

Аналіз найбільш поширених методів визначення стійкості енергетичних систем

Гнатов А. В.¹, Аргун Щ. В.¹, Багач Р. В.¹,
Гнатова Г. А.¹, Тарасова В. В.², Ручка О. О.²

¹Харківський національний автомобільно-дорожній університет, Україна

²Харківський національний університет Повітряних сил ім. І. Кожедуба, Інститут цивільної авіації,
Україна

Анотація. Для визначення стійкості енергетичної системи існує багато методів. Найбільшого використання набули методи Ляпунова та метод Моїсеєва. В роботі розкрито їх сутність, переваги та недоліки, особливості практичного використання. Визначено, що одним з перспективних напрямів підвищення ефективності роботи математичного апарату є використання методів другого порядку в моделюванні і оптимізації режимів роботи енергетичних систем, що дозволяє збільшити швидкість і надійність збіжності ітераційних процесів. Розбудовано алгоритм дій, який призначений для вирішення питання стійкості у практичній діяльності.

Ключові слова: електроенергетична система; статичні характеристики; стійкість, динамічні характеристики; інтегральні критерії; сили збурення; баланс потужностей.

Вступ

Електроенергетична система (ЕС) – це сукупність пристроїв, які дозволяють перетворити різні види енергії в електричну енергію, передати останню на відстань, та розподілити її між споживачами, де вона знову перетворюється.

У нормальному робочому стані, або у нормальному номінальному режимі, система повинна надійно забезпечувати споживання електричної енергії нормованої якості. Однак крім нормального стану існують аварійні стани та перехідні, що викликані різного роду перехідними процесами (збудниками) [1]. Це пов'язано з тим, що в системі безперервно відбуваються як малі зміни (флуктуації за рахунок змін в потужності, складі та кількості підключених споживачів) і, так звані, великі зміни, які визначаються варіаціями величин потужностей, що виробляються і споживаються, а також зміною конфігурації системи, наприклад, включенням і відключенням генераторів, ліній передач, трансформаторів, підстанцій (вузлів навантаження). Такі зміни або переходи від одного режиму до іншого, під час нормальної роботи системи,

називають нормальними перехідними режимами. Крім того, ЕС, як і будь-яка інша система, інколи зазнає аварій, що також веде до виникнення перехідних режимів [2,3].

Для нормальної роботи ЕС при різноманітних змінах (вплив ззовні, зміна технічного процесу, аварія), необхідно знати (розрахувати) її основні параметри, та ступінь впливу на них. Також для правильного здійснення переходу ЕС з одного в інший режим роботи та вихід на сталу роботу після збурення (що викликане перехідним процесом) необхідно проводити аналіз та розрахунок балансу потужностей системи. При цьому, одне з головних питань на яке потрібно дати відповідь – чи буде система стійкою.

Аналіз публікацій

Зараз для визначення стійкості енергетичних систем використовують велику кількість методів [1,4–16] та критеріїв. Наприклад, метод Ляпунова, метод Моїсеєва [17,18], критерії, Гурвіця, Раусса, Михайлова тощо [9,17,19,20].

Автори роботи [4] запропонували нову модель оцінки сталості для енергетичних систем. Модель дотримується інтегрованого

підходу та досліджує різні чинники, які впливають на оцінку стійкості системи. Для кожного чинника розробляється індекс, щоб відобразити ступінь його впливу на загальний індекс стійкості системи.

В статті [5] розглядається комбінація підходів життєвого циклу та аналізу охоплення даних для оцінки стійкості ЕС. Основну увагу приділено дослідженню та з'ясуванню потенціалу цих комбінованих підходів, що орієнтовані на стійкість інструментів багатокритеріального аналізу рішень у сфері енергетики.

В роботі [6] автори, спочатку, визначають показники сталості для енергетичного планування, а потім досліджують залежності та зворотні зв'язки між показниками та значеннями індикаторів. Як висновок стверджується, що аналітичний мережевий процес із перевагами, можливостями, витратами та ризиками є підходящим методом для вирішення цієї складної проблеми.

В роботі [7] представлено підходи, методології, сценарії та інструменти, що використовують елементи ІТ технологій у сталих енергетичних системах з детальним аналізом різних методів розпізнавання та комунікацій.

В статті [8] представлено техніко-економічний аналіз гібридних енергетичних систем з визначенням їх стійкості, які пропонують використовувати для двох столичних провінцій Ірану.

В роботі [9] описана методика визначення стійких режимів тривалого еквіваленту взаємопов'язаних ЕС різних структур. За результатами численних досліджень сформульовано критерій коливального порушення статичної стійкості, які отримано за критерієм Гурвіца.

В роботі [14] розглядаються питання розробки та дослідження методу визначення параметрів пристроїв для симетрії трифазних систем електропостачання. Для визначення вимог симетрії та компенсації використовуються метод симетричних складових. Застосування запропонованого методу на думку авторів роботи призведе до підвищення стійкості ЕС.

Статті [10–13,15] представляють всебічне обговорення енергетичної стійкості міських районів з визначеними енергетичними показниками та технічним аналізом гібридної енергосистеми, щоб показати важливість відновлюваної енергії для досягнення енергетичної стійкості. Також запропоновано ряд технічних рішень та методів, що підвищують

як стабільність роботи, так і стійкість ЕС.

