

УДК 621.311.001.57(063)

ЗАХИСТ ЯК СКЛАДОВА СИСТЕМИ ФУНКЦІОНАЛЬНОГО ДІАГНОСТУВАННЯ АСИНХРОННИХ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ

Закладний О.М., канд. техн. наук, доцент,
Прокопенко В.В., канд. техн. наук, професор, Закладний О.О., аспірант,
Національний технічний університет України «КПІ»

Розглянуто принципи побудови захисту асинхронних електродвигунів за допомогою теплової моделі та контролю струму статора. В тепловій моделі враховано нагріваючі втрати, у тому числі - втрати від несиметрії і несинусоїдальності напруги. Як часопротова характеристика захисту приймається перевантажувальна характеристика електродвигуна, враховуються його початковий режим до виникнення аварійної ситуації та струм зворотної послідовності.

The question of protection of an asynchronous electric drive with thermal model and control the stator current. In the warm thermal model takes into account losses, including - loss of nesymetriyi nesynusoidalnosti and tension. As time current characteristics of protection adopted handling characteristics of the motor, and considered the initial treatment to an emergency situation and current reverse sequence.

Вступ. Переважна більшість існуючих пристроїв захисту асинхронних електродвигунів (АД) відрізняються один від одного за своїми функціональними можливостями і мають загальні недоліки: низьку точність встановлення струмів, спрацьовування за максимально допустимого струму, відсутність контролю напруги. Вони не вирішують завдання захисту АД від перевантажень, ушкоджень силового живильного кабелю, перекосу фазних струмів, пов'язаних із внутрішніми аваріями двигуна або з погіршенням опору ізоляції обмоток.

Метою роботи є усунення недоліків пристроїв захисту шляхом використання систем функціонального діагностування АД.

Основні матеріали дослідження. Аварії АД поділяються на два основних типи: механічні та електричні. До механічних належать: деформація або поломка вала ротора, ослаблення кріплення осердя статора до станини, ослаблення обпресування осердя ротора, виплавлення бабіту в підшипниках ковзання, руйнування сепаратора, кільця або кульок у підшипниках кочення, поломка крильчатки, відкладення пилу й бруду в рухомих елементах тощо [1].

Причиною більшості механічних аварій є радіальна вібрація через асиметрію мережі живлення, механічні перевантаження на валу електродвигуна, виробничий брак комплектуючих елементів або неакуратне складання. До 10% всіх аварій АД мають механічне походження. З них 8% складає частка аварій, пов'язаних з асиметрією фаз, і лише 2% - аварії, пов'язані з механічним перевантаженням. Частка аварій, пов'язаних з браком є незначною, тому її можна не брати до уваги. На сьогодні оцінка ймовірностей виникнення механічних аварій відсутня. Більша їх частина має прихований характер і виявляється лише після відповідних випробувань або розбирання двигуна, однак постійний контроль мережевої напруги та струму АД дозволяє у більшості випадків звести цю ймовірність до мінімуму.

Електричні аварії АД, у свою чергу, поділяються на три типи:

- мережеві аварії;
- струмові аварії, пов'язані з обривом провідників у обмотках статора, ротора або кабелю, міжвитковим і міжфазним замиканнями обмоток, порушенням контактів і руйнуванням з'єднань, виконаних за допомогою паяння або зварювання; аварії, пов'язані з пробоем ізоляції в

результаті нагрівання, викликаного протіканням струмів перевантаження або короткого замикання (к.з.);

- аварії, пов'язані зі зниженням опору ізоляції внаслідок її старіння, руйнування або зволоження.

Для того, щоб захистити АД від аварійних режимів, застосовують релейний захист: тепловий, струмовий, температурний і комбінований. Багаторічний досвід експлуатації АД показав, що більшість існуючих пристроїв захисту не гарантують їх безаварійної роботи [1]. Застосування надійного й ефективного захисту від аварійних режимів роботи дозволяє значно скоротити кількість і частоту аварійних ситуацій і подовжити термін служби АД, зменшити витрати електроенергії й втрати від зупинення технологічного процесу.

