

**МІНІСТЕРСТВО ВНУТРІШНІХ СПРАВ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ВНУТРІШНІХ СПРАВ
КРЕМЕНЧУЦЬКИЙ ЛЬОТНИЙ КОЛЕДЖ**

Циклова комісія авіаційного і радіоелектронного обладнання

ТЕКСТ ЛЕКЦІЇ

з навчальної дисципліни «Основи релейного захисту та автоматизації систем»
обов'язкових компонент
освітньо-професійної програми першого (бакалаврського) рівня вищої освіти

***141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
(Електромеханіка)***

За темою № 5 - Струмові захисти ліній з одностороннім живленням

ЗАТВЕРДЖЕНО

Науково-методичною радою
Харківського національного
університету внутрішніх справ
Протокол від 30.08.2023 № 7

СХВАЛЕНО

Методичною радою
Кременчуцького льотного коледжу
Харківського національного
університету внутрішніх справ
Протокол від 28.08.2023 № 1

ПОГОДЖЕНО

Секцією Науково-методичної ради
ХНУВС з технічних дисциплін
Протокол від 29.08.2023 № 7

Розглянуто на засіданні циклової комісії авіаційного і радіоелектронного обладнання, протокол від 28.08.2023р № 1.

Розробники:

Викладач циклової комісії авіаційного і радіоелектронного обладнання, к.т.н., доцент, викладач вищої категорії, Шокарьов Д.А.

Рецензенти:

- 1. К.т.н., спеціаліст вищої категорії, викладач-методист циклової комісії авіаційного і радіоелектронного обладнання Шмельов Ю. М.*
- 2. К.т.н., професор, завідувач кафедру електричних станцій Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» Лазуренко О.П.*

План лекції:

1. Дистанційні захисти. призначення, принцип дії й основні органи захисту.
2. Вибір параметрів спрацьовування дистанційного захисту.

Рекомендована література:

Основна:

1. Кідиба В.П. Релейний захист електроенергетичних систем: Підручник.- Львів:Вид-во НУ «Львівська політехніка», 2013. – 533 с.
2. Чернобровов Н.В. Релейная защита энергетических систем/ Чернобровов Н.В., Семенов В.А. – М.: Энергоатомиздат, 1998. – 800 с.
3. Шнеерсон Э.М. Цифровая релейная защита/ Шнеерсон Э.М. – М.: Энергоатомиздат, 2007. -549.

Допоміжна література:

4. Андрев В.А. Релейная защита и автоматика систем электроснабжения: учеб.для вузов/ В.А.Андреев. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш.шк., 2006 – 639 с.
5. Басс Э.И. Релейная защита электроэнергетических систем: учеб.пособие/ Басс Э.И., Дорогунцев В.Г.; под ред. А.Ф.Дьякова. – М.: Изд-во МЭИ, 2002. – 296 с.
6. Дьяков А.Ф. Микропроцессорная автоматикаи рлейная защита электроэнергетических систем: учеб. пособие для вузов./ А.Ф.Дьяков, Н.И.Овчаренко. – М.: Изд. дом МЭИ, 2008. – 336 с.
7. Циглер Г. Цифровая дистанционная защита: принципы и применение/ Циглер Г.; пер. с англ. под ред. Дьякова А.Ф. – м.: Энергоиздат, 2005. – 322 с.
8. Перехідні процеси в системах електропостачання/ [Півняк Г.Г., Винославський В.М., Рибалко А.Я., Несен Л.І.]; за ред. академіка НАН України Г.Г.Півняка. – Дніпропетровськ: Національний гірничий університет, 2002. – 597 с.
9. Куликов Ю.А. Переходные процессы в электрических системах: учеб.пособие/ Куликов Ю.А. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2002. – 283 с.
10. Reimert D.Protective relaying for power generation/ Donald Reimert/ - USA, FL, Boca Raton: CRC Press, 2006/ - 561 p.
11. Preve C. protection of electrical networks/ Christophe Preve/ - GB: Antony Rowe Ltd, Chippenham, Wiltshire, 2006. – 508 p.

Інформаційні ресурси в Інтернеті

12. Офіційний сайт Міністерство енергетики та вугільної промисловості України <http://mpe.kmu.gov.ua/>

Текст лекції

Основна література:

1. Кідиба В.П. Релейний захист електроенергетичних систем: Підручник.- Львів:Вид-во НУ «Львівська політехніка», 2013. – 533 с.
2. Чернобровов Н.В. Релейная защита энергетических систем/ Чернобровов Н.В., Семенов В.А. – М.: Энергоатомиздат, 1998. – 800 с.
3. Шнеерсон Э.М. Цифровая релейная защита/ Шнеерсон Э.М. – М.: Энергоатомиздат, 2007. -549.

