

**А.В. Кожевников, канд. техн. наук**

(Украина, Днепрпетровск, Национальный горный университет)

## АНАЛИЗ СОВМЕСТНОЙ РАБОТЫ НЕСКОЛЬКИХ ПОДСТАНЦИОННЫХ УСТРОЙСТВ СИСТЕМЫ ЧАСТОТНОЙ ЗАЩИТЫ

В настоящее время известны образцы систем частотной защиты от утечек в контактных сетях электрического транспорта с заземленным обратным проводом [1, 2], но информация о возможности совместной работы нескольких подстанционных устройств таких систем отсутствует. Вместе с тем, необходимость такой работы возникает при централизованной схеме электроснабжения контактной сети, когда последняя питается от одной тяговой подстанции по нескольким питающим и отсасывающим кабелям [3]. Кроме того, для систем электроснабжения горных предприятий характерны постоянные изменения конфигурации контактной сети, связанные с включением, выключением, добавлением или изъятием ее секций, что ставит дополнительные требования к независимости работы составляющих ее защиты. Применение известной численной математической модели подстанционных устройств [4] для анализа их совместной работы является затруднительным.

Целью настоящей статьи является определение условий, обеспечивающих возможность совместной работы нескольких подстанционных устройств системы частотной защиты, а также разработка математической модели, позволяющей производить анализ такой работы.

При построении модели рассматривается последовательная схема ввода и снятия оперативного сигнала [5], аналогичная той, которая была использована в аппаратуре защиты РКС [1, 2]. Ее принципиальная электрическая схема приведена на рис. 1.

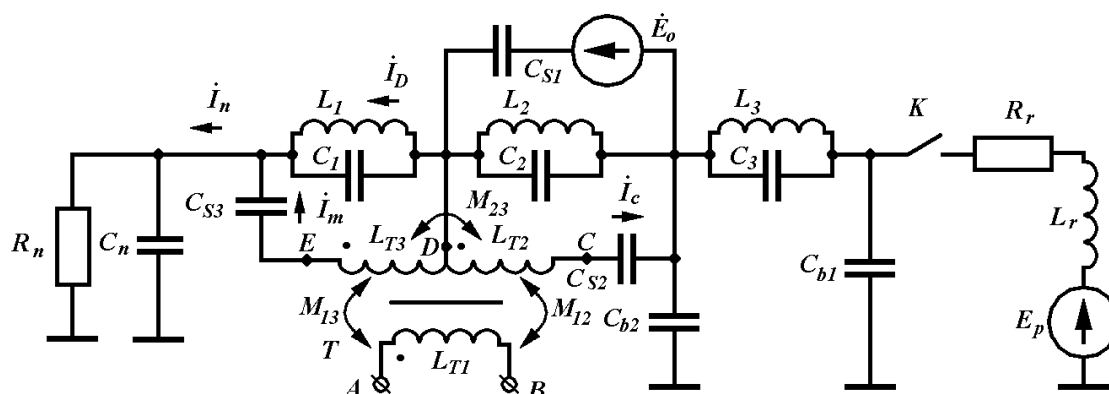


Рис. 1. Принципиальная электрическая схема подстанционного устройства

Силовая цепь представлена источником постоянного напряжения подстанционного устройства  $E_p$ , токоограничивающим реактором  $L_r R_r$ , приведенными к выходу устройства активным сопротивлением  $R_n$  и емкостью  $C_n$  контактной сети, а также параллельными резонансными контурами  $L_1 C_1$ ,  $L_2 C_2$  и

$L_3C_3$ . С помощью первых двух контуров осуществляется соответственно контроль и ввод в силовую цепь оперативного напряжения, а третий предотвращает попадание оперативного сигнала в источник силового напряжения. Ключ  $K$  служит для включения и выключения силового источника. Блокировочные емкости  $C_{b1}$  и  $C_{b2}$  шунтируют силовой источник по оперативному току, а разделительные  $C_{S1}$ ,  $C_{S2}$  и  $C_{S3}$  осуществляют развязку генератора оперативного напряжения  $E_o$  и цепей измерительного трансформатора  $T$  по постоянному току. Обмотка трансформатора  $L_{T2}$  предназначена для компенсации утечек оперативного тока контактной сети в режиме начальной настройки. На рис. 1 не показаны значения сопротивлений дросселей резонансных контуров, а так же обмоток трансформатора, для которых в дальнейшем использованы обозначения  $r_1$ ,  $r_2$ ,  $r_3$  и  $r_{T1}$ ,  $r_{T2}$ ,  $r_{T3}$  соответственно.

