

$$N_{\Sigma_{1,2}} = \sum_{k=1}^N \{1, \text{ если } \{ \text{или} [\delta U_{n_{k1}} = 0 \text{ и } \delta U_{n_{k2}} = 0] \text{ или} \\ [0 < \delta U_{n_{k1}} < P_{om} \text{ и } 0 < \delta U_{n_{k2}} < P_{om}] \text{ или} \\ [u (\delta U_{n_{k1}} < P_{om}) \text{ и } (\delta U_{n_{k2}} > P_{om} \text{ и } \frac{U_{\partial_i u_2} - U_{ocm_{ik} u_1}}{U_{\partial_i u_2}} \leq P_{om})] \text{ или} \\ [u (\delta U_{n_{k2}} < P_{om}) \text{ и } (\delta U_{n_{k1}} > P_{om} \text{ и } \frac{U_{\partial_i u_1} - U_{ocm_{ik} u_2}}{U_{\partial_i u_1}} \leq P_{om})] \} \}. \quad (11)$$

По значениям показателей, определенных по (2)...(11), можно судить о степени влияния сетей энергосистемы и проводимых мероприятий на ПЧЭ предприятий с непрерывным технологическим процессом. Причем, чем больше значение этих показателей, тем выше может быть обеспечена электромагнитная совместимость ПЧЭ с питающими сетями.

Для выбора мероприятий, способных уменьшить случаи отключения ПЧЭ, необходимо выполнить расчеты по пунктам 2–4 для исходной и измененных схем электрической сети, сравнить полученные результаты исходя из критерия увеличения значения показателей по (2)...(11) для рассматриваемого предприятия при условии неизменности или увеличения значения этих показателей для других предприятий с ПЧЭ, получающих питание от этой энергосистемы. Однако окончательный выбор оптимальных мероприятий должен проводиться далее на основе расчетов режимов работы электрической сети, отстройки средств релейной защиты и технико-экономических сравнений вариантов.

#### *Литература*

1. Куценко Г.Ф. Методика определения расчетного количества внезапных отключений сельскохозяйственного потребителя по цепи “источник–потребитель” // Энергетика. –1994. –№3–4. –С.21–25
2. Свешников В.И. Надежность электроэнергетических систем в кратковременных аварийных режимах и методы ее исследования // Энергетика. –1994. –№11–12. –С.8–10
3. Свешников В.И. Расчет надежности потребителей по критерию “напряжение–продолжительность” / Надежность систем энергетики: Меж. вуз. сб. –Новочеркасск: НПИ, 1990. –С.23–33

## СПЕКТРАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ УСИЛИТЕЛЯ ПЕРИОДИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ

**С. Н. Кухаренко, И. В. Осипенко**

*Гомельский государственный технический университет  
им. П. О. Сухого, Республика Беларусь*

Реальный усилитель электрических сигналов всегда преобразует входной сигнал в разной степени с искажениями. Искажения могут иметь как линейный, так и нелинейный характер. Для изменения качества выходного сигнала используются обратные связи и различного вида коррекции последовательного типа [1].

В общем случае усилитель, как четырехполюсник, осуществляет преобразование входного сигнала, представляемое в операторном виде во временной области выражением:

$$U_{\text{вых}}(t) = L(U_{\text{вх}}(t)) \quad (1)$$

или в частотной области выражением:

$$U_{\text{вых}}(p) = F(p, U_{\text{вх}}(p)) . \quad (2)$$

Второй подход подробно рассмотрен в [2] и основан на использовании аппарата функциональных рядов Вольтерра и методов теории чувствительности.

При первом подходе усилитель можно представить в виде параллельного соединения каскада  $L(u)$  с обратной связью  $K(u)$  (рис. 1 а) или каскадного соединения с корректирующим четырехполюсником  $G(u)$  (рис. 1 б).

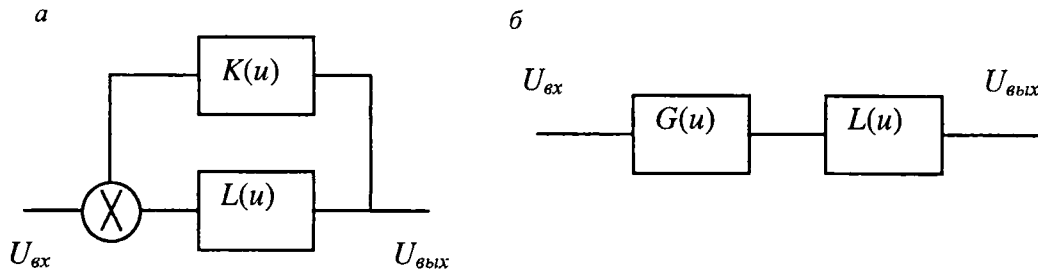


Рис. 1.

