

Перехідні процеси в системах електропостачання

**Лекція 15**

**ПЕРЕХІДНІ ПРОЦЕСИ В ОСОБЛИВИХ УМОВАХ**

**1. Перехідні процеси, обумовлені особливостями технології виробництва**

Електротехнологічні установки – широкоживані в різних галузях народного господарства зараз та з досить значними перспективами. Як споживачі електричної енергії ці установки мають низку специфічних особливостей, зокрема різноманітні режими роботи та перехідні процеси в СЕП підприємств [37-42, 44]. Це обумовлене різкозмінним, імпульсним, несинусоїдальним чи несиметричним характером навантаження, зміною напруги, появою електромагнітних перешкод у мережах і т.д. Коливання напруги викликані різкозмінними та ударними навантаженнями, характерними, в першу чергу, для електродугових сталеплавильних печей та електрозварювальних установок. Вони також можуть утворюватися такими споживачами, як вентильні перетворювачі для прокатних станів, електротягові установки тощо.

Відомо, що коливання напруги класифікують як зміни модуля напруги, які проходять з швидкістю не менше відсотка від номінальної напруги за секунду. Коливання напруги впливає на роботу світлотехнічних пристроїв, радіотелевізійної апаратури, систем автоматики та управління, обчислювальної техніки. При нелінійному навантаженні генеруються вищі гармоніки струмів, які перевантажують конденсаторні батареї, що викликає додаткові втрати потужності. Коливання напруги погіршує енергетичні показники електроустаткування та електричних мереж, а також змінює механічні характеристики електродвигунів, що небажано.

Нижче мова піде про особливості перебігу перехідних процесів у деяких електротехнологічних установках. Електродугові сталеплавильні печі належать до споживачів з циклічним різкозмінним режимом. Один з періодів графіка їх навантаження – плавлення металу – характеризується найбільшою нерівномірністю (сильні та часткові випадкові коливання струму), що пояснюється експлуатаційними КЗ. Протягом цього періоду витрачається 50...80 % усієї використаної за час плавки енергії, створюється ударний ефект в

електромережі. Для дугових печей характерна значна кількість вимикань від мережі під час плавки, пов'язаних з технологічними операціями або аварійними зупинками (до 10 за плавку).

У мережах підприємств з дуговими печами практично будь-які зміни напруги можна розглядати як коливання. Випадкові коливання напруги в живильній мережі часто перевищують допустимі межі і обумовлені коливаннями струму в печі через КЗ чи розрив дуги, періодичний характер регулювання процесу, а також особливості електричної дуги, що викликає коливання струму частотою від 2 до 10 кГц з амплітудою  $\pm 15\%$ . Коливання напруги складають 2...4 % при напрузі 110 і 35 кВ та 3...12 % при 6 і 10 кВ. Частота таких коливань – 0,5...1 Гц.

Ударний ефект дугових сталеплавильних печей оцінюють за допомогою методів, якими користуються при аналізі електричних кіл. Оцінка має велике значення для побудови СЕП підприємств з урахуванням впливу таких установок. Через випадковий характер змін параметрів навантаження дугових печей і розмахів коливань напруги при їх аналізі та нормуванні слід застосовувати методи теорії випадкових процесів. Аналізуючи коливання напруги в мережах живлення паралельно ввімкнених дугових печей, необхідно зважати на електромагнітний взаємний вплив.

Технологічні вимкнення дугових печей після обриву пічних дуг супроводжуються комутаційними перенапругами на обмотках вимкненого трансформатора. Оскільки кількість таких вимикань велика, а перенапруга значна, їх необхідно брати до уваги при розробці обладнання електропічної установки.

Рівень перенапруг визначається переважно швидкістю вимикача. Комутаційні перенапруги залежать від режиму роботи трансформатора. Найбільший рівень перенапруг (семиразовий) можливий при вимиканнях ненавантажених трансформаторів. Найсприятливіший режим з погляду виникнення значних перенапруг (п'ятиразових) при вимиканнях трансформаторів під навантаженням – у разі вимикання двофазного навантаження з струмами, близькими до значень струмів ненавантаженого агрегату. Напруги розраховують з використанням методів, поширених в електротехніці.

