

УДК 621.391.825

## Моделирование, оценка и выбор оптимального порядка переключения цепей с трехкратным модальным резервированием после отказов вдоль проводников

Медведев А. В.

**Постановка задачи:** для создания конкурентоспособной радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) необходимо уделять пристальное внимание обеспечению качества и повышению надежности. Данный процесс должен затрагивать все стадии производства аппаратуры, начиная с разработки печатных плат и кабелей. Модальное резервирование (МР) – один из методов повышения электромагнитной совместимости и функциональной безопасности (следовательно, повышения надежности). Теоретические исследования структур с МР показали, что случаи отказов на концах проводников резервируемой цепи удобно моделировать изменением граничных условий: коротким замыканием (КЗ) либо обрывом/холостым ходом (ХХ). Между тем по различным причинам могут возникать отказы и вдоль проводников. Их имитационные модели сложнее, чем для отказов на концах проводников. Однако, для более точного определения порядка переключения необходим анализ различных структур с трехкратным МР, учитывая отказы на концах и вдоль проводников. **Цель работы:** выполнить моделирование, оценку и выбор оптимального порядка переключения цепей с трехкратным МР, учитывая отказы вдоль проводников. **Используемые методы:** для моделирования, оценки и выбора порядка переключения используется система квазистатического анализа с применением алгоритма анализа структур с трехкратным МР до и после отказов. **Новизна:** впервые анализируются структуры с трехкратным МР с исходным и оптимальным наборами параметров после отказов вдоль проводников. **Результат:** Для каждой из структур определен оптимальный порядок переключения после отказов вдоль проводников. **Практическая значимость:** определяется возможностью учета специфики таких отказов для задания оптимального порядка переключения.

**Ключевые слова:** электромагнитная совместимость, функциональная безопасность, резервирование, модальное резервирование, печатная плата, отказ.

### Актуальность

Давно известно о проблемах функциональной безопасности (ФБ) радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) в сложной электромагнитной обстановке [1]. Кондуктивные или излучаемые электромагнитные помехи имеют систематический характер, то есть могут периодически повторяться [2]. Например, в системах с резервированием при отказе резервируемой печатной платы (ПП) при воздействии электромагнитных помех (ЭМП), произойдет отказ резервной ПП, если воздействие ЭМП повторится [3]. В [4] рассматриваются три возможных механизма возникновения отказов электронных устройств в результате воздействия ЭМП. Сверхширокополосные (СШП) помехи являются опасным видом кондуктивных помех. Эффективным инструментом в борьбе с СШП помехами является

#### Библиографическая ссылка на статью:

Медведев А. В. Моделирование, оценка и выбор оптимального порядка переключения цепей с трехкратным модальным резервированием после отказов вдоль проводников // Системы управления, связи и безопасности. 2023. № 2. С. 175-203. DOI: 10.24412/2410-9916-2023-2-175-203

#### Reference for citation:

Medvedev A. V. Simulating, evaluating, and selecting the optimum switching order for circuits with triple modal reservation after failures along the conductors. *Systems of Control, Communication and Security*, 2023, no. 2, pp. 175-203 (in Russian). DOI: 10.24412/2410-9916-2023-2-175-203

технология на основе эффекта модальной фильтрации (МФ) [5] и устройств на ее основе.

Модальное резервирование (МР) – это подход к компоновке и трассировке резервируемых и резервных проводников ПП и кабелей в РЭА, при котором добиваются эффекта МФ [6]. Эффект МФ достигается за счет сильной связи между резервируемым и резервными проводниками РЭА в неоднородной диэлектрической среде. Разработаны и активно исследуются однократное, двукратное и трехкратное МР [7]. В структурах с трехкратным МР на дальнем конце резервируемого проводника будет наблюдаться разложение на 4 импульса меньшей амплитуды, если произведение минимальной разности задержек мод ( $\Delta t_{\text{мин}}$ ) и длины  $l$  структуры больше длительности СШП импульса на входе.