Для анализа схема, что на рис. 1, путем нескольких эквивалентных преобразований приводится к лестничному виду. На первом этапе применяется процедура преобразования индуктивно связанных цепей трансформатора, после чего его эквивалентная схема приобретает вид как на рис.2. Данная схема не учитывает потери в сердечнике трансформатора и явление его насыщения.

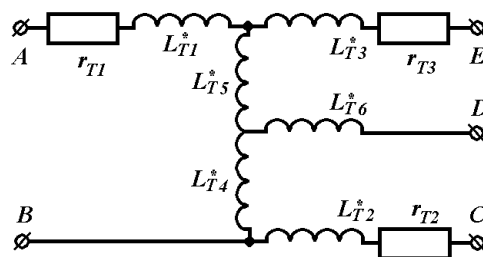


Рис. 2. Эквивалентная схема измерительного трансформатора

Здесь значения индуктивностей эквивалентной схемы составляют:

$$\begin{aligned}
 L_{T1}^* &= \frac{L_{T1}}{w_1} (w_1 - w_2 - w_3); & L_{T2}^* &= \frac{L_{T1}}{w_1^2} (w_2^2 + w_2 w_3 - w_2 w_1); \\
 L_{T3}^* &= \frac{L_{T1}}{w_1^2} (w_3^2 + w_2 w_3 - w_3 w_1); & L_{T4}^* &= \frac{w_2}{w_1} L_{T1}; \\
 L_{T5}^* &= \frac{w_3}{w_1} L_{T1}; & L_{T6}^* &= -\frac{w_2 w_3}{w_1^2} L_{T1},
 \end{aligned} \tag{1}$$

где  $w_1$ ,  $w_2$ ,  $w_3$  – число витков обмоток трансформатора. Приведенные соотношения получены в приближении, что коэффициенты индуктивной связи обмоток близки к единице. С учетом проведенного преобразования, в предположении, что выходная обмотка измерительного трансформатора работает на холостом ходу, эквивалентная схема подстанционного устройства может быть приведена к виду, показанному на рис. 3.

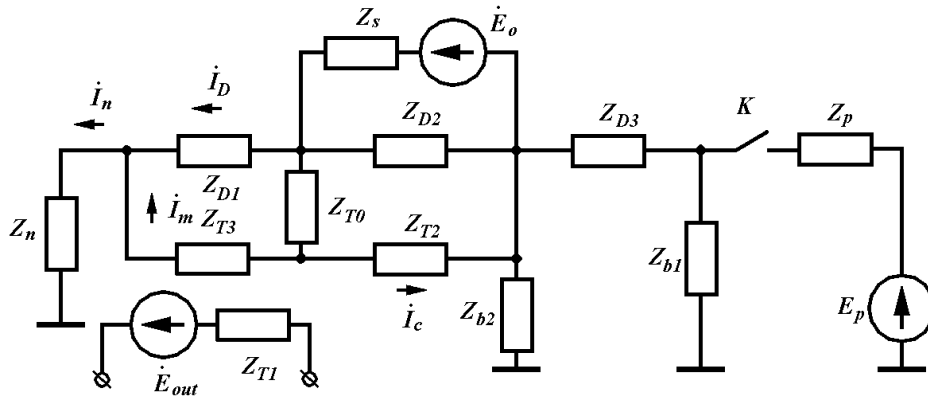


Рис. 3. Эквивалентная схема подстанционного устройства после преобразования индуктивно связанных цепей трансформатора

