

## ИССЛЕДОВАНИЕ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ СИСТЕМ (развязывающих устройств)

### 1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Целью работы является практическое изучение основных свойств равноплечей и неравноплечей дифференциальных систем (ДС).

### 2. ЗАДАНИЕ НА ЛАБОРАТОРНУЮ РАБОТУ

#### 2.1. Задание по теоретической части

Изучить основные свойства дифференциальных систем на трансформаторах и на сопротивлениях, назначение и использование их в аппаратуре связи.

#### 2.2. Задание по расчетной части

1. Рассчитать величины нагрузочных сопротивлений со стороны всех пар зажимов ДС, обеспечивающих ее балансировку и согласование с нагрузками при заданном сопротивлении со стороны зажимов 1–1 ( $Z_1 = 1000 \text{ Ом}$ ). Расчет произвести как для равноплечей ДС, так и для неравноплечей.

2. Рассчитать величины затухания в направлениях пропускания для равноплечей и неравноплечей дифференциальных систем при согласованных нагрузках.

3. Рассчитать затухание равноплечей ДС в направлении задерживания при различной степени ее балансировки.

#### 2.3. Задание по экспериментальной части

1. Ознакомиться с лабораторным макетом и применяемыми приборами.

2. Измерить рабочее затухание равноплечей трансформаторной дифференциальной системы в направлениях 1–2, 1–4, 1–3.

3. Измерить рабочее затухание  $a_{4-2}$ , и  $a_{4-1}$  равноплечей ДС при различной степени ее балансировки.

4. Измерить рабочее затухание неравноплечей ДС в направлениях 1–2 и 1–4.

5. Измерить входное сопротивление со стороны зажимов 1–1 ( $Z_1$ ) равноплечей ДС при различных значениях нагрузочного сопротивления со стороны зажимов 3–3 ( $Z_3$ ).

6. Измерить рабочее затухание ДС на сопротивлениях в направлении передачи АБ и А-1.

### 3. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ

#### 3.1. Методические указания к изучению теоретической части

Для изучения теоретических вопросов, связанных с данной лабораторной работой, следует использовать учебники, а также материал, сопровождающий данную работу.

Формирование телефонных каналов двустороннего действия, а также необходимость обеспечения независимой работы нескольких источников на общую нагрузку и, наоборот, распределение мощности сигналов от одного источника по нескольким независимым направлениям, требует наличия развязывающих устройств, исключающих влияние отдельных направлений друг на друга.

В аппаратуре связи, чаще всего, в качестве развязывающего устройства используют дифференциальную систему (ДС), представляющую собой шестиполюсник (рис. 1.), развязывающее действие которого заключается в том, что в направлении от некоторых внешних зажимов ДС к некоторым другим её зажимам затухание теоретически бесконечно велико, в то время как при прохождении сигнала через этот же шестиполюсник в других направлениях затухание должно быть мало.

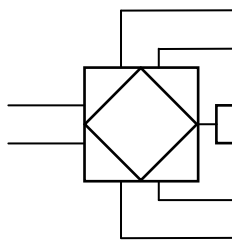


Рис. 1. К понятию о развязывающих устройствах

Дифференциальные системы выполняют либо с использованием трансформатора, либо на сопротивлениях. И в том, и в другом случае в основе работы ДС лежит принцип работы моста.

#### *Дифференциальные системы на трансформаторе*

Для построения дифференциальной системы используют дифференциальный трансформатор, к одной из пар зажимов которого подключается ба-

ланское сопротивление (или балансный контур). На рис. 2а и 2б показаны два способа подключения балансного сопротивления.

