РАСЧЕТ ДОБАВОЧНЫХ СОПРОТИВЛЕНИЙ ПРИ УРАВНОВЕШИВАНИИ ИЗБИРАЮЩЕГО СИГНАЛА НА ВХОДАХ РАССРЕДОТОЧЕННЫХ ВДОЛЬ ЛИНИИ СВЯЗИ КОНТРОЛИРУЕМЫХ ПУНКТОВ В МНОГОПРОВОДНЫХ КОДОВЫХ ИНФОРМАЦИОННЫХ УСТРОЙСТВАХ

А. Г. Мелик-Аскаров

Киев

В реальных условиях эксплуатации контролируемые пункты (КП) устройства с любым числом телеячеек (ТЯ) в каждом могут быть как угодно рассредоточены вдоль линии. При этом максимальное затухание сигнала, т. е. значение нижнего — отпирающего $U_{0(-)}$ и верхнего — запирающего $U_{з(+)}$ уровней потенциалов в кодовых шинах для заданного общего числа телеячеек, нагружающих линию, находится в области, ограниченной двумя предельными режимами нагрузки линии связи [1]. Другими словами, максимальное затухание сигнала для любого рассредоточения нагрузки вдоль линии всегда меньше, чем для

наиболее неблагоприятного предельного режима, когда все телеячейки, нагружающие линию, сосредоточены в конце ее. Общее затухание сигнала в линии может быть еще более существенно уменьшено благодаря снижению затухания, вносимого промежуточными ветвями (КП) системы. Это достигается путем введения в последние дополнительных уравновешивающих сопротивлений R_{yi}, где $i=1, 2, ..., j$ — номер ветви или КП (рис. 1). Уравновешенная (с введениями R_{yi}) система имеет следующие преимущества по сравнению с неуравновешенной:

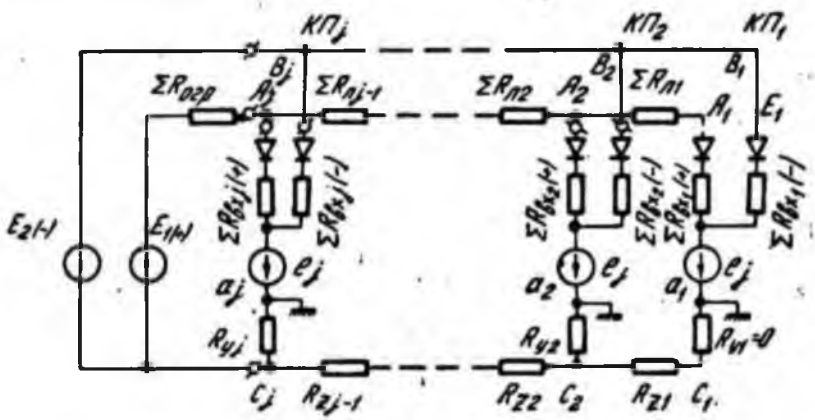


Рис. 1. Полная эквивалентная схема контура избирания устройства для рассредоточенных КП.

1. Уменьшается общее затухание сигнала в линии связи, в результате чего значение $U_{э(+)min}$ в конце линии связи устанавливается более высоким, чем в неуравновешенной системе. При одинаковых других условиях это обеспечивает большую помехоустойчивость телеячеек КП, а для заданного затухания $b_н$ и уровня сигнала $U_{э(+)}$ в конце линии связи позволяет снизить соответственно уровень кодового сигнала $E_{1(+)}$ на ее входе.

2. В результате повышения сопротивления промежуточных ветвей значительно уменьшается ток в шине «земля» в начале линии связи, что особенно важно при эксплуатации устройства в агрессивной взрывоопасной среде.

3. Уровень сигналов $U_{э(+)}$ и $U_{о(-)}$ на полезных нагрузках всех КП между точками A_i и a_i (рис. 1) устанавливается одинаковым, что обеспечивает более благоприятные условия работы аппаратуры.