Допоміжна література:

4. Андрев В.А. Релейная защита и автоматика систем электроснабжения: учеб.для вузов/ В.А.Андреев. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш.шк., 2006 – 639 с.
5. Басс Э.И. Релейная защита электроэнергетических систем: учеб.пособие/ Басс Э.И., Дорогунцев В.Г.; под ред. А.Ф.Дьякова. – М.: Изд-во МЭИ, 2002. – 296 с.
6. Дьяков А.Ф. Микропроцессорная автоматикаи рлейная защита электроэнергетических систем: учеб. пособие для вузов./ А.Ф.Дьяков, Н.И.Овчаренко. – М.: Изд. дом МЭИ, 2008. – 336 с.
7. Циглер Г. Цифровая дистанционная защита: принципы и применение/ Циглер Г.; пер. с англ. под ред. Дьякова А.Ф. – м.: Энергоиздат, 2005. – 322 с.
8. Перехідні процеси в системах електропостачання/ [Півняк Г.Г., Винославський В.М., Рибалко А.Я., Несен Л.І.]; за ред. академіка НАН України Г.Г.Півняка. – Дніпропетровськ: Національний гірничий університет, 2002. – 597 с.
9. Куликов Ю.А. Переходные процессы в электрических системах: учеб.пособие/ Куликов Ю.А. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2002. – 283 с.
10. Reimert D.Protective relaying for power generation/ Donald Reimert/ - USA, FL, Boca Raton: CRC Press, 2006/ - 561 p.
11. Preve C. protection of electrical networks/ Christophe Preve/ - GB: Antony Rowe Ltd, Chippenham, Wiltshire, 2006. – 508 p.

Інформаційні ресурси в Інтернеті

12. Офіційний сайт Міністерство енергетики та вугільної промисловості України <http://mpe.kmu.gov.ua/>

ДИСТАНЦІЙНІ ЗАХИСТИ. ПРИЗНАЧЕННЯ, ПРИНЦИП ДІЇ Й ОСНОВНІ ОРГАНИ ЗАХИСТУ

Призначення й принцип дії. У схемах електропостачання залежно від режиму роботи й виду короткого замикання змінюються струми ушкодження, тому чутливість струмових і струмових направлених захистів, зони дії відсічок не залишаються постійними. У мінімальному режимі роботи системи електропостачання вони можуть виявитися недостатніми. У складних мережах максимальний струмовий направлений захист не завжди задовольняє вимогам селективності й швидкості дії. У зв'язку з цим бажано мати захист, характерна величина якого не залежить від режиму роботи системи електропостачання, а час дії захисту визначається тільки відстанню від місця його установки до місця короткого замикання. Таким захистом є дистанційний захист. Він реагує на відношення напруги до струму в місці установки захисту. Це відношення називається опором на затискачах реле захисту. При відповідному включенні реле цей опір пропорційний відстані від місця установки захисту до місця короткого замикання й не залежить від режиму роботи системи електропостачання. У вимірювальних органах захисту використовують розглянуті вище вимірювальні реле опору.

Дистанційний захист, як і струмовий, звичайно виконується триступінчатим з відносною селективністю. Параметрами кожного ступеня є довжина зони, що захищається, і час спрацьовування. По характеристиках витримок часу його перший, другий і третій щаблі аналогічні відповідним ступеням струмового захисту. Це ілюструється графіками (Рис.5.1, а). Захист А1 має характеристику 1, захист А2 - характеристику 2, захист А3- характеристику 3. При ушкодженні в точці К1 приходять у дію захисти А1 і А2, але ушкодження відключає найближчий до нього захист А2, тому що він має меншу витримку часу. Якщо ушкодження виникає в точці К2, то воно відключається найближчим до нього захистом А3.

На лініях із двостороннім живленням дистанційний захист виконується направленим, а витримки часу відповідних ступенів захисту вибираються, як і у струмового направленого захисту, по зустрічно-східчастому принципу (Рис.5.1,б). Селективну дію можуть забезпечувати також дистанційні захисти з безупинно залежними (Рис.5.2,а) і комбінованими (Рис.5.2, б) характеристиками.