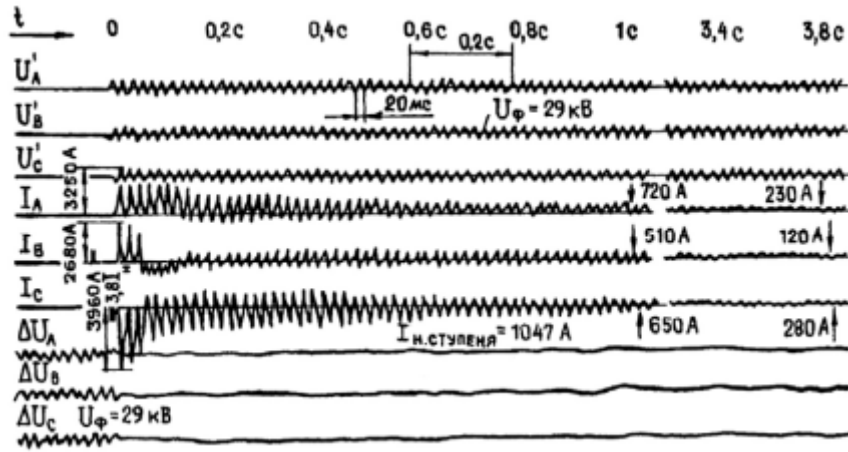


Рис. 1 Перехідний процес фазних струмів та напруг у живильній мережі при вмиканні в режимі холостого ходу трансформатора потужністю 45 МВ·А печі ДСП-200

Кратність можливих кидків струму намагнічування при вмиканні трансформаторів досягає  $4I_n$  (рис. 1). Кидки струмів різко зменшуються з переходом на нижчі ступені напруги, а також з прогріванням печі.

Імпульсний характер графіків навантаження електрозварювальних установок призводить до появи провалів в обвідній кривій напруги, форма яких залежить від форми індивідуальних імпульсів струму зварювання. Зміна струму та напруги на затискачах установки стикового зварювання потужністю 600 кВ·А зображені на рис. 2.

Закономірності змін провалів напруги відповідають закономірностям змін індивідуальних графіків і описуються залежностями, що встановлюють за допомогою ймовірних методів. Глибина провалів напруги визначається потужністю електрозварювальної установки та джерела живлення, а також параметрами живильної мережі. Установки точкового та рельєфного зварювання утворюють провали напруги до 7 %. Найглибші провали напруги спостерігаються на затискачах стикових та багатоточкових установок (до 19 %). Середня частота провалів напруги  $f_{Пср} = n / t_{П ср}$ , де  $n$  – кількість імпульсів струму за середній цикл зварювання  $t_{П ср}$ .

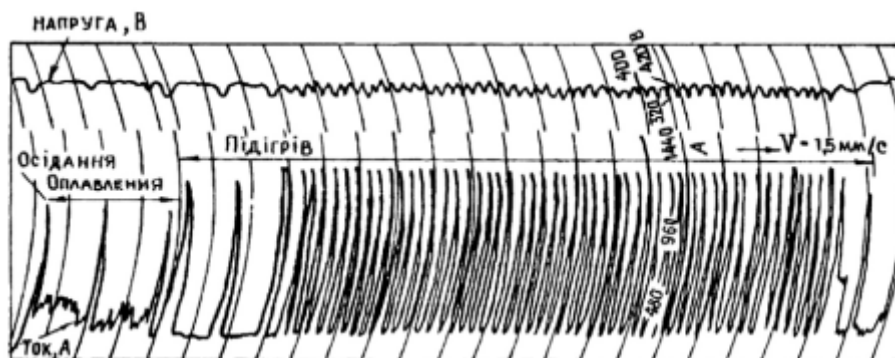


Рис. 2. Перехідний процес зварювального струму та напруги установки стикового зварювання потужністю 600 кВ·А