В системе с рассредоточенными вдоль линии нагрузками R_{yi} можно рассчитать методом подбора, предварительно задав, возможно несколькими пробами, средний уравновешенный ток или напряжение на полезных нагрузках $\Sigma R_{вхi}$ в ветвях системы и использовав в качестве математического аппарата любой известный классический метод расчета: метод контурных токов, метод узловых потенциалов, метод графов и пр. Однако при большом числе ветвей (контролируемых пунктов) расчет R_{yi} посредством известных классических методов является громоздким и трудоемким.

Учитывая, что все источники э. д. с. контролируемых пунктов e_i равны и включены в одном направлении, предлагаются следующая упрощенная методика и аналитические выражения для расчета R_{yi}, I_i и соответственно уравновешенных избирающих потенциалов $U_{э(+)}$ и $U_{о(-)}$ на полезных нагрузках ($КП_i$) во всех ветвях системы:

1. По методике, изложенной в работе [1], составляем полную эквивалентную схему контура избирания устройства, соответствующую реальной линии связи с рассредоточенными контролируемыми пунктами (рис. 1), и определяем параметры полной эквивалентной схемы (переходные коэффициенты).

Суммарное входное сопротивление каждого контролируемого пункта (нагрузки линии)

$$\Sigma R_{\text{вх}i(+)} = \frac{R_{\text{и}}}{N-1}. \tag{1}$$

Суммарное ограничивающее сопротивление на входе кодовых шин линии связи

$$\Sigma R_{\text{огр}} = \frac{R_{\text{огр}}}{n}. \tag{2}$$

Суммарное сопротивление кодовых шин линии связи между соседними КП

$$\Sigma R_{\text{л}i} = \frac{R_{\text{л}}}{n}. \tag{3}$$

Сопротивление шины «земля» между соседними КП

$$R_{zi} = \frac{R_{\text{л}i}}{k}. \tag{4}$$

В выражениях (2) и (3) n — число кодовых шин, передающих потенциал $U_{\text{з}(+)}$ или $U_{\text{о}(-)}$,

$$n = E(\log_2 N_{\text{об}}),$$

где $E(\log_2 N_{\text{об}})$ — округление $\log_2 N_{\text{об}}$ до верхнего целого числа при $N \geqslant 2$. В выражениях (3) и (4) $R_{\text{л}}$ — сопротивление кодовой шины между соседними КП,

$$R_{\text{л}i} = \rho L_i.$$

Исходными для определения переходных коэффициентов по формулам (1) — (4) являются следующие данные:

ρ — сопротивление 1 *км* токопроводящей жилы кабеля постоянному току;

L_i — расстояние между двумя соседними КП_i;

$R_{\text{огр}}$ — ограничивающее сопротивление в каждой кодовой шине;

$N_{\text{об}}$ — общее число телеячеек, нагружающих линию;

N — число телеячеек, сосредоточенных в каждом КП_i;

$R_{\text{и}}$ — входное сопротивление одной телеячейки;

k — число шин, передающих потенциал земли;

$E_{1(+)}$ и $E_{2(-)}$ — соответственно верхний и нижний потенциальные уровни кодовых сигналов, коммутируемых в кодовые шины от источников на ПУ;

e_i — напряжение питания телеячеек, сгруппированных в одном КП_i;

$R_{\text{ист}}$ — внутреннее сопротивление источников $E_{1(+)}, E_{2(-)}$.

2. Определяем необходимое значение величин добавочных уравновешивающих сопротивлений $R_{\text{у}i}$ каждой i-й ветви.

Расчет R_{yi} необходимо вести, начиная с наиболее удаленной от источника $E_{1(+)}$ правой ветви (нагрузки) системы, последовательно определяя величины R_{yi} каждой левой ветви (рис. 1).

Расчет заключается в последовательном пошаговом определении приведенных входных сопротивлений R_{ni} каждой i-й ветви, уравновешенной с суммарной величиной сопротивления $\Sigma R_{эi-1}$ эквивалентной схемы нагруженной линии правее i-й ветви. Величина необходимого добавочного сопротивления R_{yi} каждой i-й ветви определяется как разность величин R_{ni} и $\Sigma R_{вхi(+)}$.