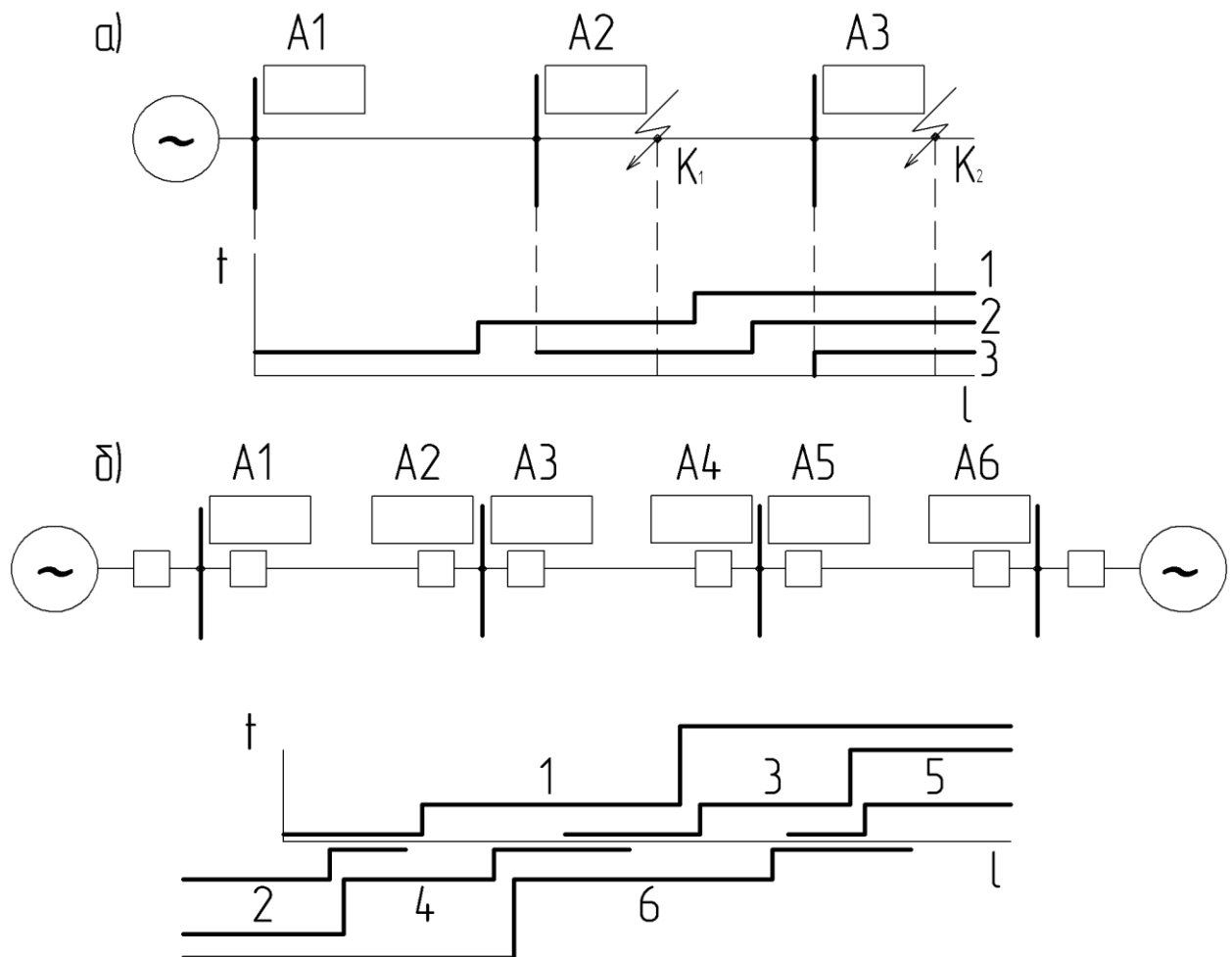


Рис. 5.1. Східчасті характеристики витримок часу дистанційного захисту

Основні органи захисту. Функціональна схема дистанційного направлено-треступінчастого захисту показана на Рис. 5.3, а. Кожний ступінь захисту містить вимірювальний орган. У першого й другого ступенів - це ненаправлені або направлені реле опору — дистанційні органи $KZ1I$ і $KZ2II$. Вимірювальний орган третього ступеня — реле $KAIII$ ($KZIII$) є одночасно пусковим органом всього захисту. Він спрацьовує при ушкодженні в будь-якій зоні й здійснює пуск захисту (наприклад, замикає ланцюг оперативного струму). Пусковим органом дистанційного захисту можуть бути або максимальні реле струму ($KAIII$), або мінімальні реле опору ($KZIII$). Вони повинні мати високу чутливість, не діяти при максимальному навантаженні й по можливості не діяти при хитаннях. Іноді пусковий орган повинен мати вибірковість дії, тобто вибирати ушкоджені фази.

Простота пускового органа струму обумовлює його застосування в дистанційних захистах мереж напругою до 35 кВ. При включенні на струми фаз пусковий орган реагує на струми навантаження й хитань так само, як і на струми ушкоджень, тому, іноді пусковий орган включається на струм зворотної послідовності. При цьому чутливість захисту підвищується. Дія такого захисту при трифазних коротких замиканнях забезпечується завдяки короткочасній асиметрії в початковий момент виникнення короткого замикання.