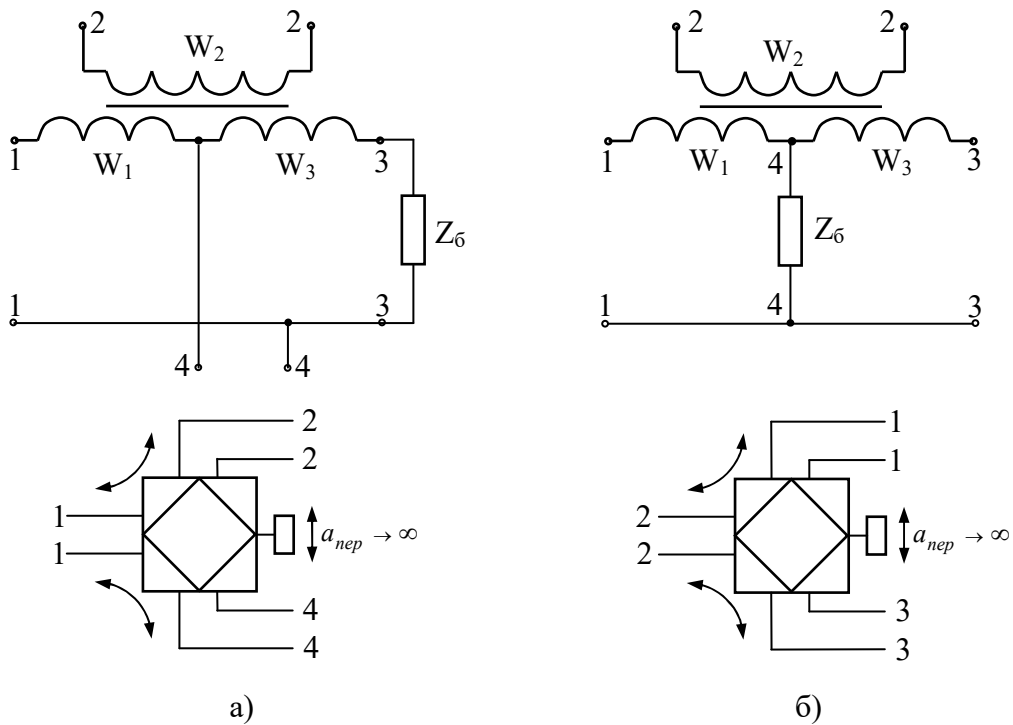


Рис. 2. Способы подключения балансного сопротивления

Дифференциальная система (рис. 2 а) обеспечивает большое затухание в направлении от зажимов 2–2 к зажимам 4–4 (2–4) и в обратном направлении (4–2), так как шестиполусник обратимый. Эти направления называются направлениями задерживания. Направления от зажимов 1–1 к зажимам 2–2 (1–2) и обратное (2–1), а также направления 1–4 и 4–1 являются направлениями пропускания.

Для дифференциальной системы (рис. 2 б) направлениями задерживания являются 1–3 (3 –1), а направлениями пропускания 1–2, 3– 2 или обратные им.

В качестве характеристик трансформатора используют два параметра: коэффициент трансформации  $n$ , определяемый как отношение количества витков в первичной обмотке  $W_2$  к количеству витков во вторичной обмотке  $W_1 + W_3$

$$n = \frac{W_1 + W_3}{W_2};$$

и коэффициент равноплечности, который определяется как отношение чисел витков в полуобмотках вторичной обмотки

$$m = \frac{W_3}{W_1}.$$

Если число витков  $W_1 = W_3$ , то  $m = 1$  и дифференциальная система называется равноплечей. При необходимости уменьшить затухание в одном из направлений пропускания ДС за счет увеличения затухания в другом направлении пропускания применяют неравноплечую ДС с дифференциальным трансформатором с отводом, при котором  $W_1 \neq W_3$  и  $m \neq 1$  соответственно. Очевидно, что равноплечая дифференциальная система является частным случаем неравноплечей, когда  $W_1 = W_3$ .

Как уже было сказано выше, дифференциальная система может быть представлена в виде моста, рис. 3 (рис. 2 а), а следовательно, условием обеспечения бесконечно большого затухания в направлении 4–2 (2–4) будет условие баланса моста. Исходя из этого, условие баланса ДС имеет вид

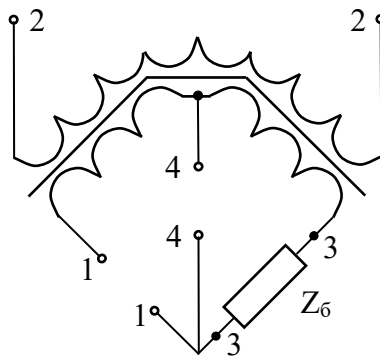


Рис. 3. Представление дифференциальной системы в виде схемы

$$Z_3 = mZ_1,$$

где  $Z_1$  – нагрузочное сопротивление, подключаемое со стороны зажимов 1–1;

$Z_3$  – нагрузочное сопротивление, подключаемое со стороны зажимов 3–3, и, в данном случае, равное  $Z_6$ .

Кроме выполнения условия баланса, необходимо, чтобы дифференциальная система была нагружена согласованно и со стороны остальных зажимов, т.е. 2–2 и 4–4. Сопротивления нагрузок, подключаемых к зажимам 2–2 и 4–4, определяются следующим образом

$$Z_2 = n^2(m+1)Z_1,$$

$$Z_4 = \frac{m}{m+1}Z_1.$$

Используя выражения для сопротивлений и полагая, что потери в трансформаторе равны нулю, можно получить выражения для определения затуханий, вносимых ДС в направлениях пропускания

$$a_{2-1} = a_{1-2} = 10 \lg(1+m),$$

$$a_{4-1} = a_{1-4} = 10 \lg \frac{1+m}{m}.$$

При  $m = 1$  для равноплечей ДС получаем следующие значения  $Z_2$ ,  $Z_3$ ,  $Z_4$  и  $a_{2-1} = a_{1-2}$ ,  $a_{4-1} = a_{1-4}$ , соответственно

$$\begin{aligned} Z_3 &= Z_1, \\ Z_2 &= 2n^2 Z_1, \\ Z_4 &= \frac{1}{2} Z_1, \end{aligned}$$

$$a_{2-1} = a_{1-2} = a_{4-1} = a_{1-4} = 10 \lg 2 \cong 3 \text{ дБ}.$$

Затухания в направлениях задерживания, при этом, обращаются в бесконечность, т.е.  $a_{2-4} = a_{4-2} = a_{3-1} = a_{1-3} = \infty$ .

Справедливость утверждений, касающихся затухания, вносимого сбалансированной равноплечей ДС как в направлениях пропускания, так и в направлениях задерживания, становится очевидной при анализе схем, приведенных на рис. 4.

