О ВОЗМОЖНОСТИ ПОСТРОЕНИЯ СХЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО СОГЛАСОВАНИЯ В ДИАПАЗОНЕ СВЧ

В. Ф. Кравченко, В. С. Жилков, В. И. Салыга, В. В. Устименко, Б. Н. Бальзамов, О. Д. Бакланов

Харьков

Известно, что оптимальный энергетический режим работы радиолокационных систем может быть реализован при условии сопряженного согласования передатчика и антенны.

На практике обычно по многим причинам стремятся обеспечить только согласование антенны с линией передачи. В этом случае исключается ее влияние на режим работы передатчика, а также обеспечиваются благоприятные условия эксплуатации волноводного тракта.

Задача согласования антенны с линией в узкой полосе частот не представляет серьезных трудностей и может быть решена простыми методами. В метровом и дециметровом диапазонах для согласования применяются шлейфовые трансформаторы, в сантиметровом — трансформаторы полных сопротивлений с подвижными кварцевыми пластинами, штыревые трансформаторы и т. д.

При эксплуатации широкополосных систем требуется соответственно широкополосное согласование, которое к тому же должно выполняться в короткий промежуток времени. Однако ни одно из известных устройств, предназначенных для согласования, не удовлетворяет этим требованиям.

Данная работа подсказывает возможность создания принципиально нового устройства — универсального автоматического трансформатора полных сопротивлений; также предлагаются схемы реализации устройства, обосновывается метод их электродинамического расчета.

Схемы автоматических согласователей

Рассмотрим схемы автоматических согласователей (рис. 1 и 2) и кратко остановимся на принципе их действия.

При отсутствии согласования между антенной и линией передачи в плече *а* (рис. 1) направленного ответвителя возбуждается сигнал, пропорциональный мощности, отражаемой от места соединения антенны с линией и коэффициенту отражения в этом сечении. Если мощность в основном тракте не изменяется, то величина тока, протекающего через детектор датчика *3*, зависит линейно только от коэффициента отражения антенны. Затем сигнал, снимаемый с датчика *3*, подается на вход устройства *5*, которое преобразует сигнал, несущий информацию о рассогласовании, в сигнал, управляющий исполнительным механизмом *6*, служащим для непосредственного согласования антенны; *4* — согласованная нагрузка.

Фактически в такой постановке устройство в целом может быть отнесено к классу систем автоматической стабилизации, так как его основным назначением является поддержание одного и того же (нулевого) значения коэффициента отражения в сечении *2*.

Отметим, что система, схема которой приведена на рис. 1, имеет определенные ограничения, связанные с необходимостью поддержания постоянного уровня мощности в линии передачи. Эти ограничения ликвидируются установкой, приведенной на рис. 2.

В основе отличия ее от предыдущей лежит способ формирования информационного сигнала. Суть его состоит в следующем. В установку вводится дополнительный элемент *7*, предназначенный для преобразова-

ния сигналов, пропорциональных падающей мощности $P+$ и отраженной мощности $P-$, в сигнал, пропорциональный отношению P^-/P^+, равный коэффициенту отражения антенны. Элементы *5* и *6* выполняют аналогичные функции.

Основным достоинством предлагаемых автоматических согласователей является возможность использования их в широком диапазоне частот. Это объясняется тем обстоятельством, что система, отрабатывающая минимальное значение сигнала, пропорционального отраженной мощности, однозначно обеспечивает полное согласование антенны.

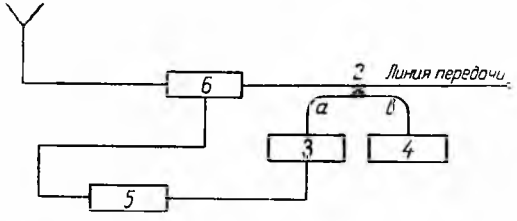


Рис. 1.

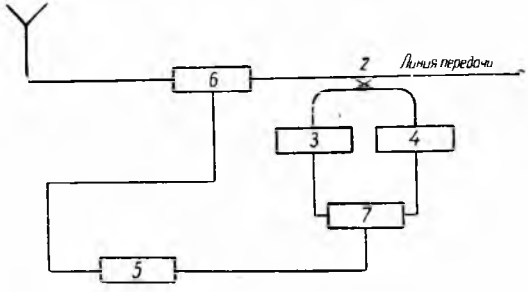


Рис. 2.

Рассматривая схемы АС (автоматического согласования), необходимо отметить еще одну особенность режима их работы. В общем случае может возникнуть ситуация, при которой (рис. 2) устройство не может обеспечить требуемого согласования из-за отсутствия в нем сигнала, пропорционального опорной фазе коэффициента отражения. Автоматическая система, удовлетворяющая полным требованиям согласования, должна иметь в своем комплекте простейшее устройство сравнения, которое должно:

а) запомнить сигнал, соответствующий полному согласованию антенны;

б) возвратить исполнительное устройство, имеющее дополнительную степень свободы, в требуемое положение. В таком виде автоматическая система согласования представляется наиболее оптимальной.

Основные расчетные соотношения

При проектировании АС теоретически и экспериментально исследован ряд элементов. В частности, получены расчетные формулы для определения диапазона согласования трансформаторов полных сопротивлений с двумя и тремя неоднородностями правильной формы (1), (2).

