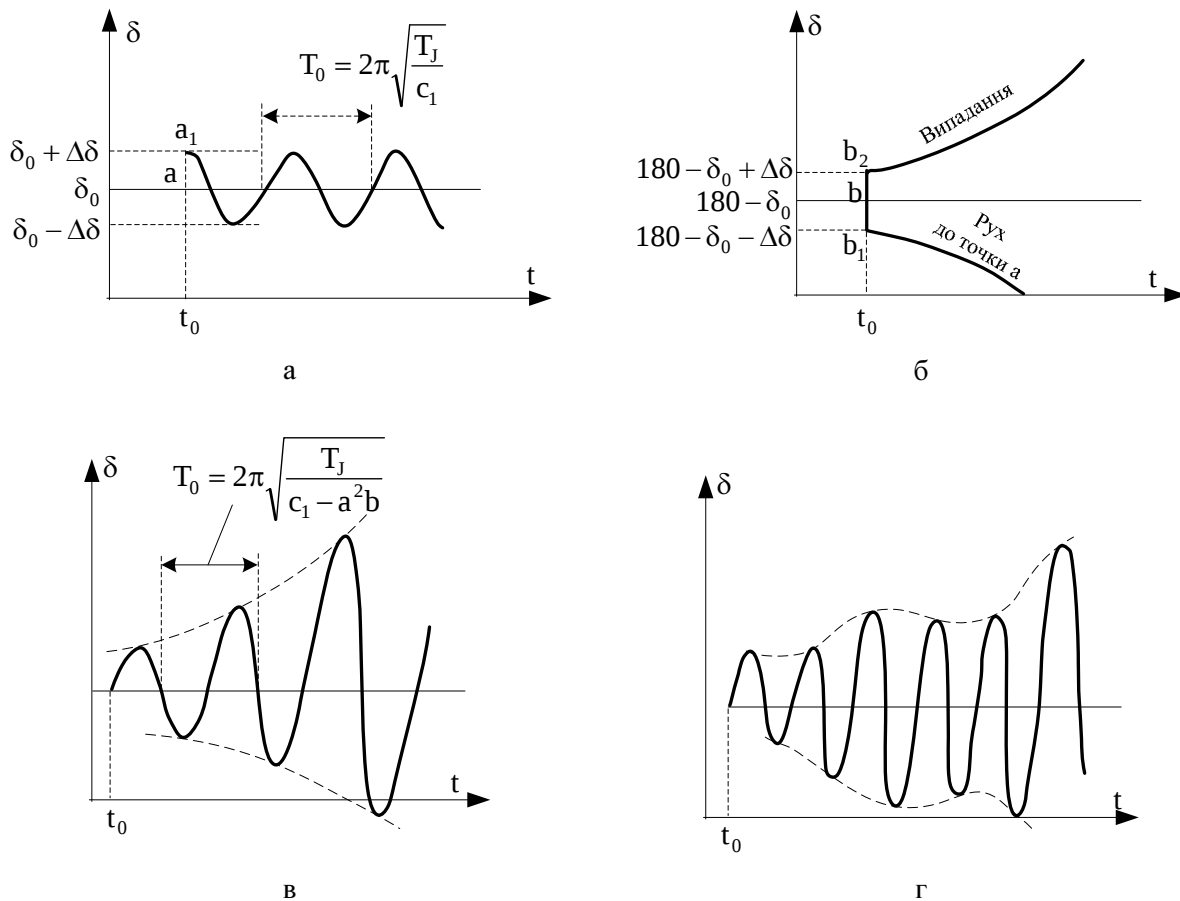


Рис. 6. Характер коливань кута в часі $\Delta\delta = f(t)$:

- а* — мале відхилення кута і подальші коливання в околиці точки *а* (рис. 5)
 при $\delta = \delta_0$; *б* — те саме в точці *в* при $\delta = 180 - \delta_0$; *в* — саморозгойдування
 при негативному демпфуванні; *г* — саморозгойдування, спричинене дією регуляторів.
 У всіх випадках для зручності розгляду взяті різні масштаби часу

Швидкість зміни кута при порушенні статичної стійкості в початковій стадії процесу невелика і становить 1–2 ел. град за секунду. Цим процес порушення статичної стійкості відрізняється від процесу порушення динамічного режиму, де швидкість набагато вища (в межах 200–500 ел. град/с). Тому при достатньо малій швидкості зміни графіка навантаження малі електростанції можуть працювати з невеликим запасом статичної стійкості.

Висновки. Внаслідок значного підвищення цін на енергоносії стає досить важливим аналіз ефективності застосування малих електростанцій, які можуть істотно знизити споживання первин-

них енергоносіїв. Це зменшення споживаних первинних енергоносіїв залежно від галузі виробництва може становити від 8 до 15 %.

При використанні малих електростанцій дуже важливим є графіки навантажень у точці їх приєднання, оскільки їх форма у поєднанні з вимогами статичної стійкості може значно зменшити ефективність використання встановленої потужності міні-ТЕЦ. Тому місцем приєднання малих електростанцій потрібно прийняти шини 10/35 кВ районних підстанцій, де річний рівень використання максимуму становить 3700 год. Крім того, для стабілізації коефіцієнта попиту, величина сумарного навантаження на шинах не повинна бути меншою, ніж 150 кВт.

1. Малярєнко В.А., Лисак Л.В. *Енергетика*. – Харків: Рубікон, 2004. – 360 с. 2. Яковчук П.Є. *МікроТЕЦ як засіб оптимізації систем енергопостачання*. – Львів, 2000. – 405 с. 3. Смит К. *Эффективное использование электроэнергии*. – М.: Энергоиздат, 1981. – 400 с. 4. Файбисович Д.Л. *Справочник по проектированию электрических сетей*. – М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2006. – 307 с. 5. Веников В.А. *Переходные электромеханические процессы в электрических системах*. – М.: Высш. шк., 1985. – 536 с.

УДК 621.314

М.А. Яцун, А.М. Яцун

Національний університет “Львівська політехніка”,
кафедра ЕМА,
Приватний підприємець

ОСНОВНІ СКЛАДОВІ ВЕКТОРНОГО ПОТЕНЦІАЛУ МАГНІТНОГО ПОЛЯ, ІНДУКТИВНОСТЕЙ РОЗСІЯННЯ І КОРОТКОГО ЗАМИКАННЯ ДОВГИХ ЕКРАНОВАНИХ ОБМОТОК

© Яцун М.А., Яцун А.М., 2007

Отримані вирази для основних складових векторного потенціалу, індуктивностей розсіяння і короткого замикання довгих екранованих обмоток залежно від геометричних розмірів і взаємного розміщення обмоток і екрана у разі плоскопаралельного магнітного поля.

Expressions are for the main components of vector-potential, leakage inductances and short circuit inductance of long screen windings depending on geometrical sizes and mutual placement of windings and screen for a case of plane-parallel magnetic field.

Аналіз останніх досліджень. У літературі [6] досліджені основні складові власної і взаємної індуктивностей, індуктивностей розсіяння і короткого замикання екранованих циліндричних співвісних обмоток на феромагнітному осерді. Однак у разі великих розмірів (діаметрів) обмоток їх можна розглядати прямолінійними і довгими, а магнітне поле – плоскопаралельним. Тоді аналіз магнітного поля таких обмоток і результати (вирази для досліджуваних величин і параметрів) істотно спрощуються.

Постановка проблеми (завдання). У загальному випадку використаємо розрахункову модель (рис. 1), яка складається із двох безмежно довгих і паралельних між собою обмоток: первинної і