

В. М. Авраменко¹
Н. Т. Юнєєва¹
А. О. Кришталь²

АВТОМАТИЗОВАНИЙ РОЗРАХУНОК ЗАПАСУ СТАТИЧНОЇ СТІЙКОСТІ У ПЕРЕТИНІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНОЇ СИСТЕМИ

¹ Інститут електродинаміки НАН України;

² Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Прийнятий у роботі підхід передбачає орієнтацію на контроль статичної стійкості ОЕС за критерієм існування режиму за умови обважнення певних перетинів. Практично це означає, що на траєкторії обважнення потрібно знайти режим, який має найбільшу потужність у досліджуваному перетині, щодо якого обчислюється і нормується «Керівними вказівками» по стійкості енергосистем коефіцієнт запасу статичної стійкості за активною потужністю в перетині. Розроблено модифікацію програми розрахунку стаціонарного режиму в лінеаризованій постановці, яка дозволяє виконувати обважнення за кутом векторів електрорушійних сил (ЕРС), безітераційно досягати граничного режиму і уточнювати запас статичної стійкості в перетині електроенергетичної системи (ЕЕС). Лінеаризація моделі ЕЕС здійснюється шляхом заміни навантажень в вузлах провідностями, а генераторних вузлів — постійними електрорушійними силами, які закріплюються за реактивними опорними, значення яких відповідає статизму за напругою автоматичних регуляторів збудження синхронних генераторів. Така модель використовується в програмах розрахунку динамічної стійкості для моделювання ЕЕС на часовому кроці чисельного інтегрування диференціальних рівнянь динаміки системи. Запропоновано блок-схему алгоритму визначення максимально і аварійно допустимих перетинів в контрольованих перетинах електроенергетичної системи. Створено окремий модуль автоматизованого розрахунку запасу статичної стійкості в перетині ЕЕС з можливістю вибору певних траєкторій обважнення з бібліотеки. Траєкторії обважнення підготовлюються в спеціально створеному редакторі, в якому передбачено покрокову зміну потужності електростанцій і електричних навантажень в різних частинах математичної моделі енергосистеми, а також і зміну кута ЕРС генераторів. Проведено розрахунки для визначення граничної потужності в перетинах ОЕС України для схеми, яка містить 614 вузлів і 975 віток.

Ключові слова: електроенергетична система, перетин, статична стійкість, коефіцієнт запасу

Вступ

Розрахунки граничних за статичною стійкістю режимів актуальні для проектування і експлуатації електроенергетичних систем і мають як самостійне значення, так і є складовою частиною інших електротехнічних завдань, пов'язаних із забезпеченням необхідного рівня надійності і ефективності функціонування ЕЕС. На сьогодні актуальність питань, пов'язаних з розрахунками граничних режимів, оцінюванням запасів і побудовою областей статичної аперіодичної стійкості в просторі регульованих параметрів, істотно зростає. Це викликано широким впровадженням в електроенергетику сучасних засобів обчислювальної техніки, створенням інформаційно-обчислювальних систем і оперативних інформаційних комплексів для розв'язання задач диспетчерського та протиаварійного керування енергосистемами. Таким чином, задача визначення стійкості електроенергетичної системи є актуальною, і роботу в цьому напрямі потрібно більше орієнту-

вати на автоматизацію розрахунків запасів стійкості для збільшення ефективності оперативного керування ЕЕС.

Метою досліджень є створення методики, алгоритму і програмної реалізації автоматизованого розрахунку запасу статичної стійкості в перетині ОЕС України в складі програмного комплексу аналізу стійкості складних електроенергетичних систем.