Рекомендації, викладені в ПУЕ стосовно захисту АД, не враховують сучасних вимог щодо надійного захисту двигуна від перегрівання обмоток статора, зумовленого несиметрією напруги живлення, пошкодженням системи охолодження і технологічними перевантаженнями, несиметрією повітряного зазору, викликаного зношуванням підшипників, заклинюванням ротора [2].

Одним із перспективних видів захисту від перевантаження є застосування функціонального діагностування із використанням математичного моделювання теплового стану АД. У практичних розрахунках найчастіше застосовується розрахунок нагрівання за експонентою, тобто представлення АД одним тілом нагрівання та диференціальним рівнянням першого порядку (рівняння теплового стану)

$$\frac{d\Delta\tau}{dt} = \frac{1}{C}[\Delta P - A\Delta\tau],$$

де $\Delta\tau$ - перевищення температури двигуна над температурою довкілля; t - час; ΔP - потужність втрат енергії в двигуні; C - сумарна теплоємність двигуна; A - сумарна тепловіддача [3].

У різницевій формі, придатній для реалізації на цифровому пристрої, це рівняння має вигляд

$$\Delta\tau_k = \Delta\tau_{k-1} + \frac{\Delta h}{T_H} \left(\frac{(V_1 + V_2 + \Delta P_{дн} + \Delta P_{дт})\Delta\tau_{із} - \Delta\tau_{k-1}}{1,3\Delta P_H} \right),$$

де $\Delta\tau_k$ - перевищення температури в k -й момент часу; $\Delta\tau_{k-1}$ - перевищення температури в $(k-1)$ -ий – момент часу; Δh - крок розрахунку, V_1, V_2 - втрати в обмотках статора і ротора, $\Delta P_{дн}, \Delta P_{дт}$ - додані і додаткові втрати в АД, ΔP_H - номінальні втрати в АД, T_H - стала часу нагрівання при номінальному навантаженні, $\Delta\tau_{із}$ - гранично припустиме перевищення температури ізоляції відповідного класу.

Алгоритм роботи теплового захисту наведено на рис.1. Повне врахування всіх факторів для забезпечення надійного теплового захисту АД практично неможливе, тому доцільно тепловий захист поєднувати зі струмовим .

Аварійні режими роботи в більшості випадків супроводжуються проходженням надструмів у обмотці статора. Небезпечними є насамперед тепловий вплив надструмів і тривалість його проходження. Чим більша кратність струму перевантаження k_I , відносно номінального струму, тим менший припустимий час перевантаження

$$t = T_H \ln \frac{1}{1 - \frac{\Delta\tau_{із} - \Delta\tau_0}{k_I^2 \Delta\tau_{ном}}}, \quad (1)$$

де $\Delta\tau_0$ - початкове перевищення температури двигуна [4].

