

## ЗАЗЕМЛЕНИЕ ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ ПРИ НАНОСЕКУНДНЫХ И МИКРОСЕКУНДНЫХ ИМПУЛЬСНЫХ ПОМЕХАХ

### Введение

Импульсные помехи (ИП) способны привести к выдаче ложных команд, изменениям информации, зависанию и даже к разрушению элементов современных технических средств (ТС). Требования стандартов на большинство ТС предусматривает проверку устойчивости ТС к ИП наносекундной и микросекундной длительности с параметрами по ГОСТ Р 51317.4.4 и ГОСТ Р 51317.4.5. Заземление корпуса ТС существенно влияет на его помехозащищенность. Неидеальность заземления при воздействии ИП приводит к появлению импульсного напряжения на корпусе ТС, которое оказывается помехой между всеми внешними связями ТС и корпусом. Эффективность фильтров для несимметричных помех во многом определяется качеством заземления. Индуктивность цепи заземления и емкость корпуса ТС важны для оценки амплитуды напряжения на корпусе. Для наносекундных ИП приходится учитывать волновой характер распространения помех по цепи заземления. Рассчитанные теоретически и полученные экспериментально данные позволяют оценить влияние параметров заземления на защищенность ТС от ИП.

### 1. Общие положения.

Заземление корпусов ТС с точки зрения электромагнитной совместимости (ЭМС) должно обеспечить равенство потенциалов корпусов, т.е. отсутствие напряжения между ними. Этого достигают соединением корпусов с единой проводящей поверхностью, например, с землей, которая наиболее доступна и используется для защитного заземления. На объектах с металлическим корпусом под заземлением подразумевается соединение корпусов ТС с корпусом объекта, например, с корпусом судна. Цепь заземления обычно выполняется проводом, металлической оплеткой, лентой или иной металлической конструкцией. Любые проводники обладают индуктивностью  $L_3$ , которая практически не сказывается на частоте 50 Гц, но определяет заземление на высокой частоте. При воздействии электромагнитного поля помех  $E$  на корпус ТС и на экраны внешних кабелей ЭК (рис. 1) появляется ток  $i$  в цепи заземления. Несимметричные помехи в кабелях питания также создают ток  $i$ , протекающий через конденсаторы фильтров в цепь заземления.

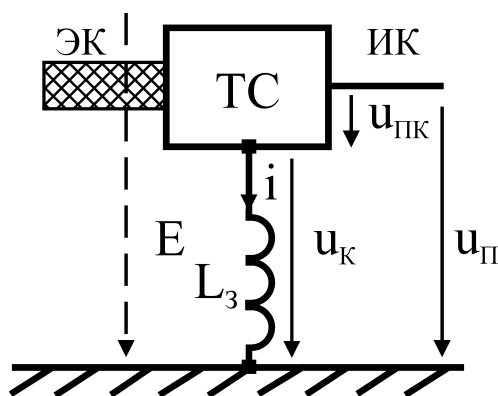


Рис.1. Возникновение помех между внешними цепями и корпусом  $u_{iE}$  из-за появления напряжения на корпусе  $u_E$  при протекании тока помех по индуктивности заземления  $L_3$ .

Ток создает падение напряжения на индуктивности заземления:

$$u_{\dot{E}} = L_{\zeta} \frac{di}{dt},$$

которое приводит к появлению напряжения помех между всеми внешними информационными кабелями ИК и корпусом ТС  $u_{i\dot{E}} = u_i - u_{\dot{E}}$ , даже при отсутствии напряжения помех  $u_i$  в информационном кабеле. Напряжение  $u_{i\dot{E}}$  воздействует на ТС как несимметричная помеха в цепях передачи информации и электропитания.

## 2. Параметры цепи заземления

Важнейшим параметром цепи заземления является индуктивность  $L_3$ , потому что она дает наибольший вклад в падение напряжения на высокой частоте помехи. При воздействии микросекундных импульсных помех цепь заземления может рассматриваться как сосредоточенная цепь.

Индуктивность прямолинейного провода кругового сечения определяется известной формулой [1]:

$$L = \frac{\mu_0 \mu_r l}{2\pi} \left( \ln \frac{2l}{r} - 1 \right),$$

где  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ Гн/м}$  - магнитная постоянная,  $\mu_r$  - относительная магнитная проницаемость вещества,  $l$  - длина провода,  $r$  - радиус его поперечного сечения.