Здесь

$$\begin{aligned}
 Z_{Di} &= (r_i + j\omega L_i) \parallel \frac{1}{j\omega C_i}, \quad i=1, \dots, 3; \quad Z_{bi} = \frac{1}{j\omega C_{bi}}, \quad i=1, \dots, 2; \quad Z_s = \frac{1}{j\omega C_s}; \\
 Z_{T0} &= j\omega L_{T6}^*; \quad Z_{T1} = r_{T1} + j\omega L_{T1}^*; \quad Z_{T2} = r_{T2} + j\omega(L_{T2}^* + L_{T4}^* - \frac{1}{\omega^2 C_{S2}}); \\
 Z_{T3} &= r_{T3} + j\omega(L_{T3}^* + L_{T5}^* - \frac{1}{\omega^2 C_{S3}}); \quad Z_p = R_r + j\omega L_r; \quad Z_n = R_n + \frac{1}{j\omega C_n}.
 \end{aligned} \quad (2)$$

Индуктируемая в выходной обмотке трансформатора ЭДС, может быть представлена в виде зависимого источника напряжения, т.е.

$$\dot{E}_{out} = \alpha \dot{I}_n - \beta \dot{I}_c. \quad (3)$$

Покажем, что коэффициенты  $\alpha$  и  $\beta$  зависят только от параметров трансформатора  $T$ , дросселя и величины разделительной емкости  $C_{S3}$  в цепи измерительной обмотки трансформатора. Действительно, с одной стороны, с учетом выбранных положительных направлений токов и полярности выводов обмоток трансформатора (рис.1) следует, что величина индуцируемой ЭДС

$$\dot{E}_{out} = j\omega(M_{13} \dot{I}_m - M_{12} \dot{I}_c). \quad (4)$$

С другой стороны, согласно законам Кирхгофа

$$\dot{I}_n = \dot{I}_D + \dot{I}_m; \quad [r_{T3} + j\omega(L_{T3} - \frac{1}{\omega^2 C_{S3}})] \dot{I}_m - j\omega M_{23} \dot{I}_c = Z_{D1} \dot{I}_D. \quad (5)$$

Решая совместно уравнения (3) и (4), окончательно получим:

$$\dot{E}_{out} = j\omega \left\{ \frac{M_{13}}{Z_{D1} + r_{T3} + j\omega(L_{T3} - \frac{1}{\omega^2 C_{S3}})} [Z_{D1} \dot{I}_n + j\omega M_{23} \dot{I}_c] - M_{12} \dot{I}_c \right\} \quad (6)$$

Следующим этапом является преобразование треугольника  $Z_{D1}$ ,  $Z_{T0}$ ,  $Z_{T3}$  в звезду  $Z_1$ ,  $Z_2$ ,  $Z_3$ , после чего схема приобретает лестничный вид (рис. 4).

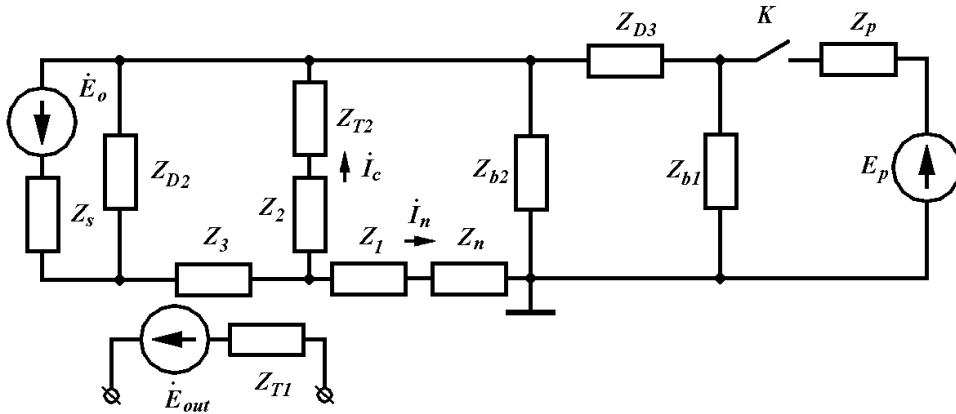


Рис. 4. Эквивалентная схема подстанционного устройства в лестничном виде

Здесь

$$Z_1 = Z_{D1}Z_{T3}/Z_{\Sigma}; \quad Z_2 = Z_{T0}Z_{T3}/Z_{\Sigma}; \quad Z_3 = Z_{D1}Z_{T0}/Z_{\Sigma}; \quad Z_{\Sigma} = Z_{D1} + Z_{T0} + Z_{T3} \quad (7)$$

Сперва проанализируем возможность работы нескольких подстанционных устройств от единой тяговой подстанции. При этом для обеспечения селективности системы защиты на каждый питающий фидер должно быть установлено собственное подстанционное устройство.

