

ния изоляции, возрастанию токов утечки и, как следствие, повышению потерь в трансформаторах.

2. При расчетах баланса энергии потери холостого хода в трансформаторах принимаются равными паспортному значению, однако на практике это не всегда соответствует реальным потерям в трансформаторе и для разных трансформаторов различие может быть значительным и определяется в основном сроком (длительностью) и условиями эксплуатации.

3. С целью повышения качества расчетов норматива потерь для распределительных сетей с высшим напряжением 6-10 кВ необходимо учитывать реальные, а не паспортные значения потерь холостого хода трансформаторов, соответствующие сроку их эксплуатации.

### **Список литературы**

1. Казаков Ю.Б. Учет изменения потерь холостого хода трансформаторов в период срока службы при расчете потерь в распределительных сетях. / Ю.Б. Казаков, А.Б.Козлов, В.В. Коротков // Электротехника: науч.-техн. журн. - М.: ЗАО "Знак". - 2006. - №5. - С. 11 - 16.
2. Воротницкий В.Э. Расчет, нормирование и снижение потерь электроэнергии в электрических сетях. / В.Э. Воротницкий, М.А. Калинкина // учебно-методическое пособие, 3-е стереотип. изд. - М. ИПКГосслужбы. - 2003. - 64 с.
3. ГОСТ 11920-85. Трансформаторы трехфазные силовые масляные общего назначения мощностью от 25 до 630 кВ·А на напряжение до 35 кВ включительно. Технические условия. - 24 с.
4. ГОСТ 11677-85. Трансформаторы силовые. Общие технические условия. - 48 с.
5. Каганович, Е.А. Испытание трансформаторов мощностью до 6300 кВА и напряжением до 35 кВ Текст. / Е.А. Каганович, И.М. Райхлин. - М.: Энергия. - 1980.-312 с.
6. Алексеев Б. А. Контроль состояния (диагностика) крупных силовых трансформаторов. - М.: Изд-во НЦ ЭНАС, - 2002. - 216 с.
7. Алексеев Г.В. Испытание мощных трансформаторов и реакторов. / Г.В. Алексеев, А.К. Ашратов, Е.А.Веремей, Е.С.Фрид. - 2-е изд., перераб. - М.: Энергия. - 1978. - 520 с., ил.
8. Холоднокатаные электротехнические стали: Справочник. - М.: Металлургия. - 1989. - 168 с.
9. Молотилов Б.В. Холоднокатаные электротехнические стали: Справочник / Б.В. Молотилов, Л.В. Миронов, А.Г. Петренко и др. // Под ред. Б. В. Молотилова. - М.: Металлургия. - 1989. - 168 с.
10. Казаков Ю.Б., Коротков В.В., Чирков В.А. Изменение мощности потерь XX трансформаторов распределительных сетей 6-10 кВ в процессе эксплуатации // Методы и средства оценки состояния энергетического оборудования. Вып. 24. - СПб.: ПЭИПК. - 2004. - С.124-129.
11. Заугольников В.Ф. Некоторые аспекты экономичной работы силовых трансформаторов. / В.Ф. Заугольников, А.А. Балабин, А.А. Савинков // Промышленная энергетика. - 2006. - № 4. - С. 10 - 14.
12. Дружинин В.В. Магнитные свойства электротехнической стали. - М.: Энергия. - 1974.
13. Казаджан Л.Б. Магнитные свойства электротехнических сталей и сплавов / Под ред. В.Д. Дурнева. - М.: ООО "Наука и технологии". - 2000. - 224с., ил.
14. Степанов В.М. Технические решения по диагностике силовых трансформаторов. / В.М. Степанов, К.А. Андреев // Известия ТулГУ. Технические науки. Вып. 6: в 2 ч. - Тула: Изд-во ТулГУ. - 2011. - Ч. 1. С.74-81.
15. Балабин, А.А. Повышение достоверности расчета потерь электроэнергии в трансформаторах 10(6)/0,4 кВ [Текст] / А.А. Балабин, Ю.Д. Волчков // Механизация и электрификация сельского хозяйства. - 2009. - №4. - С. 22-23.
16. Волчков Ю.Д. Повышение достоверности оценки величины расхода электроэнергии на ее трансформацию в силовых трансформаторах / Ю.Д. Волчков, А.А. Балабин // Сборник материалов Международной выставки-интернет-конференции "Энергообеспечение и безопасность". - Орел: ОрелГАУ. - 2005. - С. 117-122.
17. Цищорин А.Н. О физических процессах изменения магнитных свойств электротехнической стали и росте потерь холостого хода силовых трансформаторов в процессе их эксплуатации. // Электротехника: науч.-техн. журн. - М.: ЗАО "Знак". - 2011. - № 3.

