

ОСОБЛИВОСТІ РОБОТИ НАДПРОВІДНОГО ОБМЕЖУВАЧА СТРУМУ ПРИ РАПТОВОМУ КОРОТКОМУ ЗАМИКАННІ

У статті розглянуто обмежувач струму короткого замикання індуктивного типу з високотемпературними надпровідними обмоткою та екраном. Проаналізовано основні особливості перехідного процесу при виникненні струму короткого замикання.

В статті рассмотрен ограничитель тока короткого замыкания индуктивного типа с высокотемпературными сверхпроводящими обмоткой и экраном. Проанализированы основные особенности переходного процесса при возникновении тока короткого замыкания.

ВСТУП

Ідея використати в тім або іншому виді фазовий перехід при втраті надпровідності для обмеження струму короткого замикання виникла давно. Однак її реалізація на рівні низькотемпературних надпровідників була практично неможлива через надмірні енергетичні витрати на охолодження. Тільки з появою високотемпературних надпровідних матеріалів (ВТНП), які надійно працюють при температурі кипіння рідкого азоту, що зменшувало необхідні витрати на охолодження. Обмежувачі струму короткого замикання можна розділити на дві основні групи: резистивні та індуктивні.

Є цілий ряд пропозицій по використанню ВТНП для обмеження змінного струму в електричних мережах [1]. Найбільш придатний для цього обмежувач струму індуктивного типу з ВТНП екраном і ВТНП обмоткою, що разом з осердям розташовані в загальному кріостаті і охолоджуються рідким азотом (рис. 1).

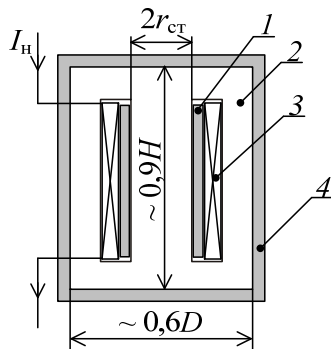


Рис. 1. Конструктивна схема ОСКЗ індуктивного типу: 1 – ВТНП екран, 2 – осердя, 3 – ВТНП обмотка, 4 – кріостат

Він послідовно з'єднаний з навантаженням і в нормальному режимі роботи (номінальний режим) крізь нього проходить струм навантаження i_n , який визначається номінальною напругою u_n і повним опором навантаження Z_n (рис. 2,а).

ОСОБЛИВОСТІ ПЕРЕХІДНОГО ПРОЦЕСУ

Враховуючи те, що падіння напруги на обмежувачі струму з ВТНП не перебільшує 3...5 % від u_n , а сам характер падіння напруги чисто індуктивний, можна вважати, що $i_n = u_n/Z_n$.

Таким чином, на момент раптового КЗ (рис. 2,б) початкові умови будуть такими: $i_{n0} = I_{nm} \sin(\psi_u - \varphi_n)$, де $I_{nm} = U_{nm}/Z_n$, ψ_u – початкова фаза КЗ, φ_n – кут навантаження.

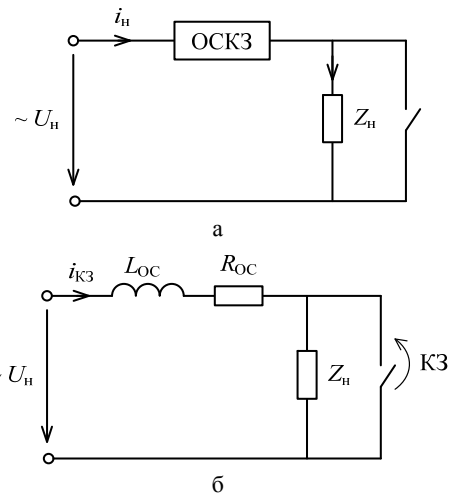


Рис. 2. Схема заміщення увімкнення НПОС у електромережу: а – до виникнення КЗ ($t = 0$); б – при виникненні КЗ ($t = + 0$)