У мережах, що живлять групи зварювальних установок, провали напруги мають випадковий характер. Найбільші провали напруги (до 30 %) у тих мережах, що живлять стикові та багатоточкові установки, а найменші – у мережах, які живлять дугові зварювальні установки (не більше 3%). Максимум частот провалів напруги групових графіків складає 1,8...4 Гц. Електрозварювальні установки також створюють коливання напруг, середня частота яких  $f_{\text{Пср}} = 2n / t_{\text{Пср}}$ . Коливання напруг – різноманітні: від періодичних прямокутних до випадкових марковських. Максимальна частота коливань напруги в групових мережах складає 5...12 Гц. Основна енергія спектра коливань зосереджена в інтервалі 2,5...3 Гц. Електрозварювальні установки працюють в імпульсному режимі. Тому необхідно враховувати появу відбиття цього режиму у вигляді перехідного процесу споживаного струму. При асинхронному вмиканні амплітудне значення перехідного струму може досягти триразового значення номінального струму. Тривалість процесу – від трьох до шести періодів. Більші значення перехідних струмів призводять до зростання амплітуди провалів напруги та додаткового спотворення синусоїди напруги за рахунок появи в струмі постійної складової та парних гармонік. Режим роботи електрозварювальних установок регулюється тиристорними перетворювачами.

Утворені ударним навантаженням неперіодичні коливання напруги можна звести до періодичних, еквівалентних щодо енергії або середньої потужності процесу за час  $T$ . Еквівалентний розмах періодичного  $p$ -го коливання (%) визначається:

$$\delta V_{\text{ек}} = \sqrt{\sum_{p=1}^n \delta V_p^2 / n},$$

де -  $n$  - число коливань за час  $T$ .

Вираз для визначення  $\delta V_{\text{ек}}$  можна записати інакше, використовуючи значення накиду реактивних потужностей  $\delta Q_p$  і потужності КЗ на шини з увімкненням різкозмінних навантажень:

$$\delta V_{\text{ек}} = \frac{\sqrt{\sum_{p=1}^n \delta Q_p / n}}{S_{\text{к}}}$$

Умова допустимих коливань напруги:  $\delta V_{\text{ек}} \leq \delta V_{\text{дон}}$ .

## 2. Процеси при комутаціях конденсаторних батарей

Конденсаторні батареї встановлюють у вузлах навантаження мереж напругою 6–110 кВ в основному як місцеві джерела реактивної потужності та з метою регулювання її потоків. Завдяки цьому досягається істотне підвищення стійкості режимів, обмеження струмів КЗ та регулювання напруги. Процеси

комутації конденсаторних батарей – із специфічними особливостями, їх вмикання та вимикання супроводжуються зміною багатьох параметрів режиму.

Протягом перебігу перехідних процесів може виникати значний кидок струму та перенапруг, небезпечних як для мереж і комутаційної апаратури, так і для конденсаторних батарей. Вимикач, встановлений у приєднанні батареї, вмикає та вимикає великі струми, здійснює комутацію значно частіше, ніж вимикач ЛЕП. Окрім того, кидок перехідного струму при вмиканні конденсаторної батареї більший, ніж при вмиканні лінії. Тому до вимикачів високої напруги, передбачених для роботи в колах комутації батарей, ставляться підвищені вимоги.

При вмиканні конденсаторної батареї на струм промислової частоти накладається високочастотний струм перехідного режиму. У разі несприятливої фази напруги в момент вмикання батареї швидкість нарощування струму відповідає ввімкненню на КЗ. Амплітуда струму перехідного режиму набагато менша за амплітуду струму КЗ, однак може набути кількох кілоампер. Амплітуда перехідного струму сягає мінімального значення, якщо струм з'являється при максимальній нарузі. Великі кидки струму можливі під час паралельного вмикання батарей, проте такі струми обмежуються реакторами.

Порівняно часті вмикання та вимикання струму конденсаторної батареї (раз чи двічі за добу) обтяжують дію вимикача. Це, як правило, викликає зростання ймовірності його відмови (зварювання контактів та більше їх спрацювання, неприпустиме підвищення тиску в дугогасильному пристрої тощо). Процеси зміни струму при вмиканні однофазного кола із зосередженою ємністю відомі з курсу електротехніки. При вмиканні трифазної конденсаторної батареї в електричній системі із заземленою нейтраллю (мережі напруги 110 кВ) виниклі процеси аналогічні однофазним.

