

А.В. Кожевников, канд. техн. наук

(Украина, Днепрпетровск, Национальный горный университет)

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОБЪЕКТА РЕГУЛИРОВАНИЯ КОМПЕНСАЦИОННОГО ЗАГРАДИТЕЛЯ СИСТЕМЫ ЧАСТОТНОЙ ЗАЩИТЫ ДЛЯ УСТАНОВИВШЕГОСЯ РЕЖИМА

Системы частотной защиты от малых токов замыкания на землю на основе компенсационных заградителей являются эффективным средством предотвращения поражения электрическим током в контактных сетях электровозного транспорта [1]. Настоящая работа посвящена вопросам построения математической модели объекта регулирования электровозного заградителя, работающего в установившемся режиме. Принципиальная электрическая схема такого заградителя приведена на рис. 1.

Силовая цепь представлена источником постоянного силового напряжения подстанционного устройства E_p , контактной сетью $KС$, и потребителем - тяговым двигателем электровоза M . Токи утечки контролируются устройством отключения $УО$, которое при необходимости разрывает силовую цепь с помощью быстродействующего выключателя S . Токи утечки в линии контролируются по переменной (оперативной) гармонической составляющей, которая вырабатывается источником E_o подстанционного устройства. Для ввода оперативного напряжения в силовую цепь и снятия сигнала оперативной составляющей тока утечки из силовой цепи используются параллельные LC контуры ($L5C11$ и $L4C10$), настроенные в резонанс на частоте оперативного напряжения. Последовательные резонансные контуры $L3C9$ и $L6C12$ шунтируют соответственно двигатель и источник силового напряжения по оперативной составляющей. Для исключения токов утечки по оперативной составляющей через цепь электровоза используется компенсационный заградитель, вырабатывающий запирающее напряжение, находящееся в фазе с оперативным и равное ему по амплитуде. В работе рассмотрена разомкнутая схема заградителя, в которой сигнал возбуждения с регулятора подается на последовательно включенные усилитель с управляемым коэффициентом усиления $A1$, предусилитель на операционном усилителе $A2$, двухтактный трансформаторный усилитель мощности, собранный по схеме $T1, VT1, VT2, T2$, и посредством контура $L1C5$ вводится в силовую цепь электровоза. При наличии рассогласования между оперативным и заграждающим напряжениями в силовой цепи электровоза возникает ток оперативной частоты, который создает падение напряжения на контуре $L2C6$, являющееся сигналом обратной связи. Далее этот сигнал подается на вход регулятора через согласующий трансформатор $T3$, автотрансформатор $T4$ и операционный усилитель $A3$.

В настоящее время существует ряд специализированных программных сред для визуального моделирования и анализа электрических цепей: Electronics Workbench, Micro-Cap, MATLAB Simulink Toolbox. Однако математи-