Але сам процес раптового КЗ ускладнюється тим, що при збільшенні струму крізь обмежувач струму збільшується напруженість магнітного поля на поверхні ВТНП екрана і при досягненні її критичного значення $H_{кр}$ він втрачає діаманітні якості, а також може бути втрачена надпровідність ВТНП обмотки при досягненні $I_{кр}$. І перше, і друге змінює як індуктивність обмежувача струму, так й резистивний опір його обмотки, а це, в свою чергу, призводить до зміни сталої часу і повного опору обмежувача струму.

Все вищевикладене дає підстави розділити перехідний процес у ВТНП ОСКЗ при раповому КЗ на такі етапи:

1) від початкового струму $i_{n0} = I_{nm} \sin(\psi_u - \varphi_n)$ до втрати діаманітної властивості ВТНП екрана (або до втрати надпровідності ВТНП обмотки);

2) від втрати діаманітної властивості ВТНП екрана до втрати надпровідності ВТНП обмотки (або навпаки від втрати надпровідності ВТНП обмотки до втрати діаманітної властивості ВТНП екрана);

3) від втрати всіх проявів надпровідності до усталеного струму в електричній мережі.

Реалізація того чи іншого варіанта визначається підбором ВТНП матеріалів для екрана і обмотки.

Індукція магнітного поля на поверхні ВТНП екрана B_e визначається струмом і кількістю рядів n ВТНП обмотки [2]. Тому, знаючи $B_{кр}$ для матеріалу ВТНП екрана, можна реалізувати перший варіант, прийнявши

таке число рядів ВТНП обмотки, щоб $B_{кр}$ досягалось при $I = (2,5...3) \cdot I_{нм}$. При цьому критичне значення струму повинно бути $I_{кр} = (4...5) \cdot I_{нм}$, що гарантує нормальну роботу ВТНП ОСКЗ при можливих флуктуаціях струму в електромережі.

Другий варіант відбувається, якщо критичне значення струму $I_{кр}$ буде на рівні $(2,5...3) \cdot I_{нм}$, а $B_{кр}$ для екрана при досягненні струмом $(4...5) \cdot I_{нм}$.

Перший етап однаковий для обох варіантів. Його параметри – R_{OC1} – резистивний опір ВТНП обмотки, L_{OC1} – індуктивність обмежувача струму і $Z_{OC1} = \sqrt{R_{OC1}^2 + (2\pi f L_{OC1})^2}$ – повний опір обмежувача струму – визначаються таким чином:

$R_{OC1} = P_0 / I_n^2$, де P_0 – сумарні втрати потужності в надпровідній обмотці при перемагнічуванні;

$L_{OC1} = w \Phi_p / I_n$, де w – число витків ВТНП обмотки, Φ_p – магнітний потік розсіювання (рис. 3), який при числі рядків обмотки n дорівнює

$$\Phi_p = \mu_0 I_n n^2 \frac{b_{пп}}{a_{пп}} \pi r_{ст}.$$

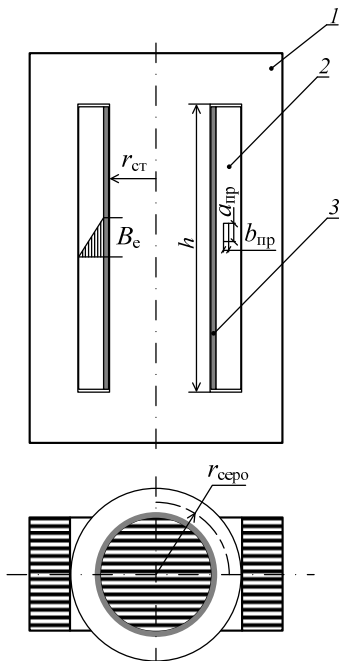


Рис. 3. Структурна схема ОСКЗ:
1 – осердя; 2 – ВТНП обмотка; 3 – ВТНП екран

Саме рішення на першому етапі можна представити як $i_{к1} = i_{y1} + i_{b1}$, де $i_{y1} = \frac{U_{нм}}{Z_{OC1}} \sin(\omega t + \psi_u - \varphi_{OC1})$, а i_{b1} знаходиться з диференційного рівняння

