

УДК 621.311

Сулейманов В. М., к. т. н, проф.,
Кацадзе Т. Л., к. т. н, доц.

МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ ВСТАВОК ПОСТІЙНОГО СТРУМУ В РОЗРАХУНКАХ УСТАЛЕНИХ РЕЖИМІВ ЕЛЕКТРИЧНИХ СИСТЕМ

Запропоновано уніфіковані моделі вставок постійного струму, які дозволяють враховувати можливості незалежного регулювання частоти в окремих енергосистемах, поєднаних на паралельну роботу. Експериментально підтверджено ефективність використання ітераційних та безітераційних моделей вставок постійного струму.

Предложены унифицированные модели вставок постоянного тока, позволяющие учитывать возможности независимого регулирования частоты в отдельных энергосистемах, объединенных на параллельную работу. Экспериментально подтверждена эффективность использования итерационных и безытерационных моделей вставок постоянного тока.

The compatible model of DC-link are offered. This model allows to take into account independent adjusting of frequency in the power systems. Efficiency of the usage mathematical models of DC-link is experimentally confirmed.

Вступ. Сучасний розвиток технологій в галузі силової електроніки дозволяє створювати досить дешеві перетворювальні пристрої високої напруги практично будь-якої необхідної потужності, які відрізняються високою надійністю роботи. Ця обставина вимагає розгляду технічних і практичних аспектів проблеми, пов'язаної з розробкою і впровадженням у структуру Об'єднаної енергосистеми (ОЕС) України пристроїв забезпечення паралельної роботи енергосистем як гнучких засобів регулювання перетоків потужності внутрішніх і міждержавних зв'язків між окремими енергосистемами ОЕС України і зовнішніми енергосистемами сусідніх держав. Це, безсумнівно, буде призводити до підвищення надійності енергопостачання споживачів ОЕС України, особливо в складних аварійних ситуаціях, і, як наслідок, підвищення енергетичної безпеки України.

Без використання в ОЕС України пристроїв подібного призначення проблема об'єднання ОЕС України з енергооб'єднанням країн Європи UCTE може стати практично нерозв'язаною на найближчу перспективу.

Аналіз досліджень і публікацій. Вставка постійного струму (ВПС) є складним нелінійним елементом, який різко ускладнює умови збіжності ітераційного розрахунку усталеного режиму електричної системи [1–7]. Ця

обставина висуває жорсткі вимоги до надійності роботи програмних режимних комплексів, які враховують вплив ВПС.

На сьогодні у вітчизняній практиці проектування, дослідження та аналізу режимів роботи електричних систем практично відсутні адекватні математичні моделі елементів пристроїв забезпечення паралельної роботи енергосистем у складі енергооб'єднання, які характеризуються високою точністю не тільки для усталених, але найголовніше, для динамічних режимів їхньої роботи з урахуванням взаємодії з великими електричними системами, до яких належить ОЕС України.

Постановка завдання. Таким чином, актуальною є задача розробки ефективних математичних моделей ВПС, які дозволять створити надійні швидкісні алгоритми розрахунків усталених режимів електричних систем, які містять ВПС.

Розглянемо найбільш перспективні дві математичні моделі ВПС, побудовані на ітераційній та безітераційній основах.

Ітераційна модель ВПС.

Як відомо, основною характеристикою режиму ВПС є задана активна потужність передачі $P_{\text{зад}}$. При індивідуальному розгляданні ВПС окремо від електричної системи мають бути відомі також модулі напруги з боку випрямляча $U_{\text{в}}$ та інвертора $U_{\text{і}}$. В результаті розрахунків слід визначити значення реактивної потужності з боку випрямляча та з боку інвертора ($Q_{\text{в}}$ та $Q_{\text{і}}$), а також внутрішніх регульованих параметрів ВПС: кута запалення випрямляча α та кута погасання інвертора δ .

Зазначимо, що кути α і δ не можуть змінюватися необмежено. Тут мають враховуватися обмеження $\alpha_{\min} \leq \alpha \leq \alpha_{\max}$; $\delta_{\min} \leq \delta \leq \delta_{\max}$. Як граничні значення таких кутів зазвичай приймають $\alpha_{\min} = 5^\circ$; $\delta_{\min} = 15^\circ$; $\alpha_{\max} = \delta_{\max} = 40^\circ$.