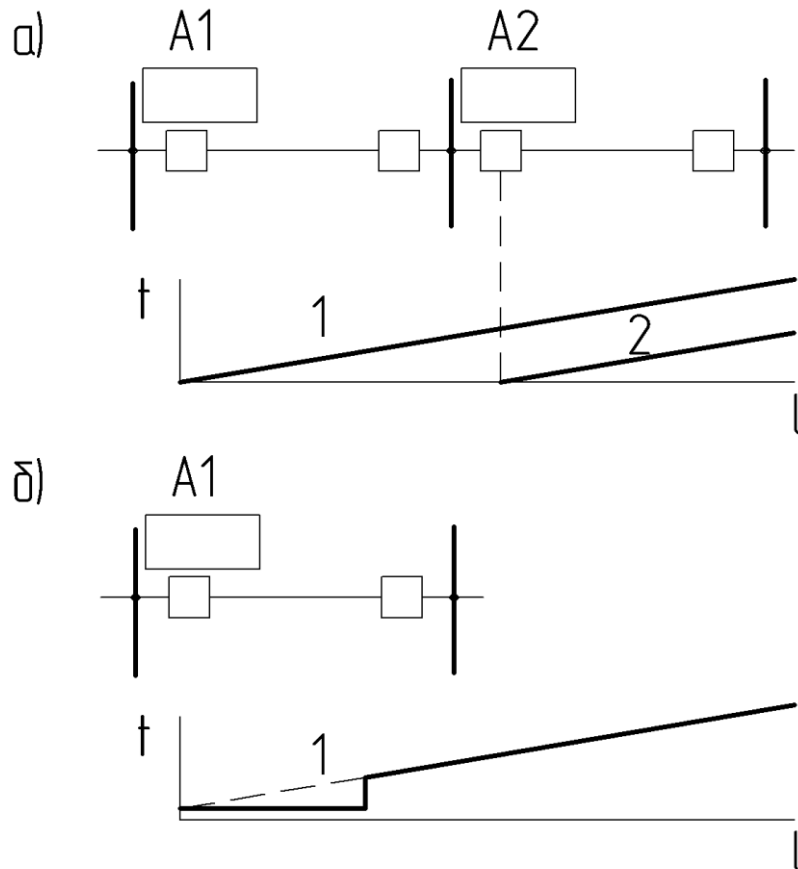


Рис. 5.2. Характеристики витримки часу дистанційного захисту:
а - безупинно залежні; б - комбіновані

Використання пускового органа опору дозволяє підвищити чутливість захисту, тому що, реагуючи на відношення $U_p/I_p = Z_p$, він більш чітко відрізняє перевантаження (Z_p змінюється на незначну величину) від коротких замикань (Z_p зменшується помітніше). Пусковий орган повного опору застосовується в захистах ліній напругою 35 кВ і коротких мало навантажених ліній напругою 110 кВ. На довгих завантажених лініях напругою 110 кВ і вище опір на затискачах реле в робочому режимі $Z_{p,роб}$ подібний до опору лінії Z_l , тому пусковий орган повного опору не забезпечує достатньої чутливості захисту. Наявність істотної різниці в кутах опорів $Z_{p,роб}$ і Z_l ($\varphi_{p,роб} < \varphi_l$) дозволяє використати в захистах зазначених ліній направлений пусковий орган опору, у якому застосовуються реле з кутом максимальної чутливості $\varphi_{рmax,ч} \approx \varphi_l$. Схеми включення пускових реле опору залежать від того, пред'являється або не пред'являється до них вимога вибірковості: реле невиборних органів вмикаються на міжфазні напруги й відповідні різниці фазних струмів, а вибірних - на міжфазні напруги й фазні струми (для дії при багатозначних коротких замиканнях) або на однойменні фазні напруги й струми (для дії при однофазних і подвійних замиканнях на землю).