$$L_{OC1} \frac{di_{b1}}{dt} + R_{OC1} i_{b1} = 0,$$

що дає в загальному вигляді $i_{b1} = A_1 e^{-\frac{R_{OC1}}{L_{OC1}} t}$. Таким

чином, $i_{к1} = \frac{U_{нм}}{Z_{OC1}} \sin(\omega t + \psi_u - \varphi_{OC1}) + A_1 e^{-\frac{R_{OC1}}{L_{OC1}} t}$.

З початкових умов стала інтегрування

$$A_1 = I_{нм} \sin(\psi_u - \varphi_n) - \frac{U_{нм}}{Z_{OC1}} \sin(\psi_u - \varphi_{OC1}).$$

Остаточо отримуємо:

$$i_{к1} = \frac{U_{нм}}{Z_{OC1}} \sin(\omega t + \psi_u - \varphi_{OC1}) + \left[I_{нм} \sin(\psi_u - \varphi_n) - \frac{U_{нм}}{Z_{OC1}} \sin(\psi_u - \varphi_{OC1}) \right] e^{-\frac{R_{OC1}}{L_{OC1}} t},$$

де

$$\varphi_{OC1} = \arctg \frac{2\pi f L_{OC1}}{R_{OC1}}.$$

В залежності від початкової фази КЗ зміна струму буде такою:

- при $\psi_u = 0$:

$$i_{к1} = \frac{U_{нм}}{Z_{OC1}} \sin(\omega t - \varphi_{OC1}) +$$

$$\left[I_{нм} \sin(-\varphi_n) - \frac{U_{нм}}{Z_{OC1}} \sin(-\varphi_{OC1}) \right] e^{-\frac{R_{OC1}}{L_{OC1}} t}; \quad (1)$$

- при $\psi_u = \pi/2$:

$$i_{к1} = \frac{U_{нм}}{Z_{OC1}} \cos(\omega t - \varphi_{OC1}) +$$

$$\left[I_{нм} \cos \varphi_n - \frac{U_{нм}}{Z_{OC1}} \cos \varphi_{OC1} \right] e^{-\frac{R_{OC1}}{L_{OC1}} t}. \quad (2)$$

Незалежно від варіанта послідовності перехідного процесу другий етап починається при досягненні струмом $i_{к1}$ значення $(2,5...3) \cdot I_{нм}$. Уводячи це значення у формули (1), (2) визначаємо час закінчення (тривалість) першого етапу $t_{к1}$.

Відповідно, початкова фаза напруги для другого етапу перехідного процесу збільшується на $\omega t_{к1}$, а саме рішення в загальному вигляді буде таким

$$i_{к2} = \frac{U_{нм}}{Z_{OC1}} \sin(\omega t + \omega t_{к1} + \psi_u - \varphi_{OC2}) + A_2 e^{-\frac{R_{OC2}}{L_{OC2}} t},$$

де відлік по часу t починається з нуля: $0 \leq t \leq t_{к2}$, де $t_{к2}$ – час закінчення другого етапу.