По соотношениям (1) и (2) были проведены вычисления на ЭВМ «УРАЛ-2».

$$\eta = \left| \frac{\frac{8\pi k^2}{\beta_{10} dh}\left[a_1^3 \sin\frac{\pi}{d}x_1 + a_2^3 \sin\frac{\pi}{d}x_2 \cdot e^{-i2\beta_{10}s}\right] + \left(\frac{8\pi k^2}{\beta_{10} dh}\right)^2 a_1^3 a_2^3 \sin\frac{\pi}{d}x_1 \sin\frac{\pi}{d}x_2 \left(1 - e^{-i2\beta_{10}s}\right)}{1 + \left(\frac{8\pi k^2}{\beta_{10} dh}\right)^2 a_1^3 a_2^3} \right| ; \quad (1)$$

$$\eta = \left| \frac{\frac{8\pi k^2}{\beta_{10} dh} a^3 \sin\frac{\pi}{d} x_0 \left[1 + e^{-i2\beta_{mn}S_1} + e^{-i2\beta_{mn}S_2}\right]}{1 + 3\left(\frac{8\pi k^2}{\beta_{10} dh} a^3 \sin\frac{\pi}{d} x_0\right)^2} + \right.$$

$$+ \frac{\left(\frac{8\pi k^2}{\beta_{10} dh} a^3 \sin\frac{\pi}{d} x_0\right)^2 \left[3 - e^{-i2\beta_{10}S_1} - e^{-i2\beta_{10}S_2} - e^{-i2\beta_{10}(S_2 - S_1)}\right]}{1 + 3\left(\frac{8\pi k^2}{\beta_{10} dh} a^3 \sin\frac{\pi}{d} x_0\right)^2} +$$

$$\left. + \frac{\left(\frac{8\pi k^2}{\beta_{10} dh} a^3 \sin\frac{\pi}{d} x_0\right)^3 \left(1 - e^{-i2\beta_{10}S_1} + e^{-i2\beta_{10}S_2}\right)}{1 + 3\left(\frac{8\pi k^2}{\beta_{10} dh} \cdot a^3 \sin\frac{\pi}{d} x_0\right)^3} \right| . \qquad (2)$$

ВЫВОДЫ

1. Особенность предлагаемой схемы построения АС в диапазоне СВЧ — создание универсального устройства, в комплект которого входит набор сменных волноводных изделий (направленных ответвителей и трансформаторов полных сопротивлений). Такой согласователь отличается широкой диапазонностью.

2. Предлагается принцип построения адаптивной системы АС, обеспечивающей отработку изменений условий распространения электромагнитных волн в тракте.

ЛИТЕРАТУРА

1. В. Ф. Кравченко, А. И. Козарь, В. Г. Червов, Н. А. Хижняк. Аннотации и тезисы докладов на XXV Всесоюзной сессии, посвященной Дню Радио и Дню связиста. Москва, 1969.

2. Е. Л. Пиротти, Н. А. Хижняк, В. Ф. Кравченко. Исследование рассеяния электромагнитных волн на телах правильной формы в прямоугольном волноводе. Сб. «Радиотехника», вып. 14. Изд-во ХГУ, Харьков, 1970.

3. О. Д. Бакланов, Б. Н. Бальзамов, В. С. Жилков, В. Ф. Кравченко, Е. Л. Пиротти, В. В. Устименко, Н. А. Хижняк. Методика расчета трансформаторов полных сопротивлений на прямоугольных волноводах. Сб. «Приборы и системы автоматики», вып. 15. Изд-во ХГУ, Харьков, 1970.

МАТРИЦА ПРОВОДИМОСТЕЙ И СХЕМА ЗАМЕЩЕНИЯ ТРЕХФАЗНОГО ТРАНСФОРМАТОРА В ШИРОКОМ ДИАПАЗОНЕ ЧАСТОТ

И. Ф. Огороднейчук, Э. А. Свирщева, А. Я. Куземин

Харьков

Практика эксплуатации и ряд исследований показали, что силовая распределительная электрическая сеть является надежным каналом для передачи информации.

Существенные отличия распределительных сетей напряжением 0.4—10 *кв* от сетей более высокого напряжения, заключающиеся в большей разветвленности, наличии большого числа ответвлений и подключений силовых токоприемников, широком применении кабельных линий и вставок, а также конденсаторных батарей большой мощности, делают невозможным по экономическим соображениям полное перенесение принципов и методов высокочастотной связи по ЛЭП высокого напряжения на распределительные сети 0,4—10 *кв*.