Крім зазначених обмежень по кутах існують також обмеження по активній та реактивній потужностям передачі, а також коефіцієнтах трансформації трансформаторів з боку випрямляча та з боку інвертора.

В загальному випадку активну потужність ВПС можна визначити з боку випрямляча за виразом

$$P_{\text{в}} = U_{\text{в}} I_{\text{в}} \cos \varphi_{\text{в}} \quad (1)$$

або з боку інвертора

$$P_{\text{і}} = U_{\text{і}} I_{\text{і}} \cos \varphi_{\text{і}}, \quad (2)$$

де $\varphi_{\text{в}}$ та $\varphi_{\text{і}}$ – кути між векторами напруги та струму з боку випрямляча та інвертора відповідно.

Модуль змінного струму визначають за виразом

$$I_{\text{в}} = I_{\text{і}} = \frac{6\sqrt{2}}{\pi} I_{\text{д}},$$

де $I_{\text{д}}$ – постійний струм між випрямлячем та інвертором.

Оскільки втрати активної потужності усередині ВПС майже відсутні, то очевидно, що

$$P_B = P_i = P_{\text{зад}}.$$

Тобто

$$\cos \varphi_B = \frac{U_i}{U_B} \cos \varphi_i. \quad (3)$$

Коефіцієнти потужності випрямляча та інвертора пов'язані з кутами запалення та погасання виразами

$$\cos \varphi_B = \cos \alpha - \frac{x_B I_d}{\sqrt{2} U_B}, \quad (4)$$

$$\cos \varphi_i = \cos \delta - \frac{x_i I_d}{\sqrt{2} U_i}. \quad (5)$$

Після виключення коефіцієнтів потужності $\cos \varphi_B$ та $\cos \varphi_i$ з рівнянь (3)–(5) отримуємо вираз для визначення випрямленого струму ВПС

$$I_d = \frac{\sqrt{2}}{x_B - x_i} (U_B \cos \alpha - U_i \cos \delta). \quad (6)$$

Аналіз виразу (6) дозволяє зробити наступні висновки:

- 1) еквівалентні реактивності випрямляча та інвертора не можуть бути однаковими ($x_B \neq x_i$);
- 2) для збільшення струму (і відповідно потужності) ВПС слід зменшити напругу з боку інвертора, або збільшити її з боку випрямляча;
- 3) для збільшення величини випрямленого струму I_d слід збільшити кут погасання або зменшити кут запалення.

Вирази (1) та (2) для ВПС можна записати у вигляді

$$P = \frac{6\sqrt{2}}{\pi} I_d U_B \cos \varphi_B. \quad (7)$$

З урахуванням рівняння (4) вираз (7) набуває вигляду

$$P = \frac{6\sqrt{2}}{\pi} I_d U_B \left(\cos \alpha - \frac{x_B I_d}{\sqrt{2} U_B} \right),$$

а з урахуванням рівняння (6) отримуємо

$$P = \frac{12}{\pi (x_B - x_i)^2} \left[(x_B + x_i) U_B U_i \cos \alpha \cos \delta - x_i U_B^2 (\cos \alpha)^2 - x_B U_i^2 (\cos \delta)^2 \right], \quad (8)$$

Нехай на поточній i -й ітерації розрахунку усталеного режиму нев'язка активної потужності ВПС складає $\Delta P^{(i)}$. Тоді відповідно до методу Ньютона зазначена нев'язка може бути зменшена за рахунок зменшення косинуса кута погасання $\cos \delta$ або кута запалення $\cos \alpha$:

$$\cos \delta^{(i+1)} = \cos \delta^{(i)} - \left(\frac{\partial P}{\partial \cos \delta} \right)_{(i)}^{-1} \Delta P^{(i)}, \quad (9)$$

$$\cos \alpha^{(i+1)} = \cos \alpha^{(i)} - \left(\frac{\partial P}{\partial \cos \alpha} \right)_{(i)}^{-1} \Delta P^{(i)}. \quad (10)$$

Нев'язку активної потужності визначають як різницю між поточним значенням активної потужності ВПС, визначену згідно (8) та її заданим значенням.