Предложены способы компоновки и трассировки проводников с трехкратным МР цепей, представляющие собой структуры с различным исполнением опорного проводника: в центре [8] (не экранированная структура), вокруг (кабель), сверху и снизу (многослойная ПП) [9], в виде боковых полигонов (двусторонняя ПП) [10]. Теоретические [11] и экспериментальные [12] исследования этих структур с МР показали, что после отказа резервируемого проводника максимальная амплитуда напряжения импульсов ( $U_{\text{max}}$ ) на выходе резервного проводника при воздействии СШП импульса изменяется. При этом для каждого из трех оставшихся резервных проводников  $U_{\text{max}}$  будет изменяться по-разному. Поэтому целесообразно после отказа резервируемого проводника переключаться на тот проводник, у которого  $U_{\text{max}}$  будет минимальным при воздействии СШП импульса. После отказа 2 и 3 выбор резервного проводника не влияет на  $U_{\text{max}}$ . Однако именно после отказа 1 определяется порядок переключения, при котором  $U_{\text{max}}$  будет минимальным как после отказа 1, так и после отказа 2. В работе [11] определен порядок переключения для структур с трехкратным МР при исходных и оптимальных наборах параметров (по критериям выравнивания амплитуд и временных интервалов импульсов разложения) после отказов только на концах проводников, но отказы вдоль проводников не рассматривались.

Отказы вдоль проводника часто возникают из-за технологических дефектов. В [13] предложена классификация технологических дефектов ПП. В [14] представлены основные виды дефектов сквозного металлизированного отверстия (СМО) в ПП высокой плотности. В [15] предложена классификация дефектов паяных соединений. Все эти дефекты могут приводить к обрывам сигнальных проводников или замыканию на землю или соседний проводник. Также к выгоранию проводника вдоль, может привести электростатический разряд [16].

При анализе  $U_{\text{max}}$  на конце резервируемого проводника при отказе вдоль резервного, возникает проблема большого количества вычислений. В [17] разработан алгоритм анализа структур с трехкратным МР после отказов, который полностью охватывает анализ, как на концах, так и вдоль проводников. Выполнена апробация алгоритма. Следующий этап состоит в том, чтобы использовать этот алгоритм для структур, рассмотренных в [11]. Для полноты исследования необходимо выполнить анализ этих структур с учетом отказов вдоль проводников.

Цель работы – выполнить моделирование, оценку и выбор оптимального порядка переключения цепей с трехкратным МР учитывая отказы вдоль проводников.

### Методы и подходы

Моделирование проводилось в системе TALGAT [18] без учета потерь в проводниках и диэлектриках. Оно основано на методе моментов и позволяет выполнить квазистатический анализ структур произвольной сложности. Алгоритм, реализованный в системе, позволяет вычислять матрицы (**L** и **C**) погонных параметров многопроводной линии передачи. Используя модифицированный метод узловых потенциалов в частотной области и быстрое преобразование Фурье, можно рассчитать временной отклик на воздействие произвольной формы. Далее приводится общий алгоритм для анализа структур в системе TALGAT:

1. Подключение модулей UTIL, MATRIX, RESPONSE, MOM2D с использованием команд CLEAR\_SCHEME, CLEAR\_RESPONSE и CLEAR\_STRUCTURE, RESPONSE\_CLEAR для очистки временной памяти, выделенной системой.
2. Построение поперечного сечения по заданным геометрическим параметрам исследуемых структур.
3. Задание граничных условий и сегментации поперечного сечения.
4. Вычисление матриц погонных параметров **L** и **C**.
5. Создание эквивалентных схем для моделирования структур и вычисления отклика.
  - 5.1. Задание отрезка линии передачи и его параметров (матрицы **L**, **C** и длина линии).
  - 5.2. Задание граничных условий в виде схем из RLC-элементов с сосредоточенными параметрами.
  - 5.3. Задание воздействия в виде источника трапециевидного импульса.
  - 5.4. Задание временного шага (число отсчетов на фронт) и числа отсчетов на период повторения импульсов.
  - 5.5. Вычисление временного отклика.

После того, как для каждой структуры выполняются пункты 1–4 алгоритма, выполняется пункт 5, в котором считается, что структура без отказов, если все нагрузки на концах резервируемого и резервных проводников согласованы со структурой (по половине ЭДС на входе). На рис. 1 представлена эквивалентная схема каждой из структур с трехкратным МР. Где  $R$  согласующая нагрузка структуры длиной  $l$ .

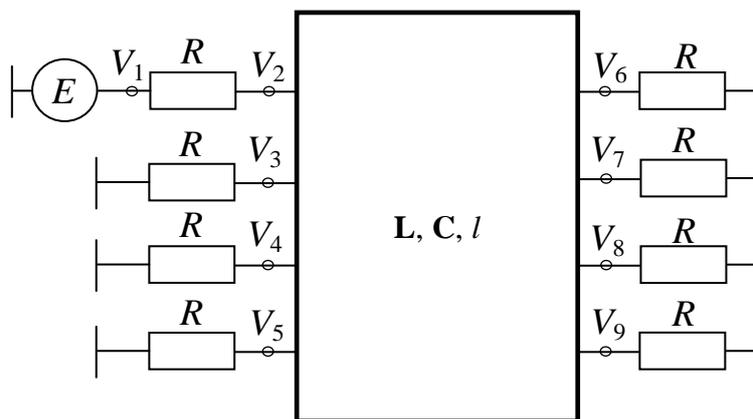


Рис. 1. Эквивалентная схема структур с трехкратным МР

Далее представлен алгоритм анализа структур с трехкратным МР после отказов [17]. Данный алгоритм выполняется на основе пункта 5 описанного выше общего алгоритма.