З початкових умов для другого етапу: при $t = 0$ $i_{к2} = (2,5...3) I_{нм}$ – визначаємо

$$A_2 = (2,5...3) I_{нм} - \frac{U_{нм}}{Z_{OC1}} \sin(\omega t_{к1} + \psi_u - \varphi_{OC2}).$$

Остаточо зміна струму на другому етапі КЗ буде такою

$$i_{к2} = \frac{U_{нм}}{Z_{OC1}} \sin(\omega t + \omega t_{к1} + \psi_u - \varphi_{OC2}) +$$

$$\left[(2,5...3) I_{нм} - \frac{U_{нм}}{Z_{OC1}} \sin(\omega t_{к1} + \psi_u - \varphi_{OC2}) \right] e^{-\frac{R_{OC2}}{L_{OC2}} t}.$$

Параметри R_{OC2} , L_{OC2} , Z_{OC2} , φ_{OC2} (рис. 4):

- для першого варіанта:

$$R_{OC2} = R_{OC1}; \quad L_{OC2} = \frac{w B_{нас} \pi r_{ст}^2}{(2,5...3) I_{нм}};$$

$$Z_{OC2} = \sqrt{R_{OC1}^2 + (2\pi f L_{OC2})^2}; \quad \varphi_{OC2} = \arctg \frac{2\pi f L_{OC2}}{R_{OC1}},$$

- для другого варіанта:

$$R_{OC2} = \rho_{пр} \frac{w 2 \pi r_{ст}}{S_{пр}}; L_{OC2} = L_{OC1};$$

$$Z_{OC2} = \sqrt{R_{OC2}^2 + (2\pi f L_{OC1})^2}; \varphi_{OC2} = \arctg \frac{2\pi f L_{OC1}}{R_{OC2}}.$$

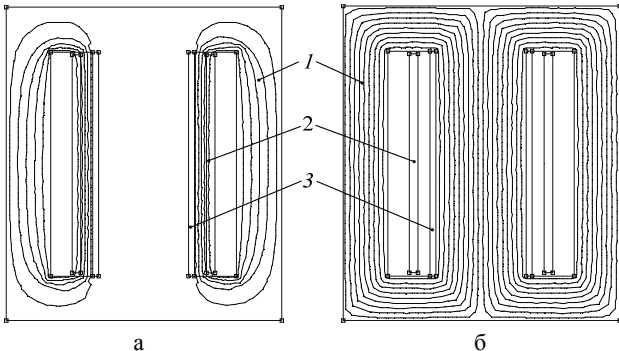


Рис. 4. Розподіл магнітного поля у ОСКЗ:
1 – осердя; 2 – ВТНП обмотка; 3 – ВТНП екран;
а – нормальна робота електромережі; б – раптове КЗ

При $\psi_u = 0$:

$$i_{к2} = \frac{U_{нм}}{Z_{OC1}} \sin(\omega t + \omega t_{к1} - \varphi_{OC2}) + \left[(2,5 \dots 3) I_{нм} - \frac{U_{нм}}{Z_{OC1}} \sin(\omega t_{к1} - \varphi_{OC2}) \right] e^{-\frac{R_{OC2}}{L_{OC2}} t}.$$

При $\psi_u = \pi/2$:

$$i_{к2} = \frac{U_{нм}}{Z_{OC1}} \cos(\omega t + \omega t_{к1} - \varphi_{OC2}) + \left[(2,5 \dots 3) I_{нм} - \frac{U_{нм}}{Z_{OC1}} \cos(\omega t_{к1} - \varphi_{OC2}) \right] e^{-\frac{R_{OC2}}{L_{OC2}} t}.$$

На третьому етапі в зв'язку з втратою діаманетизму ВТНП екрана і надпровідності ВТНП обмотки параметри ОСКЗ з достатньою ступінню точності можна прийняти такими

$$R_{OC3} = \rho_{пр} \frac{w 2 \pi r_{ст}}{S_{пр}}; L_{OC3} = \frac{w B_{нас} \pi r_{ст}^2}{(4 \dots 5) I_{нм}};$$

$$Z_{OC3} = \sqrt{R_{OC3}^2 + (2\pi f L_{OC3})^2}; \varphi_{OC3} = \arctg \frac{2\pi f L_{OC3}}{R_{OC3}}.$$