Результати дослідження

В Керівних вказівках щодо розрахунків граничних за стійкістю режимів зазначено, що граничний за статичною стійкістю перетік у перетині визначають обважненням режиму (збільшенням перетоку). При цьому слід вважати, що всі пристрої автоматичного керування, які перешкоджають досягненню граничного перетоку в цьому перетині (засоби ПК, автоматичного обмеження перетоку тощо) відключено. Розглядають траєкторії обважнення, що є послідовністю усталених режимів, які в разі зміни деякого параметра або групи параметрів дають змогу досягти границі області статичної стійкості. Траєкторії обважнення режиму повинні значною мірою змінювати потужність в обраному перетині. Розрахунок обважнених режимів супроводжують перевіркою їх аперіодичної стійкості [1]. Обважнення електричного режиму здійснюють покроковою зміною потужності електростанцій і електричних навантажень в різних частинах математичної моделі енергосистеми. Одним з основних інструментів аналізу статичної аперіодичної стійкості енергосистеми є аналіз перетоків потужності по лініях електропередачі в перетинах. Під перетином розуміється сукупність елементів електромережі (трансформаторів, ліній електропередачі), що здійснюють зв'язок двох частин енергосистеми між собою або електростанції з енергосистемою. Розрахунок границь статичної аперіодичної стійкості енергосистем є частиною більш загальної задачі визначення допустимої області параметрів режиму. При цьому розглядаються такі фактори, як забезпечення запасу по статичній аперіодичній стійкості, урахування наявних обмежень за критерієм динамічної стійкості, технологічні обмеження електричного обладнання та систем автоматичного керування та інші фактори, зумовлені індивідуальними умовами експлуатації конкретної енергосистеми. З огляду на імовірнісний характер електричного навантаження енергосистеми, під час ведення електричного режиму має бути забезпечений необхідний запас статичної стійкості, який визначається у вигляді коефіцієнта запасу [1]

$$K_p = (P_{гр} - P - \Delta P) / P,$$

де $P_{гр}$ — гранична потужність в перетині за умовою статичної стійкості; P — перетік активної потужності в перетині для розглянутого режиму, $P > 0$; ΔP — амплітуда нерегулярних коливань перетоку активної потужності в перетині (допускається, що за наявності нерегулярних коливань перетоку змінюються в діапазоні $P \pm \Delta P$).

Значення амплітуди нерегулярних коливань активної потужності (ΔP) у перетині, який розглядається, визначають за результатами вимірювань (нерегулярні коливання мають період від 2 хв до 60 хв залежно від засобів регулювання перетоку).

За відсутності результатів вимірювань ΔP розраховують за формулою

$$\Delta P = K \sqrt{\frac{P_{H1} \cdot P_{H2}}{P_{H1} + P_{H2}}},$$

де P_{H1}, P_{H2} — сумарні потужності навантаження (для режиму максимальних навантажень) з кожної із сторін розглядуваного перетину, МВт.

Коефіцієнт K становить 1,5 за умови ручного регулювання перетоку потужності в перетині і 0,75 — для автоматичного регулювання та обмеження перетоку потужності в перетині [1].

Для вибору траєкторії обважнення в умовах реальних енергосистем однозначних правил не існує, проте можуть бути наведені варіанти. Траєкторія обважнення задається у вигляді вектора змін параметрів електричного режиму на кожному кроці обважнення, які призводять до зміни перетікання активної потужності в перетині (рис. 1).

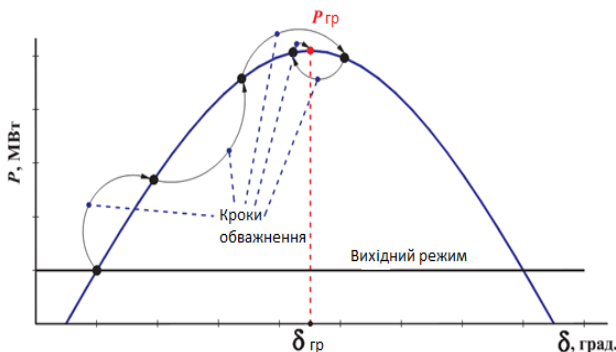


Рис. 1. Зміна перетікання активної потужності в перетині за траєкторією обважнення

Траєкторія обважнення задається у вигляді вектора змін параметрів електричного режиму на кожному кроці обважнення, які призводять до зміни перетікання активної потужності в перетині (рис. 1).