Автори дослідження [16] розробили основні концепції стійкості енергосистем. Їх сутність полягає в тому, що трапеція стійкості запроваджується як візуальний інструмент, щоб відобразити поведінку енергосистеми під час аварії. Ґрунтуючись на цьому, визначаються ключові характеристики відмовостійкості, якими має володіти енергосистема, а також пропонуються різні можливі стратегії підвищення стійкості ЕС.

Отже, при визначенні стійкості ЕС по методу Ляпунова можна користуватися двома методами: прямим методом і методом першого наближення [17,20]. Прямий метод Ляпунова відноситься до диференціальних методів. Для судження про стійкість системи тут не відшукують загального або приватного рішення диференціальних рівнянь виду $\Delta\chi_1 = (\Delta\chi_1, \Delta\chi_2, \dots, \Delta\chi_n)$, але з їх допомогою знаходять так звану V-функцію, повна похідна якої за часом має деякі специфічні властивості, що допомагають отримати судження про стійкість системи. Ці властивості формуються двома теоремами прямого методу.

Більш широке застосування при вирішенні енергетичних завдань отримав метод першого наближення (перший метод Ляпунова). При застосуванні цього методу, що відноситься до групи методів повної інтеграції, праві частини рівнянь розкладаються в ступеневі ряди, що сходяться.

Однак в деяких практичних випадках більш відповідає фізичним явищам теорія технічної стійкості по Н. Д. Моїсєєву [18].

Мета та постановка задачі

Метою роботи є дослідження можливостей різних методів визначення стійкості енергетичних систем та складання загального алгоритму дій щодо забезпечення їх стійкості.

Для досягнення мети були поставлені такі задачі:

- проаналізувати сутність та можливість використання різних існуючих методів щодо вирішення питань стійкості ЕС;
- скласти загальний алгоритм дій щодо стійкості ЕС, який допоможе вирішити питання стійкості у практичній діяльності.

Методи визначення стійкості енергетичних систем

Змістом досліджень по виявленню якості ро-

боти ЕС являється обчислення деяких інтегральних величин, які виявляють на протязі визначаючого відрізка часу інтегральні відхилення тих величин, які характеризують похибку регулювання. Такий інтегральний критерій вказує на те, що немає необхідності обов'язково прагнути до мінімуму відхилення величини, яка регулюється від заданої. При рівних умовах, найбільш спокійним буде перехід від одного стану до іншого без коливань. Це являє собою позитивний фактор оцінки якості роботи системи. Однак цей показник не завжди є найважливішим. Інтегральні критерії для оцінки якості роботи системи розроблені практично тільки для забезпечення споживача напруженою заданою якістю і частоти. Досить часто необхідно оцінити якість автоматичного регулювання систем та її роботи в цілому.

Для проведення аналізу щодо початкового режиму та режиму, який має встановитися після збурення викликаного перехідним процесом, необхідно розглядати баланс потужності. Так, передача потужності від генераторів, турбіни яких розвивають потужність P_T , можлива тільки в тому випадку, якщо:

$$P_T = f(\varphi) \text{ і } P = \psi(\varphi),$$

де P_T – потужність турбін; P – потужність, яка передається споживачам, φ – параметр режиму.

Режим може існувати, якщо характеристики $P_T = f(\varphi)$, і $P = \psi(\varphi)$ перетинаються, причому зазвичай $P_T = \text{const}$, $p = (E \cdot U/x) \cdot \sin \delta$.

Також необхідно, щоб активна потужність, яка виробляється генераторами системи P_G , дорівнювала потужності, яка поглинається в навантаженнях P_H і втрачається у всіх елементах системи ΔP :

$$P_G = P_H + \Delta P = P. \quad (1)$$

Аналогічна умова існує в колах змінного струму і для реактивної потужності:

$$Q_G = Q_H + \Delta Q = Q. \quad (2)$$

Необхідно відмітити, що активна і реактивна потужності пов'язані з повною потужністю відомим співвідношенням:

$$S_G^2 = P_G^2 + Q_G^2, \quad (3)$$

де S_G – повна потужність.

Рівняння (1) і (2) не є незалежними, тому щоб користуватися ними необхідно розглянути додаткові умови, які відображають різноманітні зв'язки, що необхідно досліджувати. Але практика роботи сучасних ЕС, параметри яких змінюються в певних діапазонах, дає змогу встановити закономірності, якими можна користуватися.

Для розрахунку режимів регульованих ЕС, при створення для них регулюючих і керуючих пристроїв має особливе значення застосування розробленої А. М. Ляпуновим загальної теорії стійкості руху [17].

При визначенні стійкості ЕС за допомогою цієї теорії досліджуваний режим характеризують параметрами ω , E'_d , E'_{d_0} , δ і т. д. Поведінку системи цього режиму описують диференціальними рівняннями виду:

$$\left. \begin{aligned} \omega &= \varphi_1(\omega', E'_d, \delta) \\ E'_d &= \varphi_2(E'_{d0}, E'_{d_e}, \delta) \\ E'_{d_e} &= \varphi_3(E'_{d_e}, U_p) \\ U_p &= \varphi_4(e) \\ e &= \varphi_5(e', P) \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

де ω , E'_d , E'_{d0} , δ і т. д. – узагальнені координати електричної системи, що характеризують її стан – режим або похідні від цих координат по часу.