*Рекомендовано до друку проф. Разумним Ю.Т.*

УДК 621.316

*А.М Королев, канд. техн. наук, В.В. Срибный  
(Украина, Днепропетровск, Национальный горный университет)*

### **ЗАЩИТА РУДНИЧНЫХ ТЯГОВЫХ ПОДСТАНЦИЙ КВАЗИСТАБИЛИЗАЦИЕЙ НАГРУЗКИ**

По воздействию на наиболее слабое звено тяговой подстанции - полупроводниковый выпрямитель – тяговая нагрузка в шахтных условиях имеет свои особенности, которые должны быть учтены при проектировании и эксплуатации подстанций:

- 1) наличие длительных (30 – 60 мин) максимумов в период наиболее интенсивной работы рудничного транспорта (в наиболее загруженный час смены);
- 2) наличие резко выраженных кратковременных максимумов (длительностью до 10–15 с), возникаю-



После окончания переходного процесса, когда скорость достигнет установившегося значения, обратная связь перестает действовать, так как потребляемый электровозом ток при установившейся скорости определяется сопротивлением движению поезда.

Наиболее вероятным возмущающим воздействием принятой нами системы является пусковой ток электровоза  $Nn\Delta I_n$  (рис. 2, а). При этом следует учитывать уровень пусковых токов на параллельном соединении тяговых двигателей (рис. 2, б), поскольку при последовательном соединении соответствуют величине средних тяговых токов электровоза.

На основании сказанного, возмущающее воздействие системы можно представить как мгновенное скачкообразное воздействие тока  $+\Delta I_n$  в момент перехода электровоза на параллельное соединение двигателей (момент  $t_1$  на рис. 2, а).

Снижение пускового тока после выхода двигателей на естественную характеристику (интервал  $t_1 \dots \infty$ ) отражено в структурной схеме (рис. 1, а) задержанными (соответственно передаточной функции  $W_5$ ) на время пуска ( $t_n = t_2 - t_1$ ) воздействиями. Таких воздействий два:

- $\Delta I_n$  – мгновенный обратный скачок тока, поступающего на сумматор входа системы;
- +  $\delta U$  – соответствующий этому току мгновенный скачок напряжения, поступающего на пускаемый электровоз.

При анализе необходимо учитывать, что неизменность пускового тока в промежутке времени  $t_1 \dots t_2$  поддерживается машинистом в процессе пуска соответствующим изменением сопротивления в цепи якоря. В системе регулирования последнее условие может быть отражено изменением передаточной функции  $W_4$  пускаемого электровоза ( $Nn$  пускаемых электровозов) или указанным более простым способом.

Точное решение полученной системы ввиду нелинейности входящих в нее звеньев получить затруднительно, поэтому принята упрощенная линеаризованная передаточная функция тягового двигателя, не вносящая существенных погрешностей в узкую область регулирования:

$$W_{\ddot{A}} = \frac{\Delta I(p)}{\Delta U(p)} = \frac{K_{\ddot{A}} p}{\dot{\sigma}_Y \dot{\sigma}_I \delta^2 + \dot{\sigma}_Z p + 1} \quad (1)$$

Электрическая постоянная времени двигателя

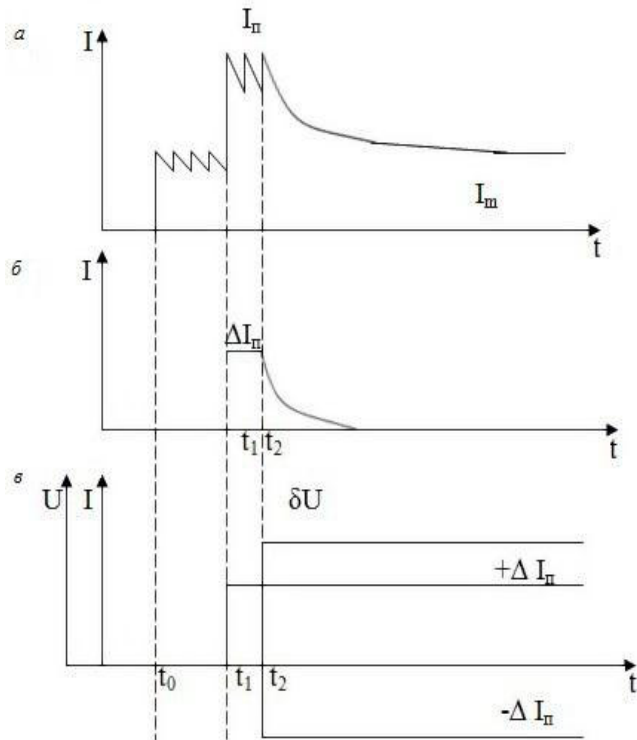
$$\dot{\sigma}_Y = \frac{L}{R} \quad , \quad (2)$$