Значения R_{ni} и R_{yi} на каждом шаге расчета находятся из общих выражений (5) для ветви $i=2$ и (6) для каждой последующей левой ветви $i \geqslant 3$ ($i=3, 4, \ldots, j$).

1-й шаг:

$$\Sigma R_{э1} = \Sigma R_{вх1(+)} + \Sigma R_{л1} + \Sigma R_{г1},$$

$$R_{n2} = \Sigma R_{э1} \cdot \frac{\Sigma R_{вх2(+)}}{\Sigma R_{вх1(+)}}, \qquad (5)$$

$$R_{y2} = R_{n2} - \Sigma R_{вх2(+)}.$$

k-й шаг:

$$\Sigma R_{эi-1} = \frac{R_{ni-1}}{P_{i-1}} + \Sigma R_{л}{}'_{i-1} + \Sigma R_{гi-1},$$

$$R_{ni} = \Sigma R_{эi-1} \cdot P_{i-1} \cdot \frac{\Sigma R_{вхi(+)}}{\Sigma R_{вхi-1(+)}}, \qquad (6)$$

$$R_{yi} = R_{ni} - \Sigma R_{вхi(+)},$$

где

$$P_{i-1} = \frac{R_{ni-1} + \Sigma R_{эi-2}}{\Sigma R_{эi-2}}.$$

Физический смысл уравновешивания системы, послуживший основанием для вывода аналитических выражений (5), (6) и полностью описываемый ими, заключается в последовательном определении такой величины сопротивления R_{ni} каждой i-й ветви, при которой соответствующее распределение токов в правых ветвях схемы, включая i-ю ветвь, обеспечило бы одинаковое падение напряжения, т. е. равные значения $U_{э(+)}$ и $U_{0(-)}$ на полезных нагрузках $\Sigma R_{вхi}$, $\Sigma R_{вхi-1}$ ... этих ветвей.

Коэффициент P_{i-1} в выражении (6) показывает, во сколько раз сумма двух параллельных сопротивлений R_{ni-1} и $\Sigma R_{эi-2}$ меньше сопротивления R_{ni-1}.

Произведение $\Sigma R_{эi-1} \cdot P_{i-1}$ определяет такое значение R_{ni}, при котором токи от источника $E_{1(+)}$ в двух соседних ветвях i и $i-1$, уравновешиваемых на данном шаге расчета, равны. Отношение $\frac{\Sigma R_{вхi(+)}}{\Sigma R_{вхi-1(+)}}$ обусловливает значение R_{ni}, при котором токи в ветвях i и $i-1$ распределяются обратно пропорционально сопротивлениям $\Sigma R_{вхi}$ и $\Sigma R_{вхi-1}$ — полезных нагрузок этих ветвей.

Расчетные значения R_{yi}, найденные для всех ветвей по формулам (5), (6), полностью уравновешивают систему по напряжению на полезных нагрузках $\Sigma R_{вхi}$ независимо от величин этих нагрузок и их расположения вдоль линии.

Однако, учитывая, что источник $E_{1(+)}$, задающий ток в ветвях системы, находится слева от уравновешиваемых ветвей, нетрудно понять, что граничное токораспределение в правых ветвях, которое еще обеспечивает заметное повышение $U_{э(+)}$ в конце линии, определится при $R_{пi} = \sum R_{эi-1} \cdot P_{i-1}$. Если $\sum R_{вхi} \gg \sum R_{вхi-1}$ — расчетное значение величины $R_{пi}$, необходимое для уравновешивания соседних ветвей, по напряжению становится таким, что оно, практически не снижая затухания сигнала в линии, вызовет значительное уменьшение тока в i-ой ветви, то это может отразиться на работоспособности аппаратуры контролируемого пункта этой ветви. Поэтому целесообразно при указанном распределении полезных нагрузок в соседних ветвях, т. е. при $\sum R_{вхi} \gg \gg \sum R_{нхi-1}$, пойти на компромиссное решение и ввести соответствующее ограничение на $R_{уi}$, вводимое в эту i-ю ветвь. Исходя из изложенного, рекомендуется в процессе расчета системы для ветвей, у которых $\sum R_{вхi} \gg \sum R_{вхi-1}$, дополнительно проверить условие $R'_{уi} = \sum R_{эi-1} \cdot P_{i-1} - \sum R_{вхi(-)}$. Если окажется, что величина $R'_{уi} < 0$, то в данную ветвь добавочное $R_{уi}$ вводить не следует. Естественно, что при этом все ветви системы, кроме тех, в которые преднамеренно не введено $R_{уi}$, будут уравновешены между собой по напряжению.