Индуктивность тонкой ленты можно рассчитать по формуле [1]:

$$L = \frac{\mu_0 \mu_r l}{2\pi} \left( \ln \frac{2l}{0,24w} - 1 \right),$$

где  $w$  - ширина ленты.

Индуктивность контура прямоугольного контура  $a \times b$  из провода кругового сечения можно оценить по формуле [1]:

$$L = \frac{\mu_0 \mu_r l}{2\pi} \left( \ln \frac{2ab}{rl} - \frac{2a}{l} \ln \frac{a+d}{l} - \frac{2b}{l} \ln \frac{b+d}{l} + \frac{4d}{l} - 2 + \mu_r \frac{\zeta}{4} \right),$$

где  $r$  - радиус поперечного сечения провода,  $a$  и  $b$  - стороны контура,

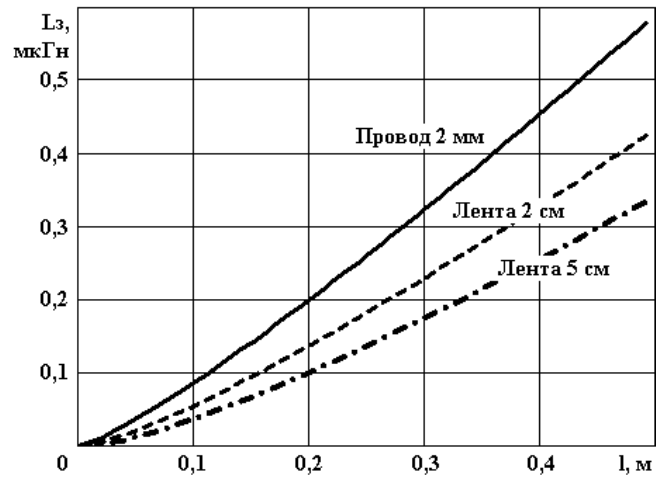
$d$  - его диагональ,  $l = 2(a+b)$ ,  $\zeta = \frac{1}{x} - \frac{3}{64x^3} - \frac{3}{128x^4} - \dots$ , где  $x = \frac{kr}{\sqrt{8}}$ ,  $k = \sqrt{\omega \times \mu \times \gamma}$ ,  $\omega$

- угловая частота,  $\gamma$  - удельная электрическая проводимость материала провода.

Значения собственной индуктивности провода и лент различной ширины, рассчитанные в зависимости от длины, приведены на рис. 2 а. Применение широкой ленты вместо обычного провода позволяет в 2 раза снизить индуктивность. На полную индуктивность цепи существенно влияют размеры контура, образованного проводником заземления и землей. Для прямоугольного контура индуктивность определяется по графику на рис. 2 б. Для сравнения здесь же приведен график для прямолинейного провода. Наличие контура большой площади может значительно увеличить индуктивность цепи заземления. Уменьшение площади путем, например, приближением прямого и обратного провода позволяет снизить индуктивность.

Таким образом, индуктивность цепи заземления может составлять единицы микрогенри даже для хорошо выполненного заземления.

а)



б)

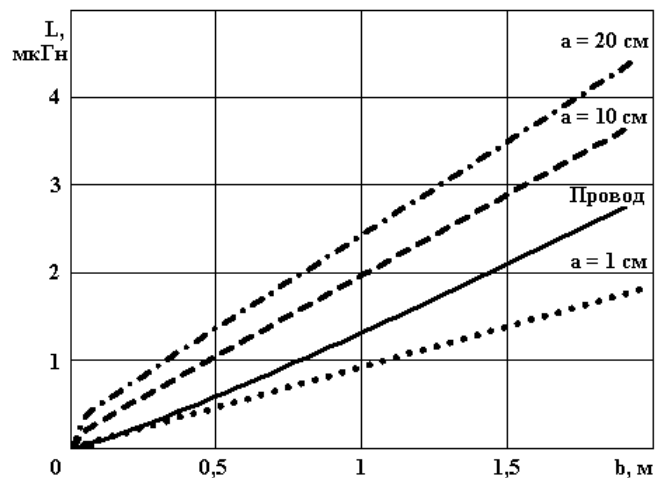


Рис.2. Зависимость индуктивности проводника различной формы от длины: а) собственная индуктивность провода и ленты, б) индуктивность прямоугольного контура размерами  $a \times b$ , образованного проводом с радиусом 1 мм.