У початковий момент часу (при $t = t_0$) позначимо змінні (параметри режиму) через ω_0 , E'_{d_0} , δ_0 . Тоді, вирішуючи систему рівнянь (4), можна кожен змінну представити у вигляді залежності від початкових значень:

$$\begin{aligned} \omega &= \psi_2(t, \omega_0, E'_{d_0}, \delta_0); \\ E'_d &= \psi_2(t, E'_{d_0}, E'_{d_e}, \delta_0), \text{ тощо.} \end{aligned}$$

Рішення системи рівнянь (4) описує зміну стану електричної системи, тобто її перехідний процес. Рішення передбачається єдиним і практично (зазвичай) відповідає технічним завданням.

Щоб судити про стійкість чи нестійкість режиму системи, слід дослідити рівняння так званого збудженого руху. Це рівняння описує перехідний процес після зміни параметрів режиму δ , ω , E'_d і інших, що з'явилися під

дією сил, які називаються збуреннями. Ці сили не беруть участі в рівняннях збуреного руху. У найпростішому випадку вважається, що миттєво створивши відхилення, вони зникли, і тепер на систему діють тільки внутрішні сили. Ці сили можуть зберегти систему стійкою або, навпаки, порушити її стійкість при появі збурення $\Delta\delta$, $\Delta\omega$, ΔE_d .

Слід підкреслити значення двох понять: збурення і сили збурення.

Збурення – це ті відхилення параметрів режиму, які при будь-яких причинах відбуваються в системі. А сили збурення (як миттєві, так і тривало діючі) – це причини збурень режиму, тобто його відхилень від рівноважного стану [21,22].

При прийнятому підході до стійкості а ні природа сил збурення, а ні їх величина не розглядаються, і вони не беруть участь в диференціальних рівняннях. Аналіз стійкості зводять тільки до з'ясування характеру змін збурень (відхилень), не визначаючи їх величини. Рівняння (4), які можна переписати для збурень, мають вигляд:

$$\left. \begin{aligned} \Delta\omega &= f_1(\Delta\omega_0, \Delta E_d, \Delta\delta) \\ \Delta E'_d &= f_2(\Delta E'_{d0}, \Delta E'_{de}, \Delta\delta) \\ \Delta E'_d &= f_3(\Delta E'_{de}, \Delta U_p) \\ \Delta U_p &= f_4(\Delta e) \\ \Delta e &= f_5(\Delta e_0, \Delta\Pi) \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Формули системи (5) можна також розглядати як вираз відомого перетворення перенесення початку координат з однієї точки в іншу. Тривіальним рішенням системи рівнянь (5), що відповідає сталому режиму, буде: $\Delta\omega=0$, $\Delta\delta=0$, $\Delta E'_d=0$ і т.д.

Незбурений стан системи, інакше званий дослідним сталим режимом, оцінюється як стійкий, якщо для будь-якої завгодно малої області ϵ , заданої навколо стану рівноваги, завжди можна знайти відповідну область $\mu(\epsilon)$ таку, при якій система, яка виявилася при різних початкових збуреннях в області ϵ (при $t=t_0$) ніколи (при будь-якому як завгодно великому $t > t_0$) не вийде з області ϵ :

$$|\Delta\chi_i(t)| < \epsilon' \quad (6)$$

де i – будь-який режимний параметр; ϵ' – лінійні розміри області ϵ .

Сталий режим системи називають нестій-

ким, якщо навколо стану рівноваги існує така область ϵ , для якої не можна підібрати область $\mu(\epsilon)$, яка має вищевказану властивість.

Якщо при виконанні нерівності (6), крім того, будуть виконуватися також і умови:

$$\begin{aligned} \lim_{t \rightarrow \infty} \Delta\delta &= 0; \\ \lim_{t \rightarrow \infty} \Delta E'_d &= 0, \end{aligned}$$

або в загальному випадку для будь-якого параметра режиму x можна записати:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \Delta x(t) = 0, \quad (7)$$

то режим системи, що відповідає цьому випадку, називають асимптотично стійким. Збурений рух об'єкта в цьому випадку визначають як рух, який повністю сходиться до його незбуреного руху.

При визначенні стійкості електричних систем по методу Ляпунова можна користуватися двома методами: прямим методом і методом першого наближення. Прямий метод Ляпунова відноситься до диференціальних методів. При цьому, специфічні властивості можна сформулювати, якщо користуватися двома такими теоремами прямого методу.

Теорема 1. Незбурений рух стійкий, якщо для властивостей диференціальних рівнянь збуреного руху досліджуваного об'єкта можна знайти таку знаковизначенну функцію V , у якій повна похідна за часом буде або знакопостійною функцією, що має знак протилежний знаку V , або функція тотожно рівна нулю.

Теорема 2. Якщо функція V , яка задовольняє умові першої теореми і має похідну $\frac{dV}{dt}$,

яка представляє собою також знаковизначенну функцію, знак якої протилежний знаку функції V , то незбурений рух досліджуваної системи асимптотично стійкий.

Алгоритм аналізу стійкості енергетичної системи

Функція декількох змінних $V = V(\chi_1, \chi_2, \dots, \chi_n)$ називається знаковизначенною в деякій області N -мірного фазового простору в координатах цих змінних, якщо вона у всіх точках цієї області навколо початку координат зберігає один і той же знак і ніде не обертається в нуль, тільки крім початку координат.

Функція V називається знакопостійною,

якщо вона зберігає один і той же знак, але може обернутися в нуль не тільки на початку координат, а і в інших точках даній області.

Функція V називається знакозмінною, якщо вона в даній області початку координат може мати різні знаки.