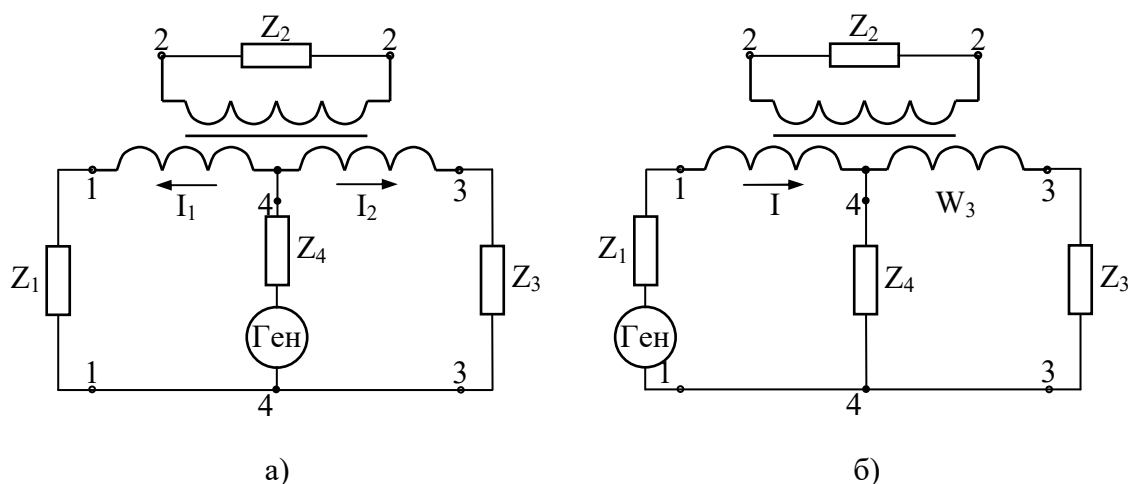


Рис. 4. К расчету затуханий, вносимых дифференциальной системой

Так, из рис. 4а видно, что половина мощности, отдаваемой генератором с внутренним сопротивлением  $Z_4$ , выделяется на полезной нагрузке ( $Z_1$ ), а вторая половина рассеивается на балансном контуре ( $Z_3 = Z_1$ ).

Аналогично может быть рассмотрена и схема на рис. 4б, где половина мощности, отдаваемой генератором с внутренним сопротивлением  $Z_1$ , выделяется на  $Z_2$ , а вторая половина – на  $Z_4$ . Так как лишь половина мощности выделяется на полезной нагрузке, то этому как раз и соответствует затухание 3 дБ.

Возвращаясь к рис. 4а, нетрудно заметить, что токи  $I_1$  и  $I_2$  равны по величине и противоположно направлены, а следовательно, магнитные потоки, порождаемые этими токами, будут компенсировать друг друга, и  $a_{4-2} = \infty$ .

Как следует из схемы на рис. 4б, зажимы 3–3 являются точками равного потенциала. Это объясняется тем, что напряжения на сопротивлении  $Z_4$  и на второй полуобмотке ( $W_3$ ) одинаковы по величине, но имеют противоположные знаки, а поэтому суммарное напряжение на зажимах 3–3 равно нулю, и  $a_{1-3} = \infty$ .

Таким образом, необходимо уяснить, что если нагрузочные сопротивления  $Z_2, Z_3, Z_4$  выбраны в соответствии с приведенными выше значениями, то дифференциальная система будет сбалансированной и согласованно нагруженной.

Если равноплечая дифференциальная система разбалансирована, то затухание в направлении 4–2 (2–4) определяется как

$$a_{4-2} = a_{2-4} = 20 \lg \left| \frac{Z_1 + Z_3}{Z_1 - Z_3} \right| + 6 \text{ дБ}$$

Величина

$$a_e = 20 \lg \left| \frac{Z_1 + Z_3}{Z_1 - Z_3} \right|$$

называется балансным затуханием и характеризует степень равновесия (или балансировки) дифференциальной системы. Значения сопротивлений и затуханий равноплечей и неравноплечей ДС сведены в табл. 1.

### *Дифференциальные системы на сопротивлениях*

Дифференциальная система может быть выполнена на активных сопротивлениях без дифференциального трансформатора. ДС на сопротивлениях может быть реализована по перекрытой Т-образной схеме (рис. 5).

Такая ДС в отличие от равноплечей ДС на трансформаторе имеет только одно (рис. 5) направление задерживания 2–4 (4–2), и, при  $Z_a = Z_b = R_1$ , ее затухание в направлении пропускания в два раза больше, т.е. равно 6 дБ. При неполной ее балансировке затухание ДС равно

$$a_{4-2(2-4)} = 20 \lg \left| \frac{Z_a + Z_b}{Z_a - Z_b} \right| + 12 = a_e + 12 \text{ дБ}$$

Существенным достоинством ДС на сопротивлениях по сравнению ДС на трансформаторах является возможность уменьшить габариты схемы. Недостатками подобной ДС являются большое затухание, вносимое в направлениях пропускания, а также невозможность обеспечения симметрии относительно земли (корпуса аппаратуры).