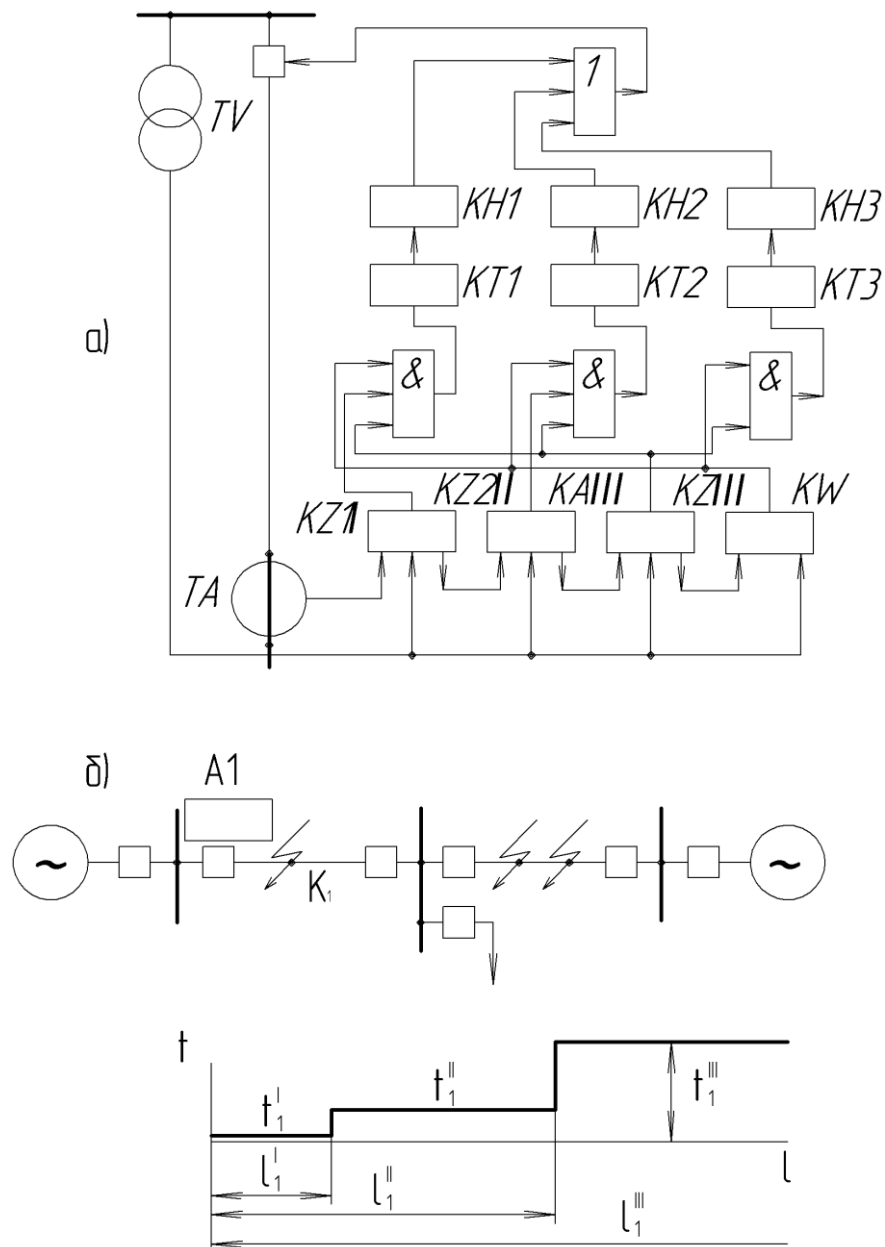


Рис. 5.3. Дистанційний направлений триступінчастий захист

Орган напрямку потужності - реле KW - запобігає спрацюванню захисту при напрямку потужності до шин підстанції й передбачається в тих випадках, коли пусковий орган і дистанційні органи не мають направленість дії. Орган витримок часу - реле KT1-KT3 - разом з іншими органами формує триступінчасту характеристику захисту.

Дія захисту. Дію захисту при ушкодженні в різних точках системи електропостачання розглянемо на прикладі захисту A1 (Рис. 5.3, б). Орган напрямку потужності дозволяє діяти захисту тільки при напрямку потужності від шин у лінію, тобто при коротких замиканнях у точках K1, K2, K3. У всіх випадках спрацьовує пусковий орган. Якщо ушкодження відбувається в межах першої зони l_1^I (точка K1), то спрацьовують також дистанційні органи KZ1I і KZ2II. При цьому приходять у дію всі реле часу. Однак раніше інших спрацьовує реле часу KT1, що має найменшу уставку t_1^I . Захист відключає вимикач із витримкою часу першого ступеня. Поводження захисту при короткому замиканні в другій зоні l_1^{II} (точка K2) відрізняється тим, що

дистанційний орган KZ1I не спрацьовує, тому приходять у дію тільки реле КТ2 і КТ3. Раніше спрацьовує реле часу КТ2, що визначає витримку часу другого ступеня, і захист зможе відключити вимикач із часом t_1^{II} як резервний. При короткому замиканні в точці КЗ обидва дистанційних органа не спрацьовують, а з витримкою часу t_1^{III} , створеною реле часу КТ3, діє третій ступінь захисту, здійснюючи далеке резервування.

При несправностях у ланцюгах напруги TV і в режимі хитань у системі захист може спрацювати неправильно. Для виключення цього дистанційний захист постачають блокуваннями, що виводять його з дії при виникненні зазначених режимів.

Окреме реле часу КТ1 для першого ступеня, як правило, не застосовується, і час дії першого ступеня, як і в триступінчастому струмовому захисті, визначається тільки власним часом спрацьовування пускового й вимірювального органів. Іноді функції декількох органів виконують складні вимірювальні реле. Так, направлене реле опору виконує функції органів напрямку потужності й дистанційного, а іноді й пускового. Схема дистанційного захисту при цьому спрощується.

5.2 ВИБІР ПАРАМЕТРІВ СПРАЦЬОВУВАННЯ ДИСТАНЦІЙНОГО ЗАХИСТУ

Параметрами дистанційного захисту є опір спрацьовування й витримка часу. У захистів зі східчастою характеристикою кожний ступінь має відповідні параметри. При виборі опору спрацьовування необхідно враховувати вплив наступних факторів: перехідного опору дуги R_d у місці ушкодження; струмів підживлення від проміжних підстанцій; розгалуження струмів при сполученні одиночної лінії із двома паралельними; погрішностей трансформаторів струму й напруги та ін. Деякі з цих факторів (наприклад, наявність R_d) можуть збільшувати Z_p , а інші (розгалуження струмів) - зменшувати його. Можливі погрішності в роботі реле опору враховуються відповідним вибором коефіцієнтів відстройки в розрахункових формулах.

Вибір параметрів спрацьовування захисту зі східчастою характеристикою. На прикладі мережі, показаної на Рис.5.4, розглядався вибір параметрів триступінчастого дистанційного захисту, встановленого на підстанції А.