Оскільки споживання реактивної потужності буде мінімальним за умовами мінімально можливих кутів запалення, то основним режимом ВПС має бути режим, за якого $\alpha = \alpha_{\min}$.

Таким чином, узагальнений алгоритм розрахунку режимних параметрів електричної системи, яка містить ВПС, складається з наступних основних розрахункових процедур.

1. Призначають початкові наближення кутів управління перетворювачів вставки постійного струму

$$\alpha = \alpha_{\text{ном}}; \delta = \delta_{\text{ном}};$$

а також рівнів напруги на шинах випрямляча та інвертора

$$\dot{U}_B = U_{\text{ном}}; \dot{U}_i = U_{\text{ном}}.$$

В загальному випадку номінальні напруги електричних систем, які примикають до шин випрямляча та інвертора можуть не співпадати.

2. Відповідно до виразу (8) визначають поточну розрахункову величину активної потужності ВПС та нев'язку активної потужності ВПС. Останню визначають як різницю між розрахунковою та заданою величинами активної потужності

$$\Delta P = P - P_{\text{зад}}.$$

Якщо нев'язка активної потужності ΔP задовольняє умовам інженерної точності ε , тобто

$$\Delta P \leq \varepsilon,$$

то задачу розрахунку параметрів усталеного режиму електричної системи слід вважати розв'язаною. В іншому випадку управління слід передати наступним процедурам алгоритму.

3. Розраховують значення часткової похідної від активної потужності ВПС по косинусу кута погасання інвертора

$$\frac{\partial P}{\partial \cos \delta} = \frac{12}{\pi (x_B - x_i)^2} \left[(x_B + x_i) U_B U_i \cos \alpha - 2 x_B U_i^2 \cos \delta \right]$$

та уточнюють за виразом (9) величину кута погасання інвертора.

Здійснюють перевірку допустимості величини кута погасання інвертора. Якщо величина кута погасання знаходиться всередині допустимого діапазону, тобто

$$\cos \delta_{\min} \leq \cos \delta \leq \cos \delta_{\max},$$

то управління передають процедурі 5 даного алгоритму. В іншому випадку фіксують величину кута погасання на порушеній межі.

4. Розраховують значення часткової похідної від активної потужності ВПС по косинусу кута запалення випрямляча

$$\frac{\partial P}{\partial \cos \alpha} = \frac{12}{\pi (x_b - x_i)^2} \left[(x_b + x_i) U_b U_i \cos \delta - 2 x_i U_b^2 \cos \alpha \right]$$

та уточнюють за виразом (10) величину кута запалення випрямляча.

Здійснюють перевірку допустимості величини кута запалення випрямляча. Якщо величина кута запалення знаходиться всередині допустимого діапазону, тобто

$$\cos \alpha_{\min} \leq \cos \alpha \leq \cos \alpha_{\max},$$

то управління передають процедурі 5 даного алгоритму. В іншому випадку фіксують величину кута погасання на порушеній межі та приймають рішення про неможливість передачі по ВПС заданої активної потужності.

При цьому граничне значення активної потужності, яку можна передати через ВПС знаходять на підставі виразу (8) з урахуванням фіксованих граничних значень кутів управління ВПС.

5. Розраховують величину випрямленого струму ВПС

$$I_d = \frac{\sqrt{2}}{(x_b - x_i)(U_b \cos \alpha - U_i \cos \delta)}. \quad (11)$$

Якщо випрямлений струм ВПС перевищує своє граничне значення, тобто

$$I_d > I_{d\max},$$

то ця обставина свідчить про неможливість передачі через ВПС заданої активної потужності. За цих умов величину випрямленого струму слід зафіксувати на порушеній межі.