1	1′	2	2′	3	3′	4	4′	5	5′
$\frac{\Gamma_1}{p}+p\sum_{s=1}^{2n+1}C_{15}$	$-\frac{\Gamma_1}{p}-pC_{11'}$	$-\frac{N_{12}}{p}-pC_{12}$	$\frac{N_{12}}{p}-pC_{12'}$	$-\frac{N_{13}}{p}-pC_{13}$	$\frac{N_{13}}{p}-pC_{13'}$	$-\frac{N_{14}}{p}-pC_{14}$	$\frac{N_{14}}{p}-pC_{14'}$	$-\frac{N_{15}}{p}-pC_{15}$	$\frac{N_{15}}{p}-pC_{15'}$
$-\frac{\Gamma_1}{p}-pC_{1'1}$	$\frac{\Gamma_1}{p}+p\sum_{\substack{s=1\\s\neq1'}}^{2n+1}C_{1'5}$	$\frac{N_{12}}{p}-pC_{1'2}$	$-\frac{N_{12}}{p}-pC_{1'2'}$	$\frac{N_{13}}{p}-pC_{1'3}$	$-\frac{N_{13}}{p}-pC_{1'3'}$	$\frac{N_{14}}{p}-pC_{1'4}$	$-\frac{N_{14}}{p}-pC_{1'4}$	$\frac{N_{15}}{p}-pC_{1'5}$	$-\frac{N_{15}}{p}-pC_{1'5'}$
$-\frac{N_{21}}{p}-pC_{21}$	$\frac{N_{21}}{p}-pC_{21'}$	$\frac{\Gamma_2}{p}+p\sum_{\substack{s=1\\s\neq2}}^{2n+1}C_{25}$	$-\frac{\Gamma_2}{p}-pC_{22'}$	$-\frac{N_{23}}{p}-pC_{23}$	$\frac{N_{23}}{p}-pC_{23'}$	$-\frac{N_{24}}{p}-pC_{24}$	$\frac{N_{24}}{p}-pC_{24'}$	$-\frac{N_{25}}{p}-pC_{25}$	$\frac{N_{25}}{p}-pC_{25'}$
$\frac{N_{21}}{p}-pC_{2'1}$	$-\frac{N_{21}}{p}-pC_{2'1'}$	$-\frac{\Gamma_2}{p}-pC_{2'2}$	$\frac{\Gamma_2}{p}+p\sum_{\substack{s=1\\s\neq2'}}^{2n+1}C_{2'5}$	$\frac{N_{23}}{p}-pC_{2'3}$	$-\frac{N_{23}}{p}-pC_{2'3'}$	$\frac{N_{24}}{p}-pC_{2'4}$	$-\frac{N_{24}}{p}-pC_{2'4'}$	$\frac{N_{25}}{p}-pC_{2'5}$	$-\frac{N_{25}}{p}-pC_{2'5'}$
$-\frac{N_{31}}{p}-pC_{31}$	$\frac{N_{31}}{p}-pC_{31'}$	$-\frac{N_{32}}{p}-pC_{32}$	$\frac{N_{32}}{p}-pC_{32'}$	$\frac{\Gamma_3}{p}+p\sum_{\substack{s=1\\s\neq3}}^{2n+1}C_{35}$	$-\frac{\Gamma_3}{p}-pC_{33'}$	$-\frac{N_{34}}{p}-pC_{34}$	$\frac{N_{34}}{p}-pC_{34'}$	$-\frac{N_{35}}{p}-pC_{35}$	$\frac{N_{35}}{p}-pC_{35}$
$\frac{N_{31}}{p}-pC_{3'1}$	$-\frac{N_{31}}{p}-pC_{3'1'}$	$\frac{N_{32}}{p}-pC_{3'2}$	$-\frac{N_{32}}{p}-pC_{3'2'}$	$-\frac{\Gamma_3}{p}-pC_{3'3}$	$\frac{\Gamma_3}{p}+p\sum_{\substack{s=1\\s\neq3'}}^{2n+1}C_{3'5}$	$\frac{N_{34}}{p}-pC_{3'4}$	$-\frac{N_{34}}{p}-pC_{3'4'}$	$\frac{N_{35}}{p}-pC_{3'5}$	$-\frac{N_{35}}{p}-pC_{3'5'}$
$\frac{N_{41}}{p}-pC_{41}$	$\frac{N_{41}}{p}-pC_{41'}$	$-\frac{N_{42}}{p}-pC_{42}$	$\frac{N_{42}}{p}-pC_{42'}$	$-\frac{N_{43}}{p}-pC_{43}$	$\frac{N_{43}}{p}-pC_{43'}$	$\frac{\Gamma_4}{p}+p\sum_{\substack{s=1\\s\neq4}}^{2n+1}C_{45}$	$-\frac{\Gamma_4}{p}-pC_{44'}$	$-\frac{N_{45}}{p}-pC_{45}$	$\frac{N_{45}}{p}-pC_{45}$
$\frac{N_{41}}{p}-pC_{4'1}$	$-\frac{N_{41}}{p}-pC_{4'1'}$	$\frac{N_{42}}{p}-pC_{4'2}$	$-\frac{N_{42}}{p}-pC_{4'2'}$	$\frac{N_{43}}{p}-pC_{4'3}$	$-\frac{N_{43}}{p}-pC_{4'3'}$	$-\frac{\Gamma_4}{p}-pC_{4'4}$	$\frac{\Gamma_4}{p}+p\sum_{\substack{s=1\\s\neq4'}}^{2n+1}C_{4'5}$	$\frac{N_{45}}{p}-pC_{4'5}$	$-\frac{N_{45}}{p}-pC_{4'5'}$
$\frac{N_{51}}{p}-pC_{51}$	$\frac{N_{51}}{p}-pC_{51'}$	$-\frac{N_{52}}{p}-pC_{52}$	$\frac{N_{52}}{p}-pC_{52'}$	$-\frac{N_{53}}{p}-pC_{53}$	$\frac{N_{53}}{p}-pC_{53'}$	$-\frac{N_{54}}{p}-pC_{54}$	$\frac{N_{54}}{p}-pC_{54'}$	$\frac{\Gamma_5}{p}+p\sum_{\substack{s=1\\s\neq5}}^{2n+1}C_{55}$	$-\frac{\Gamma_5}{p}-pC_{55}$
$\frac{N_{51}}{p}-pC_{5'1}$	$-\frac{N_{51}}{p}-pC_{5'1'}$	$\frac{N_{52}}{p}-pC_{5'2}$	$-\frac{N_{52}}{p}-pC_{5'2'}$	$\frac{N_{53}}{p}-pC_{5'3}$	$-\frac{N_{53}}{p}-pC_{5'3}$	$\frac{N_{54}}{p}-pC_{5'4}$	$-\frac{N_{54}}{p}-pC_{5'4'}$	$-\frac{\Gamma_5}{p}-pC_{5'5}$	$\frac{\Gamma_5}{p}+p\sum_{\substack{s=1\\s\neq5'}}^{2n+1}C_{5'5}$
$-\frac{N_{61}}{p}-pC_{61}$	$\frac{N_{61}}{p}-pC_{61'}$	$-\frac{N_{62}}{p}-pC_{62}$	$\frac{N_{62}}{p}-pC_{62'}$	$-\frac{N_{63}}{p}-pC_{63}$	$\frac{N_{63}}{p}-pC_{63'}$	$-\frac{N_{64}}{p}-pC_{64}$	$\frac{N_{64}}{p}-pC_{64'}$	$-\frac{N_{65}}{p}-pC_{65}$	$\frac{N_{65}}{p}-pC_{6'5}$
$\frac{N_{61}}{p}-pC_{6'1}$	$-\frac{N_{61}}{p}-pC_{6'1'}$	$\frac{N_{62}}{p}-pC_{6'2}$	$-\frac{N_{62}}{p}-pC_{6'2'}$	$\frac{N_{63}}{p}-pC_{6'3}$	$-\frac{N_{63}}{p}-pC_{6'3'}$	$\frac{N_{64}}{p}-pC_{6'4}$	$-\frac{N_{64}}{p}-pC_{6'4'}$	$\frac{N_{65}}{p}-pC_{6'5}$	$-\frac{N_{65}}{p}-pC_{6'5'}$
$-pC_{71}$	$-pC_{71'}$	$-pC_{72}$	$-pC_{72'}$	$-pC_{73}$	$-pC_{73'}$	$-pC_{74}$	$-pC_{74'}$	$-pC_{75}$	$-pC_{7'5}$