3. Для случаев, когда нагрузка в рассредоточенных КП распределена равномерно, т. е. $\sum R_{вх1} = \sum R_{вх2} = \ldots = \sum R_{вхj}$, необходимую величину $R_{уi}$ можно рассчитывать по упрощенным выражениям (7), (8), полученным из общих выражений (5), (6), так как при этом в (5) и (6) отношение $\frac{\sum R_{вхi(+)}}{\sum R_{вхi-1(+)}} = 1$, а коэффициент $P_{i-1} = i-1$.

1-й шаг:

$$R_{п2} = \Sigma R_{э1} = \sum R_л + \Sigma R_з + \Sigma R_{вх1(+)},$$
$$R_{у2} = R_{п2} - \Sigma R_{вх2(+)}. \qquad (7)$$

k-й шаг:

$$\sum R_{эi-1} = \frac{R_{пi-1}}{i-1} + \sum R_{лi-1} + \sum R_{зi-1},$$
$$R_{пi} = \sum R_{эi-1} \cdot (i-1), \qquad (8)$$
$$R_{уi} = R_{пi} - \sum R_{вхi(+)},$$

где $i \geqslant 3$ ($i = 3, 4, \ldots, j$) — номер уравновешиваемой ветви (КП), считая от правого конца схемы (рис. 1).

4. Определяем установившиеся значения запирающего $U_{э(+)}$ и отпирающего $U_{0(-)}$ потенциалов на полезных нагрузках $\sum R_{вхi}$ (на входах КП$_i$), а также величины токов I_i в ветвях уравновешенной системы.

Анализ выражений (5) — (8) показывает, что в уравновешенной посредством ввода расчетных значений $R_{уi}$ системе установившиеся уровни $U_{э(+)i}$ и $U_{0(-)i}$ на полезных нагрузках $\sum R_{вхi}$ между точками A_i, a_i и B_i, a_i (рис. 1) при любом числе ветвей системы можно определить по свернутой эквивалентной схеме (рис. 2). И, действительно, если система уравновешена, то очевидно

$$U_{э(+)1} = U_{э(+)2} = \ldots = U_{э(+)i},$$

и

$$U_{0(-)1} = U_{0(-)2} = \ldots = U_{0(-)i}.$$

Ветвь A_jC_j (рис. 2) включает в себя приведенное входное сопротивление $R_{вj}$ крайней левой j-й ветви системы, а ветвь A_{j-1}, C_{j-1} – суммарное значение эквивалентного сопротивления $\Sigma R_{в\,j-1(+)}$ всех уравновешенных правых ветвей системы. Обе величины $R_{вj}$ и $\Sigma R_{в\,j-1\,(+)}$ в соответствии с изложенной методикой определяются из выражений (5) — (8) на последнем шаге расчета.

Согласно работе (1) величина $U_{э(+)}$ с достаточной точностью может быть определена без учета контуров тока отпирающего потен-

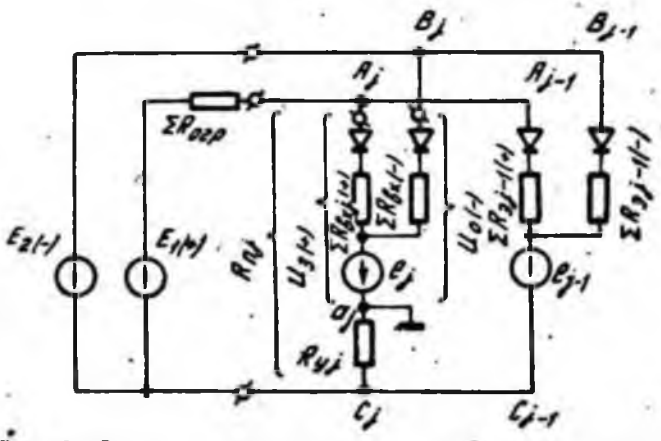


Рис. 2. Свернутая эквивалентная схема контура избирания устройства для рассредоточенных КП.