Перший ступінь. Опір спрацьовування першого ступеня $Z_{с.з}^I$ вибирається таким, щоб дистанційний орган не спрацьовував при коротких замиканнях:

на шинах протилежної підстанції Б (точка К1); для цього необхідно прийняти

$$Z_{с.зА}^I \leq k_{\text{відстр}}^I Z_{л} \quad (5.1)$$

у місці підключення трансформатора Т1 (точка К2), якщо він з'єднується через вимикач і при ушкодженні відключається власним швидкодіючим захистом, що виконується при

$$Z_{с.зА}^I \leq k_{\text{відстр}}^I Z_{діл} \quad (5.2)$$

за трансформатором Т1, якщо він приєднується без вимикача (точка К3), чому відповідає (без врахування деякого розходження кутів комплексних величин \underline{Z}_L і \underline{Z}_T).

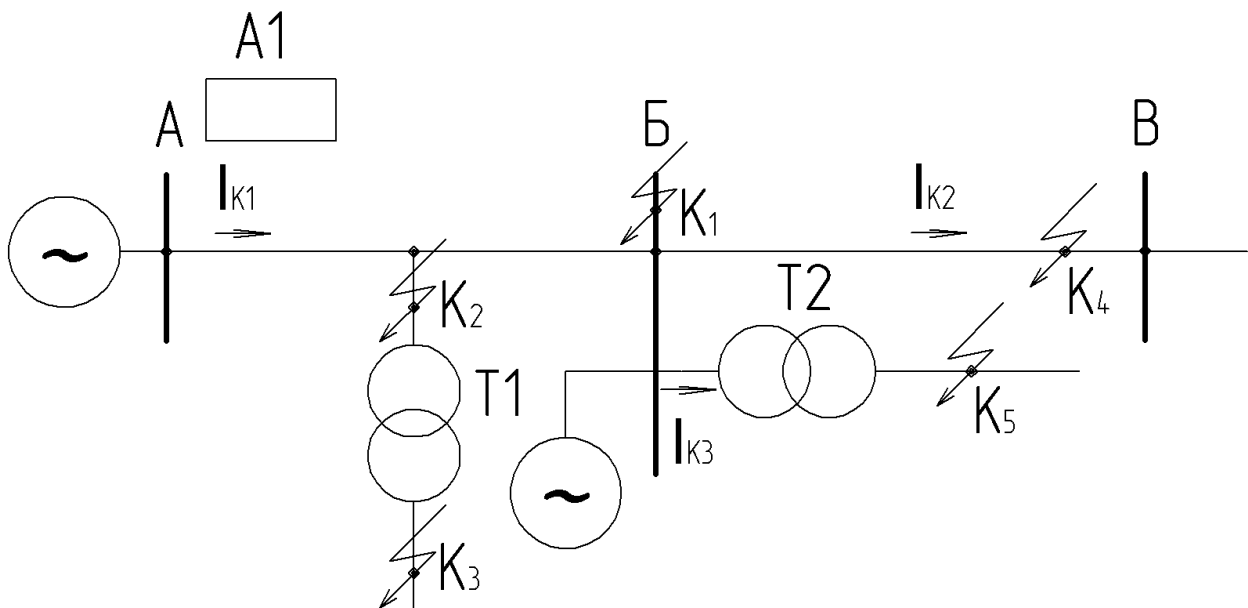


Рис.5.4. Схема до узгодження дистанційних захистів зі східчастими характеристиками

$$\underline{Z}_{с.зА}^I \leq k_{відстр}^I (\underline{Z}_{діл} + \underline{Z}_T) \quad (5.3)$$

У виразах (5.1) — (5.3) \underline{Z}_L — опір лінії АБ, що захищається; $\underline{Z}_{діл}$ — опір ділянки лінії від місця установки захисту до точки приєднання трансформатора Т1; \underline{Z}_T — опір трансформатора Т1; $k_{відстр}^I = 0,8...0,85$.

Для ліній з відгалуженнями без вимикачів на стороні вищої напруги приймається менше зі значень $\underline{Z}_{с.зА}^I$, отриманих по (5.1) і (5.3), а для ліній, що мають відгалуження з вимикачами, приймається вираз (5.2).

Перший ступінь, як правило, виконується без витримки часу, тобто $t_A^I = 0$.