Таблица 1

2	2′	3	3′	4	4′	5	5′	6	6′	7
$1 - pC_{12}$	$\frac{N_{12}}{p} - pC_{12'}$	$-\frac{N_{13}}{p} - pC_{13}$	$\frac{N_{13}}{p} - pC_{13'}$	$-\frac{N_{14}}{p} - pC_{14}$	$\frac{N_{14}}{p} - pC_{14'}$	$-\frac{N_{15}}{p} - pC_{15}$	$\frac{N_{15}}{p} - pC_{15'}$	$-\frac{N_{16}}{p} - pC_{16}$	$\frac{N_{16}}{p} - pC_{16'}$	$-pC_{17}$
$-pC_{1'2}$	$-\frac{N_{12}}{p} - pC_{1'2'}$	$\frac{N_{13}}{p} - pC_{1'3}$	$-\frac{N_{13}}{p} - pC_{1'3'}$	$\frac{N_{14}}{p} - pC_{1'4}$	$-\frac{N_{14}}{p} - pC_{1'4}$	$\frac{N_{15}}{p} - pC_{1'5}$	$-\frac{N_{15}}{p} - pC_{1'5'}$	$\frac{N_{16}}{p} - pC_{1'6}$	$-\frac{N_{16}}{p} - pC_{1'6'}$	$-pC_{1'7}$
$p\sum_{\substack{s=1\\s\neq 2}}^{2n+1} C_{25}$	$-\frac{\Gamma_2}{p} - pC_{22'}$	$-\frac{N_{23}}{p} - pC_{23}$	$\frac{N_{23}}{p} - pC_{23'}$	$-\frac{N_{24}}{p} - pC_{24}$	$\frac{N_{24}}{p} - pC_{24'}$	$-\frac{N_{25}}{p} - pC_{25}$	$\frac{N_{25}}{p} - pC_{25'}$	$-\frac{N_{26}}{p} - pC_{26}$	$\frac{N_{26}}{p} - pC_{26'}$	$-pC_{27}$
$2 - pC_{2'2}$	$\frac{\Gamma_2}{p} + p\sum_{\substack{s=1\\s\neq 2'}}^{2n+1} C_{2'5}$	$\frac{N_{23}}{p} - pC_{2'3}$	$-\frac{N_{23}}{p} - pC_{2'3'}$	$\frac{N_{24}}{p} - pC_{2'4}$	$-\frac{N_{24}}{p} - pC_{2'4'}$	$\frac{N_{25}}{p} - pC_{2'5}$	$-\frac{N_{25}}{p} - pC_{2'5'}$	$\frac{N_{26}}{p} - pC_{2'6}$	$-\frac{N_{26}}{p} - pC_{2'6'}$	$-pC_{2'7}$
$3 - pC_{32}$	$\frac{N_{32}}{p} - pC_{32'}$	$\frac{\Gamma_3}{p} + p\sum_{\substack{s=1\\s\neq 3}}^{2n+1} C_{35}$	$-\frac{\Gamma_3}{p} - pC_{33'}$	$-\frac{N_{34}}{p} - pC_{34}$	$\frac{N_{34}}{p} - pC_{34'}$	$-\frac{N_{35}}{p} - pC_{35}$	$\frac{N_{35}}{p} - pC_{35}$	$-\frac{N_{36}}{p} - pC_{36}$	$\frac{N_{36}}{p} - pC_{36'}$	$-pC_{37}$
$-pC_{3'2}$	$-\frac{N_{32}}{p} - pC_{3'2'}$	$-\frac{\Gamma_3}{p} - pC_{3'3}$	$\frac{\Gamma_3}{p} + p\sum_{\substack{s=1\\s\neq 3'}}^{2n+1} C_{3'5}$	$\frac{N_{34}}{p} - pC_{3'4}$	$-\frac{N_{34}}{p} - pC_{3'4'}$	$\frac{N_{35}}{p} - pC_{3'5}$	$-\frac{N_{35}}{p} - pC_{3'5'}$	$\frac{N_{36}}{p} - pC_{3'6}$	$-\frac{N_{36}}{p} - pC_{3'6}$	$-pC_{3'7}$
$4 - pC_{42}$	$\frac{N_{42}}{p} - pC_{42'}$	$-\frac{N_{43}}{p} - pC_{43}$	$\frac{N_{43}}{p} - pC_{43'}$	$\frac{\Gamma_4}{p} + p\sum_{\substack{s=1\\s\neq 4}}^{2n+1} C_{45}$	$-\frac{\Gamma_4}{p} - pC_{44'}$	$-\frac{N_{45}}{p} - pC_{45}$	$\frac{N_{45}}{p} - pC_{45}$	$-\frac{N_{46}}{p} - pC_{46}$	$\frac{N_{46}}{p} - pC_{46}$	$-pC_{47}$
$4 - pC_{4'2}$	$-\frac{N_{42}}{p} - pC_{4'2'}$	$\frac{N_{43}}{p} - pC_{4'3}$	$-\frac{N_{43}}{p} - pC_{4'3'}$	$-\frac{\Gamma_4}{p} - pC_{4'4}$	$\frac{\Gamma_4}{p} + p\sum_{\substack{s=1\\s\neq 4'}}^{2n+1} C_{4'5}$	$\frac{N_{45}}{p} - pC_{4'5}$	$-\frac{N_{45}}{p} - pC_{4'5'}$	$\frac{N_{46}}{p} - pC_{4'6}$	$-\frac{N_{46}}{p} - pC_{4'6'}$	$-pC_{4'7}$
$\frac{52}{p} - pC_{52}$	$\frac{N_{52}}{p} - pC_{52'}$	$-\frac{N_{53}}{p} - pC_{53}$	$\frac{N_{53}}{p} - pC_{53'}$	$-\frac{N_{54}}{p} - pC_{54}$	$\frac{N_{54}}{p} - pC_{54'}$	$\frac{\Gamma_5}{p} + p\sum_{\substack{s=1\\s\neq 5}}^{2n+1} C_{55}$	$-\frac{\Gamma_5}{p} - pC_{55}$	$-\frac{N_{56}}{p} - pC_{56}$	$\frac{N_{56}}{p} - pC_{56'}$	$-pC_{57}$
$5 - pC_{5'2}$	$-\frac{N_{52}}{p} - pC_{5'2'}$	$\frac{N_{53}}{p} - pC_{5'3}$	$-\frac{N_{53}}{p} - pC_{5'3}$	$\frac{N_{54}}{p} - pC_{5'4}$	$-\frac{N_{54}}{p} - pC_{5'4'}$	$-\frac{\Gamma_5}{p} - pC_{5'5}$	$\frac{\Gamma_5}{p} + p\sum_{\substack{s=1\\s\neq 5'}}^{2n+1} C_{5'5}$	$\frac{N_{56}}{p} - pC_{5'6}$	$-\frac{N_{56}}{p} - pC_{5'6'}$	$-pC_{5'7}$
$\frac{62}{p} - pC_{62}$	$\frac{N_{62}}{p} - pC_{62'}$	$-\frac{N_{63}}{p} - pC_{63}$	$\frac{N_{63}}{p} - pC_{63'}$	$-\frac{N_{64}}{p} - pC_{64}$	$\frac{N_{64}}{p} - pC_{64'}$	$-\frac{N_{65}}{p} - pC_{65}$	$\frac{N_{65}}{p} - pC_{6'5}$	$\frac{\Gamma_6}{p} + p\sum_{\substack{s=1\\s\neq 6}}^{2n+1} C_{65}$	$-\frac{\Gamma_6}{p} - pC_{66'}$	$-pC_{6'}$
$6 - pC_{6'2}$	$-\frac{N_{62}}{p} - pC_{6'2'}$	$\frac{N_{63}}{p} - pC_{6'3}$	$-\frac{N_{63}}{p} - pC_{6'3'}$	$\frac{N_{64}}{p} - pC_{6'4}$	$-\frac{N_{64}}{p} - pC_{6'4'}$	$\frac{N_{65}}{p} - pC_{6'5}$	$-\frac{N_{65}}{p} - pC_{6'5'}$	$-\frac{\Gamma_6}{p} + pC_{66}$	$\frac{\Gamma_6}{p} + p\sum_{\substack{s=1\\s\neq 6'}}^{2n+1} C_{6'5}$	$-pC_{6'7}$
$-pC_{72}$	$-pC_{72'}$	$-pC_{73}$	$-pC_{73'}$	$-pC_{74}$	$-pC_{74'}$	$-pC_{75}$	$-pC_{7'5}$	$-pC_{76}$	$-pC_{7'6}$	$p\sum_{\substack{s=1\\s\neq 7}}^{2n+1} C_{75}$