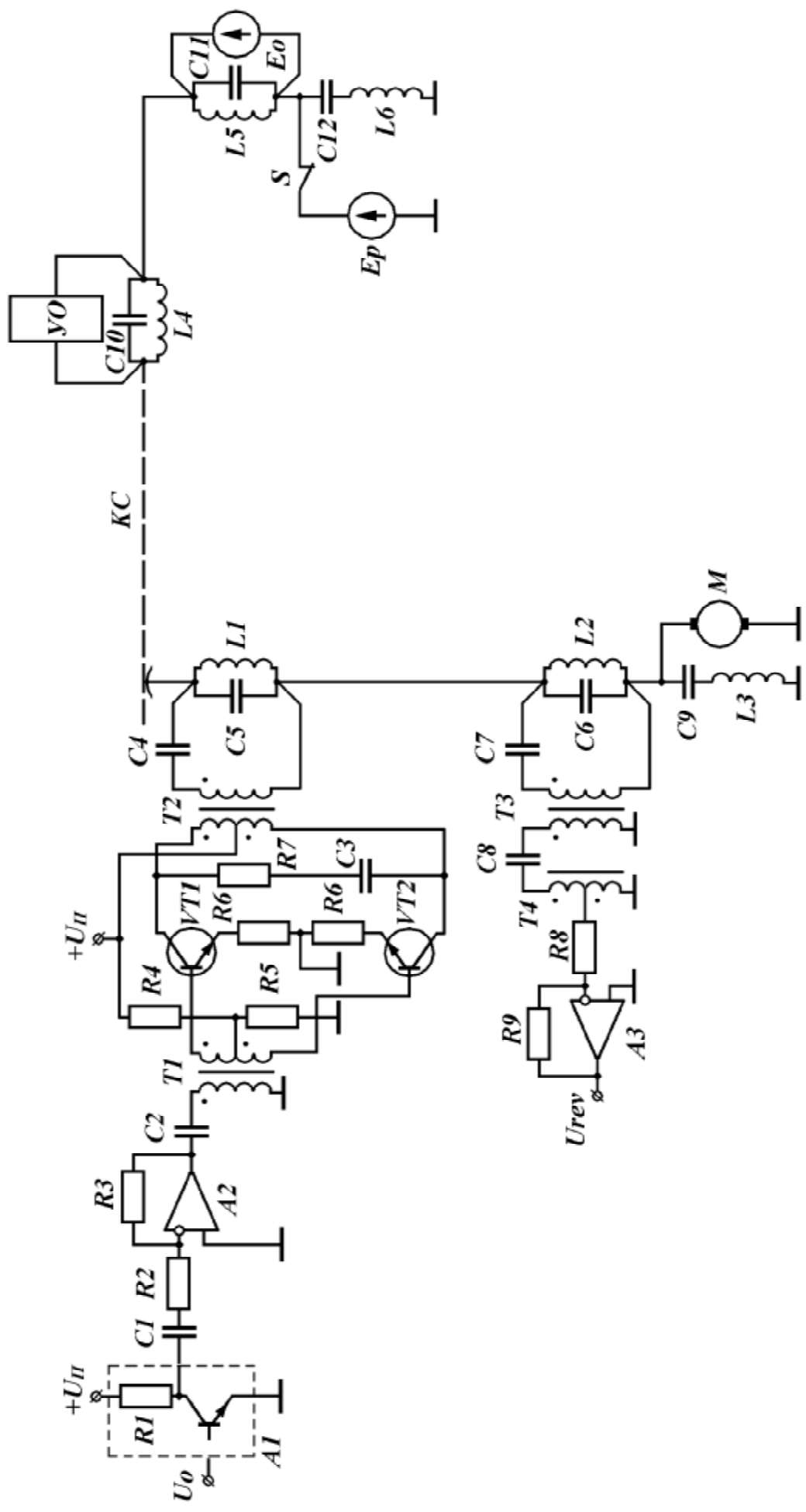


Рис. 1. Принципиальная электрическая схема объекта регулирования компенсационного заградителя частотной защиты

ческие модели электрических цепей, построенные с использованием указанных сред, позволяют получать скорее качественно-демонстрационные результаты, чем количественно-расчетные. Поэтому было решено построить оригинальную математическую модель рассматриваемой цепи на основе сведения ее к лестничной (цепной) схеме с последующим упрощением методом эквивалентного генератора и анализом методом узловых напряжений в режиме малого сигнала по оперативной составляющей частотой 2 – 10 кГц. Предварительно цепи окончного усилителя и обратной связи компенсационного заградителя были сведены к лестничным (цепным) эквивалентным схемам (рис.2).

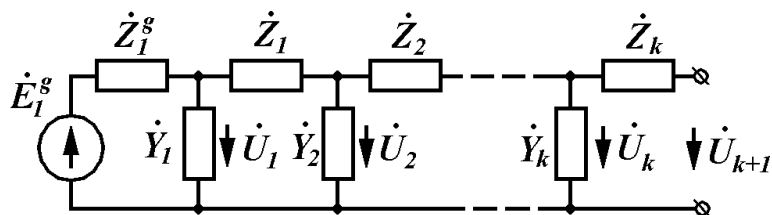


Рис. 2. Лестничная (цепная) эквивалентная схема цепи

Здесь E_1^g , Z_1^g – ЭДС и внутреннее сопротивление эквивалентного генератора, подключенного к входу цепи, $\{Z_i^g\}_{i=1,\dots,k}$, $\{Y_i^g\}_{i=1,\dots,k}$ – сопротивления последовательных и проводимости параллельных ветвей цепи, $\{U_j^g\}_{j=1,\dots,k+1}$ – узловые напряжения цепи.