6. Розраховують величини коефіцієнтів потужності на шинах випрямляча та інвертора:

$$\begin{aligned} \cos \varphi_b &= \cos \alpha - x_b I_d / (\sqrt{2} U_b); \\ \cos \varphi_i &= \cos \delta - x_i I_d / (\sqrt{2} U_i), \end{aligned} \quad (12)$$

а також повні потужності на цих шинах

$$\begin{aligned} \dot{S}_b &= \frac{6\sqrt{2}}{\pi I_d U_b (\cos \varphi_b - j \sin \varphi_b)}; \\ \dot{S}_i &= \frac{6\sqrt{2}}{\pi I_d U_i (\cos \varphi_i - j \sin \varphi_i)}. \end{aligned} \quad (13)$$

7. Згідно відомих розрахункових моделей усталених режимів електричних систем визначають режимні характеристики електричних систем, які поєднані за допомогою вставок постійного струму. Для цього

шини ВПС з боку випрямляча слід розглядати як додаткове навантаження, активна потужність якого дорівнює потужності ВПС, а реактивна потужність визначається при моделюванні ВПС. З боку інвертора ВПС можна представити як додаткове джерело живлення, активна потужність якого дорівнює потужності ВПС, а реактивна визначається при моделюванні ВПС.

Після визначення режимних параметрів управління передають процедурі 2 алгоритму та виконують розрахунки на наступній ітерації.

Алгоритм моделювання ВПС в розрахунку ustalених робочих режимів електричних систем представлено на рис. 1.

Безітераційна модель ВПС

Вираз для визначення активної потужності ВПС (8) є рівнянням другого порядку по відношенню до змінних $\cos\alpha$ та $\cos\delta$. Однак, під час розрахунків конкретного ustalеного режиму ВПС одна з складових $\cos\alpha$ або $\cos\delta$ має бути зафіксованою. За цих умов задача зводиться до розв'язання квадратного рівняння