Таким образом, возникает ряд задач теоретического и экспериментального порядка, которые необходимо решить для определения принципиальной возможности и методов технической реализации телемеханического канала, работающего по РЭС. В первую очередь требуется выяснить схему замещения трансформаторов, которая может быть использована при аналитических расчетах таких каналов или при построении физической модели РЭС.

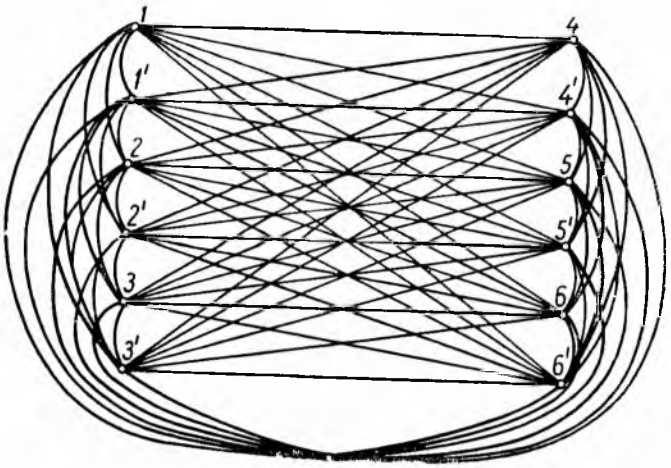


Рис. 1. Линейный граф трехфазного трансформатора.

Матрицу проводимостей для трехфазного трансформатора мы получим из уравнений узловых напряжений:

$$\|J\| = \|Y\| \cdot \|U\|, \tag{1}$$

где $\|J\|$ — матрица-столбец полюсных токов;
$\|U\|$ — матрица-столбец узловых напряжений по отношению к внешнему базисному узлу;
$\|Y\|$ — квадратная матрица проводимостей.