Вектор зміни режиму, який приймається, повинен враховувати особливості певної системи і критерії стійкості, за якими буде визначатися граничний режим. Звичайно рекомендується використовувати такі способи обважнення режиму або їх комбінації: перерозподіл генерування активної потужності між електричними станціями; зміна навантаження для найзавантаженіших вузлових підстанцій (районів, територій). В цій роботі, на відміну від існуючих, передбачено можливість виконання обважнення за кутом векторів ЕРС генераторів. Спосіб обважнення електричного режиму шляхом перерозподілу генерування активної потужності між електричними станціями слід застосовувати для визначення граничної переданої потужності довгих і/або дуже завантажених електропередач. За допомогою цього способу, як правило, визначають пропускну здатність електричної мережі. Під час формування вектора зміни режиму для кожної енергосистеми необхідно вибрати групу передавальних і балансуєчих електростанцій (або енерговузлів), розраховуючи, що збільшення перетоків активної потужності відбувається через певний перетин. Коректність вибору електростанцій, між якими в ході процесу обважнення ведеться перерозподіл генерування активної потужності, слід контролювати, а саме: розвантаження генерувального обладнання до технологічного мінімуму; відключення окремих генераторів електростанцій в частині енергосистеми, з якої здійснюється передача потужності по перетину; завантаження генерувального обладнання до значення наявної потужності; включення окремих генераторів електростанцій; використання дозволених аварійних перевантажень ввімкненого генерувального обладнання.

На останньому етапі обважнення здійснювалося шляхом послідовного збільшення кутів ЕРС генераторів, потужність яких планується підвищити. Для цього розроблена модифікація програми розрахунку стаціонарного режиму в лінеаризованій постановці. Оскільки розрахунок для такої моделі виконується прямим (безітераційним) методом, в такому підході відсутня проблема збіжності ітераційного процесу. Однак, необхідно підбирати значення збільшення кута, яке давало б (приблизно) бажане збільшення електричної потужності. Імітаційним моделюванням обрано $d\delta = 3$ град. Визначення режиму, граничного за умовами статичної стійкості, як граничного за критерієм існування режиму в мережі змінного струму вимагає розрахунку цього стаціонарного режиму. З огляду на те, що традиційний запис рівнянь усталеного режиму ЕЕС (через потужності навантаження і генерування) приводить до нелінійних рівнянь щодо напруги в вузлах, єдиною можливістю розрахунку є використання ітераційних методів розв'язання нелінійних систем рівнянь. Методи і алгоритми розрахунку, які використовуються в сучасних програмах, досить потужні, але цілком очевидно, що в разі завдання для розрахунку неіснуючого режиму (на траєкторії обважнення, коли параметри граничного режиму невідомі) ітераційний процес розрахунку може не сходитися. Це вимагає виконання кількох спроб зі зменшеним значенням кроку обважнення за потужністю. Однак, якщо поблизу границі існування режиму перейти на лінійну (лінеаризовану) модель, то розрахунок можна виконати прямим, безітераційним методом — методом виключення Гауса. У розробленій авторами програмі використовується лінеаризація моделі ЕЕС шляхом заміни навантажень в вузлах провідностями, а генерувальних вузлів — постійними електрорушійними силами (ЕРС), які закріплюються за реактивними опорами, значення яких відповідає статизму за напругою автоматичних регуляторів збудження синхронних генераторів. Саме така модель використовується в програмах розрахунку динамічної стійкості для моделювання ЕЕС на часовому кроці чисельного інтегрування диференціальних рівнянь динаміки системи. Лінійна система алгебраїчних рівнянь, яка при цьому виникає, розв'язується методом послідовного виключення невідомих, за допомогою ефективного алгоритму використання лише ненульових елементів матриці (беручи до уваги, що вихідна матриця заповнена дуже нещільно). Використання такої моделі дозволяє виконувати обважнення за кутом векторів ЕРС і безітераційно досягати граничного режиму.