В нормальном режиме для осуществления компенсации начального тока утечки, ЭДС, индуцируемая в выходной обмотке трансформатора, должна равняться нулю, что согласно (3) равносильно условию

$$\alpha/\beta = \dot{I}_c/\dot{I}_n, \quad (8)$$

а из рис.4 следует, что деление токов осуществляется в пропорции

$$\dot{I}_c/\dot{I}_n = [Z_1 + Z_n + Z_{b2} \parallel (Z_{D3} + Z_{b1} \parallel Z_p)]/(Z_2 + Z_{T2}). \quad (9)$$

Поскольку, как показано выше, коэффициенты  $\alpha$  и  $\beta$  определяются только параметрами трансформатора, а также величинами  $Z_{D1}$  и  $C_{S3}$ , компенсацию начального тока утечки наиболее просто осуществлять варьированием отношения  $\dot{I}_c/\dot{I}_n$  за счет изменения величин сопротивления  $r_{T2}$  и емкости  $C_{S2}$ . Со стороны

тяговой подстанции подстанционное устройство может быть рассмотрено как эквивалентный генератор с внутренним сопротивлением

$$Z_{in}^p = Z_{b1} \parallel (Z_{D3} + Z_{b2} \parallel (Z_n + Z_1 + (Z_2 + Z_{T2}) \parallel (Z_3 + Z_{D2} \parallel Z_S))). \quad (10)$$

Условие компенсации начального тока утечки при подключении к тяговой подстанции  $N$  устройств не будет нарушено при выполнении равенства

$$\frac{Z_1 + Z_n + Z_{b2} \parallel (Z_{D3} + Z_{b1} \parallel Z_p)}{Z_1 + Z_n + Z_{b2} \parallel (Z_{D3} + Z_{b1} \parallel Z_p \parallel Z_{in}^p / N)} \approx 1, \quad (11)$$

которое, в свою очередь, с учетом того, что согласно (10) справедливо неравенство  $|Z_{in}^p| < |Z_{b1}|$ , обеспечивается при удовлетворении хотя бы одного из следующих условий:

$$|Z_1 + Z_n| \gg |Z_{b2} \parallel (Z_{D3} + Z_{b1} \parallel Z_p)|; \quad (12)$$

$$|Z_{D3} + Z_{b1} \parallel Z_p \parallel Z_{in}^p / N| \gg |Z_{b2}|; \quad |Z_{D3}| \gg |Z_{b1} \parallel Z_p|.$$

Блокирующие емкости  $C_{b1}$ ,  $C_{b2}$  подбираются таким образом, чтобы их сопротивления на частоте оперативного напряжения были малы. Следовательно, поскольку для реальных параметров изоляции контактных сетей и токоограничивающих реакторов на частотах оперативного напряжения обеспечиваются более жесткие неравенства чем (12), а именно:

$$|Z_n| \gg |Z_{b2}|; |Z_1| \gg |Z_{b2}|; |Z_{D3}| \gg |Z_{b1}|; |Z_{D3}| \gg |Z_{b2}|, \quad (13)$$

то все три соотношения системы (12) удовлетворяются и соответственно соблюдаются условия компенсации начального тока утечки при изменении количества подстанционных устройств защиты, работающих на единую тяговую подстанцию. Кроме того, соблюдение указанных неравенств предотвращает попадание в обмотки измерительного трансформатора оперативных сигналов других подстанционных устройств, для которых в рассматриваемой схеме начальные токи утечки скомпенсировать нельзя. В конечном счете, выполнение неравенств (12) обеспечивает независимость работы нескольких подстанционных устройств от единой подстанции.