Разложим матричное уравнение на два:

$$\begin{aligned} \|J'\| &= \|Y'\| \cdot \|U'\|; \\ \|J''\| &= \|Y''\| \cdot \|U''\|. \end{aligned} \tag{2}$$

Здесь

$$\begin{aligned} \|J'\| + \|J''\| &= \|J\|; \\ \|Y'\| + \|Y''\| &= \|Y\|. \end{aligned} \tag{3}$$

Такому разложению матричного уравнения соответствует расслоение сложного многополюсника на два, соединенных между собой параллельно [1]. Предполагая, что, проводимости между отдельными полюсами трансформатора существуют за счет паразитных емкостей, собственных и взаимных индуктивностей, для трехфазного трансформатора без потерь можно записать в общем виде матрицу проводимостей (табл. 1). В ней N_{ij} — величина, обратная взаимной индуктивности; Γ_i — величина, обратная собственной индуктивности; C_{ij} — взаимные емкости; C_{ii} — собственные емкости.

Эквивалентная схема, соответствующая этой матрице, сложна, поэтому на рис. 1 приведен ее линейный граф [2], каждая ветвь которого представляет параллельный контур. Коэффициенты матрицы проводи-

мостей могут быть определены экспериментальным путем по известной методике [3]. Измерения показали, что они являются частотозависимыми.

Обработка полученных экспериментальным путем частотных зависимостей коэффициентов матрицы проводимостей трансформатора АП-2,5 показала, что они могут быть объединены в зоны в диапазоне 10-200 *кгц* (рис. 2).

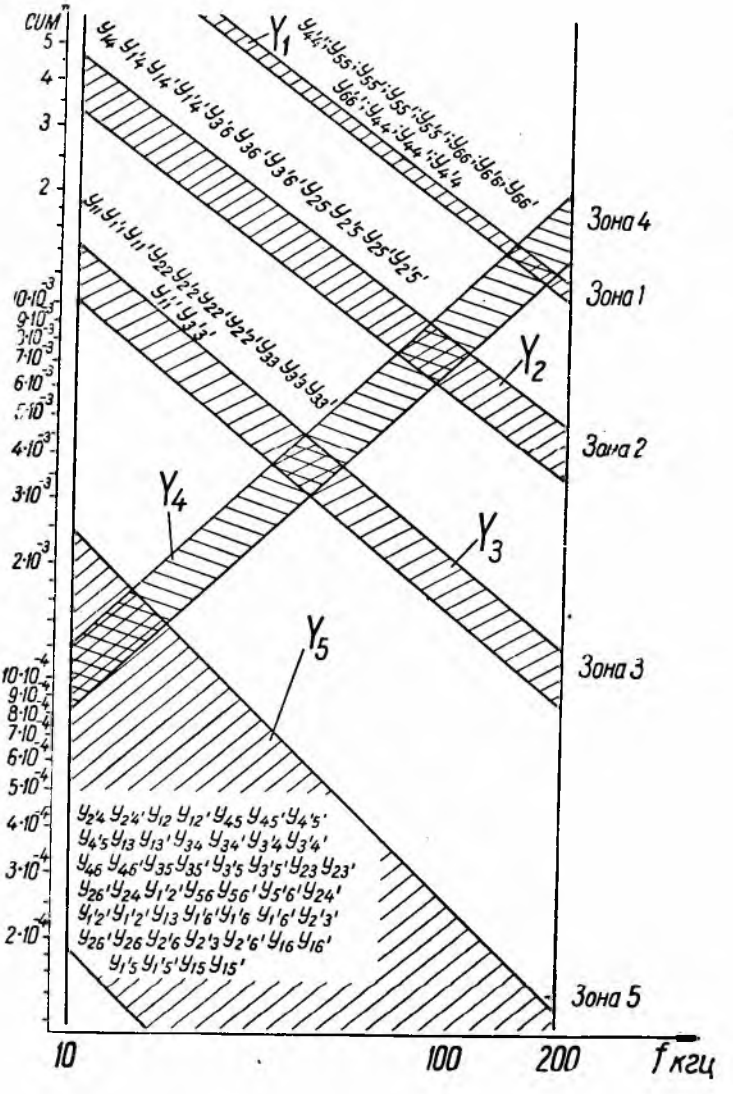


Рис. 2. Зоны частотных зависимостей трехфазного трансформатора.

Зона *1* — собственные проводимости низковольтных обмоток (Y_1).

Зона *2* — взаимные проводимости между полюсами обмоток, сидящих на одном стержне (Y_2).

Зона *3* — собственные проводимости высоковольтных обмоток (Y_3).

Зона *4* — проводимости между полюсами трансформатора и корпусом (Y_4).