Блок-схема алгоритму визначення максимально і аварійно допустимих перетікань в контрольованих перетинах електроенергетичної системи показана на рис. 2. Траєкторії обважнення режиму повинні найбільшою мірою змінювати розглядуваний режим перетину. Розрахунок обважнених режимів супроводжують перевіркою їх аперіодичної стійкості. З огляду на це в складі програмного комплексу аналізу стійкості складних електроенергетичних систем розроблено окремий модуль автоматизованого розрахунку запасу статичної стійкості в перетині ЕЕС [2].

Для спрощення розрахунків передбачена можливість задавання різних траєкторій обважнення за допомогою редактора їх підготовки (рис. 3). Спочатку вибирають режим з бібліотеки, на якому буде задаватися траєкторія, потім за допомогою спеціальних вікон задаються зміни генерування і обважнення за кутом на блоках станцій, комутації та навантаження вузлів, а в кінці кожного кроку — тип розрахунку. Режим можна отримати або з програмного комплексу оцінки стану ЕЕС, або підготувати

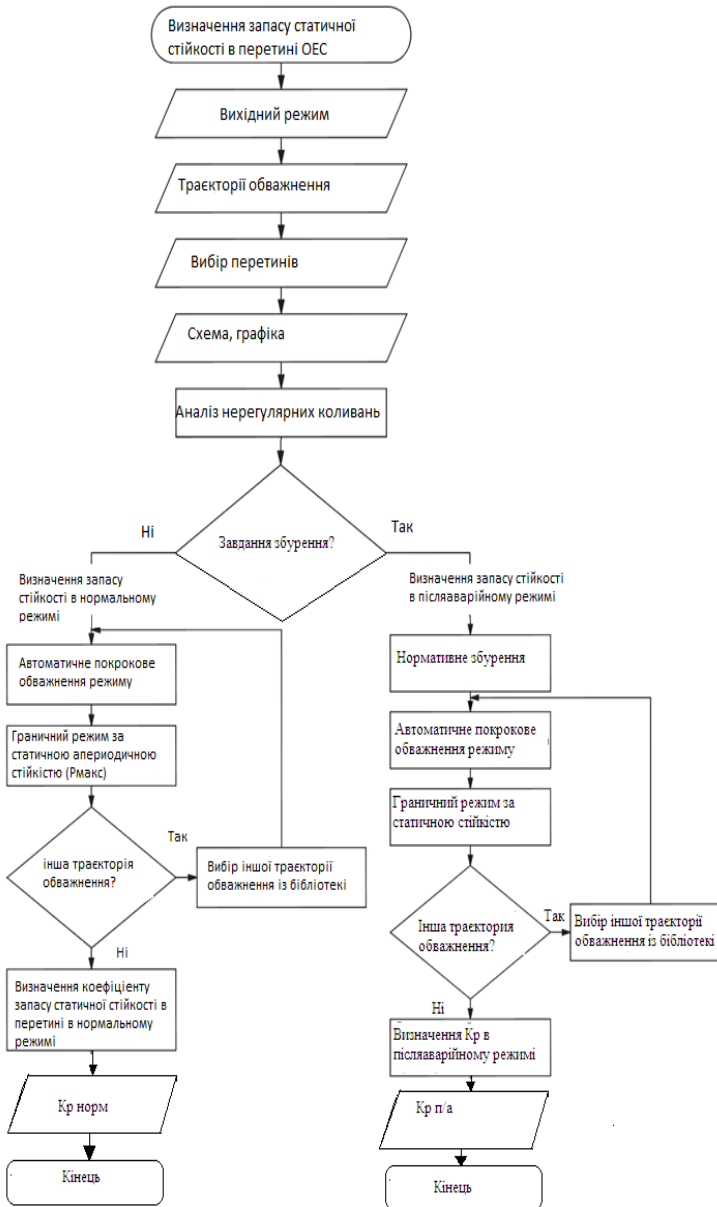


Рис. 2. Алгоритм визначення перетікань в контрольованих перетинах ЕЕС

off-line (режими максимальних, мінімальних навантажень, ремонтні). Далі передбачена можливість виконання розрахунку за всією траєкторією обважнення, або за окремими пунктами (рис. 4) з контролем сумарного перетоку потужності в обраному перетині. Перетини задаються заздалегідь в редакторі перетинів.

В процесі виконання розрахунку усталеного режиму за обраною траєкторією отримано граничне значення перетоку потужності в перетині, а потім за формулою визначено значення коефіцієнта запасу статичної стійкості в перетині електроенергетичної системи. Програму використано для визначення граничної потужності в перетинах ОЕС України, далі наведено деякі результати для отриманого режиму, оцінювання стану для схеми, яка містить 614 вузлів і 975 віток. Для перетину Захід–Вінниця обважнення здійснювалося збільшенням до максимуму потужності генераторів РАЕС і ХАЕС з відповідним зменшенням генерування Київської, Канівської, Кременчуцької ГЕС, а далі збільшенням кутів ЕРС генераторів РАЕС і ХАЕС за фіксованих кутів ЕРС інших генераторів системи.

Для досліджуваного режиму за розрахунком ПК «КОСМОС» потужність перетину, який складається з лінії ВЛ-750 кВ Хмельницька АЕС—Чорнобильська АЕС, Західно-Українська ПС—ПС «Вінниця-750», ВЛ-330 кВ ХАЕС—Шепетівка, ХАЕС — Хмельницький, ЗУ ПС — Бурштинська ТЕС, дорівнює: $P_{пер.} = 920 + 638 + 254 + 533 + 382 = 2727$ МВт.