Другий ступінь. Дистанційний орган другого ступеня не повинен спрацьовувати при коротких замиканнях наприкінці першої зони захисту суміжної лінії (точка К4) і при коротких замиканнях за трансформатором Т2 прийомні підстанції (точка К5). Відповідно до цього опір спрацьовування другого ступеня приймається рівним меншому зі знайдених по виразах

$$\underline{Z}_{с.зА}^{II} \leq k_{відстр}^{II} [\underline{Z}_L + k_{відстр}^I (\underline{Z}_{с.зБ}^I / k_{р.л})], \quad (5.4)$$

$$\underline{Z}_{с.зА}^{II} \leq k_{відстр}^{II} [\underline{Z}_L + (1 - \Delta n_{*г.мах})^2 (\underline{Z}_T / k_{р.т})], \quad (5.5)$$

де $\underline{Z}_{с.зБ}^I$ — опір спрацьовування першого ступеня захисту суміжної лінії БВ;

\underline{Z}_T — опір найбільш потужного трансформатора Т2 підстанції Б;

$\Delta n_{*г.мах}$ — максимальне відносне відхилення коефіцієнта трансформації, обумовлене його регулюванням;

$k_{відстр}$ — коефіцієнт відстройки, що враховує погрішність опору спрацьовування $\underline{Z}_{с.зБ}^I$; $k_{відстр} < 1,0$;

$k_{p,л}, k_{p,т}$ - коефіцієнти струмозподілу, що враховують нерівність струмів у місці ушкодження ($I_{к2}$ або $I_{к,т}$) і у місці установки захисту ($I_{к1}$), $k_{p,л} = I_{к1}/I_{к2}$, $k_{p,т} = I_{к1}/I_{к,т}$.

Витримка часу другого ступеня t_A^{II} вибирається на ступінь селективності Δt більше часу спрацьовування t_B^I першого ступеня дистанційного захисту лінії БВ і t_T швидкодіючих захистів трансформаторів підстанції Б. Другий ступінь захисту повинен задовольняти вимогам чутливості. Вважається достатнім $k_{ч}^{II} = \underline{Z}_{с.зА}^{II} / \underline{Z}_л \geq 1,25$. При недостатній чутливості $\underline{Z}_{с.зА}^{II}$ збільшується. Для запобігання можливого зайвого спрацьовування при короткому замиканні в межах зони другого ступеня дистанційного захисту лінії БВ збільшується й витримка часу до $t_A^{II} = t_B^{II} + \Delta t$.

Третій ступінь. Вимірювальним органом третього ступеня є пусковий орган захисту. Струм спрацьовування реле струму пускового органа визначається, як і для реле максимального струмового направленої захисту. При виконанні пускового органа з використанням направлених реле опору здійснюється відстройка від мінімально можливого опору в режимі з урахуванням самозапуску електродвигунів:

$$\underline{Z}_{с.зА}^{III} = U_{роб.мін} / [\sqrt{3} I_{роб.мах} k_{відстр} k_{п} k_{сзп} \cos(\varphi_{роб} - \varphi_{р.мах.ч})] \quad (5.6)$$

де $k_{п} > 1$ - коефіцієнт повернення мінімального реле опору; $k_{сзп}$ - коефіцієнт самозапуску, що враховує зниження $\underline{Z}_р$ за рахунок збільшення струму й зменшення напруги при самозапуску електродвигунів; $\varphi_{роб}$ - кут зміщення фаз між $U_{роб.мін}$ і $I_{роб.мах}$; $\varphi_{р.мах.ч}$ - кут максимальної чутливості, прийнятий рівним куту опору лінії $\varphi_л$.

Знайдене по (5.6) значення $\underline{Z}_{с.зА}^{III}$ являє собою діаметр окружності, що є характеристикою спрацьовування захисту. Для захисту з пусковими реле повного опору уставку опору спрацьовування вибирають по (5.6), приймаючи $(\varphi_{роб} - \varphi_{р.мах.ч}) = 0$. При цьому $\underline{Z}_{с.зА}^{III}$ є радіусом окружності із центром на початку координат.

Витримку часу третього ступеня t_A^{III} визначають, як і для струмових направлених захистів, по зустрічно-східчастому принципу. Третій ступінь повинен мати достатню чутливість. При короткому замиканні наприкінці лінії, що захищається, необхідно мати $k_{ч}^{III} \geq 1,5$. При ушкодженні наприкінці суміжних елементів бажано, щоб $k_{ч}^{III} \geq 1,2$. Для одержання таких коефіцієнтів чутливості у ряді випадків доводиться використовувати пускові органи опору зі складною характеристикою спрацьовування, наприклад у вигляді трикутника [28].

Вибір параметрів спрацьовування захисту з лінійно залежною характеристикою. Для ліній напругою 6-20 кВ випускається односистемний ненаправлений дистанційний захист повного опору типу ДЗ-10-У2. Захист застосовується насамперед у сільських мережах на багаторазово секціонованих радіальних лініях з мережним резервуванням. Пусковим органом захисту є трифазне реле повного опору. Дистанційний орган теж у трифазному виконанні. Він спрацьовує з витримкою часу, лінійно залежної від дальності місця ушкодження, тобто від опору на затискачах захисту (Рис.5.5).

У захисті ДЗ-10-У2 немає явно виражених ступенів. Він власне кажучи є одноступінчастим захистом, тому вибір його параметрів зводиться до визначення опору спрацьовування $Z_{с.з}^{III}$ і розрахункової уставки часу спрацьовування $t_{с.з.}$.