Таблица 2

1	1′	2	2′	3	3′	4	4′	5	5′	6	6′	7
$\frac{\Gamma_3}{p}+pC_{11}$	$-\frac{\Gamma_3}{p}-pC_{11'}$					$-\frac{N_2}{p}$	$\frac{N_2}{p}-pC_{14'}$					$-pC_4$
$\frac{\Gamma_3}{p}-pC_{11'}$	$\frac{\Gamma_3}{p}+pC_{1'4'}$					$\frac{N_2}{p}-pC_{1'4}$	$-\frac{N_2}{p}$					$-pC_{4'}$
		$\frac{\Gamma_3}{p}+pC_{11}$	$-\frac{\Gamma_3}{p}-pC_{11'}$					$-\frac{N_2}{p}$	$\frac{N_2}{p}-C_{14'}$			$-pC_4$
		$-\frac{\Gamma_3}{p}-pC_{11'}$	$\frac{\Gamma_3}{p}+pC_{1'1'}$					$\frac{N_2}{p}-pC_{1'4}$	$-\frac{N_2}{p}$			$-pC_{4'}$
				$\frac{\Gamma_3}{p}+pC_{11}$	$-\frac{\Gamma_3}{p}-pC_{11'}$					$-\frac{N_2}{p}$	$\frac{N_2}{p}-pC_{14'}$	$-pC_4$
				$-\frac{\Gamma_3}{p}-pC_{11'}$	$\frac{\Gamma_3}{p}+pC_{1'1'}$					$\frac{N_2}{p}-pC_{1'4}$	$-\frac{N_2}{p}$	$-pC_{4'}$
$-\frac{N_2}{p}$	$\frac{N_2}{p}-pC_{1'4}$					$\frac{\Gamma_1}{p}+pC_{44}$	$-\frac{\Gamma_1}{p}-pC_{44'}$					$-pC_4$
$\frac{N_2}{p}-pC_{14'}$	$-\frac{N_2}{p}$					$-\frac{\Gamma_1}{p}-pC_{44'}$	$\frac{\Gamma_1}{p}+pC_{4'4'}$					$-pC_{4'}$
		$-\frac{N_2}{p}$	$\frac{N_2}{p}-pC_{1'4}$					$\frac{\Gamma_1}{p}+pC_{44}$	$-\frac{\Gamma_1}{p}-pC_{44}$			$-pC_4$
		$\frac{N_2}{p}-pC_{14'}$	$-\frac{N_2}{p}$					$-\frac{\Gamma_1}{p}-pC_{44'}$	$\frac{\Gamma_1}{p}+pC_{4'4'}$			$-pC_4$
				$-\frac{N_2}{p}$	$\frac{N_2}{p}-pC_{1'4}$					$\frac{\Gamma_1}{p}+pC_{44}$	$-\frac{\Gamma_1}{p}-pC_{44'}$	$-pC_4$
				$\frac{N_2}{p}-pC_{14}$	$-\frac{N_2}{p}$					$-\frac{\Gamma_1}{p}-pC_{44'}$	$\frac{\Gamma_1}{p}+pC_{4'4'}$	$-pC_{4'}$
$-pC_4$	$-pC_{4'}$	$-pC_4$	$-pC_{4'}$	$-pC_4$	$-pC_{4'}$	$-pC_4$	$-pC_{4'}$	$-pC_4$	$-pC_{4'}$	$-pC_4$	$-pC_{4'}$	$+pC_{77}$

Зона *5* — взаимные проводимости между полюсами обмоток, сидящих на различных стержнях (Y_5).

Проводимости Y_5 на 2—3 порядка меньше других проводимостей в диапазоне 10—200 *кгц*, поэтому ими можно пренебречь. В соответствии с этим упрощенная матрица проводимостей трехфазного трансформатора приведена в табл. 2, а граф данной матрицы показан на рис. 3. Каждая из проводимостей Y_1, Y_2, Y_3 реализуется параллельным соединением емкостей и индуктивностей, а Y_4 — емкостью.

Для определения емкостей и индуктивностей выбирались два значения каждой проводимости на различных частотах.

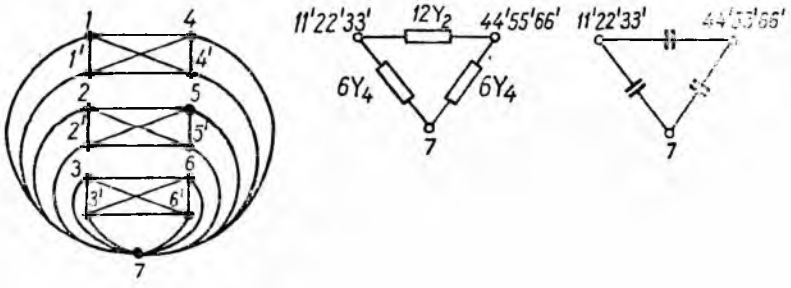


Рис. 3. Упрощенный линейный граф трехфазного трансформатора.

Тогда для взаимных проводимостей можно записать

$$\left.\begin{aligned} Y'_{ij} &= -j2\pi f_1 C_{ij} \pm \frac{N_{ij}}{j2\pi f_1} \\ Y''_{ij} &= -j2\pi f_2 C_{ij} \pm \frac{N_{ij}}{j2\pi f_2} \end{aligned}\right| \; i \neq i \qquad (4)$$

и для собственных проводимостей

$$\begin{aligned} Y'_{ij} &= \pm \frac{\Gamma_{ij}}{j2\pi f_1} \pm j2\pi f_1 C_{ij}; \\ Y''_{ij} &= \pm \frac{\Gamma_{ij}}{j2\pi f_2} \pm j2\pi f_2 C_{ij}. \end{aligned} \qquad (5)$$

Взаимные проводимости определяются из Y_2, собственные — из Y_1 и Y_3 (рис. 2).

Из (4) следует формула для вычисления величины обратной взаимной индуктивности

$$N_{ij} = \frac{1}{M_{ij}} = \frac{2\pi\left(f_2 \left|Y'_{ij}\right| - f_1 \left|Y''_{ij}\right|\right) \cdot f_1 f_2}{\pm\left(f_2^2 - f_1^2\right)}, \qquad (6)$$

и взаимной емкости

$$C_{ij} = \frac{\mp \left|Y'_{ij}\right| \cdot f_1 \pm \left|Y''_{ij}\right| \cdot f_2}{2\pi\left(f_2^2 - f_1^2\right)}. \qquad (7)$$

Взаимные емкости вычисляются по формуле (7) с учетом крутизны частотной характеристики проводимости. Если емкость получается меньше нуля, что не имеет физического смысла, то следует перейти на область кривой с большим наклоном.

