

*А.А.ПЕТКОВ*, канд.техн.наук, НТУ «ХПИ»

## **ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДОВ СИНТЕЗА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ИМПУЛЬСНЫХ ИСПЫТАТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ**

У роботі проаналізована можливість використання методів синтезу електричних кіл при проектуванні високовольтних імпульсних випробувальних пристроїв. Указані обмеження їхнього застосування та обґрунтовані напрямки подальших розробок.

In this article, a possibility of using synthesis methods of electric circuits for designing of high-voltage pulsed test sets up has been analyzed. Limitations of their applicability are specified and directions of the further development are indicated.

**Постановка проблеми.** Процесс проектирования высоковольтных импульсных испытательных устройств (ВИИУ) включает в себя как составную часть определение параметров элементов их разрядной цепи (РЦ). Данная задача возникает также при модернизации ВИИУ и изменении режима его работы: переход к генерированию импульсных воздействий с новыми параметрами и/или новым видом нагрузки. В настоящее время задача выбора параметров РЦ имеет ограниченные решения только для определенных типов ВИИУ, а для формирования общих подходов к ее решению требуется привлечение известных методов из смежных областей, в частности, методов синтеза электрических цепей.

**Анализ публикаций.** Как известно, в классической постановке, задача синтеза электрических цепей состоит в определении схемы и параметров всех ее элементов по заданному входному воздействию и требуемой выходной (входной) реакции [1, 2]. Применительно к двухполюснику задачей синтеза является построение его схемы по входному сопротивлению (входной проводимости). Синтез двухполюсников проводят по частотным или временным характеристикам цепи.

В настоящее время отсутствует общий метод синтеза электрических цепей. Существуют различные частные методы синтеза, которые должны быть адаптированы к решению конкретной задачи. Это связано с тем, что их применение всегда имеет особенности, связанные с определенными ограничениями на структуру синтезируемой схемы, тип и величину ее элементов.

Для синтеза двухполюсников наибольшее распространение получили следующие методы:

- 1) последовательное выделение из функции, описывающей операторное

сопротивление –  $Z(p)$  (или операторную проводимость –  $Y(p)$ ), простейших составляющих (метод Фостера);

2) представление операторного сопротивления (проводимости) непрерывной дробью (метод Кауэра).

Разработаны также более общие методы, которые в определенной степени снимают ряд ограничений, но отличаются определенной сложностью использования: методы Бруне, Ботта и Даффина, Дармингтона, Мията и другие.

Указанные методы в общем случае непосредственно не применимы для синтеза разрядных цепей ВИИУ в силу их специфики и отмеченных выше ограничений, что предопределяет необходимость адаптации известных методов и разработки специальных методов синтеза РЦ ВИИУ.

**Целью** настоящей работы является выявление особенностей и определение направлений разработки методов синтеза РЦ ВИИУ.

**Материалы и результаты исследований.** Рассмотрим основные структурные схемы РЦ ВИИУ, показанные на рис. 1. Вопросы практической реализации этих схем обсуждаются во многих работах, например в [3, 4].