где  $L, R$  – индуктивность и активное сопротивление двигателя.

Электромеханическая постоянная времени двигателя

$$\dot{\sigma}_I = m \frac{R n_0}{E_0 \alpha_0} \quad , \quad (3)$$

где  $m$  – масса поезда, которая приходится на один двигатель;  $E_0, n_0$  – среднее значение ЭДС и скорости тягового двигателя в области регулирования;  $\alpha$  – тангенс угла наклона тяговой характеристики двигателя в диапазоне регулирования ,



**Рис. 2. Характеристики действительного (а), расчетного (б) и приведенного к структурной схеме (в) возмущающих воздействия системы автоматического регулирования**

$$\alpha = \frac{\Delta F}{\Delta I} .$$

Коэффициент усиления двигателя в динамическом режиме

$$\hat{E}_{\dot{A}} = \frac{\dot{O}_I}{R} .$$

Постоянная времени тягового двигателя

$$\dot{O}_Z = \left(1 + \frac{Cn_0\beta_0}{R}\right) T_M = \left(1 + \frac{E_0\beta_0}{\dot{O}_0 R}\right) T_M , \quad (4)$$

где  $\Phi_0$  – среднее значение потока двигателя в диапазоне регулирования;  $\beta_0$  – тангенс угла наклона кривой намагничивания двигателя в диапазоне регулирования,

$$\beta_0 = \frac{\Delta \hat{O}}{\Delta^2} .$$

Для анализа работы системы приняты некоторые допущения, позволяющие использовать аналитические методы решения:

- 1) перевод двигателей на параллельное соединение при пуске электровоза производится без изменения тока тяговых двигателей. Ток электровоза при этом мгновенно удваивается (рис. 2, а);
- 2) дальнейший разгон электровоза вплоть до выхода на естественную характеристику при неизменном токе соответствует плавному выводу пускового реостата (рис. 2, б);
- 3) сопротивление движению поезда в диапазоне регулирования не зависит от скорости движения состава;
- 4) внешняя характеристика тяговой подстанции в диапазоне регулирования линейна, выпрямитель безынерционен.

Изменение тока тяговой подстанции в функции пускового скачка описывается передаточной функцией  $W_t$ .

Так, для интервала времени  $t_1 \dots t_2$  передаточная функция имеет следующий вид:

$$W_{t_1 \dots t_2} = \frac{\Delta I(p)}{\Delta I(\delta)} = \frac{1}{1 + W_2 W_3} \quad (5)$$

или

$$W_{t_1 \dots t_2} = \frac{\dot{O}_y \dot{O}_i \delta^2 + T_z p + 1}{T_y T_i \delta^2 + [\dot{O}_z + (N-1)K_2 K_y] p + 1} ,$$

где  $K_3$  – коэффициент усиления электровоза с двумя двигателями,

$$\hat{E}_y = 2\hat{E}_A ;$$

$N$  – количество электровозов, потребляющих ток.

Пренебрегая в первом приближении электрической постоянной времени электровоза (так как  $T_s \ll T_M$ ), для передаточной функции системы получим

$$W_{t_1 \div t_2} = \frac{T_z p + 1}{[\dot{O}_z + K_2 K_y (N-1)] p + 1} \quad (6)$$

корень уравнения

$$\delta = \frac{1}{\dot{O}_z + K_2 K_y (N-1)} .$$

Постоянная времени переходного процесса системы

$$\dot{O}_I = \dot{O}_z + K(N-1), \quad (7)$$

где  $K=K_2K_3$  – коэффициент усиления системы.