1. Определение  $U_{\max}$  на дальнем конце резервируемого проводника до отказов при  $t_{\Sigma} < l \min |\Delta \tau_i|$ , где  $t_{\Sigma}$  – общая длительность воздействующего импульса.
2. Расчет значений  $U_{\max}$  в конце активного проводника после отказов 1, 2, 3 на концах проводников для вариантов переключения 1, 2, 3.
3. Построение зависимостей значений  $U_{\max}$  от номера отказа на концах проводников для вариантов переключения 1, 2, 3.
4. Представление структуры в виде  $N$  отрезков длиной  $l/N$ , где  $l$  – длина всей структуры, а  $N$  определяется требуемой точностью анализа (в данной работе  $N=4, 10$ ).
5. Расчет значений  $U_{\max}$  для вариантов переключения после отказов 1, 2, 3 (выбранных схемных моделей) вдоль проводников для вариантов переключения 1, 2, 3.
6. Построение зависимостей значений  $U_{\max}$  от номера отказа вдоль проводников для вариантов переключения 1, 2, 3.
7. Анализ полученных результатов.

Далее представлены схемные модели, имитирующие реальные отказы вдоль проводников линии передачи с трехкратным МР. Схемные модели, имитирующие отказы (КЗ, ХХ и их вариации) в начале и конце проводников, представлены на рис. 2. При отказе вдоль проводника в произвольном месте структура длиной  $l$  делится на два участка с длинами  $l_1$  и  $l_2$ . Схемные модели, имитирующие отказы вдоль проводника в произвольном месте, представлены на рис. 3 и 4.