циала от источника $E_{2(-)}$. Следовательно, расчет $U_{э(+)j}$ между точками A_j, a_j по свернутой эквивалентной схеме (рис. 2) сводится к расчету двухконтурной цепи с ветвями A_jC_j и $A_{j-1}C_{j-1}$. Этот расчет не представляет труда и может быть осуществлен любым известным классическим методом.

Величина тока в каждой i-ой ветви для системы с равными полезными нагрузками $\sum R_{вх1} = \Sigma R_{вх2} = \ldots = \Sigma R_{вхj}$, определится при расчете значения $U_{э(+)j}$, так как в этом случае

$$I_1 = I_2 = \ldots = I_j.$$

В системе с неравными нагрузками величину тока в каждой i-й ветви можно найти из выражения

$$I_i = \frac{e_i + U_{э(+)}}{\Sigma R_{вхi}}.$$

Величина отпирающего потенциала $U_{0(-)}$ определится из выражения

$$U_{0(-)} = -E_{2(-)} - I_{A_jC_j} \cdot R_{уj},$$

где $E_{2(-)}$ — нижний потенциальный уровень кодового сигнала на входе линии со стороны ПУ;

$I_{A_jC_j}$ — определяемый по свернутой эквивалентной схеме ток крайней левой j-ветви системы;

$R_{уj}$ — уравновешивающее сопротивление крайней левой j-ой ветви A_jC_j системы.

Результаты расчета, проведенного по изложенной методике, были проверены на лабораторном макете в условиях, максимально прибли-

женных к реальным. В макете параметры кабеля были имитированы набором сопротивлений и емкостей на каждый километр жилы кабеля. В качестве нагрузки использовались реальные телеячейки устройства.

Экспериментальные зависимости, полученные на макете, хорошо согласуются с расчетными, что подтверждает достоверность предложенных аналитических выражений. Расчетные и экспериментальные дан-

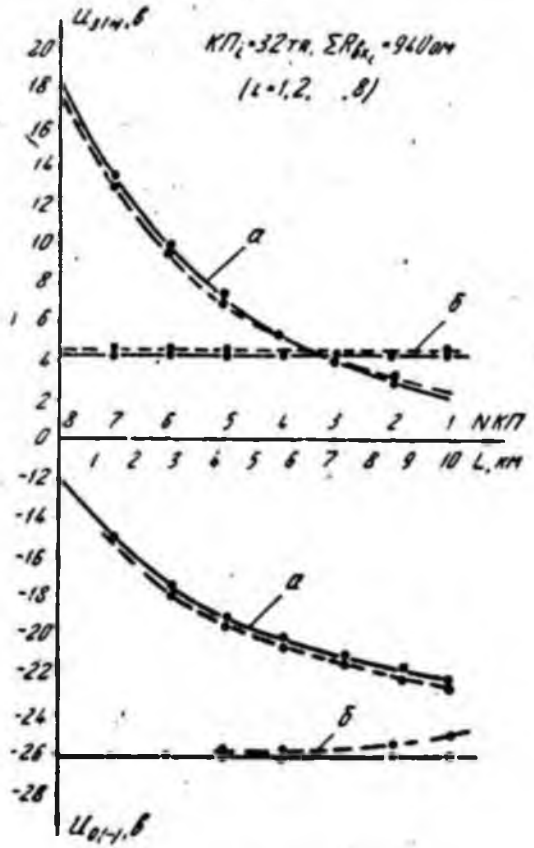


Рис. 3. Зависимости $U_{y(+)}$ и $U_{0(-)}$ на входах КП неуравновешенной и уравновешенной системы при $\Sigma R_{вх1} = \Sigma R_{вх2} = \ldots = \Sigma R_{вхn}$: *а* — зависимость без R_{yi}, б — зависимость с введенными R_{yi}

ные для некоторых характерных режимов нагрузки КП вдоль линии приведены ниже.