Якщо перехідний процес дійде до третього етапу (а цього може і не статися) його початкові умови $i_{к3} = (4 \dots 5) \cdot I_{нм}$ при $t = 0$, де відлік часу t починаємо з нуля: $0 \leq t \leq t_{к3}$ (час закінчення третього етапу). Початкова фаза напруги збільшується на $\omega t_{к2}$, а саме рішення в загальному вигляді буде таким

$$i_{к3} = \frac{U_{нм}}{Z_{OC3}} \sin(\omega t + \omega(t_{к1} + t_{к2}) + \psi_u - \varphi_{OC3}) + A_2 e^{-\frac{R_{OC3}}{L_{OC3}} t}.$$

З початкових умов для третього етапу визначаємо

$$A_3 = (4 \dots 5) I_{нм} - \frac{U_{нм}}{Z_{OC3}} \sin(\omega(t_{к1} + t_{к2}) + \psi_u - \varphi_{OC3}),$$

а зміна струму на третьому етапі КЗ буде такою

$$i_{к3} = \frac{U_{нм}}{Z_{OC3}} \sin(\omega t + \omega(t_{к1} + t_{к2}) + \psi_u - \varphi_{OC3}) + \left[(4 \dots 5) I_{нм} - \frac{U_{нм}}{Z_{OC3}} \sin(\omega(t_{к1} + t_{к2}) + \psi_u - \varphi_{OC3}) \right] e^{-\frac{R_{OC3}}{L_{OC3}} t}.$$

При $\psi_u = 0$:

$$i_{к3} = \frac{U_{нм}}{Z_{OC3}} \sin(\omega t + \omega(t_{к1} + t_{к2}) + \psi_u - \varphi_{OC3}) + \left[(4 \dots 5) I_{нм} - \frac{U_{нм}}{Z_{OC3}} \sin(\omega(t_{к1} + t_{к2}) - \varphi_{OC3}) \right] e^{-\frac{R_{OC3}}{L_{OC3}} t}.$$

При $\psi_u = \pi/2$:

$$i_{к3} = \frac{U_{нм}}{Z_{OC3}} \cos(\omega t + \omega(t_{к1} + t_{к2}) + \psi_u - \varphi_{OC3}) + \left[(4 \dots 5) I_{нм} - \frac{U_{нм}}{Z_{OC1}} \cos(\omega(t_{к1} + t_{к2}) - \varphi_{OC3}) \right] e^{-\frac{R_{OC3}}{L_{OC3}} t}.$$

Результати розрахунків ОСКЗ розглянутої конструкції на параметри: $S_{н} = 2,4$ МВА; $I_{н} = 400$ А; $U_{н} = 6000$ В для двох варіантів підбору ВТНП матеріалів для ВТНП екрану і ВТНП обмотки показані на рис. 5, 6.

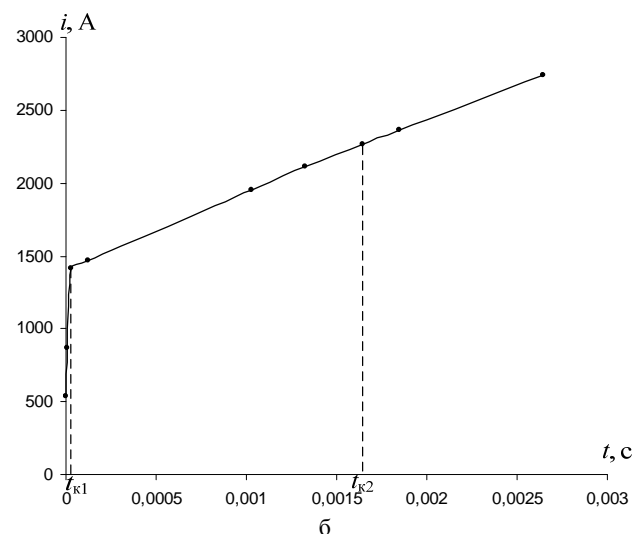
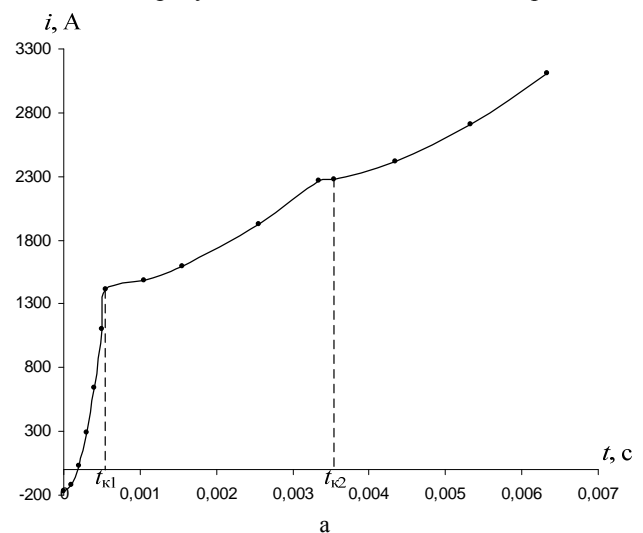