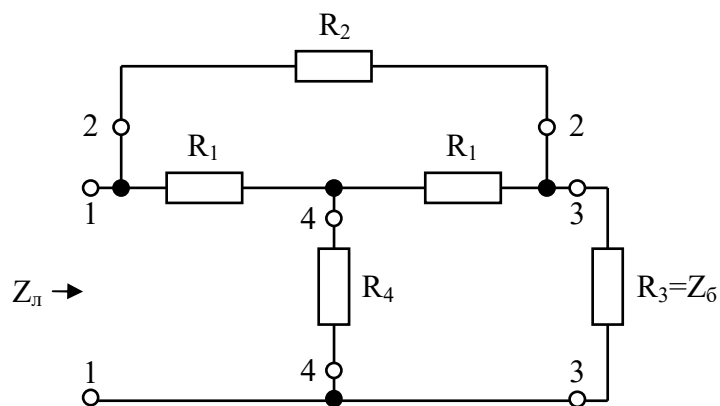


Рис. 5. Схема дифференциальной системы на сопротивлениях

Таблица 1

	Неравноплечая дифференциальная схема	Равноплечая дифференциальная схема
Условия равновесия ДС в направлении 2-4 (4-2)	$Z_3 = mZ_1$	$Z_3 = Z_1$
Затухание в направлении задерживания при нарушении условий равновесия (дБ)		$a_{2-4} = 20 \lg \left  \frac{Z_1 + Z_3}{Z_1 - Z_3} \right  + 6 \text{ дБ} = a_e + 6, \text{ дБ}$
Сопротивление нагрузок, согласованных с характеристическим сопротивлением ДС	$Z_3 = mZ_1$ $Z_2 = n^2(1+m)Z_1$ $Z_4 = \frac{m}{1+m}Z_1$	$Z_3 = Z_1$ $Z_2 = 2n^2Z_1$ $Z_4 = \frac{Z_1}{2}$
Условие равновесия ДС для передачи в направлении 1-3 (3-1)	$\frac{Z_2}{Z_4} = \frac{n^2(1+m)^2}{m}$	$\frac{Z_2}{Z_4} = 4n^2$
Затухание ДС в направлениях пропускания (дБ)	$a_{2-1} = a_{1-2} = 10 \lg(1+m)$ $a_{4-1} = a_{1-4} = 10 \lg \frac{1+m}{m}$	$a_{4-1} = a_{1-4} \cong 3$ $a_{2-1} = a_{1-2} \cong 3$

### Многополюсная развязывающая схема

Многополюсная сбалансированная развязывающая схема используется для распределения мощности сигналов по нескольким независимым направлениям. При этом применяется один многообмоточный трансформатор с  $N$  входами или  $N$  отдельных трансформаторов.

Трехходовое развязывающее устройство в лабораторном макете выполнено на трех трансформаторах (рис. 6). Оно имеет три взаиморазвязанных входа и один общий выход.

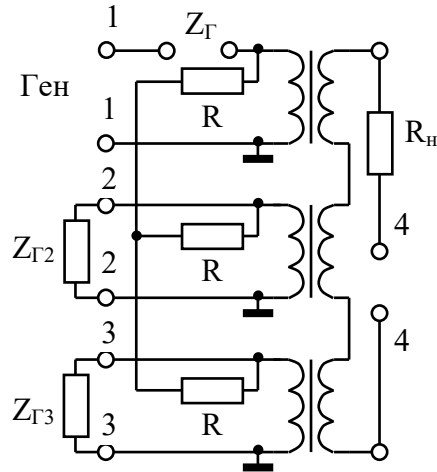


Рис.6. Многополюсная развязывающая схема

Развязка отдельных направлений обеспечивается компенсирующим током, ответвляемым через балансное сопротивление  $R$  данного направления и далее параллельно через остальные сопротивления  $R$  к трансформаторам других направлений.

Если развязка обеспечена, то при подключении источника тока, например, к первому трансформатору, магнитные потоки во всех остальных трансформаторах будут скомпенсированы, и ток в сторону остальных источников тока ( $Z_{Г}$ ) поступать не будет, т.е. затухание развязки будет равно бесконечности. Затухание рассматриваемой развязывающей системы в любом направлении пропускания, т.е. от зажимов общей нагрузки к любому независимому направлению и обратно, равно  $a = 10 \lg 3 = 4,8$  дБ (в общем случае при  $N$  трансформаторах  $a = 10 \lg N$ ).

### ***Применение дифференциальных систем в аппаратуре связи***

Равноплечие дифференциальные системы применяются для получения двухпроводного окончания канала ТЧ (рис. 7а) и для образования схемы двустороннего усилителя ДУ (рис. 7б). Следует обратить внимание на то, что в схеме (рис, 7а) к оконечным ДС подключаются городские линии, входное сопротивление которых будет разным для разных подключаемых абонентов, что не дает возможности обеспечить хорошую балансировку. Если в качестве балансного контура подключается активное сопротивление, равное номинальному значению волнового сопротивления линии ( $Z_0 = 600$  Ом), то балансное затухание составляет  $\approx 5-8$  дБ. Для обеспечения достаточного запаса устойчивости канала от самовозбуждения остаточное затухание его принимается равным не менее 7 дБ. В двусторонних усилителях балансный контур выполняется, по одной из схем (рис. 7в).



Так как входное сопротивление линии, подключаемой к ДУ, имеет сложный волнообразный характер зависимости от частоты, балансное затухание ДС не превышает 30 дБ. Это ограничивает достижимую величину усиления и поэтому двухпроводные однополосные системы передачи применяются только в каналах ТЧ воздушных линий связи.