У трифазній схемі реальної електричної мережі амплітуди струму вмикання можуть різнитися від розрахованих для однофазної схеми внаслідок затухання перехідного струму, наявності кількох складових різних частот та неодночасної появи струму в різних фазах. На перехідний процес може впливати навіть невелика неодночасність появи струму через різницю в докладених до контактів миттєвих значень фазної напруги та неусувну неодночасність замикання чи розмикання контактів. Оскільки періоди змін струму високої частоти малі, то неодночасність появи струму фаз призводить до того, що при вмиканні другої та третьої фаз струм в раніш увімкнених фазах може досягти великих значень, а їх взаємовплив стає суттєвішим.

Численними випробуваннями встановлено, що незважаючи на велику кількість означених чинників, які можуть позначатися на розбіжності максимальних амплітуд перехідного струму при вмиканні конденсаторної батареї в розрахунковій однофазній та в реальній трифазній схемах, амплітуди струмів практично збігаються. Зміна фазних струмів та напруг при вмиканні

конденсаторної батареї зображені на рис. 3. Швидкість наростання перехідного струму при наявності високочастотних складових може сягати великих значень (до 50 А/мкс), небезпечних для вимикача. Для її зниження зменшують паразитну ємність конденсаторної батареї або між вимикачем та батареєю вмикають реактор.

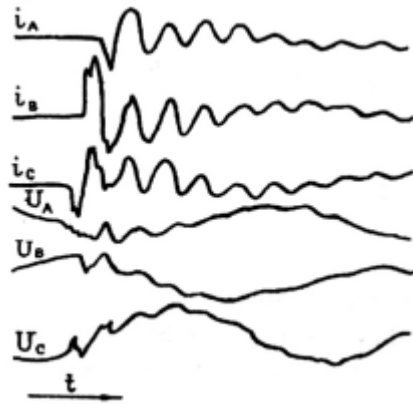


Рис. 3. Осцилограми перехідних процесів фазових струмів та напруг при вмиканні конденсаторної батареї

При вмиканні конденсаторних батарей перехідні процеси супроводжуються появою перенапруг. Теоретично максимальний коефіцієнт перенапруги дорівнює 2 (можливий – при замиканні кола на максимум напруги), а практично – не перевищує 1,9.

У разі вимкнення батареї (при дослідженні вимикачів з природним масляним дугтям), що супроводжується повторним виникненням дуги, поштовхи струму та перенапруги звичайно бувають більшими, аніж при її вмиканні. Значення струмів при цьому залежать від потужності батареї та характеристики мережі, а перенапруг – від кількості повторних запалювань дуги під час вмикань. Вмикання опорів для розрядки батарей або використання для цього трансформатора напруги впливає тільки на процес вмикання, якщо заземлювальний пристрій приєднаний постійно.

При вимиканнях конденсаторної батареї, приєднаної до підстанції довгим кабелем, виникають додаткові коливання, які спричиняють значні перенапруги в мережі. При вимкненні конденсаторної батареї за допомогою маломасляних вимикачів перенапруги повторний пробій або запалювання дуги відсутні, час горіння дуги зменшується, чому сприяє наявність постійного тиску в дугогасильних пристроях. Використання таких вимикачів для комутації конденсаторних батарей – досить перспективне.

Застосування заземлювальних опорів у нейтралі конденсаторної батареї може на 15...20 % знизити перенапругу при повторних виникненнях дуги та появі напруги на контактах вимикача.

### 3. Короткі замикання в мережах постійного струму

Постійний струм застосовується для живлення електролізних установок кольорової металургії та хімічної промисловості, дугових вакуумних та графітових електропечей, установок для електрохімічної обробки металів та гальваностегії, електричного транспорту, електроприводу, зарядних пристроїв, цехових мереж. Мережі постійного струму для живлення сигналізації та диспетчеризації звичайно мають малу потужність.

Як перетворювачі змінного струму на постійний використовують напівпровідникові випрямлячі на некерованих та керованих вентилях (діодах або тиристорах).