Слід зазначити, що теореми 1 і 2 забезпечують отримання тільки достатніх умов стійкості, але не необхідних. Це означає, що отримані умови не охоплюють всіх вимог, що пред'являються до параметрів системи для забезпечення її стійкості, хоча при виконанні цих умов система обов'язково буде стійка. Крім того, методи побудови функції Ляпунова стосовно до електричних систем розроблені мало. Значні труднощі при розробці цих методів для цілей технічних програм полягають в тому, що при заданих рівняннях збуреного руху досліджуваної електричної системи зазвичай може бути підібрано декілька різних варіантів функції Ляпунова. Це пов'язано з тим, що для наведених вище теорем потрібна тільки знаковизначеність функції та її похідної. Різні варіанти V – функції, що задовольняють двом теоремам, можуть призводити до різних варіантів умов стійкості системи, режим якої відображено записаними рівняннями. Тому застосування прямого методу Ляпунова для енергетичних завдань обмежене. На даний час його можливо застосовувати тільки для деяких окремих випадків.

Більш широке застосування при вирішенні енергетичних завдань отримав метод першого наближення (перший метод Ляпунова). При застосуванні цього методу, що відноситься до групи методів повної інтеграції, праві частини рівнянь розкладаються в ступеневі ряди, що сходяться в області $\Delta\chi \leq \eta$. Тут η є малою позитивною величиною. Після цього розкладання виходять рівняння, які мають вигляд:

$$\Delta\chi = \sum_{k=1}^n b_{1k} \Delta\chi_k + L_1(\Delta\chi_1, \Delta\chi_2, \dots, \Delta\chi_n), \quad (8)$$

де b_{1k} – постійні лінійної частини розкладання; $L_1(\Delta\chi_1, \Delta\chi_2, \dots, \Delta\chi_n)$ – сукупність членів вище першого порядку в цьому розкладанні.

Відкинувши цю сукупність і проводячи таким чином лінеаризацію, отримуємо систему рівнянь першого наближення, тобто нову систему лінійних рівнянь з постійними коефіцієнтами. Для вирішення цієї системи, що має вид:

$$\Delta\chi = \sum_{k=1}^n b_{1k} \Delta\chi_k, \quad (9)$$

Характеристичне рівняння має вид:

$$D(p) = \sum_{m=1}^n a_m p^{n-m} = 0 \quad (10)$$

де a_m – коефіцієнт; p – оператор $\frac{d}{dt}$; n, m – індекси, що характеризують порядок даного члена в характеристичному рівнянні.

Знайшовши значення коренів p рівняння з (10), легко зобразити зміни в часі і таким чином отримати в першому наближенні відповідь про наявність стійкості незбуреного руху. Характер коренів виразу (10) може бути з'ясований і без знаходження їх величини за відомим способом.

Стійкість по першому наближенню визначають наступними двома теоремами першого методу Ляпунова.

Теорема 1. Якщо всі корені характеристичного рівняння (10) мають негативні дійсні частини, тобто $\text{Re}(p_k) < 0$, де $k = 1, 2, \dots, n$, то незбурений рух системи асимптотично стійкий по першому наближенню.

Незбурений рух стійкий та не асимптотичний, коли характеристичне рівняння не має коренів з позитивними дійсними частинами, рівними нулю. Крім того ці корні прості або кратні і число груп рішень, їм відповідних, дорівнює їхньої кратності.

Теорема 2. Якщо серед коренів $p_1, p_2, \dots, p_n$, характеристичного рівняння (4) є хоча б один корінь з нульовою дійсною частиною, то незбурений рух системи нестійкий по першому наближенню.

Якщо характеристичне рівняння (10) має кратні корені з нульовими дійсними частинами і якщо число груп рішень, які відповідають цим корінням, менше їхньої кратності, то незбурений рух є нестійким.

При дослідженні стійкості за рівняннями першого наближення можуть зустрітися так звані критичні випадки, які не відповідають умовам наведених вище теорем.

Так, якщо серед коренів характеристичного рівняння (10) є хоча б один корінь, у якому дійсна частина дорівнює нулю, а решта коренів мають негативні дійсні частини, то наведені вище дві теореми першого методу не дають можливості судити про стійкість.

У критичних випадках, коли система знаходиться на межі стійкості, відповідь не може бути отримана на підставі дослідження рівнянь першого наближення (9). Тут характер руху системи, вирішальним чином, залежить від відкинutoї при переході від (8) до (9) сукупності членів вищого порядку.

Щоб відповісти на питання, чи буде в критичному випадку система стійкою, необхідно розглянути дійсні рівняння без їх лінеаризації, тобто повернутися до дослідження системи рівнянь (4) в їх початковій формі. Для такого роду досліджень А. М. Ляпуновим запропоновані деякі прийоми [17]. Зауважимо, що до теперішнього часу при вивченні режимів електричних систем в основному займалися дослідженнями некритичних випадків.

Теорія стійкості по А. М. Ляпунову, що застосовується як перше наближення, передбачає малі відхилення і веде аналіз без розгляду збурюючих сил, а тому не завжди задовольняє інженера-практика. Багато технічних завдань не цілком відповідають концепції визначення стійкості по методу А. М. Ляпунова. Досліджувані відхилення від сталого режиму бувають кінцеві, а дії сил, що збурюють суттєвими не тільки з точки зору створення ними деяких відхилень режиму, але і з точки зору того безперервного впливу на систему, який ними чиниться.