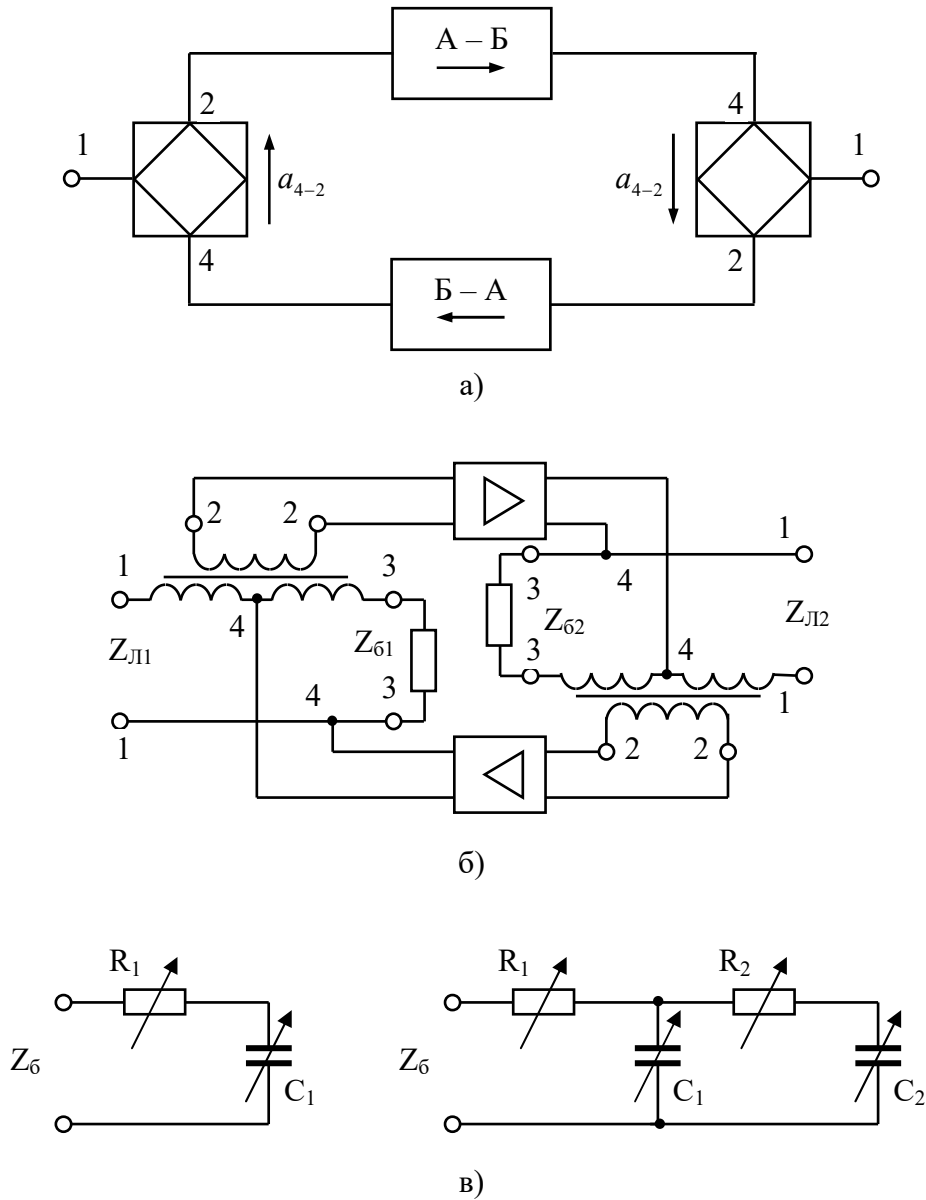


Рис. 7. Применение дифференциальных схем в аппаратуре связи

Неравноплечие дифференциальные системы применяются в качестве развязывающих устройств для подключения к основному тракту передачи сигналов вспомогательных устройств. При этом важно, чтобы включение дифференциальной системы вносило минимальное затухание в основной тракт, т. е. чтобы одно из направлений пропускания ДС имело минимальное затухание, в то время как в тракте передачи (или приема) дополнительных сигналов затухание ДС может быть несколько большим. При этом

тракты основных и дополнительных сигналов должны быть развязаны, т. е. между зажимами, к которым подключаются эти тракты, надо обеспечить наибольшее затухание (направление задерживания).

Примером использования неравноплечих ДС в аппаратуре систем передачи может служить введение в групповой тракт сигнала вещания в СИП-60, сигнала контрольного тока первичной группы 84,14 кГц, подключение к выходу каждого канала приемника тонального набора и вызова (ПТНВ). Неравноплечие ДС используются для подключения измерительных приборов к трактам передачи сигналов так, чтобы это подключение не изменило затухания в этих трактах.

Неравноплечие дифференциальные системы включаются внутри самой аппаратуры, для них обычно несложно обеспечить практически активные и постоянные нагрузочные сопротивления и тем самым добиться высокой степени балансировки для нужного направления задерживания.