Для випрямлячів застосовують трифазну мостову схему, шестифазну нульову із зрівняльним реактором, трифазну нульову схему перетворення. Випрямлячі малої потужності – з трифазною нульовою схемою. В трифазній мостовій схемі (рис. 4,а) первинна і вторинна обмотки живильного трансформатора з'єднані на зірку або трикутник. Кожна фаза вторинної обмотки через вентилі сполучена з позитивним та від'ємним полюсами кола постійного струму. В шестифазній нульовій схемі (рис. 4,б) первинна обмотка живильного трансформатора поєднується на зірку або трикутник, а вторинна – на дві зворотні зірки, нульові точки яких сполучені через зрівняльний реактор. Середня точка зрівняльного реактора – це від'ємний полюс постійного струму.

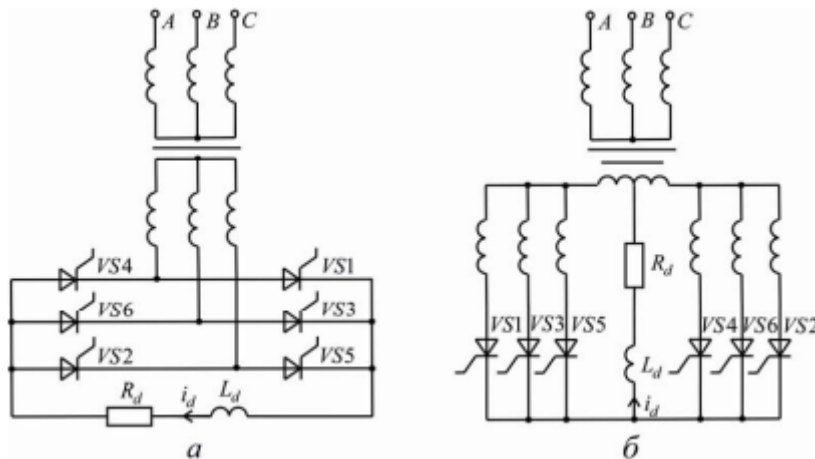


Рис. 4. Схеми випрямлення трифазного змінного струму: а – трифазної мостової; б – шестифазної зрівняльним реактором

У трифазній нульовій схемі вторинна обмотка трансформатора поєднана на зірку або зигзаг із виведеною нульовою точкою. В першому випадку первинна обмотка повинна бути з'єднана на трикутник, а в другому – на зірку.

Процеси при КЗ у всіх мережах постійного струму однакові: КЗ виникає в основному з причин, що й у мережах змінного струму. Аварійні режими можливі при неприпустимих перевантаженнях, коли виходять з ладу окремі елементи силової схеми випрямляча або в системах управління та

автоматичного регулювання. Розрахунок цих режимів необхідний для вибору параметрів силової схеми випрямляча та засобів захисту.

Аварії розподіляють на зовнішні та внутрішні (зіпсованість елементів силової схеми, пошкодження одного з вентилів моста). Внаслідок зовнішніх аварій можуть вийти з ладу вентиля та розвинутися внутрішні аварії.

Розглянемо аварійні режими для двох схем випрямлення: трифазної мостової та шестифазної нульової із зрівняльним реактором. Припущення: параметри силових елементів випрямляча – лінійні; нелінійність зовнішньої характеристики випрямляча внаслідок зміни числа вентилів, що комутуються, в процесі КЗ ураховується лише при великій тривалості перехідного процесу і малій віддаленості КЗ; трифазна система живлення – симетрична та зрівноважена; намагнічувальні струми трансформаторів та відповідні ємності елементів електроустаткування – малі; аварія виникає при усталеному режимі живильної мережі. Ці припущення дають змогу отримати достовірний рівень результатів відповідно до вимог практики.

Струм зовнішнього КЗ випрямляча при навантаженні  $I_d$  у перехідному режимі

$$i_k = I_k [1 - \exp(-tR_d / L_d)] + I_d \exp(-tR_d / L_d). \quad (1)$$

Тут зовнішня характеристика випрямляча (за характером електромагнітних процесів і можливих умов КЗ) складається з двох частин: прямолінійної та еліптичної.