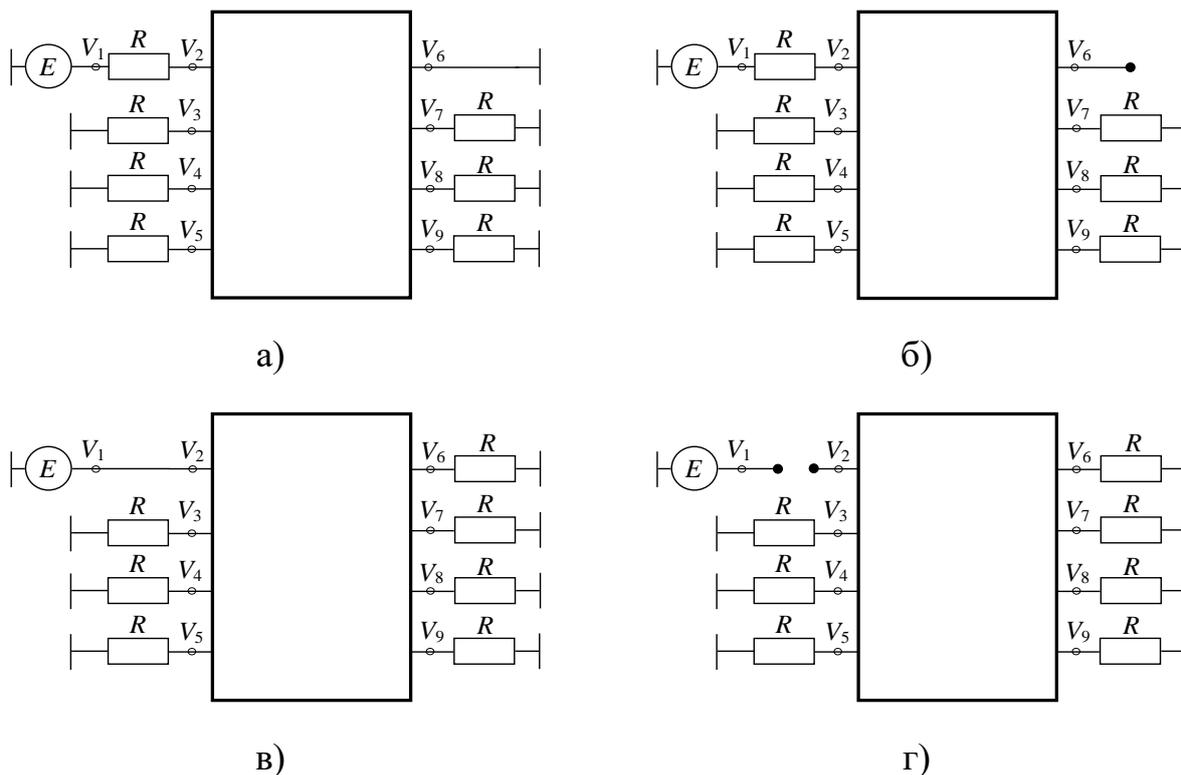


Рис. 2. Схемные модели: а) КЗ на выходе, б) обрыв на выходе, в) КЗ на входе, г) обрыв на входе проводника

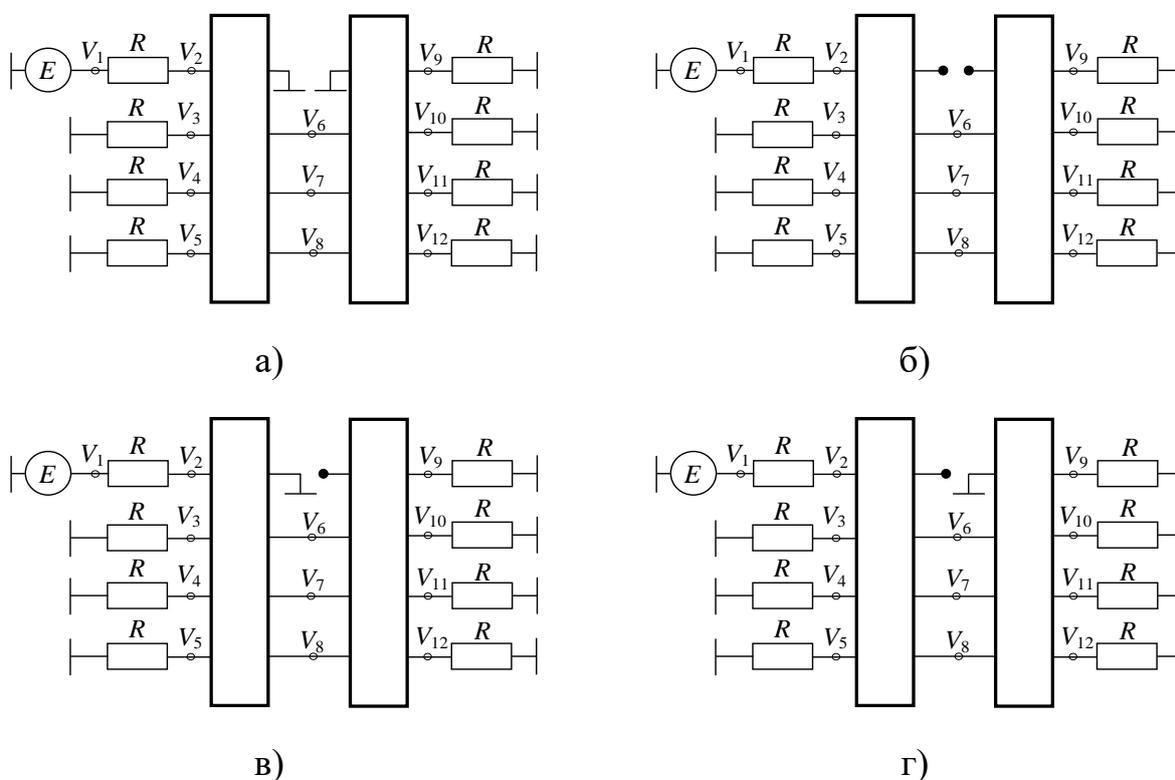


Рис. 3. Схемные модели: а) обрыв проводника с замыканием концов на землю, б) обрыв проводника, в) обрыв проводника с замыканием левого конца на землю, г) обрыв проводника с замыканием правого конца на землю на выходе и входе первого и второго участков линии передачи