Рис. 5. Перехідний процес (перший варіант):
а – при $\psi_u = 0$; б – при $\psi_u = \pi/2$

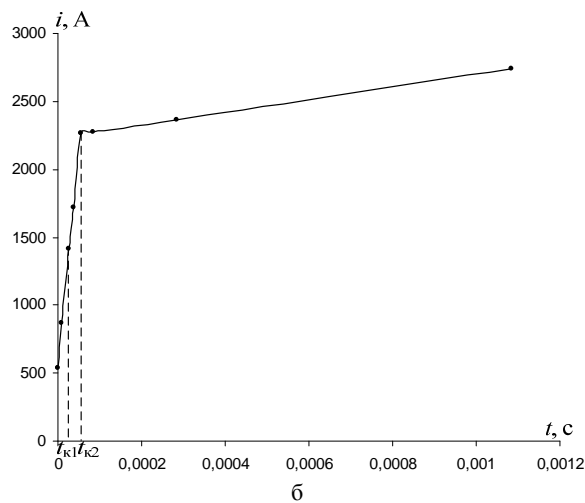
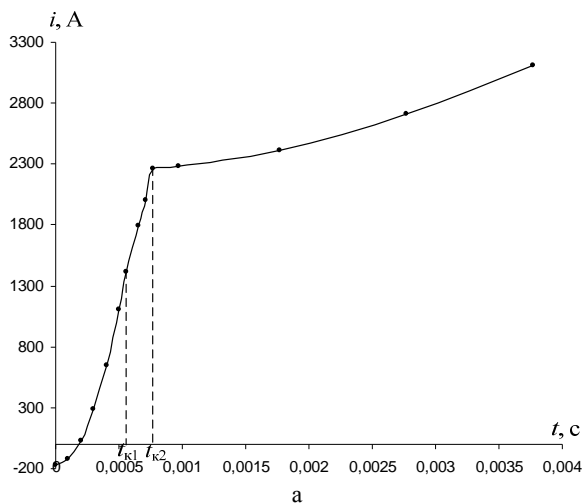


Рис. 6. Перехідний процес (другий варіант):
а – при $\psi_u = 0$; б – при $\psi_u = \pi/2$

Третій етап перехідного процесу відбувається по експоненціальній спадаючій, струм стухає з постійною часу $\tau = R_{OC3}/L_{OC3}$. Час закінчення третього етапу перехідного етапу триває близько 3τ , але фактично час закінчення t_{k3} відповідає спрацюванню апаратури захисту. На рис. 7,а,б наведені криві струму i_{k3} для початкових фаз напруги $\psi_u = 0$, $\psi_u = \pi/2$.