Для анализа лестничных схем применялся метод эквивалентного генератора (прямая прогонка), который проиллюстрирована на рис. 3.

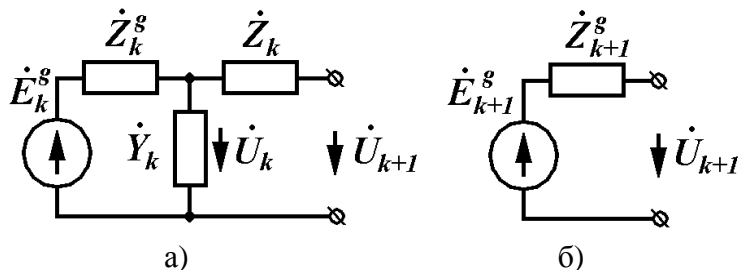


Рис. 3. Лестничная схема цепи до (а) и после (б) упрощения

Параметры эквивалентного генератора после упрощения можно записать через параметры исходной схемы

$$E_{k+1}^g = \frac{E_k^g}{1 + Z_k^g Y_k^g};$$

$$Z_{k+1}^g = Z_k^g + \frac{Z_k^g}{1 + Z_k^g Y_k^g}.$$
(1)

После определения напряжения на выходе схемы U_{k+1}^g ее узловые напряжения вычислялись в ходе обратной прогонки как

$$U_k^g = \left(1 - \frac{Z_k^g}{Z_{k+1}^g} \right) U_{k+1}^g + \frac{Z_k^g}{Z_{k+1}^g} E_{k+1}^g. \quad (2)$$

Напряжения на выходе оконечного усилителя компенсационного заградителя U_n^g и на входе цепи обратной связи U_m^{rev} , необходимые для расчета узловых напряжений данных каскадов, определялись из анализа внешней цепи, эквивалентная схема которой изображена на рис. 4.

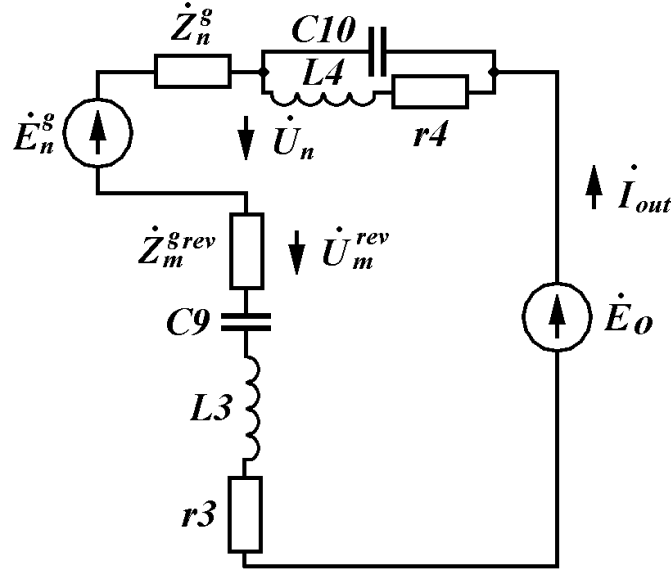


Рис. 4. Эквивалентная схема внешней цепи компенсационного заградителя

Для данной цепи справедливы следующие соотношения:

$$I_{out}^g = \frac{E_o^g - E_n^g}{Z_n^g + Z_m^{g, rev} + r_3 + j \left(\omega L_3 - \frac{1}{\omega C_9} \right) + \left[\left(\frac{1}{j\omega C_{10}} \right) \parallel (r_4 + j\omega L_4) \right]};$$

$$U_n^g = E_n^g + Z_n^g I_{out}^g;$$

$$U_m^{rev} = Z_m^{rev} I_{out}^g.$$
(3)

Здесь I_{out}^g – обозначен ток во внешней цепи, r_3 , r_4 – активные сопротивления обмоток катушек L_3 , L_4 . Величины параметров эквивалентных генераторов оконечного усилителя E_n^g и Z_n^g , и цепи обратной связи $Z_m^{g, rev}$ определялись путем прямой прогонки с использованием соотношений (1). При записи данных уравнений предполагалось, что влияние распределенных параметров контактной сети пренебрежительно мало, т.е. заградитель находится в непосредственной близости от подстанционного устройства.