На величину напряжения на цепи заземления влияет также емкость корпуса относительно земли, которая оказывается параллельной индуктивности заземления. Оценка емкости корпуса относительно земли по модели из двух параллельных обкладок может быть выполнена по графикам на рис. 3, рассчитанным на основе формулы [2]:

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r S}{d},$$

где  $\epsilon_0 = 8,85418782 \times 10^{-12} \text{ Ф/м}$  - диэлектрическая проницаемость вакуума,  $\epsilon_r$  - относительная диэлектрическая проницаемость,  $S$  - площадь обкладки,  $d$  - расстояние между обкладками.

Более точно емкость горизонтальной пластины  $a \times b$  на расстоянии  $d$  от горизонтальной плоскости определяется формулой [2]:

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r ab}{d} + \frac{C_0}{2},$$

где  $C_0 = \frac{16\epsilon_0 \epsilon_r a}{\frac{a}{b} \text{Arsh} \frac{b}{a} + \text{Arsh} \frac{a}{b}}$  - емкость одиночной пластины.

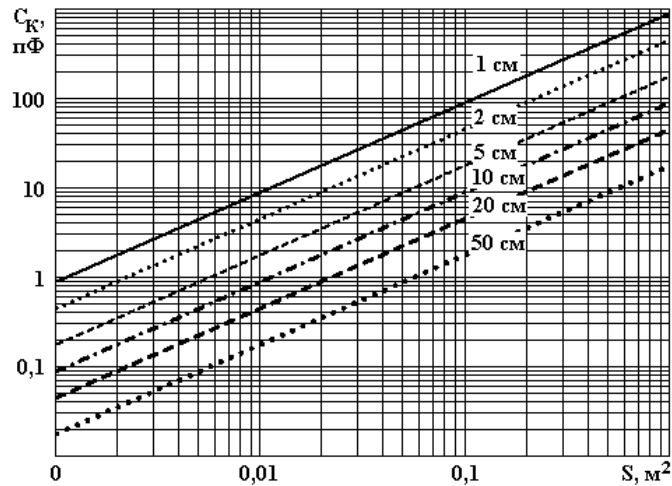


Рис. 3. Зависимость емкости двух параллельных пластин при различном расстоянии между ними от площади пластины.

Емкость вертикальной пластины  $a \times c$  на расстоянии  $d$  от горизонтальной плоскости определяется выражением [2]:

$$C = \frac{2}{\pi} \varepsilon_0 \varepsilon_r a \ln\left(4 \frac{d+c}{d}\right).$$

Емкость корпуса  $a \times b \times c$  на расстоянии  $d$  от горизонтальной плоскости будет определяться суммой емкости дна и емкости вертикальных пластин размером  $2(a+b)$  на  $c$ .

Графики на рис. 4 рассчитаны для корпуса размерами  $a=0,8$  м,  $b=0,6$  м,  $c=0,8$  м. При небольшой высоте над землей, например, при установке корпуса на металлическом столе, наибольший вклад в емкость дает днище корпуса. Максимальные значения емкости не превышают 1 нФ в большинстве практических случаев.

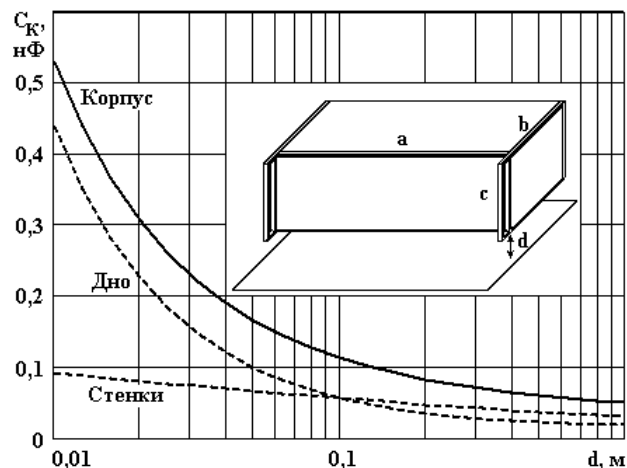
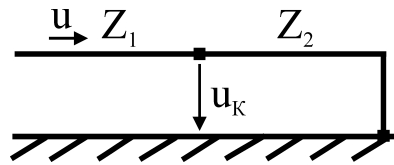


Рис. 4. Зависимость емкости корпуса ТС от расстояния до проводящей поверхности.