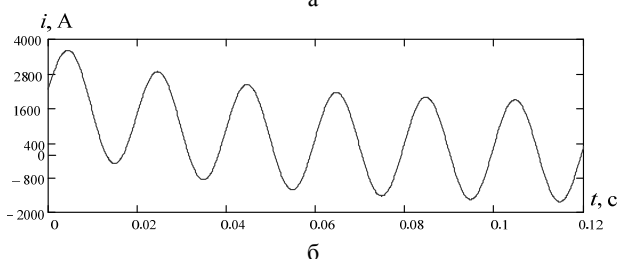
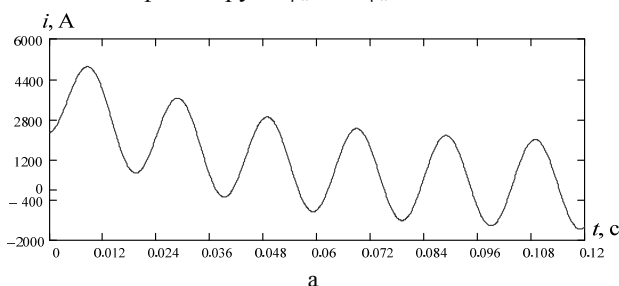


Рис. 7. Третій етап перехідного процесу:
а – при $\psi_u = 0$; б – при $\psi_u = \pi/2$

ВИСНОВКИ

На першому та другому етапі перехідного процесу тривалість часу t_{k1} , t_{k2} зменшується в залежності від початкової фази напруги, найменший час при $\psi_u = \pi/2$. Тривалість третього етапу перехідного процесу залежить від R_{OC} активного опору ВТНП проводу обмотки, при достатній його величині [3] третій етап перехідного процесу може і не відбуватися, а струм при цьому може бути менший за номінальний.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Данько В.Г., Полянська І.С., Гончаров Є.В. Використання високотемпературної надпровідності в електроенергетичному обладнанні: монографія. – Х.: НТМТ, 2011. – 248 с.
2. Данько В.Г., Гончаров Є.В. Расчет параметров индуктивного ограничителя тока короткого замыкания со сверхпроводящим экраном // Электротехника. – 2013. – №9. – С. 10-13.
3. Janowski T., Kozak S., Kondratowicz-Kucewicz B. Analysis of transformer type superconducting fault current limiters // IEEE transactions on applied superconductivity. – 2004. – vol.17. – №2. – pp. 1778-1780.

REFERENCES: 1. Dan'ko V.G., Polyanska I.S., Goncharov E.V. *Vykorystannia vysokotemperaturnoi nadprovodnosti v elektroenergetychnomu obladnanni: monohrafiia* [The use of high-temperature superconductivity in electric power equipment: monograph]. Kharkiv, NTMT Publ., 2011. 248 p. 2. Dan'ko V.G., Goncharov E.V. Calculating of parameters of an inductive short-circuit current limiter with a superconducting shield. *Elektrotehnika – Electrical engineering*, 2013, no.9, pp. 10-13. 3. Janowski T., Kozak S., Kondratowicz-Kucewicz B. Analysis of transformer type superconducting fault current limiters. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2004, vol.17, no.2, pp. 1778-1780.

Поступила (received) 10.09.2014

Данько Володимир Григорович¹, д.т.н., проф.,
Гончаров Євген Вікторович¹, м.н.с.,
¹ Національний технічний університет
"Харківський політехнічний інститут",
61002, Харків, вул. Фрунзе, 21,
тел/phone +38 057 7076427,
e-mail: vdankog@gmail.com, jay1981@rambler.ru

V.G. Dan'ko¹, E.V. Goncharov¹
¹National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"
21, Frunze Str., Kharkiv, 61002, Ukraine

Features of operation of a superconducting current limiter at the sudden short circuit.

In the article the fault current limiter of inductive type with high-temperature superconducting coil and screen is considered. Main features of transient at occurrence of short circuit are analyzed.

Key words – coil, high-temperature superconducting, magnetic permeability.