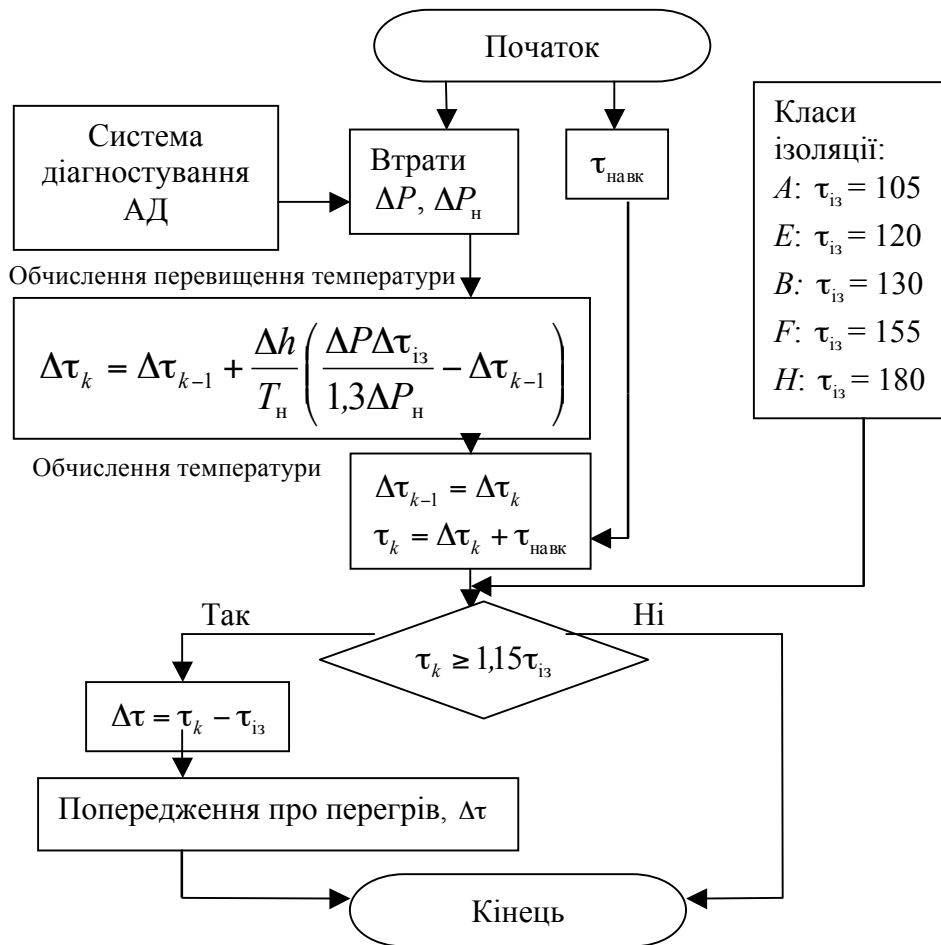


Рисунок 1 – Алгоритм роботи теплового захисту

Спрощено формула (1) має вигляд

$$t = T_n \ln \frac{k_I^2 - k_{\text{поч}}^2}{k_I^2 - a},$$

де $k_{\text{поч}}$ - початковий коефіцієнт кратності струму, $a = \frac{\Delta\tau_{i3}}{\Delta\tau_{\text{ном}}}$ - коефіцієнт, який змінюється в межах 1-1,5 і в середньому приймається таким, що дорівнює 1,3 [5].

На рис. 2 зображена перевантажувальна характеристика АД з різними початковими режимами.

В [6] наводиться кілька варіантів часострумової характеристики захисту:

$$t = A_1 \ln \frac{k_I^2}{k_I^2 - 1}, \quad (2)$$

$$t = \frac{A_2}{k_I^2}, \quad (3)$$

$$t = \frac{A_3}{k_I^2 - 1}, \quad (4)$$

де A_1, A_2, A_3 - сталі величини, які вибираються меншими T_n із запасом, який залежить від можливої похибки дії захисту.

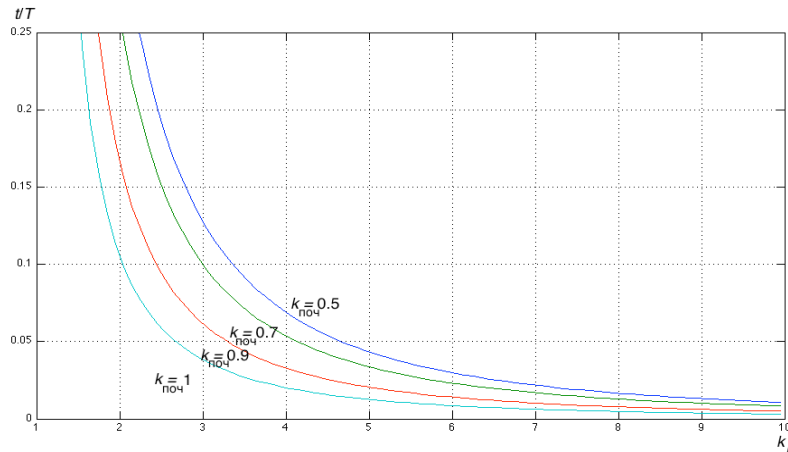


Рисунок 2 – Перевантажувальна характеристика АД

Часострумова характеристика захисту з урахуванням температури навколишнього повітря визначається виразом