Наносекундные импульсные помехи по ГОСТ Р 51317.4.4 имеют длительность фронта 5 нс, что соизмеримо с временем распространения волны напряжения и тока по цепи заземления и по корпусу ТС. Это приводит к тому, что элементы корпуса и цепи заземления начинают влиять на процесс формирования помех на корпусе только через время  $t_d$  двойного пробега волны напряжения от точки появления помех до точки расположения этих элементов и цепей. Расчет изменения напряжения

может быть выполнен методом распространяющихся волн, при котором цепи замещаются длинными линиями длиной  $l$  с волновым сопротивлением  $Z$ , скоростью распространения волны напряжения и тока  $v$  (рис.5). Схема на рис 5а рассматривает цепь заземления как линию с волновым сопротивлением  $Z_2$  замкнутую накоротко на конце. Схема на рис. 5б описывает корпус как линию с волновым сопротивлением  $Z_2$ , не имеющую нагрузки на конце. Линия с волновым сопротивлением  $Z_1$  относится к кабелю, по которому помеха приходит на ТС. Время двойного пробега волны по цепи рассчитывается  $t_d=2l/v$ .

а)



б)

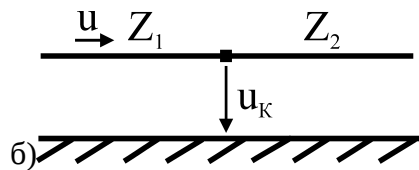


Рис. 5. Схемы расчета напряжения методом распространяющихся волн для оценки характера влияния: а) цепи заземления, б) корпуса.

Волновые сопротивления могут быть определены по формулам, приведенным в [3, 4] или по графикам на рис. 6

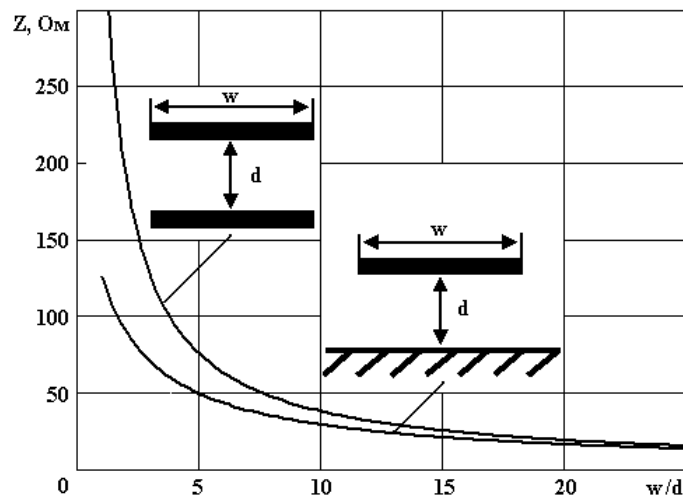


Рис. 6. Зависимости волнового сопротивления линии от ее геометрических параметров.

Выражение для расчета напряжения методом распространяющихся волн имеет вид:

$$u_k(t_i) = \frac{2Z_2}{Z_2 + Z_1} \left[ 1 + (1 + \alpha_1) \sum_{v=0}^i (\alpha_1 \alpha_2)^v h(t_i \geq (v+1)t_d) \right], \quad (1)$$

$$\text{где } \alpha_1 = (Z_1 - Z_2)/(Z_1 + Z_2), \quad h(t_i \geq (v+1)t_d) = \begin{cases} 1 & \text{if } t_i \geq (v+1)t_d \\ 0 & \text{if } t_i < (v+1)t_d \end{cases}$$

Для короткого замыкания на конце линии полагаем  $\alpha_2 = -1$ , для отсутствия

соединения  $\alpha_2=+1$ .