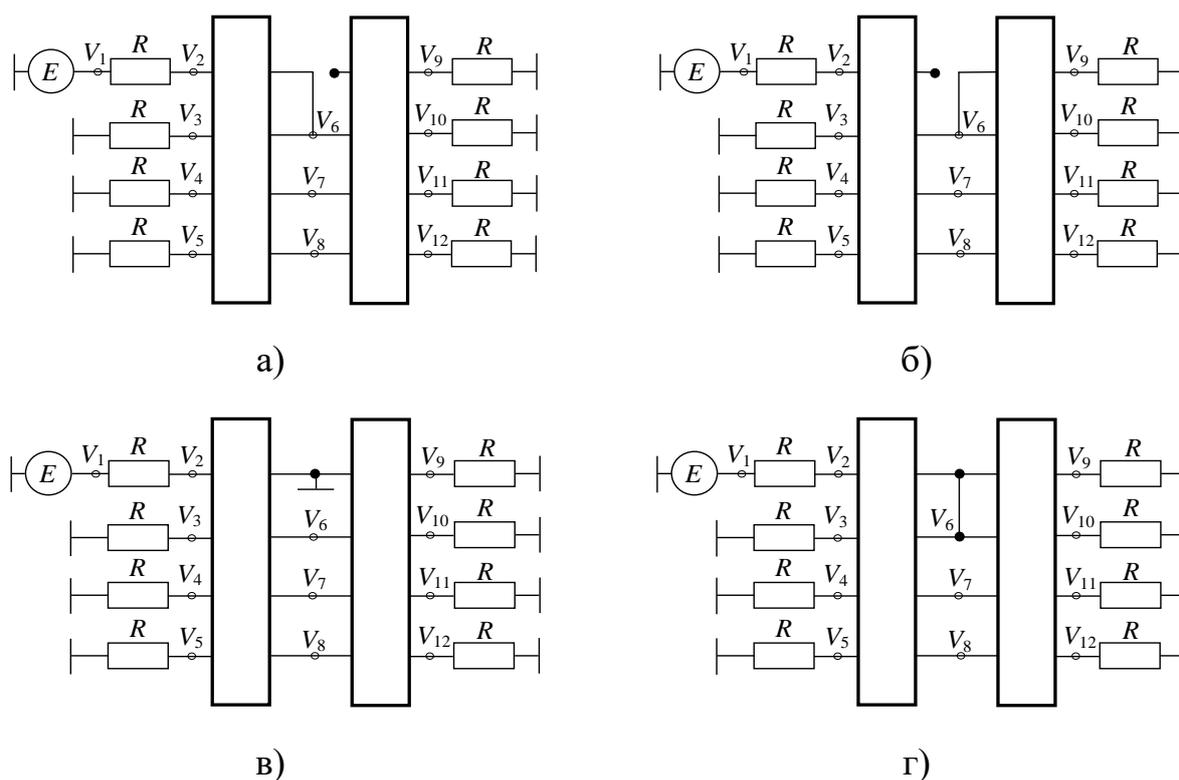


Рис. 4. Схемные модели: а) обрыв проводника с замыканием левого конца на соседний проводник, б) обрыв проводника с замыканием правого конца на соседний проводник, в) КЗ на землю, г) замыкание соседних проводников

На рис. 5 представлена эквивалентная схема, имитирующая последовательные отказы на одном из концов и вдоль активного проводника, для симметричных структур с трехкратным МР [11].

Далее приводятся ограничения применения алгоритма в данном исследовании. Результаты апробации алгоритма (представленные в [17]) показали, что при анализе структур с трехкратным МР целесообразно использовать импульс с  $t_{\Sigma} \approx l \cdot \min|\Delta\tau_i|$ . Значения  $U_{\max}$  для исследуемых структур при исходном и оптимальном наборах параметров после отказов 1, 2 и 3 на концах проводников для вариантов переключения 1, 2, 3 рассмотрены в [11] (рассмотрены пункт 2 и 3 алгоритма). При анализе структуры после отказов 1 и 2 она представляется в виде  $N$  последовательно соединенных отрезков. После отказа 1 принято  $N=10$ , чтобы число точек вдоль длины проводника было не очень большим, но достаточным для выявления максимального изменения  $U_{\max}$ . После отказа 2 принято  $N=4$ , поскольку максимальные изменения  $U_{\max}$  наблюдаются при отказах по середине и примерно на  $1/4$  и  $3/4$  длины проводника. Таким образом, пункты 2 и 4 алгоритма не рассматриваются. С целью анализа структуры после отказа 2, выполнено по 27 вычислений для вариантов переключения 1, 2 и 3 при отказах 1 и 2 вдоль проводника (для 9 точек вдоль длины отрезка для 3 отказов) структур с исходными и оптимальными наборами параметров на одном расстоянии от начала линии, так как проводить 153 вычисления (как это сделано в [17]) не целесообразно. Отказ 3 не рассматривается, так как он не влияет на порядок переключения. Рассматри-

ваются схемные модели, имитирующие отказы вдоль проводника в произвольном месте, представленные на рис. 3 и 4. При этом, ситуация при отказах с замыканием на соседний проводник (рис. 4 а, б и г) рассмотрена только после первого отказа и анализируется отдельно, так как отказывают сразу два проводника.