$$t = A_1 \ln \frac{k_I^2}{\left(1 - \frac{\tau_{навк}}{\tau_{дв.доп}}\right) (k_I^2 - 1)}, \quad (5)$$

де $\tau_{дв.доп}$ - відповідає температурі АД при струмі перевантаження $(1,15-1,5)I_{ном}$, коли перегрівання призводить до скорочення терміну служби ізоляції.

Взявши як вихідну точку за ГОСТ 183-74* ($t = 120с$, $k_I = 1,5$), з урахуванням коефіцієнта запасу $k_3 = 1,1$ можна знайти значення A для формул (2) - (4):

$$t = 186 \ln \frac{k_I^2}{k_I^2 - 1}, \quad (6)$$

$$t = \frac{245}{k_I^2}, \quad (7)$$

$$t = \frac{136}{k_I^2 - 1}. \quad (8)$$

Для рівняння (5) приймаємо $\tau_{навк} = 25^\circ C$, а $\tau_{дв.доп} = 165^\circ C$ для класу ізоляції В. Тоді

$$t = 145 \ln \frac{k_I^2}{0,85(k_I^2 - 1)}. \quad (9)$$

Як видно з рис.3, часострумові характеристики захисту за формулами (2), (3), (4) значною мірою відрізняються в початковій частині, при незначних струмах перевантаження, а характеристика (5) значно відрізняється від інших при значеннях $k_I > 1,5$.

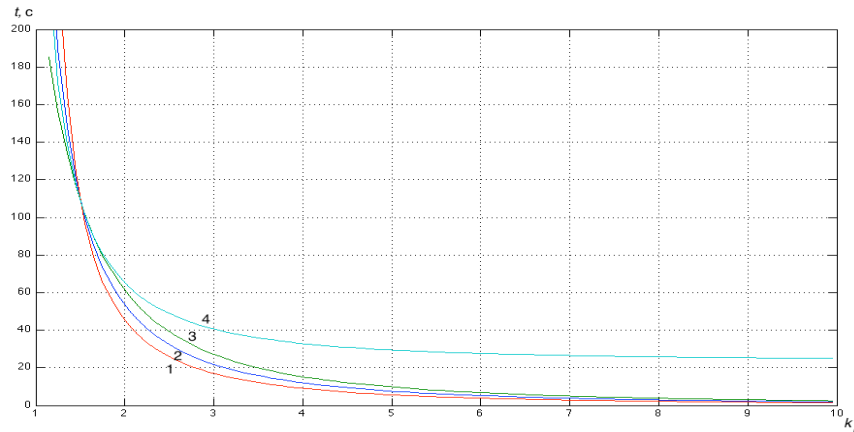


Рисунок 3 – Часострумове характеристика спрацювання захисту:
1 - ф. (8), 2 - ф. (6), 3 - ф. (7), 4 - ф. (9)

Вирази (6) - (9) можуть використовуватися лише для загальної оцінки процесу нагрівання, оскільки базуються лише на одній точці ГОСТ 183-74*. Для точнішого вибору захисного пристрою, наприклад з часострумовою характеристикою типу (3), можна скористатися виразом [4]

$$A_2 = \alpha_{\text{зап}} k_{\text{п}}^2 t_{\text{п}}$$

де $\alpha_{\text{зап}}$ - коефіцієнт, що гарантує відсутність помилкових спрацьовувань захисту при пуску, $k_{\text{п}}$ - кратність пускового струму, $t_{\text{п}}$ - тривалість пуску двигуна.