$$(\cos\delta)^2 - p_\delta \cos\delta + q_\delta = 0 \quad (14)$$

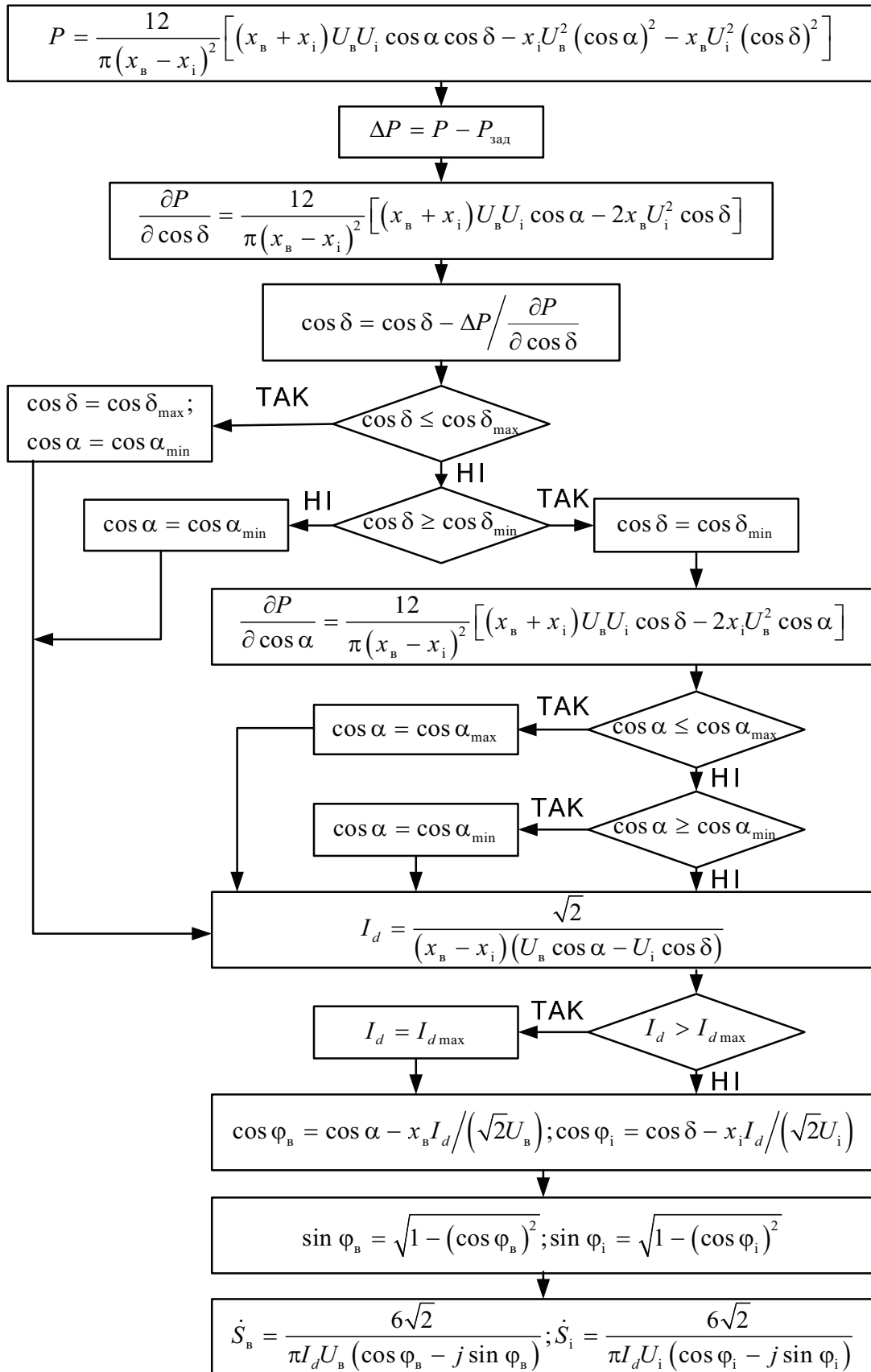
або

$$(\cos\alpha)^2 - p_\alpha \cos\alpha + q_\alpha = 0, \quad (15)$$

де

$$\begin{aligned} p_\delta &= \frac{(x_B + x_i)U_B U_i \cos\alpha}{x_B U_i^2}; \\ q_\delta &= \frac{12x_i U_B^2 (\cos\alpha)^2 + \pi(x_B - x_i)^2 P_{\text{зад}}}{12x_B U_i^2}. \end{aligned} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} p_\alpha &= \frac{(x_B + x_i)U_B U_i \cos\delta}{x_i U_B^2}; \\ q_\alpha &= \frac{12x_B U_i^2 (\cos\delta)^2 + \pi(x_B - x_i)^2 P_{\text{зад}}}{12x_i U_B^2}. \end{aligned} \quad (17)$$



За умови від'ємних значень дискримінантів квадратних рівнянь (14) та (15) значення $\cos \alpha$ та $\cos \delta$ визначають виходячи з граничної умови нульового значення дискримінанту за виразами:

$$\cos \alpha = \sqrt{\frac{\frac{\pi(x_B - x_i)^2 P_{\text{зад}}}{12x_B U_i^2}}{\left[\frac{(x_B + x_i)U_B U_i}{2x_B U_i^2}\right]^2 - \frac{x_i U_B^2}{x_B U_i^2}}}, \quad (18)$$

$$\cos \delta = \sqrt{\frac{\frac{\pi(x_B - x_i)^2 P_{\text{зад}}}{12x_i U_B^2}}{\left[\frac{(x_B + x_i)U_B U_i}{2x_i U_B^2}\right]^2 - \frac{x_B U_i^2}{x_i U_B^2}}}. \quad (19)$$

Таким чином модель ВПС може бути зведена до безітераційного алгоритму, який складається з послідовного виконання таких процедур.

1. Призначають початкові наближення кутів управління перетворювачів вставки постійного струму та рівнів напруги на шинах випрямляча та інвертора.

2. Відповідно до виразів (16) визначають значення коефіцієнтів поліному квадратного рівняння (14). Визначають дискримінант рівняння (14). Якщо величина дискримінанту є додатною або дорівнює нулю величину кута загасання інвертора визначають як корінь квадратного рівняння (14). В іншому випадку за виразом (18) визначають величину кута запалення випрямляча і відповідне значення кута загасання за виразом

$$\cos \delta = \frac{(x_B - x_i)U_B U_i \cos \alpha}{2x_B U_i^2}.$$

Здійснюють перевірку допустимості величини кута погасання інвертора. Якщо величина кута погасання знаходиться всередині допустимого діапазону $\cos \delta_{\min} \leq \cos \delta \leq \cos \delta_{\max}$, то управління передають процедурі 4 алгоритму. В іншому випадку фіксують величину кута погасання на порушеній межі.