### 3.2. Методические указания к выполнению расчетной части

Предварительный расчет производится для схем, представленных на рис. 4.8. При расчете всех параметров трансформаторной ДС (рис. 8а) следует пользоваться сводкой формул, приведенных в табл. 1. Сопротивление  $Z_1$  задано равным 1000 Ом для равноплечей и неравноплечей ДС. Количество витков обмоток трансформатора следующее:  $W_2 = 500$ ;  $W_{1a} = 250$ ;  $W_{1б} = 250$ ;  $W_{3a} = 250$ ;  $W_{3б} = 250$ . Для образования равноплечей ДС на макете следует соединить перемычкой гнезда 0 и В, для образования неравноплечей ДС соединяются гнезда 0 и А. Тогда для равноплечей ДС

$$m = \frac{W_{3a} + W_{3б}}{W_{1a} + W_{1б}},$$

для неравноплечей

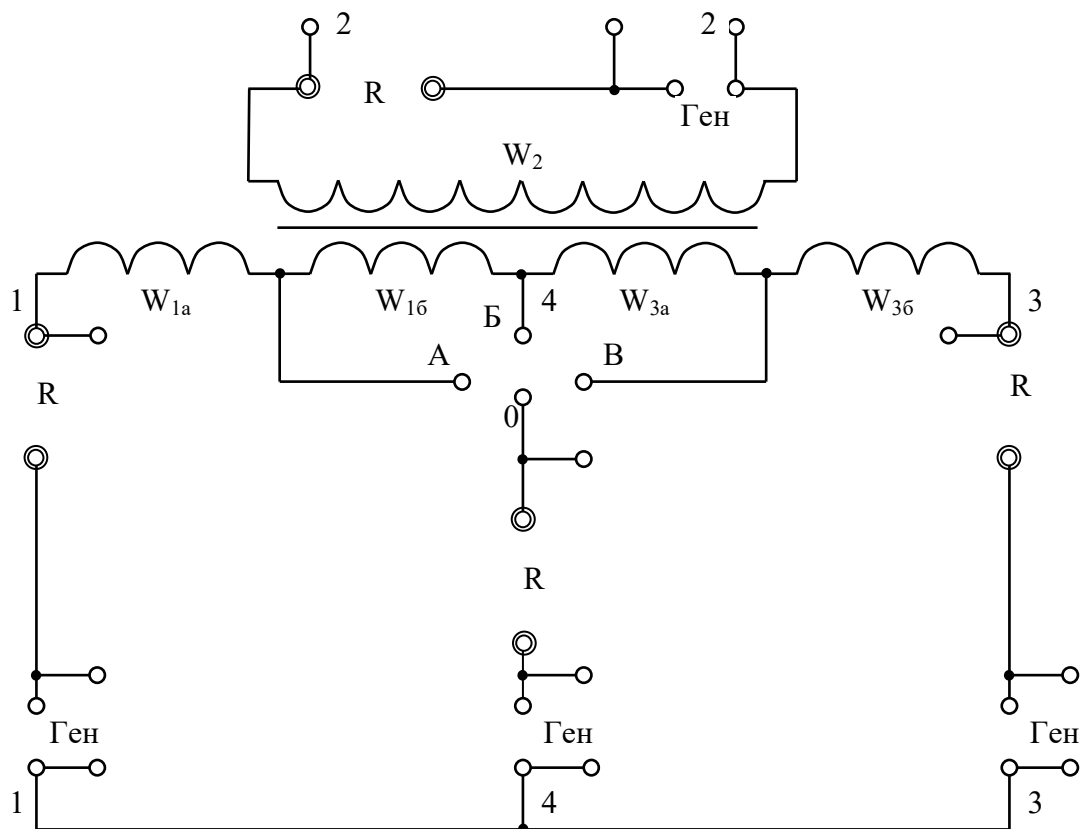
$$m = \frac{W_{3a} + W_{3б} + W_{1б}}{W_{1a}};$$

$$n = \frac{W_2}{W_{1a} + W_{1б} + W_{3a} + W_{3б}}$$

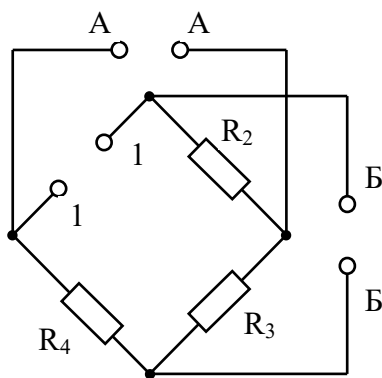
для обоих случаев.

По п.3 затухание  $a_{4-2}$  следует рассчитать при значениях балансного сопротивления  $Z_3$ : 5000; 2000; 1000; 800; 500; 0 Ом.

Для дифференциальной системы на сопротивлениях, схема которой приведена на рис. 8б, следует считать, что  $R_2 = R_3 = R_4 = 600$  Ом;  $Z_1 = 600$  Ом.



а)



б)

Рис. 8. Схема макета для проведения лабораторной работы

### 3.3. Методические указания к выполнению экспериментальной части

Измерение рабочего затухания ДС производится по схеме, приведенной на рис. 4.9а.