Для технічних завдань практично цікаво і важливо підійти до стійкості так, щоб врахувати всі ці обставини.

В деяких практичних випадках більш відповідає фізичним явищам теорія технічної стійкості по Н. Д. Моїсєєву. Специфіка цього методу полягає в прагненні отримати оцінку рішення системи диференціальних рівнянь, уникнувши тих труднощів, які полягають у необхідності тим чи іншим шляхом вирішувати систему диференціальних рівнянь або досліджувати характер її коренів.

Наведемо основні положення цього методу дослідження технічної стійкості при деяких режимах енергосистем.

Технічною стійкістю системи називають здатність системи, що отримала вплив деякої сили (зазвичай, заданої за величиною), зберегти стан, близький до вихідного, або повертатися до нього, здійснюючи при цьому на заданому інтервалі часу (кінцевому або нескінченному) такі рухи, при яких жодна змінна (параметр режиму) не перевищить деякого кінцевого, наперед заданого значення.

Математично умови технічної стійкості

можна сформулювати таким чином. Нехай перехідний процес, що виникає у будь-якій системі після збурення, проявився у вигляді дії сили $\Delta P_k(t)$ та визначається рівнянням:

$$\frac{dx_k}{dt} = \varphi(t, x_1, x_2, \dots, x_n) + \Delta P_k(t),$$

де $k=1, 2, \dots, n$; $x_1, x_2, \dots, x_n$ – параметри режиму.

Згідно даному вище визначенню, система буде стійкою, якщо в ній, при дії збурюючих сил $\Delta P_k(t)$, усі параметри режиму $x_1(t)$, $x_2(t), \dots, x_n(t)$ при будь-яких своїх початкових умовах $x_{10}, x_{20}, \dots, x_{n0}$ ніколи не можуть стати більше деяких значень $\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_n$, званих верхніми межами. В цьому випадку кожна з сил не повинна перевищувати деякої верхньої межі, а поточне значення будь-якої сили $\Delta P_k(t)$ при дії на відрізок часу $0 \leq t \leq \bar{t}$ задовольняти умовам:

$$\Delta P_1(t) \leq \Delta \bar{P}_1;$$

$$\Delta P_2(t) \leq \Delta \bar{P}_2;$$

$$\Delta P_n(t) \leq \Delta \bar{P}_n.$$

Порушення будь-якої з умов $x_1(t) \leq \bar{x}_1$ означає, що система на відрізок часу $0 \leq t \leq \bar{t}$ не має технічної стійкості. Перехід до нескінченного відрізка часу дає можливість визначити технічну стійкість системи протягом нескінченно великого часу.

Необхідно також відмітити, що існують і методи другого порядку, які використовуються в моделюванні режимів роботи електроенергетичних систем.

Однією з важливих функцій автоматизованих систем диспетчерського управління є управління режимами їх роботи. Розв'язання складних задач високої розмірності, які виникають при цьому, неможливе без використання сучасної обчислювальної техніки. Успішне функціонування системи управління в темпі реальних процесів в системах електропостачання забезпечується не тільки можливостями комп'ютерів (швидкодія, обсяг оперативної пам'яті тощо), але і обчислювальними можливостями алгоритмів і програми, яку використовують для досягнення мети управління.

Одночасно з розвитком можливостей комп'ютерної техніки відбувається розвиток обчислювальних методів розв'язання задач

планування та управління режимами енергосистем.

Одним з перспективних напрямів підвищення ефективного математичного забезпечення є використання методів другого порядку в моделюванні і оптимізації режимів роботи ЕС, що дозволяє збільшити швидкість і надійність збіжності ітераційних процесів.

Важливою особливістю методів другого порядку є те, що квадратична апроксимація достатньо точно відображає режим електри-

чної мережі. В першу чергу це стосується рівнянь усталеного режиму у формі балансу потужностей, які також є квадратичними. Можливі модифікації методів другого порядку визначаються формою запису рівнянь сталого режиму, методами розв'язання системи квадратичних рівнянь.

Загальний алгоритм розв'язання системи рівнянь сталого режиму методами другого порядку приведений на рис. 1, алгоритм аналізу щодо стійкості ЕС на рис. 2.