Зависимость (7) может быть использована при выборе параметров электровозной откатки. Обеспечив достаточно большой коэффициент усиления  $K_2$  (угол наклона внешней характеристики выпрямителя), можно получить результирующую постоянную  $T_n$ , намного превосходящую длительность пуска  $t_n$ , и добиться, чтобы приращение тока в тяговой сети за время пуска электровозов было незначительным.

Для интервала времени  $t_2 \dots \infty$  передаточная функция описывается выражением:

$$W_{t_2 \div \infty} = \frac{\dot{O}_y \dot{O}_i \delta^2 + T_z p + 1}{T_y T_i \delta^2 + [\dot{O}_z + (N-1)K_2 K_y] p + 1} \cdot \frac{[\dot{O}_y \dot{O}_i \delta^2 + (\dot{O}_z - T_i) p + 1] \exp(-p t_i) + \dot{O}_y \dot{O}_i \delta^2 + \dot{O}_z \delta + 1}{\dot{O}_y \dot{O}_i \delta^2 + (\dot{O}_z + KN) p + 1}. \quad (8)$$

Если пренебречь, так же как и в первом случае, электрической постоянной, ( $T_s \ll T_m$ ), то для корней и постоянных времени процесса, получим упрощенные зависимости:

$$\delta_1 = -\frac{1}{T_z + NK} \quad \delta_2 = -\frac{1}{T_z + (N-1)K}; \quad \dot{O}_1 = \dot{O}_z + NK \quad \dot{O}_2 = \dot{O}_z + (N-1)K. \quad (9)$$

Анализ выражений (8) и (9) показывает, что скорость электровозов после окончания переходного процесса восстановится практически с той же постоянной времени  $T_n$ , что и нарастание тока в тяговой сети при пуске электровозов.

Практическое значение установленной зависимости заключается в возможности создания по этому принципу защиты тяговых выпрямителей от кратковременных перегрузок. Сущность такой защиты сводится к формированию специальной внешней характеристики тяговой подстанции (рис.3), приводящей к ограничению кратковременных перегрузок выпрямителя за счет снижения потребления тока движущимися электровозами.

Снижение скорости движения электровозов, которое имеет место при срабатывании защиты, несущественно и не оказывает заметного влияния на производительность электровозной откатки, тем более, что скорости движения электровозов не достигает предельных значений.

Связь параметров системы регулирования с формой внешней характеристики выпрямителя можно выразить на основании рис.3 и выражений (8), (9):

$$\hat{E}_2 = \frac{dU}{dI} = tg\alpha, \quad tg\alpha = \frac{T_i - T_z}{(\dot{O} - 0,5)\hat{E}_y}. \quad (10)$$

Необходимо отметить, что нежесткая внешняя характеристика подстанции существенно улучшает распределение нагрузки параллельно работающим двигателям.

Наклон внешней характеристики выпрямителя можно изменением угла регулирования выпрямителя или параметров преобразовательного трансформатора.

**Вывод.** Формирование специальной внешней характеристики тяговых выпрямителей, приводящей к ограничению кратковременных перегрузок за счет снижения потребления тока движущимися электровозами, обеспечивается, как описывалось выше, уменьшением выпрямленного напряжения при возникновении перегрузки, большей тока установки  $I_y$ . Полное отключение произойдет при перегрузках, превышающих ток отсечки  $I_{омс}$ . Эта дает возможность уменьшить число отключений и повысить использование мощности тяговой подстанции (увеличить количество электровозов, питающихся от подстанции).

#### Список литературы

1. Електрифікація гірничих робіт: підручник / Г.Г. Півняк, М.М. Белий, Л.П. Ворохов та ін.; за ред. акад. НАН України Г.Г. Півняка. – 2-ге вид. переробл. і доп. – Д.: Національний гірничий університет, 2005. – 615 с.

2. Проектирование и конструирование транспортных машин и комплексов / под ред. И.Г. Штокмана. – М.: Недра, 1986. – 392с.
3. Гетопанов В.Н. Горные и транспортные машины и комплексы / В.Н. Гетопанов, Н.С. Гудилин, Л.И. Чугреев. – М.: Недра, 1991. – 304 с.
4. Подземный транспорт шахт и рудников: справочник / под ред. Г.Я. Пейсаховича, И.П. Ремизова. – М.: Недра, 1985. – 565 с.