Пример моделирования напряжения  $u_k(t)$  методом распространяющихся волн для цепи заземления приведен на рис. 7. В качестве исходной помехи принята ступенька напряжения единичной амплитуды. В первый момент времени напряжение равно  $2Z_2/(Z_2+Z_1)$ , а после окончания переходного процесса устанавливается напряжение 0. С возрастанием длины цепи заземления длительность переходного процесса увеличивается. Здесь же приведены результаты расчета изменения напряжения при замещении цепи заземления индуктивностью

$$L = \frac{t_d}{2} \times (Z_1 + Z_2) \quad (2)$$

Таким образом, цепь заземления можно в первом приближении заменить эквивалентной индуктивностью, определяемой по (2).

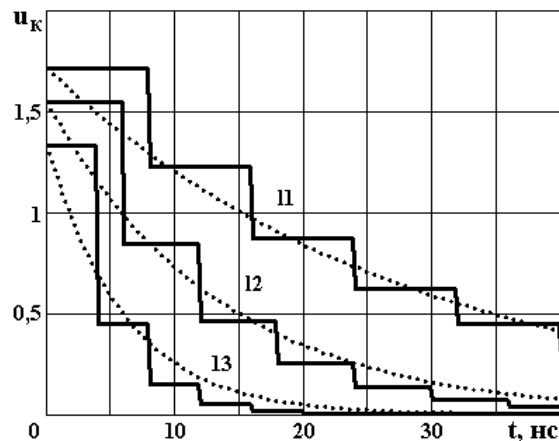


Рис. 7. Результат моделирования изменения напряжения на цепи заземления методом распространяющихся волн (сплошные линии) для цепей разной длины  $l_1 > l_2 > l_3$ , высоты и результаты расчета переходного процесса на индуктивности (пунктир).

Результат моделирования напряжения  $u_k(t)$  методом распространяющихся волн для корпуса приведен на рис. 8. В качестве исходной помехи принята ступенька напряжения единичной амплитуды. В первый момент времени напряжение равно  $2Z_2/(Z_2+Z_1)$ , а после окончания переходного процесса устанавливается напряжение 2. С возрастанием площади корпуса относительно земли длительность переходного процесса увеличивается. Здесь же приведены результаты расчета изменения напряжения при замещении корпуса емкостью

$$C = \frac{t_d}{2} \times \left( \frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_2} \right) \quad (3)$$

Таким образом, корпус можно в первом приближении заменить эквивалентной емкостью, определяемой по (3).

При увеличении длительности фронта  $t_\phi$  исходного импульса ступенчатый характер напряжения сглаживается и при равенстве  $t_\phi = t_d$  кривая практически не имеет ступенек, приближаясь к кривой, рассчитанной для цепи с сосредоточенными параметрами.

Возможность использования схем обоснована для ступеньки напряжения, что позволяет распространить их использование и для любой формы исходного напряжения.

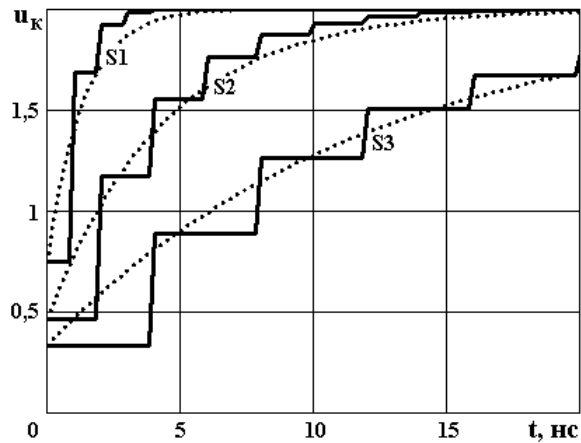
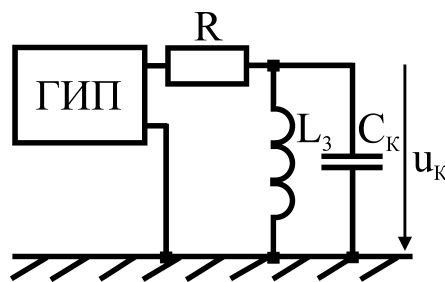


Рис. 8. Результат моделирования изменения напряжения на корпусе методом распространяющихся волн (сплошные линии) для корпусов разной площади  $S3 > S2 > S1$ , высоты и результаты расчета переходного процесса на емкости (пунктир).