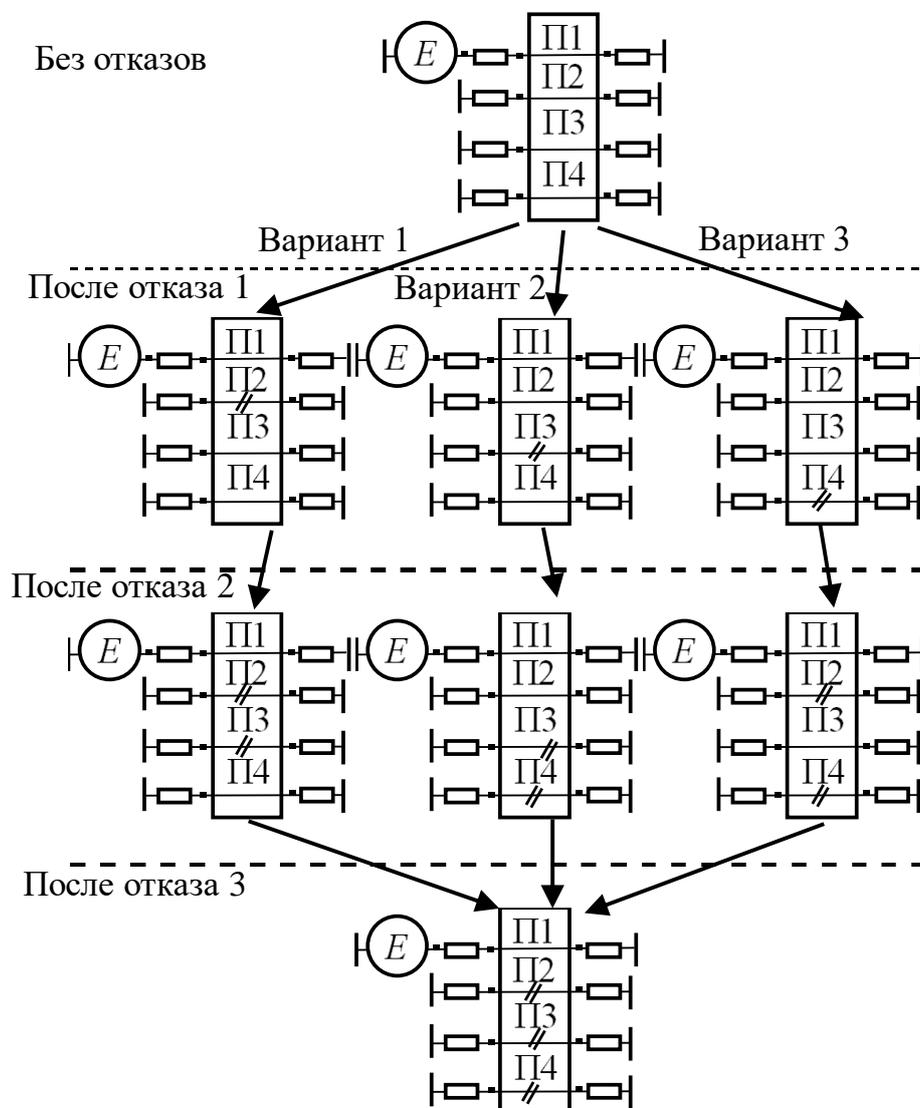


Рис. 5. Эквивалентная схема, имитирующая последовательные отказы на одном из концов активного проводника, для симметричных структур с трехкратным МР

### Структура с исполнением опорного проводника в центре

Далее представлены моделирование, оценка и выбор оптимального порядка переключения цепей с трехкратным МР для структуры с исполнением опорного проводника в центре [8], после отказов вдоль проводников.

Поперечное сечение структуры представлено на рис. 6. Исходный набор параметров:  $s=400$  мкм;  $w=300$  мкм;  $t=105$  мкм;  $h=300$  мкм;  $\epsilon_r=5$ . Оптимальный набор параметров:  $s=510$  мкм;  $w=1600$  мкм;  $t=18$  мкм;  $h=500$  мкм;  $d=1600$  мкм. Эквивалентная схема структуры приведена на рис. 1.