3. Відповідно до виразів (17) визначають значення коефіцієнтів поліному квадратного рівняння (15). Визначають дискримінант рівняння (15). Якщо величина дискримінанту є додатною або дорівнює нулю величину кута загасання інвертора визначають як корінь квадратного

рівняння (15). В іншому випадку за виразом (19) визначають величину кута погасання інвертора і відповідне значення кута запалення за виразом

$$\cos \alpha = \frac{(x_B - x_i) U_B U_i \cos \delta}{2x_i U_B^2}.$$

Здійснюють перевірку допустимості величини кута запалення випрямляча. Якщо величина кута запалення знаходиться всередині допустимого діапазону $\cos \alpha_{\min} \leq \cos \alpha \leq \cos \alpha_{\max}$, то управління передають процедурі 4 алгоритму. В іншому випадку фіксують величину кута погасання на порушеній межі.

4. По співвідношенню (11) розраховують величину випрямленого струму ВПС. Якщо випрямлений струм ВПС перевищує своє граничне значення, то це свідчить про неможливість передачі через ВПС заданої активної потужності. За цих умов величину випрямленого струму слід зафіксувати на порушеній межі.

5. За виразами (12) розраховують величини коефіцієнтів потужності на шинах випрямляча та інвертора та також величини повної потужності на цих шинах згідно виразів (13).

6. На підставі відомих розрахункових моделей усталених режимів електричних систем визначають характеристики електричних систем, які поєднані за допомогою вставок постійного струму.

Після визначення режимних параметрів управління передають процедурі 2 алгоритму та виконують розрахунки на наступній ітерації.

Блок-схему безітераційного алгоритму моделювання ВПС при розрахунку усталеного режиму електричної системи представлено на рис. 2.

Для дослідження ефективності запропонованих математичних моделей ВПС авторами використана найпростіша електрична система, яка містить дві лінії електропередачі, пов'язані між собою ВПС. ВПС поділяє систему на дві підсистеми, які працюють з незалежними частотами змінного струму. Кожна з ліній електропередачі отримує живлення від шин нескінченної потужності, які в розрахунковій моделі представлені як БП. Ці ж самі вузли є опорними по напрузі. Лінії електропередачі та ВПС забезпечують живлення двох зосереджених навантажень, прикладених на шинах випрямно-інверторної підстанції.

Аналіз результатів проведених авторами експериментальних розрахунків підтверджує адекватність розробленої моделі та доцільність її використання для розрахунків параметрів усталеного режиму електричної системи, яка містить у своєму складі ВПС. При цьому виявлено, що безітераційна модель ВПС характеризується певними розрахунковими перевагами та більш високою надійністю отримання результату.