Для схемы а (рис. 1) сигнал на выходе усилителя определяется выражением:

$$U_{\text{вых}} = L(U_{\text{вх}} + K \cdot U_{\text{вых}}), \quad (3)$$

а для схемы б (рис. 1):

$$U_{\text{вых}} = L(G(U_{\text{вх}})). \quad (4)$$

Если решаемой задачей является построение неискажающего усилителя с коэффициентом усиления  $A$ , тогда для параллельной схемы получаем:

$$U_{\text{вых}} = A \cdot U_{\text{вх}} = L(U_{\text{вх}} + K \cdot A \cdot U_{\text{вх}}) \text{ и}$$

$$K = L^{-1} - \frac{1}{A} \cdot E, \quad (5)$$

где  $E$  – единичная матрица или для последовательной схемы:

$$U_{\text{вых}} = A \cdot U_{\text{вх}} = L(G(U_{\text{вх}})), \quad G = A \cdot L^{-1}. \quad (6)$$

Оператор  $L^{-1}$  легко реализуется только для ряда наиболее простых случаев (например, при квадратичных искажениях). Однако для класса усилителей периодических сигналов можно получить новое решение задачи коррекции характеристик усилителя.

Пусть на вход нелинейного усилителя с характеристикой:

$$L(u) = \alpha_1 \cdot U + \alpha_2 \cdot U^2 + \dots \quad (7)$$

подан периодический сигнал периода  $T$ . Если усилитель не содержит звеньев, осуществляющих деление, умножение и т.п. сигнала, тогда и на выходе сигнал будет также периода  $T$ . Входной и выходной сигналы в этом случае могут быть представлены в виде разложения в ряд Фурье по гармоникам кратным основной  $\omega_0 = \frac{2 \cdot \pi}{T}$  и нулевой:

$$U_{\text{вх}}(t) = \sum_{n=0}^{\infty} U_{\text{вх}n} e^{j n \omega_0 t}; \quad U_{\text{вых}}(t) = \sum_{n=0}^{\infty} U_{\text{вых}n} e^{j n \omega_0 t},$$

где  $n = 0, 1, 2, \dots$

$$U_{\text{вых}n} = [L_{nm}] \cdot U_{\text{вх}m}, \quad (8)$$

где  $L_{nm}$  – элементы квадратной матрицы преобразования, зависящие от характера нелинейности усилителя и отражающие все интермодуляционные процессы.

Если требуемый выходной сигнал  $U_T(t) = U_T >$  должен отличаться от (8), тогда для схемы последовательной коррекции имеем:

$$U_T > = [L] \cdot [G] \cdot U_{ax} >. \quad (9)$$

Учитывая, что  $U_T > = [A] \cdot U_{ax} >$ , получаем:

$$[G] = [L]^{-1} \cdot [A]. \quad (10)$$

Формула (10) позволяет построить корректирующий четырехполюсник известными методами частотного синтеза.

Для схемы параллельной коррекции получаем соотношение:

$$[K] = [A]^{-1} ([L]^{-1} \cdot [A] - [E]). \quad (11)$$

Сформулированный выше спектральный подход позволяет сравнить энергетические характеристики ключевых каскадов, работающих в режиме автоколебаний и в режиме принудительного возбуждения. Для первого случая имеем:

$$U_{вых}(t) = L(K \cdot U_{вых}(t));$$

$$U_{вых} > = [L] \cdot [K] \cdot U_{вых} >; [K] = [L]^{-1}. \quad (12)$$

Если проводимость нагрузки на  $n$  – гармонике  $Y_n$ , мощность на выходе усилителя:

$$P_{вых} = \langle U_{вых} \cdot [Y]^+ \cdot U_{вых}^+ \rangle, \quad (13)$$

где  $[Y]$  – диагональная матрица нагрузки, «+» – знак комплексного сопряжения.

Подставляя в (13) значения  $U_{вых} >$ , полученные с использованием (10), (11) или (12), получим, что достижимое значение  $P_{вых}$  в первых двух случаях при наличии нелинейности больше чем в автоколебательном режиме. В обоих случаях выигрыш по выходной мощности составляет  $\|A\|^2$  раз, где  $\|A\|$  – норма оператора преобразования от сигнала усилителя без коррекции к требуемому сигналу. По физическому смыслу  $\|A\| > 1$ .