Предложенный подход позволил построить математическую модель, с помощью которой в установившемся режиме можно рассчитывать узловые напряжения эквивалентных схем каскадов компенсационного заградителя, и в ко-

нечном счете связать комплексную амплитуду напряжения на выходе регулятора \underline{U}_o с величиной напряжения на выходе цепи обратной связи \underline{U}_{rev} .

Разработанная на основании построенной модели ее программная реализация в среде MATLAB дает возможность рассчитывать и строить АЧХ, ФЧХ и АФХ объекта регулирования. На рис. 5 представлен рассчитанный годограф АФХ объекта регулирования, нормированный на максимум модуля АФХ. На годографе отмечены точки, соответствующие частотам $(f_1 - f_5) = (4,8 - 5,2)$ кГц. Частота $f_3 = 5$ кГц – резонансная для контуров заградителя.

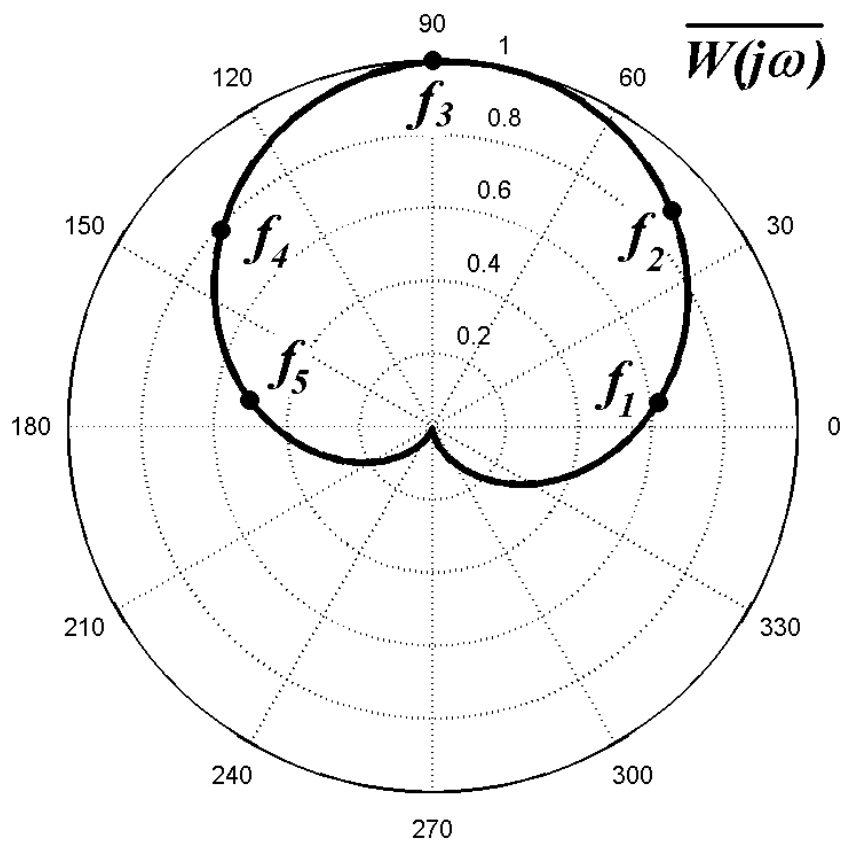


Рис. 5 Годограф АФХ объекта регулирования, нормированный на максимум модуля АФХ

Таким образом, предложенная модель является основой для анализа переходных процессов, возникающих при коммутациях компенсационного заградителя, а также синтеза его системы автоматического регулирования.

Список литературы

1. Бунько В.А., Волотковский С.А., Пивняк Г.Г. Повышение безопасности рудничной электровозной откатки – М.: “Недра”, 1978 – 200 с.