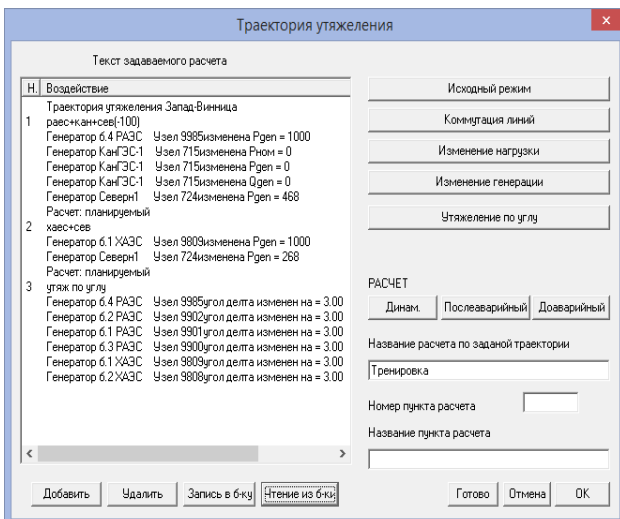


Рис. 3. Вікно редактору траєкторії обважнення

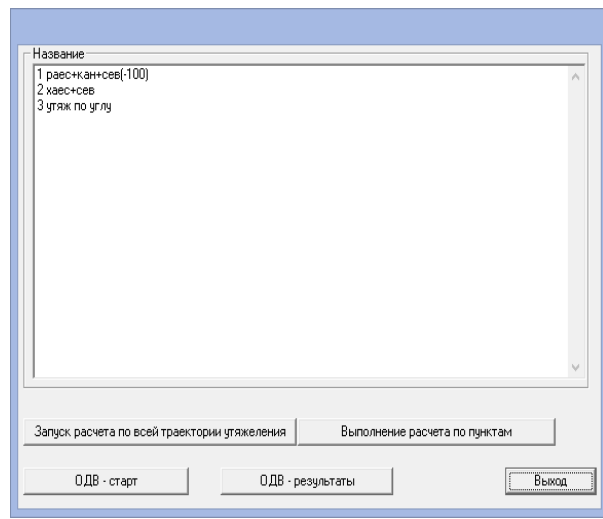


Рис. 4. Вікно вибору розрахунку режимів за траєкторією обважнення

Значення граничної потужності за критерієм існування режиму: $P_{гр.} = 4164$ МВт. Для перетину Вінниця — Южно-Українська АЕС (в напрямку на схід) $P_{гр.} = 4071,7$ МВт. Для Південного перетину: $P_{гр} = 3617,6$ МВт (перша траєкторія обважнення); $P_{гр} = 3297,4$ МВт (друга траєкторія обважнення); $P_{гр} = 3457,3$ МВт (третя траєкторія обважнення). Верифікація результатів проведена на підставі даних НЕК «Укренерго» щодо режиму для цієї схеми, отриманому оцінюванням стану за програмним комплексом «КОСМОС».

Таким чином, розроблений модуль автоматизованого розрахунку дозволяє швидко, зручно та ефективно визначати запас статичної стійкості в перетині електроенергетичної системи.

Висновки

Запропоновано методику визначення запасу статичної стійкості в перетині ОЕС України, яка дозволяє, завдяки виконанню обважнення за кутом векторів ЕРС генераторів, безітераційно досягати граничного режиму, що підвищує точність визначення граничної активної потужності в перетині.

Розроблено алгоритм визначення максимально і аварійно допустимих перетоків в контрольованих перетинах електроенергетичної системи, за яким виконано програмну реалізацію автоматизованого розрахунку запасу статичної стійкості в перетині ОЕС України в складі Програмного комплексу аналізу стійкості складних електроенергетичних систем.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] ГКД 34.20.575-2002. *Стійкість енергосистем. Керівні вказівки*. Мінпаливенерго України, Київ, 2002.
 [2] В. М. Авраменко, В. Л. Прихно, О. В. Мартинюк, та Н. Т. Юнєєва, *Адаптивні засоби забезпечення стійкості та живучості об'єднаної енергосистеми України*. Київ, Україна: Інститут електродинаміки НАН України, 2016, 100 с.

Рекомендована кафедрою електричних станцій та систем ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 16.01.2018

Авраменко Володимир Миколайович — д-р техн. наук, професор, провідний науковий співробітник, e-mail: avr@ied.org.ua ;