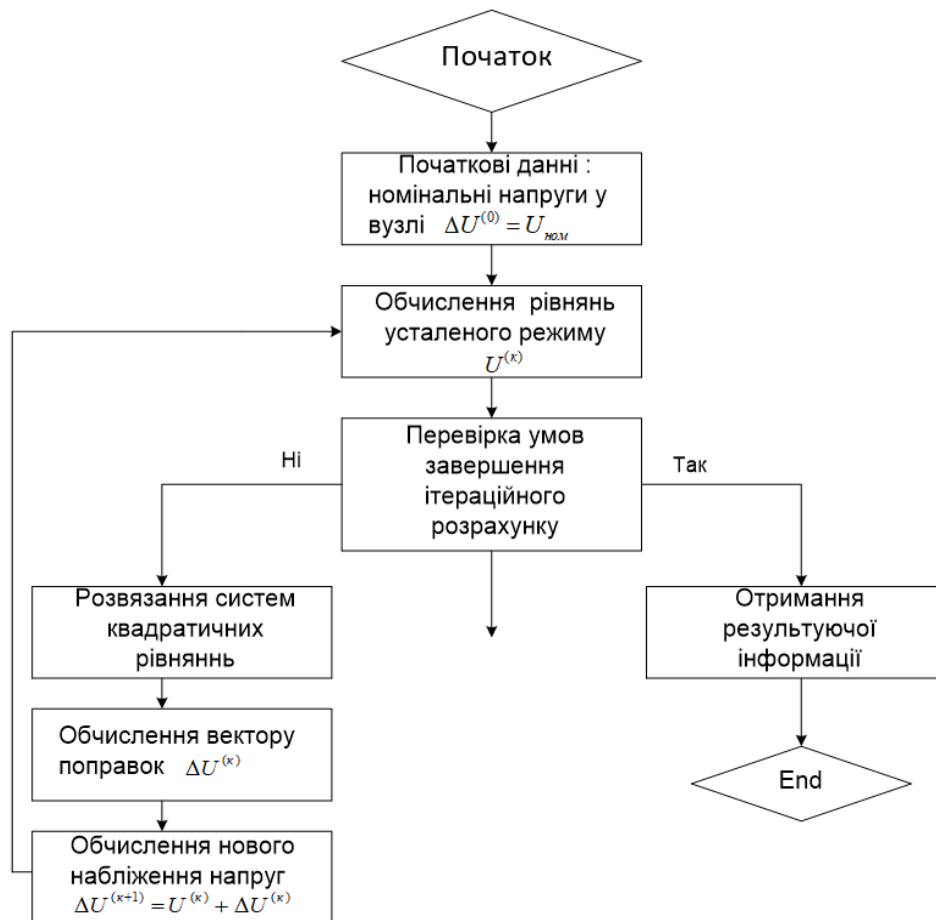


Рис. 1. Алгоритм розрахунку з використанням методів другого порядку

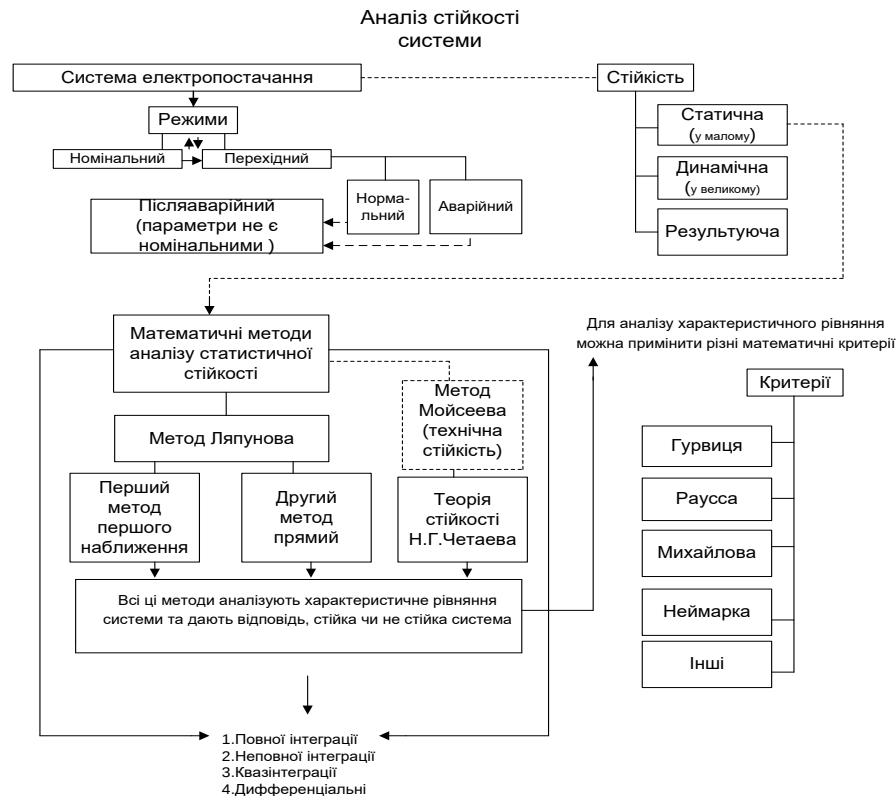


Рис. 2. Алгоритм аналізу щодо стійкості ЕС

В деяких практичних випадках більш відповідає фізичним явищам теорія технічної стійкості по Н. Д. Моїсєєву. Специфіка методу Моїсєєва полягає в прагненні отримати оцінку рішення системи диференціальних рівнянь, уникнувши тих труднощів, які полягають у необхідності тим чи іншим шляхом вирішувати систему диференціальних рівнянь або досліджувати характер її коренів.

Висновки

Для визначення стійкої енергетичної системи чи ні, можливо використання багатьох методів. Найбільшого використання набули методи Ляпунова та частково – метод Моїсєєва.

Прямий метод Ляпунова відноситься до диференціальних методів. Застосування прямого методу Ляпунова для енергетичних завдань обмежений. На даний час його можливо застосовувати тільки для деяких окремих випадків.

Більш широке застосування отримав при вирішенні енергетичних завдань метод першого наближення (перший метод Ляпунова). Одним з перспективних напрямів підвищення ефективності роботи математичного апарату є використання методів другого порядку в моделюванні і оптимізації режимів роботи

ЕС. Це дозволяє збільшити швидкість і надійність збіжності ітераційних процесів.

Спираючись на проведений аналіз різних існуючих методів щодо вирішення питань стійкості енергетичних систем запропоновано та розбудовано алгоритм дій, який допоможе вирішити питання стійкості у практичній діяльності.