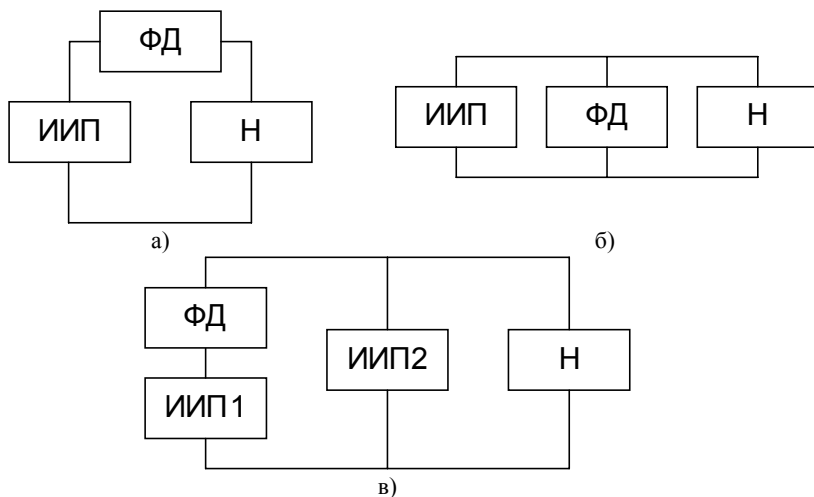


Рисунок 1 – Основные структурные схемы РЦ ВИИУ:  
ИИП, ИИП1, ИИП2 – импульсные источники питания; Н – нагрузка;  
ФД – формирующий двухполюсник

В приведенных схемах формирующий двухполюсник (ФД) используется для корректировки переходного процесса при разряде импульсных источников питания (ИИП) на нагрузку. Цель корректировки – при заданной

структуре ВИИУ сформировать в нагрузке с сопротивлением  $Z_H$  импульс тока (ИТ)  $i_H(t)$  или импульс напряжения  $u_H(t) = i_H(t) \cdot Z_H$ .

Таким образом, задача синтеза РЦ ВИИУ сводится к задаче синтеза ФД. Исходными данными задачи синтеза являются: структура РЦ ВИИУ, структура и параметры ИИП, структура и параметры нагрузки, и параметры ИТ в нагрузке.

В классической постановке синтез двухполюсника (по частотным характеристикам) осуществляется при задании его операторного сопротивления в виде [2]

$$Z(p) = \frac{u(p)}{i(p)}, \quad (1)$$

где  $u(p)$ ,  $i(p)$  – соответственно известные операторные изображения напряжения на выводах двухполюсника и тока, протекающего через двухполюсник.

В общем случае, как следует из постановки задачи синтеза РЦ ВИИУ, а также рис. 1, для ФД непосредственно не могут быть заданы ток через ФД и напряжение на его выводах или, по крайней мере, обе эти величины. Это обстоятельство определяет первую особенность применения синтеза электрических цепей для синтеза РЦ ВИИУ – невозможность непосредственного задания операторного сопротивления ФД, что требует разработки методов для его определения. Рассмотрим один из вариантов определения операторного сопротивления ФД, базирующийся на том, что в большинстве схем ВИИУ цепи ИИП подсоединяются параллельно испытываемой нагрузке. Пусть для схемы, представленной на рис. 1, в, ИИП в режиме разряда представляют собой последовательное соединение источников э.д.с. и проводимостей. Тогда операторная схема РЦ ВИИУ имеет вид, изображенный на рис. 2.

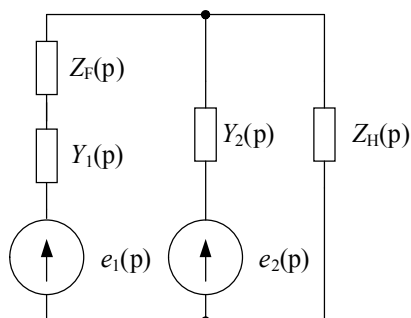


Рисунок 2 – Операторная схема РЦ ВИИУ:

$e_1(p)$ ,  $Y_1(p)$  – операторные изображения э.д.с. и проводимости ИИП1;

$e_2(p)$ ,  $Y_2(p)$  – операторные изображения э.д.с. и проводимости ИИП2;

$Z_F(p)$  – операторное изображение сопротивления ФД;

$Z_H(p)$  – операторное изображение сопротивления нагрузки

Данное представление достаточно универсально, так как аналогичный вид будет иметь схема РЦ ВИИУ с любым количеством параллельно соединенных ИИП и ФД, включенным в цепь разряда одного из них. Тогда используя теорему Миллмана [5], можно показать, что напряжение на нагрузке имеет вид

$$u_H(p) = i_H(p) Z_H(p) = \frac{e_1(p) \frac{1}{\frac{1}{Y_1(p)} + Z_F(p)} + e_2(p) Y_2(p)}{\frac{1}{\frac{1}{Y_1(p)} + Z_F(p)} + Y_2(p) + \frac{1}{Z_H(p)}}. \quad (2)$$