Из (5) следует формула для вычисления величины, обратной собственной индуктивности,

$$\Gamma_i = \frac{1}{L_i} = \pm \frac{2\pi \left(\left| Y'_{ij} \right| f_2 - \left| Y''_{ij} \right| f_1 \right) f_2 f_1}{f_2^2 - f_1^2}, \qquad (8)$$

и собственной емкости

$$C_{ij} = \frac{\left| Y'_{ij} \right| f_1 - \left| Y''_{ij} \right| f_2}{2\pi \left(\pm f_1^2 \mp f_2^2 \right)}. \qquad (9)$$

Поправки, сделанные для формулы (7), справедливы и для формулы (9).

Величины емкостей между полюсами и корпусом определялись по известной методике для однофазного трансформатора.

Элементы эквивалентной схемы трансформатора АП-2,5, полученные на основании экспериментальных данных, сведены в табл. 3.

Таблица 3

Зоны	Индуктивность	Емкость
1	$L_1 = 1{,}5 \cdot 10^{-3}$ *гн*	$C_{44'} = 100 \cdot 10^{-12}$ *ф*
2	$M_2 = 4{,}22 \cdot 10^{-3}$ *гн*	$C_{14'} = 50 \cdot 10^{-12}$ *ф*
		$C_{1'4} = 400 \cdot 10^{-12}$ *ф*
3	$L_3 = 1{,}225 \cdot 10^{-2}$ *гн*	$C_{11'} = 150 \cdot 10^{-12}$ *ф*
4		$C_{4'} = 100_{пф}$
		$C_4 = 60_{пф}$

На рис. 4 приведены графы для различных схем соединения трехфазных трансформаторов и различных схем присоединения высокочастотной аппаратуры связи.

По этим графам и матрице проводимостей (табл. 2) легко построим эквивалентную схему замещения трансформатора для каждого соединения обмоток. Каждой ветви графа соответствует проводимость, величина которой определяется сложением элементов строк и столбцов матрицы с номерами, присвоенными узлам графа. Например, для системы присоединения «Зф-з» в случае соединения обмоток трансформатора $\frac{\Delta}{\Delta}$ матрица проводимостей принимает вид

$$\| Y \| = \begin{array}{|c|c|c|} \hline + 6pC_{11} - 6pC_{11'} & -6pC_{14'} & -6pC_4 \\ \hline -6pC_{14'} & 6pC_{44} - CpC_{44'} & -6pC_4 \\ \hline -6pC_4 & -6pC_4 & pC_{11} \\ \hline \end{array} \qquad (10)$$

По матрице (10) строим схему замещения [2].

ВЫВОДЫ

1. Методика определения параметров и эквивалентной схемы силового трехфазного трансформатора, предложенная в статье и проиллюстрированная на примере трансформатора АП-2,5, предназначена для

исследования и расчета энергетических цепей, используемых в качестве каналов связи.

2. На основании матрицы и эквивалентной схемы трехфазного трансформатора получена методика перехода к эквивалентным схемам для различных соединений обмоток трансформатора и способов присоединения высокочастотной аппаратуры (рис. 4).

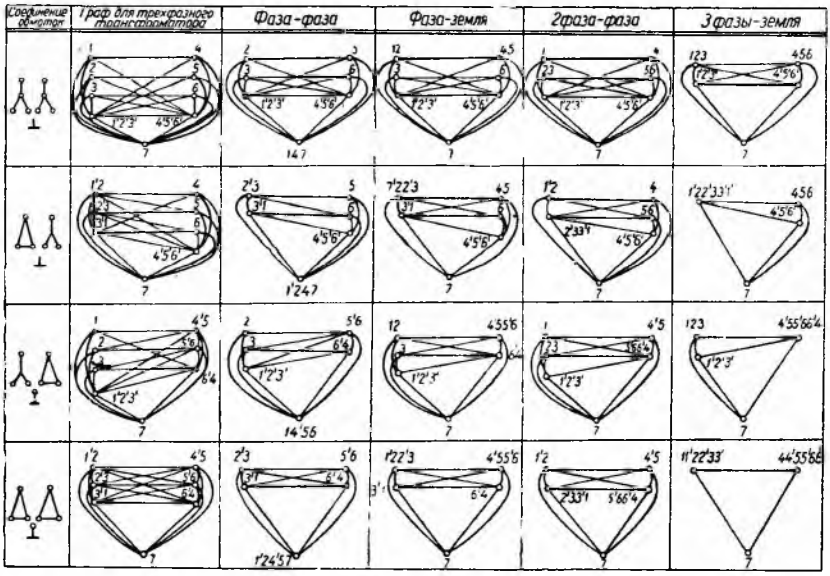


Рис. 4. Графы для различных схем трехфазного трансформатора.

3. В результате исследования трансформатора АП-2,5 получены следующие результаты, важные для решения различных задач, связанных с использованием этого трансформатора в каналах передачи информации:

а) в диапазоне 10—200 *кгц* силовой трехфазный трансформатор АП-2,5 (для другого трансформатора будет свой диапазон) можно рассматривать как три независимых однофазных воздушных трансформатора, полюсы которых имеют емкостную связь на корпусе (рис. 3);

б) вывод *а* и данные, приведенные в табл. 3 указывают путь построения модели силового трехфазного трансформатора.

ЛИТЕРАТУРА

1. Э. А. Свирщева Уравнения плавающего трансформатора. Сб. «Радиотехника», вып. 8. Изд-во ХГУ, 1968.

2. С. Мезон, Г. Циммерман. Электронные цепи, сигналы и системы Изд-во иностр. лит., 1963.

3. Э. В. Зелях. Основы общей теории линейных цепей. Изд. АН СССР, 1951.