*Рекомендовано до друку проф. Разумним Ю.Т.*

УДК 621.332.3:629.423

**П.Є. Михаліченко, Ю.І. Хмарський, канд-ти техн. наук**

*(Україна, Дніпропетровськ, Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна)*

## **МІКРОПРОЦЕСОРНА СИСТЕМА ЗАХИСТУ ВИЗНАЧЕННЯ ВИДУ КОРОТКОГО ЗАМИКАННЯ ЗА "ЗАЛИШКОВОЮ НАПРУГОЮ"**

### **Вступ**

На сьогодні у зв'язку з уведенням прискореного і швидкісного руху перед залізницями України гостро стоїть проблема захисту системи тягового електропостачання. Тому, у найближчий час пріоритетним напрямом роботи є комплексна модернізація тягових підстанцій (ТП) у питанні фідерної автоматики із застосуванням сучасних мікропроцесорних систем захисту, так як вони дозволяють достатньо швидко реагувати на виявлену небезпечну ситуацію в тяговій мережі (ТМ).

Одна з найчастіших аварійних ситуацій – виникнення короткого замикання (КЗ) у ТМ та локомотивах.

Нині існують пристрої для швидкісного реагування на виникнення КЗ, проте більшість з них мають низку недоліків, головним з яких є неможливість виявлення місця його появи. Для розпізнавання виду КЗ (в локомотиві або на лінії електропостачання) на сьогодні взагалі не існує.

Цього можна досягти, скориставшись наведеним у роботі [1] новим, так званим методом "залишкової напруги". Згідно з цим методом вид короткого замикання (в ТМ чи в електровозі) можна виявити, проаналізувавши залишкову напругу на затискачах тягової підстанції після закінчення перехідного процесу, яким супроводжується аварійне відключення фідерного автомата.

У даній статті автори поставили мету розробити пристрій, який буде очікувати сигнал про виникнення КЗ на лінії фідера. Після прийняття даного сигналу пристрій відраховує певний проміжок часу і вимірює залишкову напругу фідера. Після аналізу напруги на затискачах тягової підстанції на індикатори подаються сигнали про вид виявленого КЗ (в локомотиві або на лінії електропостачання).

### **Структурна схема системи**

Структурна схема даного пристрою розглянута на рис. 1, на якій позначено: G – кварцовий резонатор, використовується в схемі для генерації частотних синхроімпульсів; ЦПЕ – центральний процесорний елемент; ОЗП – оперативний запам'ятовуючий пристрій; Т/Сч – таймер-лічильник, використовується для відліку затримок; ІРПР – паралельний інтерфейс прийому й передачі даних; АЦП – аналого-цифровий перетворювач, використовується для перетворення рівня напруги в цифрову форму для обробки ЦПЕ; ГР – пристрій сполучення і гальванічної розв'язки, використовується в схемі для від'єднання АЦП від напруги фідера; ПВв/вив – пристрій виводу використовується для виведення інформації на індикатори, а також для подачі сигналу на швидкодіючий вимикач.

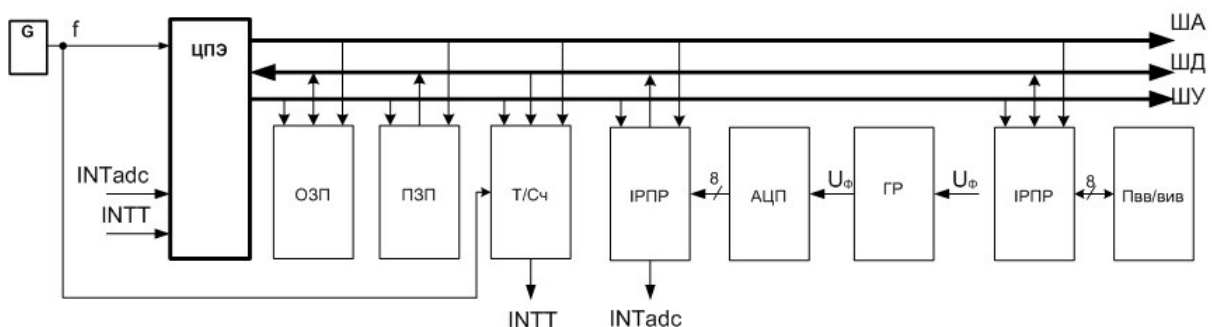


Рис. 1. Структурна схема розробленого пристрою