Конфлікт інтересів

Автори заявляють, що немає конфлікту інтересів щодо публікації цієї статті.

Література

1. Авраменко, В. М. (2018). Устойчивость электроэнергетических систем как задача нелинейной механики. *Праці Інституту Електродинаміки Національної Академії Наук України*, 49, 5–10. Avramenko, V. M. (2018). Ustoichyvost elektroenerheticheskyykh system kak zadacha nelyneinoi mekhanyky. [Stability of electric power systems as a problem of nonlinear mechanics.] *Pratsi Instytutu Elektrodynamiky Natsionalnoi Akademii Nauk Ukrainy*, 49, 5–10. [in Russian]
2. Матеєнко, Ю. П., & Кравчик, А. С. (2020). Оцінка показників балансової надійності електроенергетичних систем з відновлюваними джерелами енергії.

- Міжнародний Науково-Технічний Журнал "Сучасні Проблеми Електроенергетехніки Та Автоматики"*, 145–149. Mateienko, Yu. P., & Kravchuk, A. S. (2020). Otsinka pokaznykiv balansovoi nadiinosti elektroenerhetychnykh system z vidnovliuvanymy dzherelamy enerhii. [Estimation of indicators of balance reliability of electric power systems with renewable energy sources.] *Mizhnarodnyi Naukovo-Tekhnichni Zhurnal "Suchasni Problemy Elektroenerhotekhniki Ta Avtomatyky"*, 145–149. [in Ukrainian]
3. Hnatov, A., Patlins, A., Arhun, S., Kunicina, N., Hnatova, H., Ulianets, O., & Romanovs, A. (n.d.). Development of an unified energy-efficient system for urban transport. *2020 6th IEEE International Energy Conference (ENERGYCon)*, 248–253.
 4. Abu-Rayash, A., & Dincer, I. (2019). Sustainability assessment of energy systems: A novel integrated model. *Journal of Cleaner Production*, 212, 1098–1116.
 5. Martín-Gamboa, M., Iribarren, D., García-Gusano, D., & Dufour, J. (2017). A review of life-cycle approaches coupled with data envelopment analysis within multi-criteria decision analysis for sustainability assessment of energy systems. *Journal of Cleaner Production*, 150, 164–174.
 6. Kuleli Pak, B., Albayrak, Y. E., & Erensal, Y. C. (2017). Evaluation of sources for the sustainability of energy supply in Turkey. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 36(2), 627–637.
 7. Salam, A. (2020). Internet of things in sustainable energy systems. In *Internet of Things for Sustainable Community Development*. 183–216. Springer.
 8. Razmjoo, A., Ehyaei, M. A., Ahmadi, A., Pazhoohesh, M., Marzband, M., Mansouri Khosravi, M., Shahhoseini, A., & Davarpanah, A. (2019). Implementation of energy sustainability using hybrid power systems, a case study. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 1–14.
 9. Popov, M. G., & Lu, Z. (2019). Adaptive emergency control system with an algorithm for rapid assessment of sustainability united energy system. *Journal of Physics: Conference Series*, 1419(1), 012025.
 10. Patlins, A., Hnatov, A., & Arhun, S. (2018). Using of green energy from sustainable pavement plates for lighting bikeways. *Transport Means-Proceedings of the International Conference*, 574–579.
 11. Patlins, A., Hnatov, A., & Arhun, S. (2018). Safety of pedestrian crossings and additional lighting using green energy. *Transport Means-Proceedings of the International Conference*, 527–531.
 12. Patlins, A., Hnatov, A., Kunicina, N., Arhun, S., Zabasta, A., & Ribickis, L. (2018). Sustainable pavement enable to produce electricity for road lighting using green energy. *2018 Energy and Sustainability for Small Developing Economies (ES2DE)*, 1–2.
 13. Gnatov, A., Argun, S., & Rudenko, N. (2017). Smart road as a complex system of electric power generation. *2017 IEEE First Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON)*, 457–461.
 14. Shymuk, D., Hnatov, A., Arhun, S., Ponikarovska, S., Mygal, V., & Kunicina, N. (2020). Solving the Problem of Balancing and Complete Compensation of Reactive Power for a Three-Phase Power Supply System. *EAI Endorsed Transactions on Energy Web*, 7(28).
 15. Armin Razmjoo, A., Sumper, A., & Davarpanah, A. (2020). Energy sustainability analysis based on SDGs for developing countries. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 42(9), 1041–1056.
 16. Panteli, M., Trakas, D. N., Mancarella, P., & Hatziaargyriou, N. D. (2017). Power systems resilience assessment: Hardening and smart operational enhancement strategies. *Proceedings of the IEEE*, 105(7), 1202–1213.
 17. Wang, M. (2018). Note on the Lyapunov functional method. *Applied Mathematics Letters*, 75, 102–107.
 18. Денисенко, В. С. (2020). О технической устойчивости множеств траекторий дискретных систем. *Известия Высших Учебных Заведений. Математика*, 7, 63–75. Denisenko, V. S. (2020). O tehniceskoy ustoychivosti mnozhestv traektoriy diskretnykh sistem. [On technical stability of sets of trajectories of discrete systems.] *Izvestiya Vysshih Uchebnyih Zavedeniy. Matematika*, 7, 63–75. [in Russian]
 19. Wójcik, W., Mazakov, T., Jomartova, S., Ziyatbekova, G., Karymsakova, N., & Tursynbai, A. (2021). The stability interval of the set of linear system. *International Journal of Electronics and Telecommunications*, 67(2), 155–161.
 20. Mazakov, T., Wójcik, W., Jomartova, S., Karymsakova, N., Ziyatbekova, G., & Tursynbai, A. (2021). The Stability Interval of the Set of Linear System. *International Journal of Electronics and Telecommunications*, 67.
 21. Hnatov, A., Arhun, S., & Ponikarovska, S. (2017). Energy saving technologies for urban bus transport. *International Journal of Automotive and Mechanical Engineering*, 14, 4649–4664.
 22. Гнатов, А. В., Аргун, Ш. В., Дзюбенко, О. А., Тарасова, В. В., Левенець, А. О., & Пілявець, О. О. (2018). Енергозбереження в системах електропостачання. *Автомобіль і Електроніка. Сучасні Технології*, 13, 80–89.