Юнєєва Наталія Тахірджанівна — канд. техн. наук, науковий співробітник, e-mail: untunt@ukr.net.
 Інститут електродинаміки НАН України, Київ;

Кришталь Анна Олександрівна — студентка Фізико-технічного інституту, e-mail: annakryshstal01@gmail.com .
 Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ

V. M. Avramenko¹
N. T. Yunieieva¹
A. O. Kryshstal²

Automated Calculation of the Sustainability of the Cross Section of the Electrical Power Systems

¹Institute of Electrodynamics of National Academy of Science of Ukraine;

²National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»

The approach adopted in the work involves focusing on the control of static stability of the UES on the criterion of existence of the regime, subject to weighing of certain sections. In practice, this means that on the trajectory of weighing it is necessary to find the mode which has the greatest power in the investigated section, for which the coefficient of the reserve of static stability at the active power in the intersection is calculated and normalized by the "Guideline" on the stability of the power systems. A modification of the program of calculating the stationary regime in a linearized formulation, which allows us to perform weighting at the angle of the vectors of electromotive forces (EMF), without the iterative approach to the boundary regime and to specify the stock of static stability at the intersection of the Electric Power System (EPS). The linearization of the EPS model is carried out by replacing the loads in the nodes of the conductivities, and the generating nodes — by constant electromotive forces, which are fixed on the reactive supports, the magnitude of which corresponds to the staticity of the voltage of the automatic regulators of excitation of the synchronous generators. Such a model is used in the programs for calculating the dynamic stability for the simulation of EPS at the time step of numerical integration of the differential equations of dynamics of the system. A block diagram of the algorithm for determining the maximum and unacceptable fluxes in controlled sections of the electric power system is proposed. A separate module for the automated calculation