### 3. Напряжение на корпусе ТС при воздействии ИП

Изменение напряжения на заземленном корпусе ТС при воздействии микросекундных и наносекундных ИП можно рассчитать по схеме на рис. 9.

а)



б)

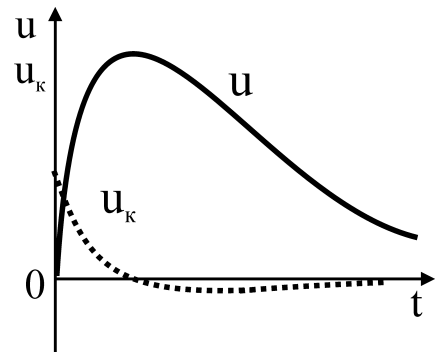


Рис. 9. Расчет напряжения на заземленном корпусе ТС:

а) - схема для расчета,

б) - вид кривых напряжения, где  $u$  – напряжение на выходе испытательного генератора импульсов ГИП на холостом ходу,  $u_k$  – напряжение на корпусе.

Внутренняя схема генератора ГИП при расчете соответствует схемам генераторов, приведенным в базовых стандартах ГОСТ Р 51317.4.4 и ГОСТ Р 51317.4.5.

Микросекундные ИП на заземленном корпусе ТС ослабляются по амплитуде в соответствии с графиком на рис. 10, где  $K = U_k/U$ . Емкость корпуса оказывает небольшое влияние на коэффициент снижения амплитуды. Для уменьшения амплитуды ИП на корпусе более чем в 10 раз необходимо, чтобы индуктивность заземления не превышала 1 мкГн.

Наносекундные ИП на заземленном корпусе ТС ослабляются по амплитуде в соответствии с графиком на рис. 11, где  $K = U_k/U$ . Емкость корпуса оказывает существенное влияние на коэффициент снижения амплитуды, выступая как фильтр. Для уменьшения амплитуды ИП на корпусе более чем в 10 раз необходимо, чтобы при емкости корпуса 300 пФ индуктивность заземления не превышала 0,1 мкГн, что обеспечить очень трудно. Таким образом, для наносекундных ИП обычное заземление снижает амплитуду ИП на корпусе лишь в несколько раз.

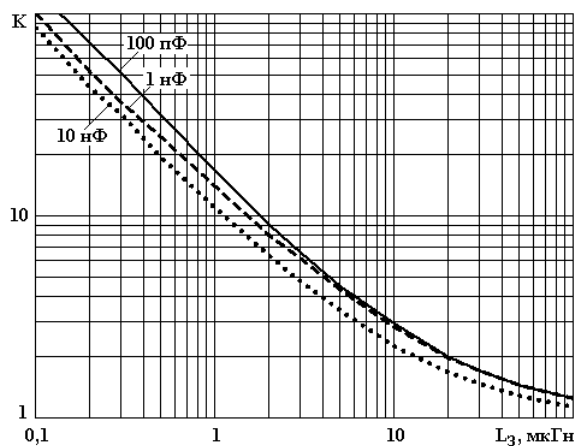


Рис. 10. Зависимость коэффициента снижения напряжения микросекундных ИП на заземленном корпусе ТС от индуктивности цепи заземления при различной емкости корпуса относительно земли.

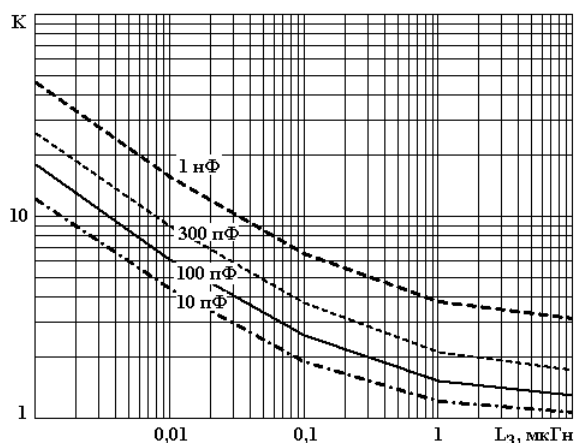


Рис. 11. Зависимость коэффициента снижения напряжения наносекундных ИП на заземленном корпусе ТС от индуктивности цепи заземления при различной емкости корпуса относительно земли.