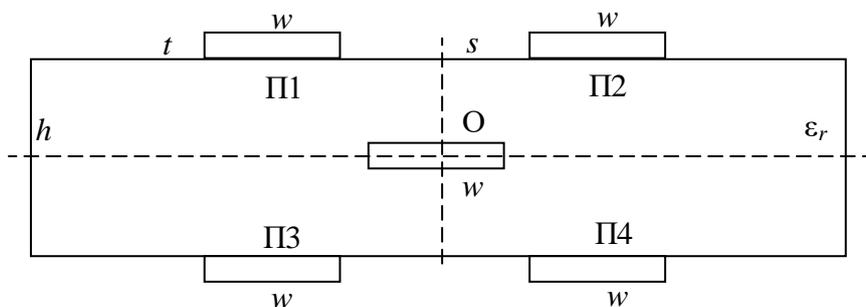


Рис. 6. Поперечное сечение структуры с исполнением опорного проводника в центре, где проводники: П1, П2, П3, П4 – сигнальные (резервируемый и резервные); О – опорный

На вход структуры длиной 0,5 м с исходным и оптимальным наборами параметров до отказов, подавались импульсы с ЭДС 2 В с  $t_{\Sigma}=70, 80$  пс, соответственно (в соответствии с пунктом 1 алгоритма, рассмотренного выше, для каждого набора параметров). Из вычисленных откликов на выходе (рис. 7) видно, что воздействующие импульсы раскладываются на 4 импульса с  $U_{\max} \approx 0,25$  В.

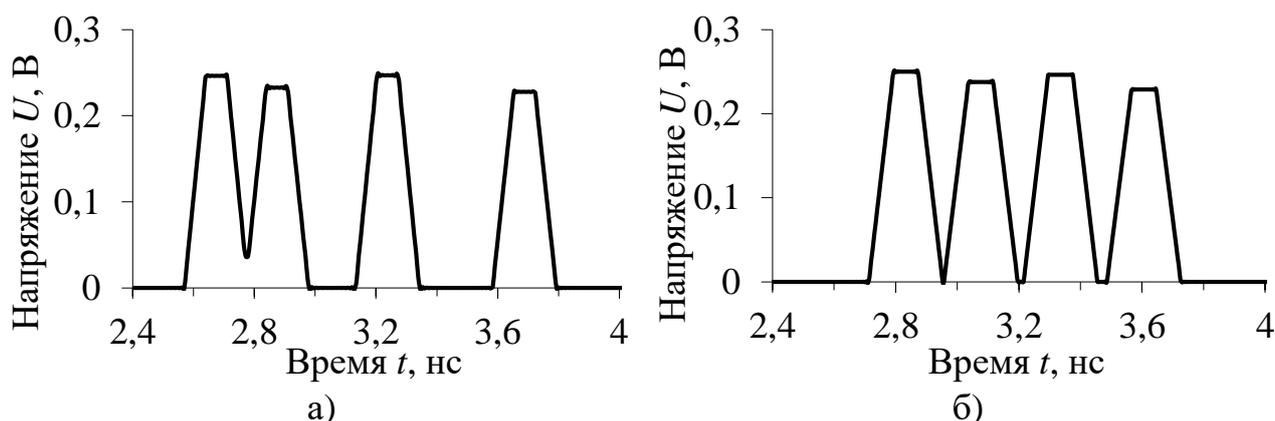


Рис. 7. Формы напряжения на дальнем конце активного проводника структуры для исходного (а) и оптимизированного (б) наборов параметров

Далее рассматривается влияние отказов вдоль проводников на изменения  $U_{\max}$  на дальнем конце резервируемого проводника. Схемные модели отказов вдоль проводников представлены на рис. 3 и 4. На рис 8, 9 и 10 представлены зависимости  $U_{\max}$  от длины участка  $l_1$  при отказах вдоль проводника структуры с исходным и оптимальным наборами параметров после отказа 1 для вариантов переключения 1, 2, 3, соответственно.

Из рис. 8 а, 9 а и 10 а видно, что  $U_{\max}$  увеличивается до 0,41, 0,43, 0,35 В, соответственно. При этом, для рис. 8 а и 9 а наибольшее  $U_{\max}$  наблюдается при отказах на середине резервного проводника, для рис. 10а – на расстоянии 0,1 м. Из рис. 8 б, 9 б и 10 б видно, что  $U_{\max}$  изменяется до 0,48, 0,48, 0,33 В, соответственно. При этом, для рис. 8 б и 9 б наибольшее  $U_{\max}$  наблюдается на середине линии, для рис. 10б на расстоянии 0,1 м.