Сталий струм КЗ залежить від схеми випрямляча, режиму його роботи та параметрів кола. При малих значеннях аварійного струму (віддалені КЗ) та почерговій роботі двох-трьох вентилів схеми, коли зовнішня характеристика випрямляча прямолінійна (кут комутації вентилів  $\gamma < 60^\circ$ , режим 1), для розглянутих схем випрямлення маємо відповідно:

$$\begin{aligned} I_{k(a)} &= 1,35U_{2Л}(1 \pm \Delta u_C / 100) / [r_{рез(a)} + 0,955(x_C + x_T / n)]; \\ I_{k(b)} &= 0,675U_{2Л}(1 \pm \Delta u_C / 100) / [r_{рез(b)} + 0,239(x_C + x_T / n)], \end{aligned} \quad (2)$$

де  $U_{2Л}$  – вторинна лінійна напруга трансформатора, що живить випрямляч, В;  $\Delta u_C$  – втрата напруги живильної мережі, %;  $n$  – число паралельно працюючих випрямлячів.

Для великих значень аварійного струму (КЗ поблизу випрямляча) і одночасній роботі трьох вентилів схеми, коли зовнішня характеристика випрямляча еліптична (кут  $\gamma = 60^\circ$ , режим 2), справедливо:

$$\begin{aligned} I_{k(a)} &= 1,17U_{2Л}(1 \pm \Delta u_C / 100) / \sqrt{r_{рез(a)}^2 + [3(x_C + x_T / n) / 2]^2}; \\ I_{k(b)} &= 0,585U_{2Л}(1 \pm \Delta u_C / 100) / \sqrt{r_{рез(b)}^2 + [3(x_C + x_T / n) / 2]^2} \end{aligned} \quad (3)$$

Активні опори випрямлячів при КЗ визначають за виразами:

$$\begin{aligned} r_{рез(a)} &= 3r_T / (2n) + r_{зш} + r_\delta; \\ r_{рез(b)} &= 3r_T / (2n) + r_{зш} + r_\delta; \end{aligned} \quad (4)$$



індуктивності в режимі 1

$$\begin{aligned} L_{рез(a)} &= 0,955(x_C + x_T / n) / \omega + L_{зш}; \\ L_{рез(б)} &= 0,239(x_C + x_T / n) / \omega + L_{зш}, \end{aligned} \quad (5)$$

а в режимі 2

$$\begin{aligned} L_{рез(a)} &= 3(x_C + x_T / n) / 2\omega + L_{зш}; \\ L_{рез(б)} &= 3(x_C + x_T / n) / (8\omega) + L_{зш}. \end{aligned} \quad (5,а)$$

Опір дуги  $r_\delta = 0,01 \dots 0,015$  Ом. Струми КЗ на шинах випрямлячів з опором дуги  $r_\delta = 0$  для розглянутих схем можна розрахувати за формулами:

$$\begin{aligned} I_{к(a)} &= 0,78U_{2Л} (1 \pm \Delta u_C / 100) / \sqrt{r_T^2 + (x_C + x_T)^2}; \\ I_{к(б)} &= 1,56U_{2Л} (1 \pm \Delta u_C / 100) / \sqrt{r_T^2 + (x_C + x_T)^2}, \end{aligned} \quad (6)$$

де опори  $x_C$ ,  $r_{TP}$ ,  $x_{TP}$  (Ом) визначаються так:

$$\begin{aligned} x_C &= U_{2Л}^2 \cdot 10^{-6} / S_K; \\ r_T &= \Delta P_M U_{2Л}^2 10^{-3} / S_T^2; \\ x_T &= U_{2Л}^2 10^{-5} \sqrt{u_K^2 - (100 \Delta P_M / S_T)^2}, \end{aligned}$$

де  $S_K$  – потужність КЗ на шинах змінного струму;  $\Delta P_M$  – потужність втрат в обмотках трансформатора при КЗ.