#### 4. Экспериментальные результаты

Параметры цепи заземления и корпуса ТС можно определить с помощью измерителей индуктивности, емкости и с помощью измерителя неоднородности линии. Последний случай ближе к реальному случаю воздействия ИП. Импульсный рефлектометр Р5-12 создает ступеньку напряжения единичной амплитуды с фронтом около 1 нс. Воздействие этой ступеньки на исследуемую цепь (рис. 12) приводит к появлению отраженной волны и изменению исходного напряжения (рис. 13). По значению преломленного напряжения  $u_0$  можно рассчитать значение волновое сопротивление цепи  $Z_2$ , а по измеренной постоянной времени  $\tau$  изменения напряжения можно найти индуктивность  $L$  цепи заземления и емкость  $C$  корпуса ТС:

$$Z_2 = \frac{Z}{\frac{2}{u_0} - 1}, \quad C = \frac{\tau}{Z}, \quad L = \tau \times Z.$$

где  $Z=50$  Ом волновое сопротивление кабеля импульсного рефлектометра.



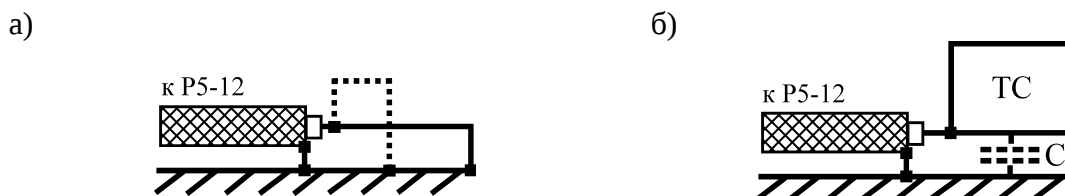


Рис. 12. Схемы измерения параметров цепей с помощью измерителя неоднородности линии: а) – цепь заземления, б) – корпус ТС.

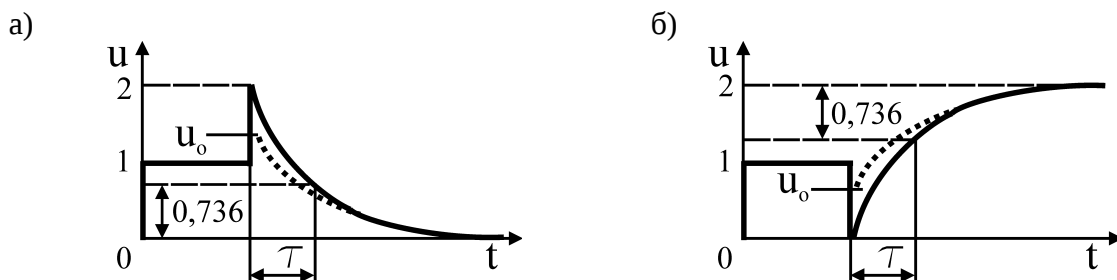


Рис. 13. Осциллограммы напряжения на экране импульсного рефлектометра при воздействии ступеньки напряжения единичной амплитудой: а) – цепь заземления, б) – корпус ТС, где сплошная линия приведена для идеальных индуктивности и емкости, пунктирная - для реальных цепей.

Результаты измерения индуктивности квадратного контура, образованном проводом сечением  $S$  и лентами шириной  $w$  длиной  $l$ , приведены в таблице 1. Результаты измерения близки при использовании рефлектометрии и обычных измерителей индуктивности.

Таблица 1.

Индуктивность контура квадратной формы, образованного проводниками длиной  $l$

Провод заземления	Индуктивность $L$ , нГн			
	$l=0,1 \text{ м}$	$l=0,2 \text{ м}$	$l=0,5 \text{ м}$	$l=1 \text{ м}$
Провод $S=1,5 \text{ мм}^2$	200	300	700	1450
Провод $S=4 \text{ мм}^2$	150	200	600	1250
Лента $w=10 \text{ мм}$	125	200	500	1000
Лента $w=20 \text{ мм}$	100	150	400	900
Лента $w=60 \text{ мм}$	100	150	300	700

График на рис. 2б для контура длиной 1 м ( $0,4 \times 0,4 \times 0,2 \text{ м}$ ) дает близкое значение индуктивности 1200 нГн. Сечение провода меньше влияет на индуктивность контура при возрастании его площади.