При измерении затухания дифференциальной системы в различных направлениях передачи в качестве входных зажимов используется одна из пар внешних зажимов ДС, а в качестве выходных – другая пара. При этом к другим двум парам подключаются согласованные нагрузки

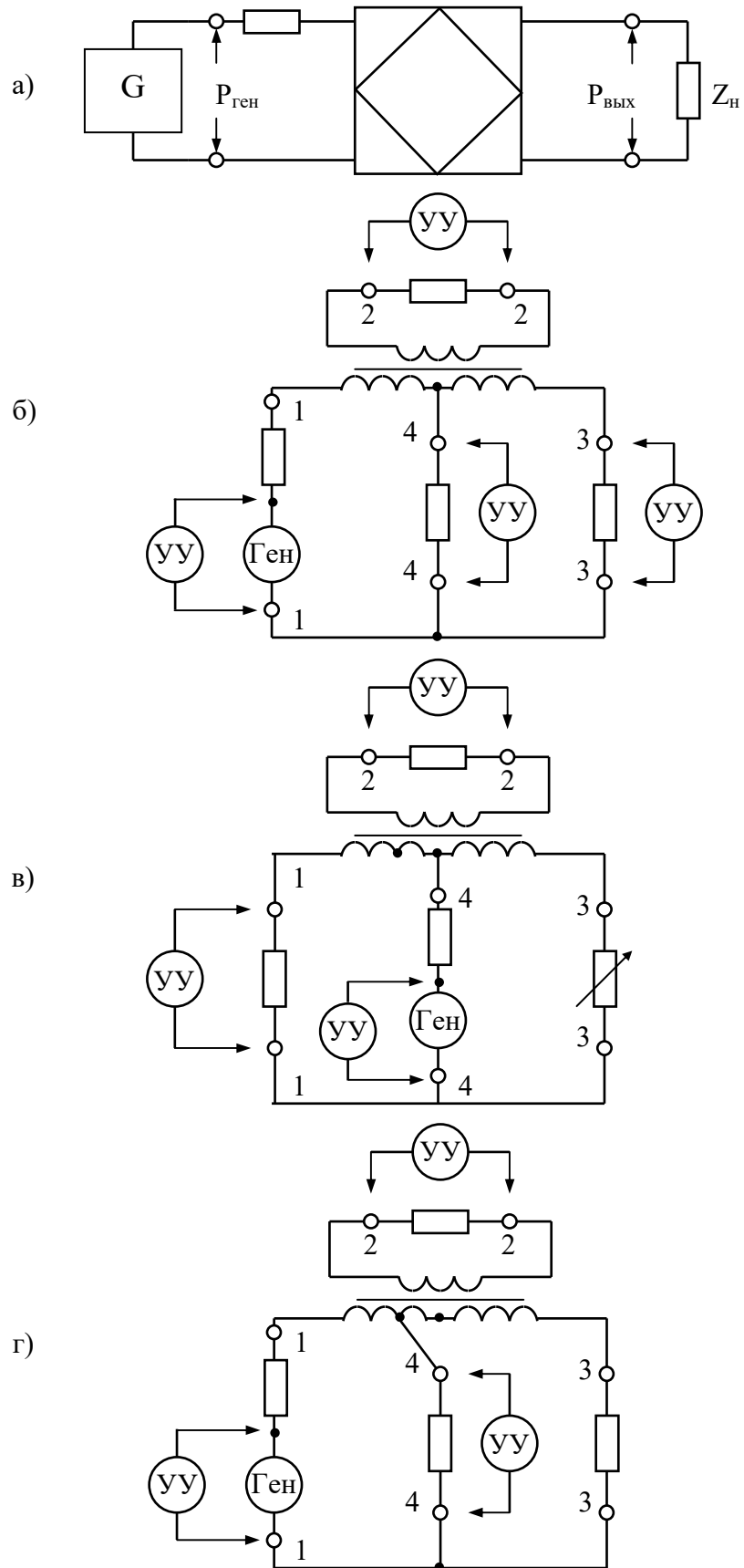


Рис. 9. Схемы проведения экспериментальных исследований ДС

(предварительно рассчитанные). Рабочее затухание ДС следует измерять при согласованных нагрузках со стороны ее входа и выхода. Так, при измерении затухания  $a_{1-4}$  входными зажимами являются зажимы 1–1, а выходными 4–4. Тогда  $Z_{Г} = Z_1, Z_{Н} = Z_4$  (рис. 9б). К гнездам «Ген.» со стороны 1–1 подключается измерительный генератор с частотой 0,8 кГц, встроенный в лабораторную стойку. На измерителе уровня, расположенном в той же стойке, устанавливают высокоомное входное сопротивление и измеряют уровень  $p_{ген}$  на гнездах «Ген.» со стороны зажимов 1–1 и уровень  $p_{вых}$  на гнездах «R» со стороны зажимов 4–4, где подключено сопротивление  $Z_4$ . Затухание, дБ, вычисляется по формуле

$$a = p_{ген} - p_{вых} - 6 + 10 \lg \frac{Z_{Н}}{Z_{Г}}.$$

Аналогично производят измерения затухания в других направлениях передачи, Результаты измерений затухания вместе с предварительно рассчитанными параметрами заносят в табл. 2.