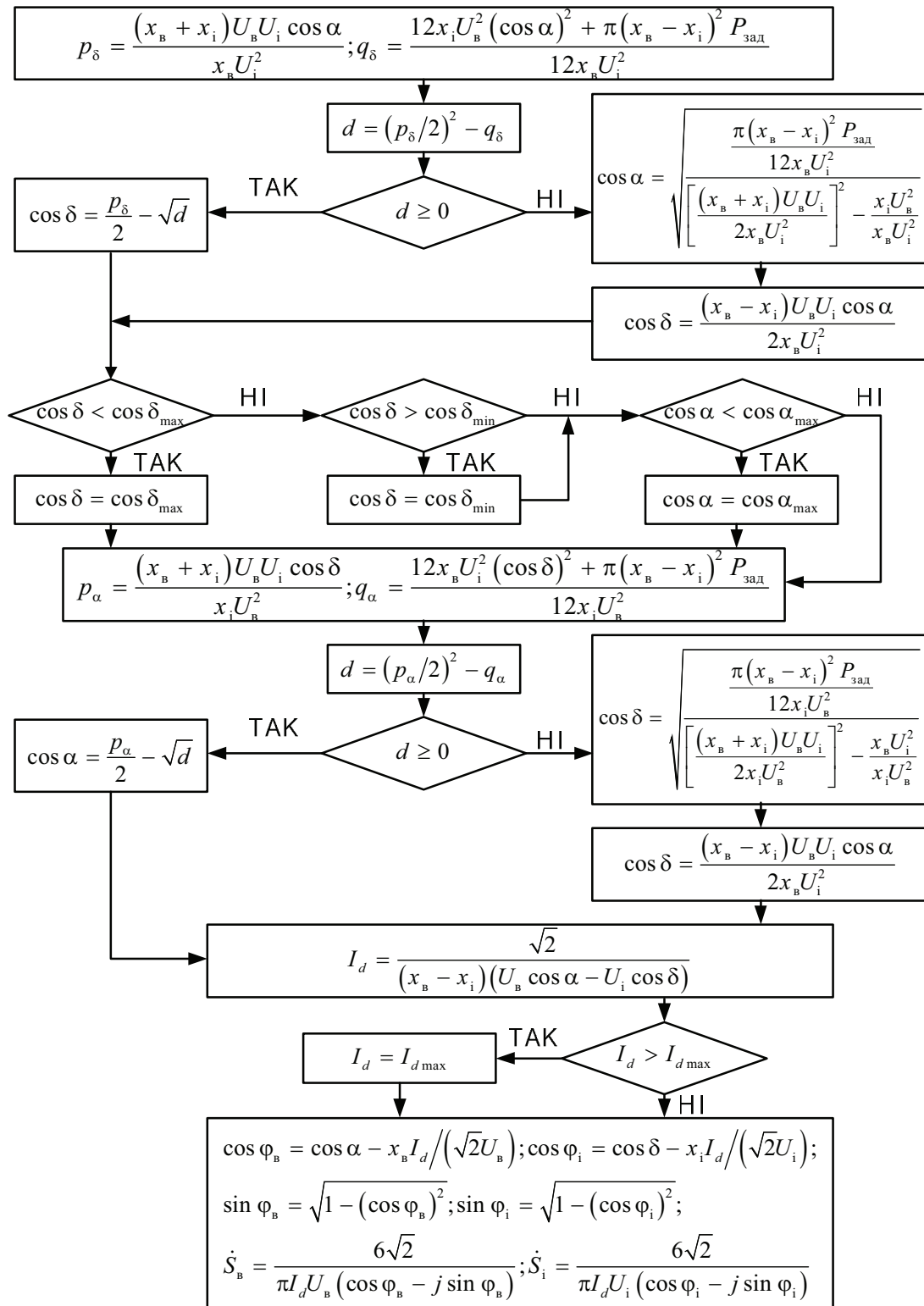


Рис. 2. Блок-схема безітераційної моделі ВПС в усталеному режимі електричної системи

Використані джерела інформації:

1. Андреюк В.А., Дижур Д.П., Кац П.Я., Шлайфтейн В.А. Устойчивость электропередач и вставок постоянного тока. // Передача электроэнергии постоянным током, М.: Энергоатомиздат, 1985, с. 77-88.

2. Андреюк В.А., Шлайфтейн В.А. Метод расчета электромеханических переходных процессов в энергосистеме, содержащей передачу постоянного тока. // Тр. НИИПТ, 1977, вып. 26, с. 67-75.
3. Диджур Д.П. Моделирование передачи постоянного тока на ЦВМ // Известия НИИ постоянного тока, 1971, вып 17.
4. Дижур Д.П., Шлайфтейн В.А. Анализ статической устойчивости вставки постоянного тока. // Тр. НИИПТ, 1980, вып. 29, с. 19-23.
5. Крайчик Ю.С. Общие зависимости между режимными параметрами на входах вентильной части преобразователей // Известия НИИПТ, №57, 2000, с. 3-13.
6. Нейман Л.Р., Глитерник С.Р., Емельянов А.В., Новицкий В.Г. Электропередача постоянного тока как элемент энергетических систем. // М.: И-во АН СССР, 1962. – 340 с.
7. Перхач В.С., Данилюк А.В. Математическая модель анализа электроэнергетических систем с вентильными устройствами // Техническая электродинамика, 1981, №4, с. 79-84.
8. Сулейманов В.Н., Мельник В.П., Ципоруха С.Г. Моделирование установившихся режимов работы объединенных энергосистем с учетом вставок постоянного тока //и электрификация, 1989, №4, с. 46-51.
9. Сулейманов В.Н., Кацадзе Т.Л., Лучин Н.Н. Моделирование установившихся режимов электрических систем, содержащих вставки постоянного тока // Энергетика: Экономика, технологии, экология, 2007, №1, с. 84-89.