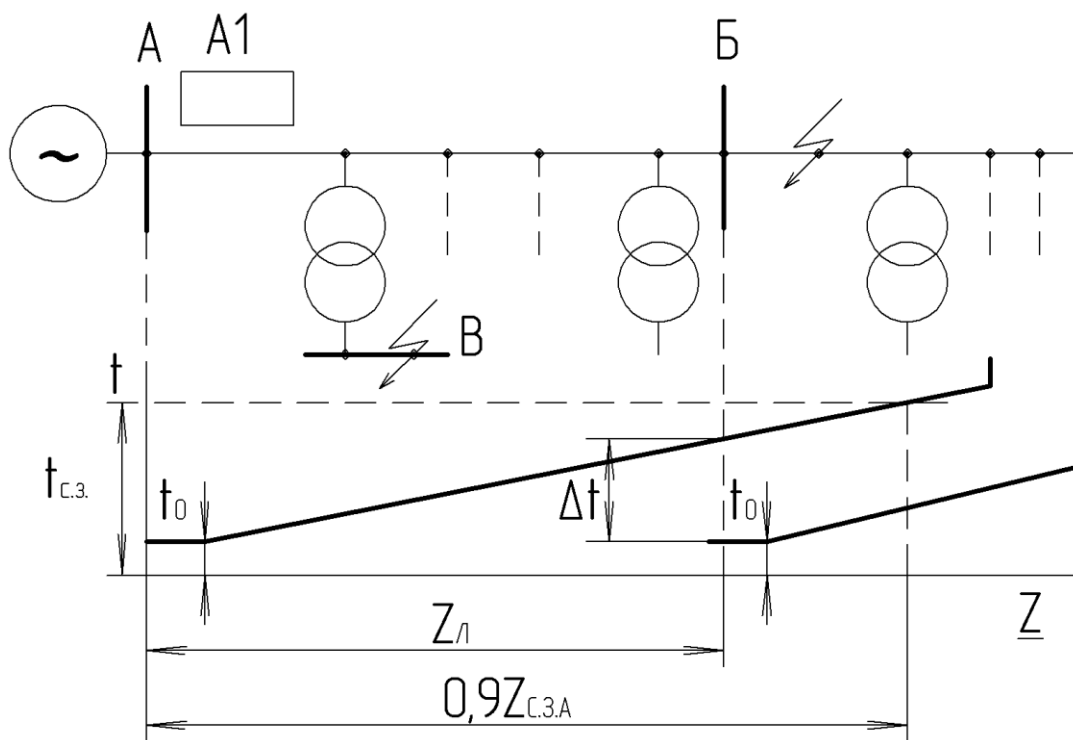


Рис. 5.5. Узгодження дистанційних захистів з комбінованими характеристиками

Вибір опору спрацьовування. Опір спрацьовування захисту $Z_{с.з.А}$ визначається в такий спосіб: для забезпечення коефіцієнта чутливості $k_q=1,5$ при короткому замиканні наприкінці лінії приймається $Z_{с.з.А}=1,5Z_L$ для відстройки від навантажувального режиму $Z_{с.з.А}$ визначається по (5.1) при $(\varphi_{роб} - \varphi_{р.мах.ч})=0$; для відстройки від коротких замикань за трансформаторами відгалужень використовується умова (5.3); для узгодження з дистанційним захистом суміжної ділянки виконується умова $Z_{с.з.А}=k_{відстр}(Z_L+Z_{с.з.Б})$ при $k_{відстр}=0,85$.

Опір уставки реле Z_y визначається як розрахунковий вторинний опір: $Z_{с.р} = (K_I/K_U)Z_{с.з.}$.

Вибір уставки часу спрацьовування. Час спрацьовування захисту $t_{с.з.}$ пов'язаний з опором $Z_{с.з.}$ на його затискачах співвідношенням $t_{с.з.} = \alpha Z_{с.з.}$, де α - коефіцієнт нахилу характеристики (Рис.5.5). Розрахункова уставка захисту визначається як $t_{с.з.}=0,9\alpha Z_{с.з.}$ [8]. Тому при обраному $Z_{с.з.}$ розрахунок $t_{с.з.}$ зводиться до визначення коефіцієнта α . При узгодженні між собою дистанційних захистів коефіцієнт $\alpha \geq (t_0 + \Delta t)/Z_L$.

Таким чином, $t_{с.з.}=0,9(Z_{с.з.}/Z_L)(t_0 + \Delta t)$. Якщо прийняти $Z_{с.з.}/Z_L = 1,5$ то $t_{с.з.}=1,35(t_0 + \Delta t)$.

При визначенні коефіцієнта α , якщо буде потрібно погоджують характеристики захисту із захисними характеристиками запобіжників найбільш потужних трансформаторів відгалужених підстанцій. Крім того, на суміжних ділянках, розташованих як до, так і після розглянутої лінії, можуть бути струмові захисти з характеристиками, відмінними від характеристики дистанційного захисту. Спосіб узгодження характеристики дистанційного захисту з характеристиками запобіжників і максимальних струмових захистів розглянутий в [8].