Перехід від режиму 1 до режиму 2 відбувається при значеннях аварійного струму випрямлячів:

$$\begin{aligned} I_{кП(a)} &= 0,26U_{2Л} (1 \pm \Delta u_C / 100) / (x_C + x_T); \\ I_{кП(б)} &= 0,26U_{2Л} (1 \pm \Delta u_C / 100) / (x_C + x_T). \end{aligned} \quad (7)$$

За менших (більших) значень струмів КЗ, аніж значення  $I_{кП}$ , для їх визначення необхідно використати відповідно вирази (2) та (3).

Струм внутрішнього КЗ, викликаного пробоем вентиля трифазного мостового випрямляча, знаходять таким чином (аналогічно здійснюють розрахунок для шестифазної нульової схеми із зрівняльним реактором). За параметрами трансформатора визначають відношення  $x_{(a)} / R_{(a)}$ , де  $x_{(a)} = \omega L_{(a)}$  і  $R_{(a)}$  – сумарні індуктивні та активні опори однієї фази, і розраховують максимальний базовий струм схеми:

$$I_{\delta max} = \frac{\sqrt{2}U_{2\phi}}{\sqrt{x_{(a)}^2 + R_{(a)}^2}}. \quad (8)$$

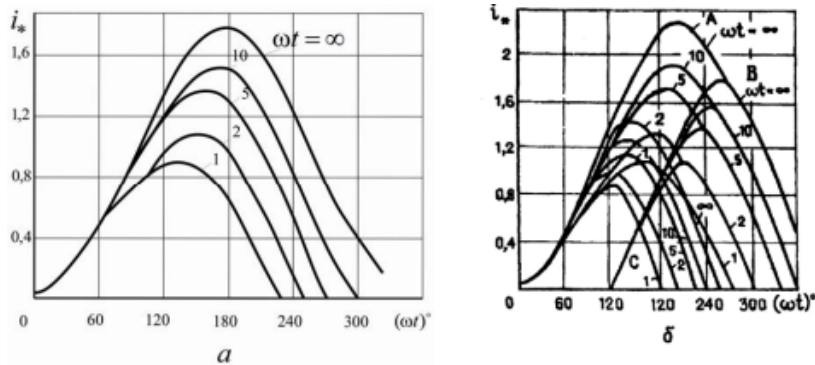


Рис. 5. До розрахунку миттєвих значень аварійного струму тиристорів при внутрішньому КЗ під час блокування імпульсів управління: а – до чергової комутації; б – після першої комутації

Миттєві значення аварійного струму тиристорів та діодів при використанні кривих на рис. 5 та 6 складають  $i_k = i_* I_{\sigma \max}$ . Розглядають випадки з блокуванням (для засобів захисту випрямляча) і без блокування імпульсів управління. Криві А на рисунках характеризують струми пробитого вентиля; криві В – струми кола підживлення вентиля перед початком роботи, а криві С – струми вентиля перед її закінченням. Як видно, амплітуда та тривалість перебігу аварійного струму через пробитий вентиль більші, аніж через непошкоджені вентиля, що здійснюють підживлення.

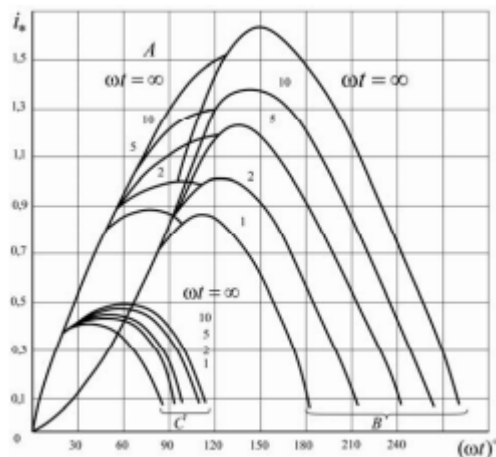


Рис. 6. До розрахунку миттєвих значень аварійного струму діодів при внутрішньому КЗ в час прикладання максимальної зворотної напруги