Hnatov, A. V., Arhun, Shch. V., Dziubenko, O. A., Tarasova, V. V., Levenets, A. O., & Piliavets, O. O. (2018). Enerhozberezhennia v systemakh elektropostachannia. [Energy saving in power supply systems.] *Avtomobil i Elektronika. Suchasni Tekhnolohii*, 13, 80–89. [in Ukrainian]

Гнатів Андрій Вікторович¹, д.т.н., проф. каф. автомобільної електроніки, тел. +38 06674380887, e-mail: kalifus76@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0932-8849>

Аргун Щасяна Валіковна¹, д.т.н., проф. каф. автомобільної електроніки, тел. +38 0993780451, shasyana@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6098-8661>

Гнатова Ганна Андріївна¹, студентка автомобільного факультету ХНАДУ, тел. +38 0990679809, e-mail: hannahnatova@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7263-3024>

Багач Руслан Володимирович¹, аспірант кафедри автомобільної електроніки, +38 0935761042, e-mail: ruslanbagach@gmail.com, **Тарасова Валентина Всеволодівна**², к.т.н., доц., тел. +38066-828-47-31, val.vs.tarasova@gmail.com, **Ручка Олександр Омелянович**², к.т.н., доц., тел. +38 067-774-86-83, val.vs.tarasova@mail.ru,

¹Харківський національний автомобільно-дорожній університет, 61002, Україна, м. Харків, вул. Ярослава Мудрого, 25.

²Харківський національний університет Повітряних сил імені Івана Кожедуба, Інститут цивільної авіації, 61023, м. Харків, вул. Сумська 77/79.

Analyzing the most common methods for determining the stability of energy systems

Abstract. Problem. There are many methods for determining the stability of the energy system. In normal operating condition (normal rated mode), the power system must reliably ensure the consumption of electricity of normalized quality. However, in addition to the normal state, there are emergency and transient states caused by various transients. This is due to the fact that the energy system is constantly changing its parameters. Such changes are determined by variations in the amount of power produced and consumed, as well as the changes in system configuration. **Goal.** The goal is studying the possibilities of various methods of determining the power systems stability and drawing up the general algorithm of actions for maintenance of their stability. **Methodology.** When determining the stability of energy systems by the Lyapunov method, two methods can be used: the direct method and the first approximation method. Lyapunov direct method refers to differential methods. To conclude about the stability of the system we do not find a general or particular solution of differential equations, but with

their help we find a mathematical function, the complete derivative of which over time allows to obtain a conclusion about the stability of the system. **Results.** Many methods can be used to determine whether a sustainable energy system is stable or not. The most common are the Lyapunov methods and the Moiseev method. It is determined that the direct Lyapunov method refers to differential methods. The application of the direct Lyapunov method for energy problems is limited. Currently, it can be used only for some individual cases. The method of the first approximation (Lyapunov first method) has received wider application in the solution of power problems. When applying this method, which belongs to the group of methods of full integration, the right-hand sides of the equations are decomposed into power series. **Originality.** It is determined that one of the perspective directions of increasing the efficiency of the mathematical device work is using the methods of the second order in modeling and optimization of operating modes of electric power systems. This allows you to increase the speed and reliability of the convergence of iterative processes. **Practical value.** Based on the analysis of various existing methods for solving the problems of stability of energy systems, an algorithm of actions is proposed and developed, which will help to solve the problem of stability in practice.

Key words: power system; static characteristics; stability; dynamic characteristics; integral criteria; perturbation forces; power balance.

Hnatov Andrii¹, professor, Doct. of Science, Head of Vehicle Electronics Department, tel. +38 066-7438-0887, kalifus76@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0932-8849>

Shchasiana Arhun¹, professor, Doct. of Science, Vehicle Electronics Department, shasyana@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6098-8661>

Hnatova Hanna¹, student of the Automobile Faculty, tel.+38 0990679809, e-mail: hannahnatova@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7263-3024>

Bagach Ruslan¹, postgraduate, Vehicle Electronics Department, tel. +38 0935761042, e-mail: ruslanbagach@gmail.com

Tarasova Valentina², Ph.D., Assoc. Prof., tel. +38066-828-47-31, val.vs.tarasova@gmail.com,

Ruchka Oleksandr², Ph.D., Assoc. Prof., tel. +38 067-774-86-83, val.vs.tarasova@mail.ru,

¹Ivan Kozhedub Kharkiv University of Air Force, Sumy 77/79 street, Kharkiv, 61023, Ukraine.

²Kharkov National Automobile and Highway University, 25, Yaroslava Mudrogo str., Kharkiv, 61002, Ukraine.