В качестве примера рассмотрим усилитель гармонического сигнала  $U_{ex} = a \cdot \sin \omega t$  с характеристикой  $L(u) = \alpha U + \beta U^2 + \gamma U^3$ . Пусть  $\alpha = 10$ ,  $\beta = 1$ ,  $\gamma = 1$ ,  $a = 2$ . Матрица преобразования  $[L]$  и обратная к ней  $[L]^{-1}$  имеют вид:

$$[L] = A \begin{vmatrix} 1.231 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.077 & 1 & -j0.077 & -0.077 & 0 \\ 0.077 & 0 & 1 & 0 & -j0.077 \\ 0.077 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0.077 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix};$$

$$[L]^{-1} = \frac{1}{A} \begin{vmatrix} 0.8125 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -0.0634 + j0.004 & 1 & -j0.077 & -0.077 & -0.006 \\ 0.0625 + j0.0048 & 0 & 1 & 0 & j0.077 \\ -0.0625 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ -0.0625 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}.$$

Значит для осуществления коррекции нелинейных искажений необходимо изменить входной сигнал, добавив на вход постоянное смещение с относительной к основной частоте амплитудой  $U_0 \approx -0.065$  В; вторую гармонику  $U_2(t) = -0.077 \cos 2\omega t$ , третью гармонику  $U_3(t) = -0.077 \sin 3\omega t$  и четвертую гармонику  $U_4(t) = -0.006 \sin 4\omega t$ .

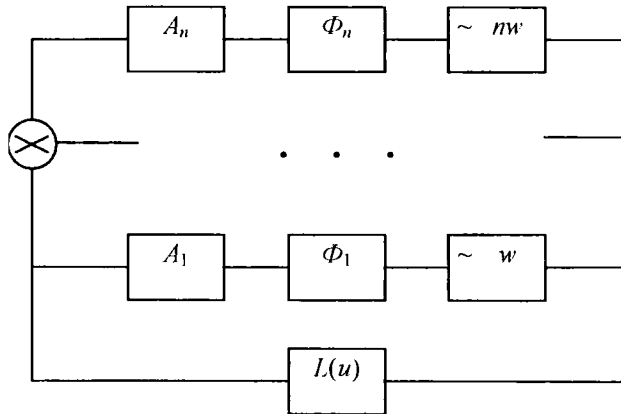


Рис. 2

При параллельной коррекции эти гармоники могут быть выделены фильтрами с выхода усилителя и поданы на вход через параллельные обратные связи. Выходной сигнал исходного усилителя имеет нелинейные искажения на уровне  $-18$  дБ, после коррекции  $-43$  дБ.

В результате получаем схему усилителя с параллельной коррекцией (рис. 2). Каждая ветвь обратной связи содержит полосовой фильтр на гармонику номера  $n$ , фазовращатель  $\Phi_n$  и аттенюатор  $A_n$ .

Задача синтеза корректирующих последовательных или параллельных четырехполюсников при таком подходе практически всегда имеет решение, так как синтез необходимо осуществить для дискретных частот, а не для непрерывной полосы частот. Аппарат синтеза четырехполюсника на заданной частоте хорошо разработан.

Таким образом, рассмотренный спектральный метод анализа задачи коррекции характеристик нелинейного усилителя может оказаться эффективным при решении ряда прикладных задач. В частности, он использован нами при разработке широкополосного линейного усилителя мощности для аппаратуры связи по высоковольтным электрическим линиям в электросистемах [3] и электронного пускорегулирующего устройства для люминисцентных ламп.

#### Литература

1. Головин О.В. Радиоприемные устройства. – М.: Высшая школа, 1987.
2. Богданович Б.М., Бачило Л.С. Проектирование усилительных устройств. – Мн.: Вышэйшая школа, 1985.
3. Верига Б.А., Козусев Ю.Н., Кухаренко С.Н., Осипенко И.В. Линейный усилитель мощности для каналов высокочастотной связи по линиям электропередач, МНТК «Современные направления развития производственных технологий и робототехника», – Могилев, 1999. – С.25

### КОНТРОЛЬНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ СНАРЯД ДЛЯ ТРУБОПРОВОДНОГО ТРАНСПОРТА

А. Б. Верига, Э. М. Виноградов, А. И. Никеевков

Гомельский государственный технический университет  
им. П. О. Сухого, Республика Беларусь

В настоящее время на трубопроводном транспорте используются два вида внутри-трубных снарядов: чистящие и диагностические. Чистящие снаряды предназначены для регулярной очистки внутренней полости трубопровода от парафиносмолистых отложений и посторонних предметов. С помощью диагностических снарядов получают информацию о наличии и местоположении дефектов трубопровода (коррозии, раковин, состояния сварных швов и т.п.). Такие снаряды являются чрезвычайно сложными и дорогостоящими. Стоимость 1 м инспекции трубопровода составляет от 2 до 5 долларов США (по данным нефтепровода «Дружба»). Опыт эксплуатации диагностических снарядов показал, что их чувствительные элементы, касающиеся стенок трубы, часто по-