За графічними залежностями, зображеними на рис. 7, знаходять відносне значення теплового еквівалента, яке перетворюють згодом на абсолютне за формулою:

$$W = I_{\sigma \max}^2 \cdot A_T / \omega.$$

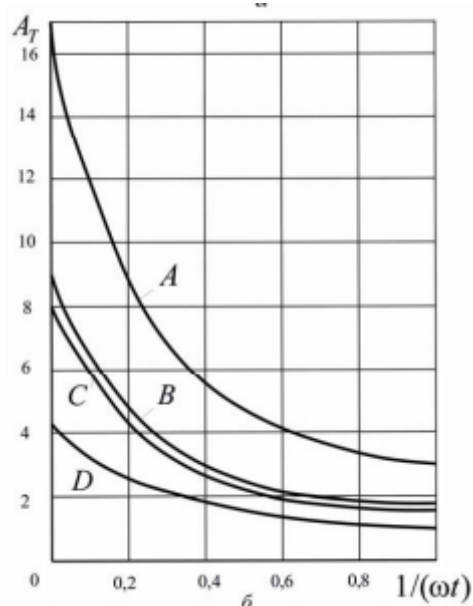
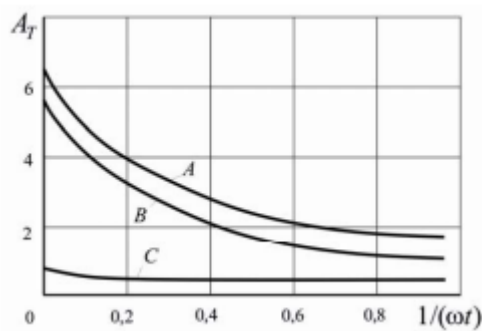


Рис. 7. Криві відносного значення теплового еквіваленту у часі при внутрішньому КЗ випрямлювача після першої комутації пробитого тиристора (А) і тиристорів підживлення (С і D): а – некерованого; б – керованого

Як бачимо, пробій вентиля в момент закінчення комутації – найважчий порівняно з пробоями в інші моменти часу після початку аварії. Це пояснюється тим, що зворотна напруга діє на пробитий вентиль більшу частину періоду живильної напруги. За інших рівних умов некеровані схеми випрямлення з діодами мають вищі значення струмів та тривалості їх перебігу, ніж схеми випрямлення з тиристорами.

Джерела енергії можуть бути пов'язані з місцем КЗ за допомогою ЛЕП постійного струму. Врахування цих джерел при обчисленні струмів КЗ з метою вибору або ж перевірки апаратів та провідників залежить від місця КЗ і типу перетворювального агрегату. Коли точка КЗ у колі змінного струму випрямляча, останній необхідно вводити до схеми заміщення прямої послідовності у вигляді постійного навантаження (постійного шунта). Параметри шунта визначаються попереднім навантаженням електропередачі. До схеми заміщення зворотної послідовності випрямляч не вводять. Схема заміщення нульової послідовності містить лише трансформатори випрямляча із з'єднанням їхніх обмоток за схемою  $Y_0/D$ . Якщо ж точка КЗ у колі змінного струму інвертора, то останній вводять до схеми заміщення прямої послідовності у вигляді шунта. Опір шунта  $Z_{III}$  залежить від місця КЗ та розрахункового моменту часу. При КЗ поблизу інвертора (можливе порушення його стійкості – перекидання) для моменту часу 0,02 с значення  $Z_{III}$  беруть за попереднім навантаженням. Для наступних моментів часу  $Z_{III} = jx_T$ , де  $x_T$  – сумарний опір трансформаторів інверторів.

Якщо при КЗ інвертор не перекидається, то для будь-якого часу

$$Z_{III} = U_{зал} Z_{не} / U_{зал(0)},$$

де  $U_{зал}$  – залишкова напруга на шинах інвертора при КЗ (без урахування електропередачі постійного струму);  $Z_{не}$  – опір шунта, що визначається попереднім навантаженням;  $U_{зал(0)}$  – залишкова напруга на шинах інвертора до КЗ (у схему заміщення зворотної послідовності інвертор не вводять). Схема заміщення нульової послідовності містить лише трансформатори інвертора із з'єднанням їх обмоток за схемою  $Y_0/D$ .

Коли КЗ супроводжується зняттям імпульсів управління з інвертора, то для будь-яких моментів часу (до нового вмикання електропередачі)  $Z_{III} = \infty$ .