Решив (2) относительно  $Z_F(p)$  имеем

$$Z_F(p) = \frac{\frac{e_1(p)}{u_H(p)} - 1}{\frac{1}{Z_H(p)} - \left( \frac{e_2(p)}{u_H(p)} - 1 \right) Y_2(p)} - \frac{1}{Y_1(p)}. \quad (3)$$

Как известно [2], операторное сопротивление двухполюсника может быть представлено отношением полиномов

$$Z(p) = \frac{a_n p^n + a_{n-1} p^{n-1} + \dots + a_1 p + a_0}{b_m p^m + b_{m-1} p^{m-1} + \dots + b_1 p + b_0}. \quad (4)$$

Для физически реализуемого двухполюсника все коэффициенты его операторного сопротивления должны быть не отрицательны [2] (это означает, что величины элементов двухполюсника положительны). Из этого условия следует, что выражение операторного изображения сопротивления двухполюсника ни при каких значениях  $p$  не должно принимать отрицательные значения.

Проведем анализ положительности выражения для операторного сопротивления ФД (3). Положим  $e_2(p) = 0$   $Y_2(p) = 0$  (вариант схемы РЦ ВИИУ, представленный на рис. 1, а), тогда имеем

$$Z_F(p) = \left( \frac{e_1(p)}{u_H(p)} - 1 \right) Z_H(p) - \frac{1}{Y_1(p)}. \quad (5)$$

Из выражения (5) видно, что положительность  $Z_F(p)$  всегда может быть достигнута увеличением  $e_1(p)$ .

Положим  $e_1(p) = 0$   $Y_1(p) = \infty$  (вариант схемы РЦ ВИИУ, представленный на рис. 1, б), тогда имеем

$$Z_F(p) = \frac{1}{\left( \frac{e_2(p)}{u_H(p)} - 1 \right) Y_2(p) - \frac{1}{Z_H(p)}}. \quad (6)$$

Очевидно, что положительность  $Z_F(p)$  всегда может быть достигнута увеличением  $e_2(p)$ .

В общем случае, анализ (3) показывает, что положительность  $Z_F(p)$  может быть достигнута:

- увеличением  $e_1(p)$  при условии  $e_1(p) > u_H(p)$  и  $e_2(p) > u_H(p)$ ;
- увеличением  $e_2(p)$  при условии  $e_1(p) < u_H(p)$  и

$$e_2(p) > u_H(p) \left( 1 + \frac{1}{Z_H(p)Y_2(p)} \right).$$

При других соотношениях между  $e_1(p)$ ,  $e_2(p)$  и  $u_H(p)$  положительность  $Z_F(p)$  имеет место только при определенных соотношениях всех параметров РЦ ВИИУ.

Таким образом, второй особенностью использования методов синтеза электрических цепей для синтеза РЦ ВИИУ является то, что в общем случае имеется зависимость факта физической реализуемости ФД от структуры и значений параметров всех элементов РЦ ВИИУ, что требует разработки специальных решений задачи синтеза РЦ ВИИУ.