of the static stability reserve at the intersection of the EPS with a choice of certain weighting trajectories from the library was created. Trajectories weighing are prepared in a specially created editor, which provides a step-by-step change in the power of power stations and electrical loads in different parts of the mathematical model of the power system and the change of the angle of the EMF generators. Calculations were made to determine the boundary power at the cross sections of the UES of Ukraine for a scheme containing 614 nodes and 975 branches.

Keywords: electric power system, cross section, steady state stability, reserve ratio.

Avramenko Volodymyr M. — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Senior Research Fellow, e-mail: avr@ied.org.ua ;

Yunieiieva Nataliia T. — Cand. Sc. (Eng.), Research Fellow, e-mail: untunt@ukr.net ;

Kryshhtal Anna O. — Student of the Institute of Physics and Technology, e-mail: annakryshhtal01@gmail.com

В. Н. Авраменко¹
Н. Т. Юнеева¹
А. А. Кришталь²

Автоматизированный расчет запаса статической устойчивости в сечении электроэнергетической системы

¹Институт электродинамики Национальной Академии наук Украины;

²Национальный технический университет Украины

«Киевский политехнический институт им. Игоря Сикорского»

Принятый в работе подход предполагает ориентацию на контроль статической устойчивости ОЭС по критерию существования режима при утяжелении определенных сечений. Практически это означает, что на траектории утяжеления нужно найти режим, который имеет наибольшую мощность в исследуемом сечении, по которому вычисляется и нормируется «Руководящими указаниями» по устойчивости энергосистем коэффициент запаса статической устойчивости по активной мощности в сечении. Разработана модификация программы расчета стационарного режима в линеаризованной постановке, которая позволяет выполнять утяжеление по углу векторов электродвижущих сил (ЭДС), безитерационно достигать предельного режима и уточнять запас статической устойчивости в сечении ЭЭС. Линеаризация модели ЭЭС осуществляется путем замены нагрузок в узлах проводимостями, а генерирующих узлов — постоянными электродвижущими силами, которые закрепляются за реактивными сопротивлениями, значение которых соответствует статизму по напряжению автоматических регуляторов возбуждения синхронных генераторов. Такая модель используется в программах расчета динамической устойчивости для моделирования ЭЭС на временном интервале численного интегрирования дифференциальных уравнений динамики системы. Предложена блок-схема алгоритма определения максимально и аварийно допустимых перетоков в контролируемых сечениях электроэнергетической системы. Создан отдельный модуль автоматизированного расчета запаса статической устойчивости в сечении ЭЭС с возможностью выбора определенных траекторий утяжеления из библиотеки. Траектории утяжеления подготавливаются в специально созданном редакторе, в котором предусмотрено пошаговое изменение мощности электростанций и электрических нагрузок в различных частях математической модели энергосистемы и изменение угла ЭДС генераторов. Проведены расчеты для определения предельной мощности в сечениях ОЭС Украины для схемы, содержащей 614 узлов и 975 ветвей.

Ключевые слова: электроэнергетическая система, сечение, статическая устойчивость, коэффициент запаса.

Авраменко Владимир Николаевич — д-р техн. наук, профессор, ведущий научный сотрудник, e-mail: avr@ied.org.ua ;

Юнеева Наталия Тахирджановна — канд. техн. наук, научный сотрудник, e-mail: untunt@ukr.net ;

Кришталь Анна Александровна — студент Физико-технического института, e-mail: annakryshhtal01@gmail.com