Для часострумової характеристики (4) згідно [7] приймають $A_3 = 250$ (для закритих АД, що мають велику вагу і розміри) і $A_3 = 150$ (для відкритих АД).

У існуючих пристроїв перевантажувальна здатність двигуна (рис.4) повною мірою не використовується, що є значним недоліком захисту. Особливо це стосується невеликого перевантаження. Таким чином, як часострумове характеристику захисту пропонується використовувати перевантажувальну характеристику. Це дозволяє налагоджувати захист під параметри конкретного АД.

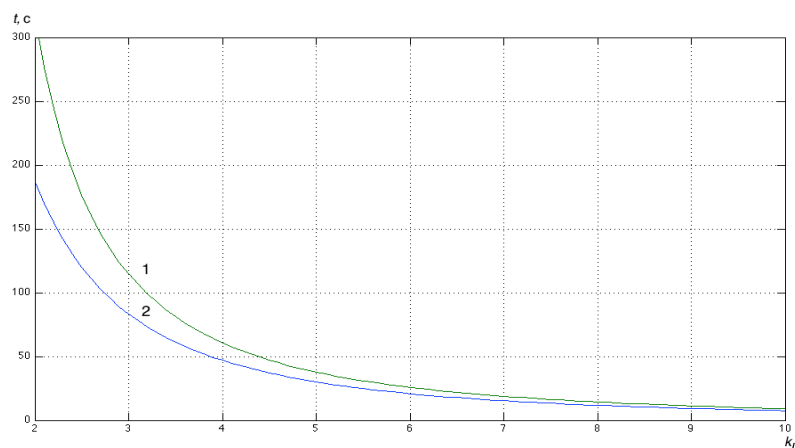


Рисунок 4 – 1 - перевантажувальна характеристика двигуна АД 4A280S2У3,
2 - часострумове характеристика захисту

На рис.5 наведено алгоритм роботи струмового захисту.