Теперь рассмотрим возможность работы нескольких подстанционных устройств защиты на электрически связанную контактную сеть. Со стороны контактной сети подстанционное устройство может быть рассмотрено как эквивалентный генератор с внутренним сопротивлением

$$Z_{in}^n = Z_1 + (Z_2 + Z_{T2}) \parallel (Z_3 + Z_{D2} \parallel Z_S) + Z_{b2} \parallel (Z_{b1} + Z_{D3}). \quad (14)$$

Сохранение режима компенсации начального тока утечки при подключении к контактной сети подстанционных устройств аналогично соотношению (11) и выражается равенством

$$\frac{Z_1 + Z_n + Z_{b2} \parallel (Z_{D3} + Z_{b1} \parallel Z_p)}{Z_1 + Z_n \parallel Z_{in}^n / N + Z_{b2} \parallel (Z_{D3} + Z_{b1} \parallel Z_p)} \approx 1, \quad (15)$$

которое обеспечивается при выполнении хотя бы одного из условий

$$|Z_1 + Z_{b2} \parallel (Z_{D3} + Z_{b1} \parallel Z_p)| \gg |Z_n|; \quad |Z_{in}^n / N| \gg |Z_n|. \quad (16)$$

На частоте оперативного сигнала, при которой дроссели настроены в резонанс, их сопротивления являются чисто активными и имеют величины  $Z_{Di} = L_i / r_i C_i$ ,  $i = 1, \dots, 3$ , которые пропорциональны длинам обмоток и их массам. Из рис 3, 4 также следует, что значение  $|Z_{in}|$  оценивается величиной  $|Z_{D1} + Z_{D2}|$ , а  $|Z_1|$  – величиной  $|Z_{D1}|$ . Считая дроссели подстанционного устройства одинаковыми, что предпочтительно с технологической точки зрения, обозначим их полные сопротивления на частоте оперативного напряжения через  $Z_D$ . Тогда, с учетом того, что  $|Z_1| \gg |Z_{b2}|$ , неравенства (16) сводятся к одному условию:  $|Z_D| \gg |Z_n|$ . Анализ показывает, что для реальных параметров изоляции контактных сетей и возможных массогабаритов дросселей выполнение последнего неравенства невозможно и, следовательно, изменение числа подстанционных устройств, работающих на электрически связанную контактную сеть, в любом случае нарушает режим компенсации начального тока утечки. Кроме того, такой режим работы подстанционных устройств требует синхронизации всех генераторов оперативного напряжения и не обеспечивает селективность системы защиты. Следовательно, при применении рассматриваемого варианта системы защиты, целесообразно разбиение тяговой сети на электрически изолированные участки, обслуживаемые отдельными подстанционными устройствами.

Таким образом, в настоящей статье описана аналитическая модель подстанционного устройства системы частотной защиты, которая основана на представлении эквивалентной схемы устройства в виде лестничной цепи. Доказано, что для рассматриваемой схемы подстанционного устройства выходной сигнал измерительного трансформатора представим в виде линейной функции токов утечки контактной сети и компенсирующей обмотки трансформатора. Найдено выражение, определяющее связь параметров устройства в режиме компенсации начального тока утечки. Обоснована возможность работы нескольких подстанционных устройств системы защиты от единой тяговой подстанции и получены соотношения, обеспечивающие развязку устройств по оперативным сигналам. Показана целесообразность сегментирования тяговой сети на электрически изолированные участки, обслуживаемые отдельными подстанционными устройствами.

## Список литературы

1. Бунько В.А., Волотковский С.А., Пивняк Г.Г. Повышение безопасности рудничной электровозной откатки – М.: Недра, 1978. – 200 с.
2. Колосюк В.П. Защитное отключение рудничных электроустановок. – М.: Недра, 1980. – 334 с.
3. Волотковский С.А. Рудничная электровозная тяга. – М.: Недра, 1981. – 389 с.
4. Кожевников А.В. Математическая модель подстанционного устройства частотной защиты // Зб. наук. праць НГУ. – 2006. – № 26, т. 1. – С. 173 – 178.
5. Кожевников А.В. Сравнительный анализ схем ввода и снятия оперативного сигнала в подстанционных устройствах систем частотной защиты // Гірнична електромеханіка та автоматика: Наук.-техн. зб. – 2006. – Вип. 76. – С. 29 – 32.