Формируемый ИТ в нагрузке, который является исходным данным при проектировании ВИИУ, может быть задан двумя основными способами [6, 7]:

аналитическим, при котором ИТ в нагрузке представляется в виде

$$i_H(t) = \sum_{j=1}^n a_j e^{-\beta_j t} \sin(\omega_j t - \varphi_j), \quad (7)$$

где  $\beta_j > 0$ ,  $\omega_j \geq 0$ ,  $i(0) = 0$ ,  $i(\infty) = 0$

и способом контролируемых параметров, при котором ИТ задается набором значений тока в определенных моменты времени и временными параметрами, например, для апериодического ИТ  $\{i_{max}, T_{\Phi}, T_{\Pi}\}$  – максимальным значением тока в импульсе, длительностью фронта и длительностью импульса. Выражение (7) допускает операторное преобразование, что позволяет непосредственно находить  $u_H(p)$  и по (3)  $Z_F(p)$ . При задании ИТ контролируемыми параметрами непосредственное определение сопротивления  $Z_F(p)$  невозможно, что принципиально не позволяет использовать в этом случае классические методы синтеза электрических цепей. Данный вариант задания ИТ требует разработки специальных методов синтеза РЦ ВИИУ.

При проектировании ВИИУ к элементам РЦ (в том числе и к элементам ФД) предъявляются требования технической реализуемости, которые являются усилением требований физической реализуемости. Условия технической реализуемости элементов ФД [6] – это граничные значения параметров элементов ФД, которые могут быть технически реализованы при используемом уровне технологии изготовления элементов и заданных экономических требованиях на их изготовление. В общем случае условия технической ре-

лизуемости имеют вид

$$R \geq R^*; \quad L \geq L^*; \quad C^{**} \geq C \geq C^*; \quad Y^* \geq Y > 0, \quad (8)$$

где  $R^*$ ,  $L^*$ ,  $C^{**}$ ,  $C^*$ ,  $Y^*$  – соответственно граничные значения величины активного сопротивления, индуктивности, емкости и проводимости.

Из приведенного выше следует, что требования технической реализуемости элементов ФД не могут быть учтены в рамках теории классического синтеза электрических цепей [2].

### **Выводы.**

1. В работе исследованы причины ограничивающие возможность непосредственного использования методов синтеза электрических цепей при проектировании ВИИУ.
2. По результатам проведенного анализа определены области соотношения величин элементов операторной схемы РЦ, в которых целесообразно производить адаптацию известных методов, путем разработки частных решений синтеза ВИИУ.
3. Показана необходимость разработки специальных методов синтеза РЦ ВИИУ при задании импульса тока методом контролируемых параметров.

**Список литературы:** 1. *Татур Т.А.* Основы теории электрических цепей (справочное пособие): Учебное пособие. – М. Высшая школа, 1980. – 271 с. 2. *Бессонов Л.А.* Теоретические основы электротехники: Учебник для студентов энергетических и электротехнических вузов. – М.: Высшая школа, 1973. – 752 с. 3. *Михайлов А.К., Фоминич Э.Н., Хромов В.В.* Методы и средства испытаний электрооборудования на стойкость к электромагнитным импульсам естественного и искусственного происхождения // Международный симпозиум по электромагнитной совместимости. ЭМС-93 (21-26 июня 1993 г.). Сборник научных докладов. – Ч. 3. – Санкт-Петербург: ЭЛТУ. – 1993. – С. 630-633. 4. *Баранов М.И., Игнатенко Н.Н.* Повышение энергетической эффективности разрядных цепей генераторов больших импульсных токов с мощными емкостными накопителями энергии // Вестник НТУ «ХПИ». Сборник научных трудов. Тематический выпуск: Техника и электрофизика высоких напряжений. – Харьков: НТУ «ХПИ». – № 49. – 2005. – С. 3-14. 5. *Конторович М.И.* Операционное исчисление и процессы в электрических цепях. – М.: Советское радио, 1975. – 320 с. 6. *Петков А.А.* Формирование испытательного импульса тока в активно-индуктивной нагрузке // Электротехника. – 2006. – № 4. – С. 34-37. 7. *Петков А.А.* Расчет параметров разрядной цепи высоковольтных импульсных испытательных устройств, формирующих импульсы аperiodической формы // Электротехника та електроенергетика. – 2005. – № 1. – С. 65-69.

*Поступила в редакцию 26.06.2007.*