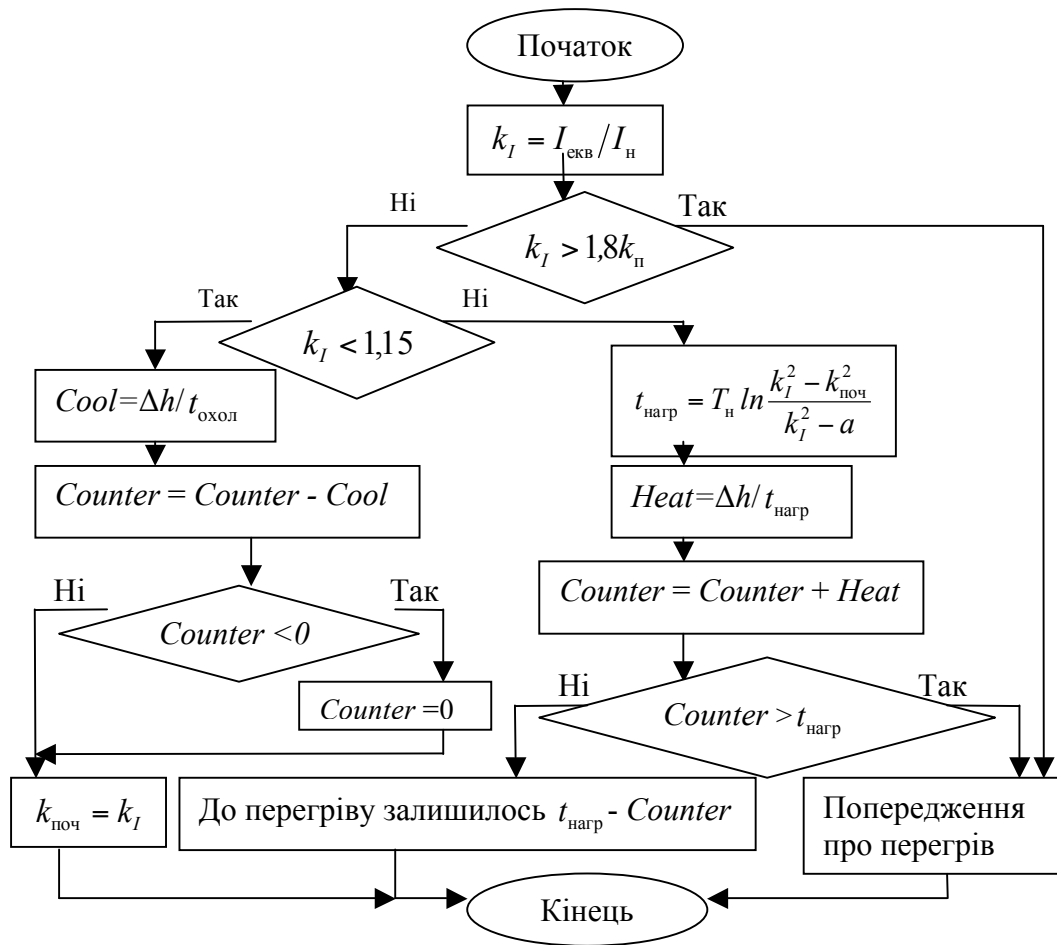


Рисунок 5 – Алгоритм роботи струмового захисту АД

АД можуть отримувати теплове перевантаження струмами зворотної послідовності при фазних струмах нижчих струмів спрацювання теплових реле існуючих систем захисту. Наприклад, при «злипання фаз» або обриві фази зі сторони високої напруги у понижувального трансформатора зі схемою з'єднання «трикутник-зірка» із заземленою нейтраллю струм в одній із фаз в 2 рази перевищує струм у двох інших [4]. Абсолютні значення струмів прямої та зворотної послідовності дорівнюють один одному, тобто $|I_1| = |I_2|$. Таким чином, захист АД за струмом повинен урахувати струм зворотної послідовності.

Еквівалентний фазний струм з урахуванням струму зворотної послідовності

$$I_{екв} = \sqrt{I_{max}^2 + kI_2^2}, \quad (10)$$

де I_{max} - діюче значення найбільшого фазного струму, I_2 - діюче значення складової зворотної послідовності, k - ваговий коефіцієнт струму I_2 [8].

Для АД k можна знайти за формулою

$$k = 2 \frac{M_{п}}{M_{н}} \frac{1}{s_{н} k_{п}^2} - 1,$$

де $M_{п}$, $M_{н}$ - пусковий та номінальний обертові моменти АД, $k_{п}$ - кратність пускового струму, $s_{н}$ - номінальне ковзання. Зазвичай для АД типовим значенням є $k_{п} = 4,5$ [9].

Згідно ГОСТ 13109-97 дозволяється розраховувати напруги зворотної послідовності за спрощеною формулою $U_{2i} = 0,62(U_{i \max} - U_{i \min})$, де $U_{i \max}$, $U_{i \min}$ - найбільше та найменше діюче значення з трьох міжфазних напруг при i -ому спостереженні з урахуванням гармонічних складових цих напруг при коефіцієнті спотворень синусоїдальності кривих напруги, який не перевищує 5%. Похибка розрахунків не перевищує 8%.

Використовуючи співвідношення складових зворотної послідовності для струмів і напруг при переході від схеми з'єднання «трикутник» до схеми «зірка» [10], можна перетворити наближену формулу для напруги зворотної послідовності у формулу струму зворотної послідовності у фазах трипровідної мережі

$$I_{2i} = 1,074(I_{i \max} - I_{i \min}) \quad (11)$$

де $I_{i \max}$, $I_{i \min}$ - найбільше та найменше з трьох діючих значень фазних струмів в лінії i -ому спостереженні з урахуванням гармонічних складових цих струмів при коефіцієнті спотворень синусоїдальності кривих струму не більше 5%.