Пример расчета. Общие исходные данные: $L = 10$ *км*, $\rho = 86$ *ом/км*; $k = 4$; $R_{огр} = 500$ *ом*; $R_н = 30$ *ком*; $e_i = -6$*в*; $E_{1(+)} = +24$ *в*; $E_{2(-)} = -12$*в*; $R_{ист} = 1$ *ом*; $N_{об} = 256$.

Условие 1. Нагрузки (КП) рассредоточены вдоль линии равномерно $\Sigma R_{вх1} = \Sigma R_{вх2} = \ldots = -\Sigma R_{вхj}$ и находятся на равном расстоянии одна от другой.

Дополнительные исходные данные:

1. Количество КП, рассредоточенных вдоль линии, — восемь.
2. Число телеячеек, сосредоточенных в каждом

$$КП_i - 32 (i = 1, 2, \ldots, 8).$$

3. Расстояние между соседними КП$_i$: $L_i = 1,4$ *км* ($i = 1, 2, \ldots, 7$).

Расчетные данные:

1. Параметры полной эквивалентной схемы контура избирания устройства (рис. 1) находим по формулам (1) — (4):

$$\Sigma R_{\text{огр}} = 62{,}5 \text{ ом},$$

$$\Sigma R_{\text{вх1}} = \Sigma R_{\text{вх2}} = \ldots = \Sigma R_{\text{вх8}} = 910 \text{ ом},$$

$$\Sigma R_{л1} = \Sigma R_{л2} = \ldots = \Sigma R_{л7} = 15{,}4 \text{ ом},$$

$$\Sigma R_{z1} = \Sigma R_{z2} = \ldots = \Sigma R_{z7} = 30{,}7 \text{ ом}.$$

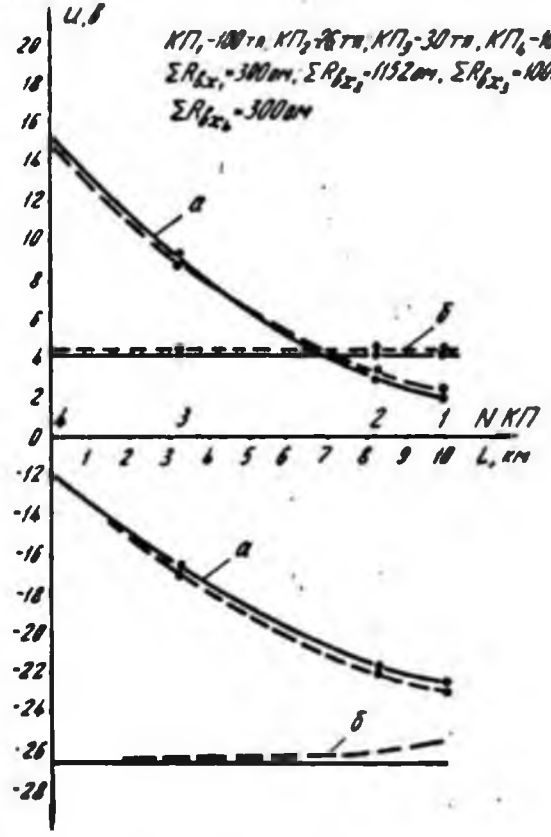


Рис. 4. Зависимость $U_{з(+)}$ и $U_{н(-)}$ на входах КП неуравновешенной и уравновешенной системы при $\Sigma R_{\text{вх4}} < \Sigma R_{\text{вх3}} < \Sigma R_{\text{вх2}} > \Sigma R_{\text{вх1}}$:
а — зависимость без R_{yi}; *б* — зависимость с введенными R_{yi}.