Таблица 2

Тип ДС	Направление передачи	$p_{ген}$ , дБ	$p_{вых}$ , дБ	$Z_{Н}$ , Ом	$Z_{Г}$ , Ом	$10 \lg \frac{Z_{Н}}{Z_{Г}}$	$a_{расч}$ , дБ	$a_{изм}$ , дБ
Равноплечая	1-2							
	1-4							
	1-3							
Неравноплечая	1-2							
	1-4							

Для упрощения расчетов при измерении затухания в направлении пропускания удобно установить уровень  $p_{ген} = 0$  дБ. При измерении затухания в направлении задерживания на выходе генератора следует установить максимально возможный уровень ( $p_{ген\ max}$ ). Заданные значения балансного сопротивления устанавливают на магазине сопротивлений (расположенном на лабораторной стойке), который подключается со стороны зажимов 3–3. Результаты измерений и предварительный расчет заносятся в табл.3.

Измерение модуля входного сопротивления ДС производится по схеме, приведенной на рис. 10.

К гнездам «Ген.» со стороны зажимов 1–1 (измеряется сопротивление  $|Z_{вх}|$ ) подключается измерительный генератор с частотой 0,8 кГц. К гнездам «R» со стороны 1–1 подключается магазин сопротивлений. Все, остальные зажимы ДС (2–2, 4–4) нагружаются на расчетные сопротивления. Изменяя сопротивление магазина сопротивлений, добиваются такого значения  $R$ , при котором уровень на нем и на входе ДС будут равны (измерения произ-

водятся указателем уровня с высокоомным входом). При этом модуль входного сопротивления ДС будет равен величине сопротивления, установленного на магазине  $|Z_{вх}| = R$ . Измерения производятся для трех значений  $Z_3$ : 1000 Ом, 0,  $\infty$ . Результаты измерений заносятся в табл. 4.

Таблица 3

$Z_3$ , Ом	$p_{ген}$ , дБ	$p_{вых22}$ , дБ	$p_{вых11}$ , дБ	$10\lg \frac{Z_2}{Z_4}$	$10\lg \frac{Z_1}{Z_4}$	$a_{4-2 \text{ изм}}$ , дБ	$a_{4-1 \text{ изм}}$ , дБ	$a_{4-2 \text{ расч}}$ , дБ	$a_{4-1 \text{ расч}}$ , дБ
5000									
2000									
1000									
800									
500									
0									

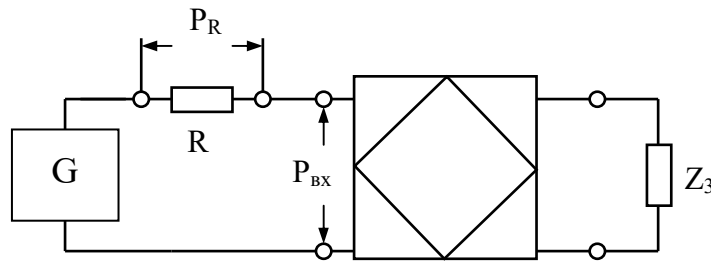


Рис. 10. Схема измерения модуля входного сопротивления ДС

Таблица 4

Условия измерения	$Z_3 = 1000 \text{ Ом}$	$Z_3 = 0$	$Z_3 = \infty$
$ Z_{вх} $ , Ом			

Как уже было сказано выше, измеряемая ДС на сопротивлениях приведена на рис. 8б ( $R_2 = R_3 = R_4 = 600 \text{ Ом}$ ;  $Z_1 = 600 \text{ Ом}$ ).

При измерении затухания ДС в направлении задерживания  $a_{A-B}$  генератор (с внутренним сопротивлением 600 Ом) частотой 0,8 кГц, с уровнем  $p_{ген}$  подключается к гнездам А-А, а измеритель уровня к гнездам Б-Б. Гнезда 1-1 нагружаются на  $Z_1 = 600 \text{ Ом}$ . В этом случае

$$a_{A-B} = p_{ген} - p_{B-B}, \text{ дБ}.$$

Для измерения затухания в направлении А-1 (направление пропуска) к гнездам 1-1 подключается генератор с уровнем  $p_{ген}$ , к гнездам А-А - измеритель уровня. Гнезда Б-Б нагружаются на 600 Ом

$$a_{A-1} = p_{gen} - p_{A-A}, \text{ дБ.}$$

Во всех этих измерениях выходное сопротивление генератора и входное сопротивление указателя уровня устанавливаются равными 600 Ом.

#### 4. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

Отчет должен содержать:  
схемы развязывающих устройств трех типов;  
структурные схемы измерений затухания и входного сопротивления ДС;  
таблицы расчетных и измеренных параметров;  
результаты расчета и измерения затухания развязки трансформаторной ДС, представленные графически;  
анализ результатов экспериментальных исследований.

#### Контрольные вопросы

1. Пояснить, почему затухание идеальной уравновешенной ДС в направлении 4-2 будет бесконечно большим.
2. Будет ли зависеть входное сопротивление идеально уравновешенной ДС со стороны зажимов 4-4 от величины сопротивления, подключенного к зажимам 2-2?
3. Почему подключение двухпроводной городской телефонной линии к четырехпроводной части канала ТЧ должно осуществляться с помощью развязывающего устройства?
4. Чем вызваны трудности балансировки оконечных дифференциальных систем?
5. Чем вызваны трудности балансировки ДС, использующихся в промежуточных усилителях однополосной двухпроводной системы связи?
6. Преимущества и недостатки ДС на сопротивлениях.
7. Где используются неравноплечие ДС?