Таким чином, підставляючи (11) в (10), з урахуванням струму зворотної послідовності спрощено можна записати

$$k_I = \frac{\sqrt{6,19I_{\max}^2 - 5,19I_{\min}^2}}{I_H}$$

Додатково рекомендується обмежувати струм зворотної послідовності значенням $(0,2 \dots 0,25) I_H$ [8].

Мінімальний захист встановлюється на АД, які необхідно вимикати при пониженій напрузі для запобігання самозапуску відповідальних двигунів, а також АД, самозапуск яких при відновленні напруги неприпустимий за умовами безпеки або особливостей технологічного процесу [11].

Критична напруга $U_{кр}$ при якій двигуни, що працюють з номінальним навантаженням, перекидаються

$$U_{кр} \leq U_{ном} \sqrt{\frac{M_{ном}}{M_{max}}}$$

де $M_{ном}$, M_{max} - номінальний і максимальний моменти АД.

Напруга спрацьовування захисту приймається такою, що дорівнює $U_{кр}$, витримка часу на відімкнення 0,5...1,5 с - для відповідальних двигунів, для інших АД - 10...15 с.

Висновок. Вдосконалено моделі та алгоритми захисту АД на основі його теплової моделі та контролю струмів обмотки статора, у яких враховано: всі нагриваючі втрати, у тому числі - втрати від несиметрії і несинусоїдальності напруги; струм зворотної послідовності через коефіцієнт кратності струму перевантаження; перевантажувальну характеристику діагностованого двигуна як часоструміву характеристику захисту.

Література.

1. Соркінд М. Асинхронные электродвигатели 0,4 кВ. Аварийные режимы работы / М. Соркінд // «Новости Электротехники», №2(32), 2005.
2. Сивокобыленко В.Ф. Тепловая защита асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором при несимметрии питающего напряжения / В.Ф. Сивокобыленко, С.Н. Ткаченко // Вісник КДПУ ім. М. Остроградського. – 2009. – Вип. 3(56)., ч.2. – С. 74-78.

3. *Синчук О.Н.* Тепловая модель кранового АД для диагностирования и настройки цифровой защиты от перегрузок / О.Н. Синчук, В.В. Чумак, С.Л. Михайлов // *Электротехника*, 2003. - №3. – С. 61-66.
4. *Гимоян Г.Г.* Релейная защита горных электроустановок / Г.Г. Гимоян. – изд. 2, перераб. и доп. М.: «Недра», 1978, 349 с.
5. *Сыромятников И.А.* Режимы работы асинхронных и синхронных двигателей / И.А. Сыромятников Под ред. Л.Г. Мамикоянца. – 4-е изд., переработ. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 240 с., ил.
6. *Корогодский В.И.* Релейная защита электродвигателей напряжением выше 1 кВ / В.И. Корогодский, С.Л. Кужеков, Л.Б. Паперно – М.: Энергоатомиздат, 1987 – 248 с.
7. *Коваленский И.В.* Релейная защита электродвигателей высокого напряжения / И.В. Коваленский, - Л.: Энергия, 1964 – 81 с.
8. *Сушко В.* Защита низковольтных электродвигателей совершенных устройств / В. Сушко // «Новости Электротехники», №5(35), 2005.
9. *Schneider Electric.* Серия Sepam. Sepam1000+. Подстанция. Трансформатор. Двигатель. Сборные шины. Защита и контроль. – 2001.
10. *Вагнер К.Ф.* Метод симметричных составляющих. В применении к анализу несимметричных электрических цепей / К.Ф. Вагнер, Р.Д. Эванс. – Л.-М.: Главная редакция энергетической литературы, 1936.
11. *Чернобровов Н.В.* Релейная защита энергетических систем: Учеб. пособие для техникумов / Н.В. Чернобровов, Семенов В.А. – М.: Энергоатомиздат, 1998. – 800 с.: ил.