Результаты измерения емкости рефлектометром P5-12 и LC-метром Mastech MY 6243 приведены в табл. 2. Измерение прибором Mastech MY 6243 проводится на частоте 900 Гц, что устраняет волновые эффекты. Наблюдается существенная разница в результатах измерения по сравнению с применением рефлектометра, которая особенно заметна при увеличении расстояния до земли. Размеры объекта при этом сохраняются и время пробега волны  $t_d$  в формуле (3) не изменяется, возрастает лишь волновое сопротивление  $Z_2$ , что влияет меньше на измеряемую емкость.

Измерения показывают, что емкость корпуса ТС может составлять сотни пикофард, а индуктивность единицы микрогенри.

Емкость пластин и корпусов, поднятых над плоскостью заземления на высоту  $d$ 

Исследуемый объект	Измерительный прибор	Емкость $C$ , пФ			
		$d=15$ мм	$d=40$ мм	$d=80$ мм	$d=100$ мм
Пластина, 455x295 мм	LC-метр	95	54	40	37
	P5-12	200	150	120	120
Корпус, 480x310x120 мм	LC-метр	125	70	53	50
	P5-12	280	220	160	160
Пластина, 455x400 мм	LC-метр	162	66	48	44
	P5-12	247	158	168	132
Корпус, 480x430x160 мм	LC-метр	220	90	50	50
	P5-12	340	220	180	160

Эксперименты подтверждают, что амплитуды напряжения на цепи заземления ТС при воздействии ИП (рис. 14) могут быть оценены по графикам на рис. 10 и 11. Для точных расчетов следует учитывать реальные параметры кабеля между ТС и источником наносекундных ИП.

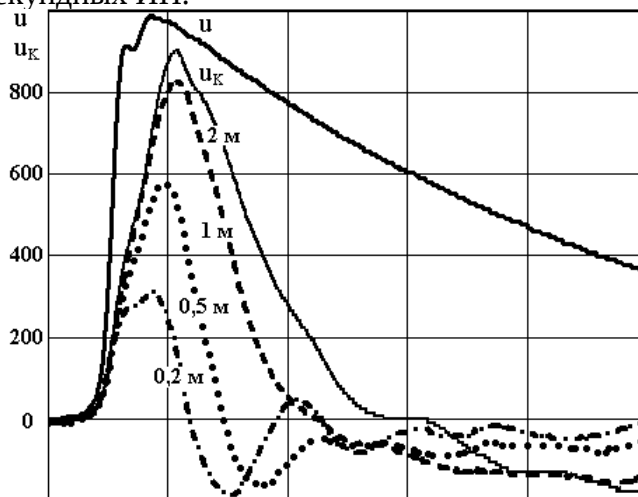


Рис. 14. Осциллограммы напряжения наносекундных ИП на выходе испытательного генератора  $u$  и на цепи заземления  $u_k$  корпуса ТС для разной длины этой цепи.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Воздействие помех в цепи заземления приводит к появлению напряжения помех на корпусе ТС, что эквивалентно воздействию несимметричных помех на портах питания и ввода-вывода относительно корпуса. Наносекундные импульсные помехи могут создать на проводнике заземления достаточно высокие падения напряжения. Полученные значения параметров цепи заземления и зависимости ослабления ИП на заземленном корпусе от этих параметров позволяют прогнозировать эффект от воздействия наносекундных и микросекундных ИП в цепи заземления.

### Литература

1. Калантаров П.Л. Расчет индуктивностей / П.Л.Калантаров, Л.А.Цейтлин. М.:— Энергия, 1970. — 380 с.
2. Йоссель Ю.Я. Расчет электрической емкости / Йоссель Ю.Я., Кочанов Э.С., Струнский М.Г. — Л.: Энергоиздат. ЛО, 1981.-288 с.
3. Tesche F., Ianoz M., Karlson T. EMC analysis methods and computational models. Wiley-Interscience publication. New York. 1997, 623 с.
4. Воршевский А.А., Гальперин В.Е. Электромагнитная совместимость судовых технических средств. СПбГМТУ.-СПб., 2006, 317 с.