2. Уравновешивающие сопротивления R_{yi} в ветвях системы получаем по формулам (7), (8):

$$R_{y2} = 0;\ R_{y2} = 46 \text{ ом};\ R_{y3} = 138 \text{ ом};\ R_{y4} = 270 \text{ ом};$$

$$R_{y5} = 454 \text{ ом};\ R_{y6} = 680 \text{ ом};\ R_{y7} = 861 \text{ ом};\ R_{y8} = 1.283 \text{ ом}.$$

3. Параметры свернутой эквивалентной схемы (рис. 2) определяем на последнем шаге расчета R_{yi} по формулам (7), (8):

$$\Sigma R_{э7} = 317{,}5 \text{ ом};\ R_{пк} = 2223 \text{ ом};\ R_{y8} = 1{,}283 \text{ ом}.$$

4. Значения уравновешенных уровней потенциалов на входах $КП_l$ $U_{з(+)}$ и $U_{о(-)}$ находим соответственно по свернутой эквивалентной схеме (рис. 2) методом контурных токов и по формуле (10):

$$U_{з(+)} = U_{з(+)1} = U_{з(+)2} = \ldots = U_{з(+)8} \approx +4{,}4b,$$

$$U_{о(-)} = U_{о(-)1} = U_{о(-)2} = \ldots = U_{о(-)8} \approx -26b.$$

На графике (рис. 3) для заданного условия 1 приведены расчетные и экспериментальные зависимости величин $U_{з(+)}$ и $U_{о(-)}$ для неуравновешенной (без $R_{уl}$) и уравновешенной системы с введенными в соответствующие ветви ($КП_l$) расчетными значениями $R_{уl}$. Экспериментальные зависимости показаны штрихпунктирными линиями.

Условие 2. Нагрузки (КП) рассредоточены вдоль линии неравномерно $\Sigma R_{вх4} < \Sigma R_{вх3} < \Sigma R_{вх2} > \Sigma R_{вх1}$ и находятся на неодинаковом расстоянии одна от другой.

Дополнительные исходные данные:

1. Количество КП, рассредоточенных вдоль линии, — четыре.
2. Число телеячеек, сосредоточенных в каждом КП:

$$КП_1 — 100;\ КП_2 — 26;\ КП_3 — 30;\ КП_4 — 100.$$

3. Расстояние между соседними КП:

$$L_1 = 1{,}7\ км;\ L_2 = 5\ км;\ L_3 = 3{,}3\ км.$$

Расчетные данные:

1. Параметры полной эквивалентной схемы контура избирания устройства (рис. 1) получаем по формулам (1) — (4):

$$\Sigma R_{огр} = 62{,}5\ ом,$$
$$\Sigma R_{вх1} = 300\ ом,\ \Sigma R_{вх2} = 1152\ ом,$$
$$\Sigma R_{вх3} = 1000\ ом,\ \Sigma R_{вх4} = 300\ ом.$$

2. Уравновешивающие сопротивления $R_{уl}$ в ветвях системы находим по формуле (5), (6):

$$R_{у1} = 0,\ R_{у2} = 210\ ом,\ R_{у3} = 865\ ом,\ R_{у4} = 430\ ом.$$

3. Параметры свернутой эквивалентной схемы (рис. 2) определяем на последнем шаге расчета $R_{уl}$ по формулам (5), (6):

$$\Sigma R_{э3} = 464\ ом;\ R_{п4} = 730\ ом;\ R_{у4} = 430\ ом.$$

4. Значения уравновешенных уровней потенциалов на выходах $КП_l$ $U_{з(+)}$, $U_{о(-)}$ и I_l находим соответственно по свернутой эквивалентной схеме (рис. 2) методом контурных токов и по формуле(10):

$$U_{з(+)} = U_{з(+)1} = \ldots = U_{з(+)4} = +4{,}2b,$$
$$U_{о(-)} = U_{о(-)1} = \ldots = U_{о(-)4} = -26{,}6b.$$

На графиках (рис. 4) для заданного условия 2 приведены расчетные и экспериментальные зависимости $U_{з(+)}$ и $U_{о(-)}$ для неуравновешенной (без $R_{уl}$) и уравновешенной системы с введенными в соответствующие ветви ($КП_l$), расчетными значениями $R_{уl}$. Экспериментальные зависимости показаны штрихпунктирными линиями.

ЛИТЕРАТУРА

1. А. Г. Мелик-Аскаров. Обоснование и расчет затухания избирающего сигнала для предельных режимов нагрузки линии связи многопроводных кодовых информационных устройств.