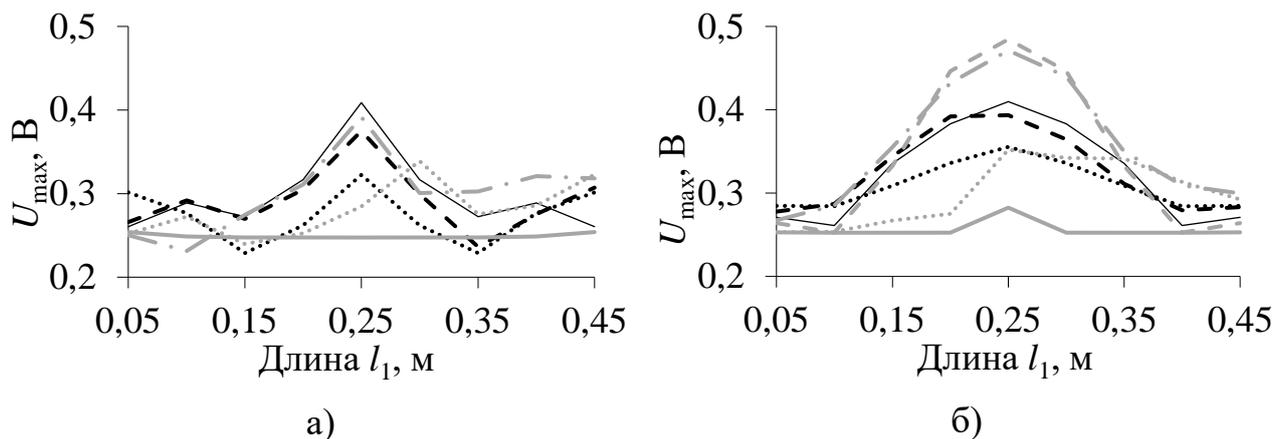


Рис. 8. Зависимости  $U_{\max}$  от  $l_1$  при отказе типов XX–XX (····), XX–КЗ (КЗ–XX) (- -), КЗ–КЗ (—), XX–замыкание на ПЗ (- - -), XX–замыкание на П4 (— ·), замыкание на ПЗ (- · ·) для варианта переключения 1 для структуры с исходными (а) и оптимизированными (б) параметрами

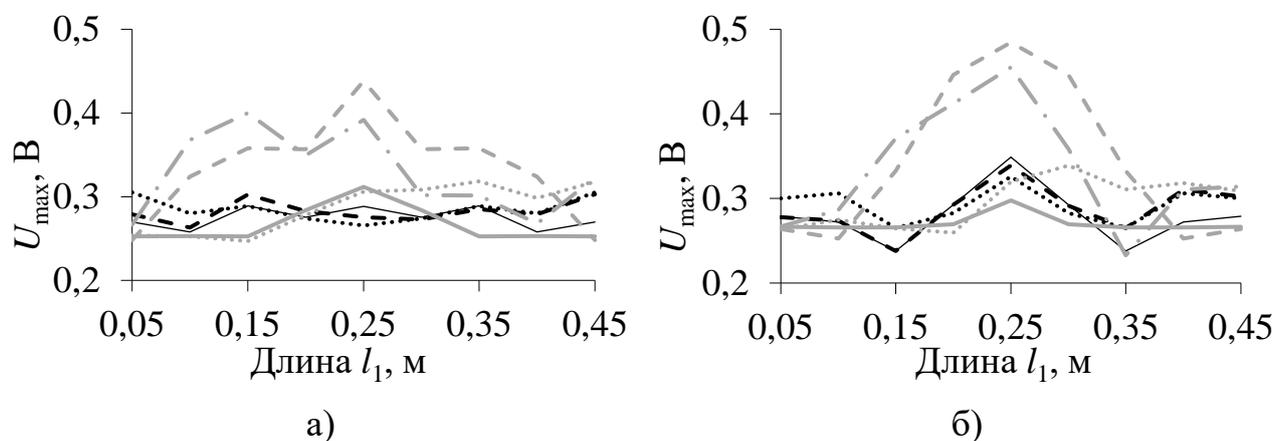


Рис. 9. Зависимости  $U_{\max}$  от  $l_1$  при отказе типов XX–XX (····), XX–КЗ (КЗ–XX) (- -), КЗ–КЗ (—), XX–замыкание на П2 (- - -), XX–замыкание на П4 (— ·), замыкание на П2 (- · ·) для варианта переключения 2 для структуры с исходными (а) и оптимизированными (б) параметрами

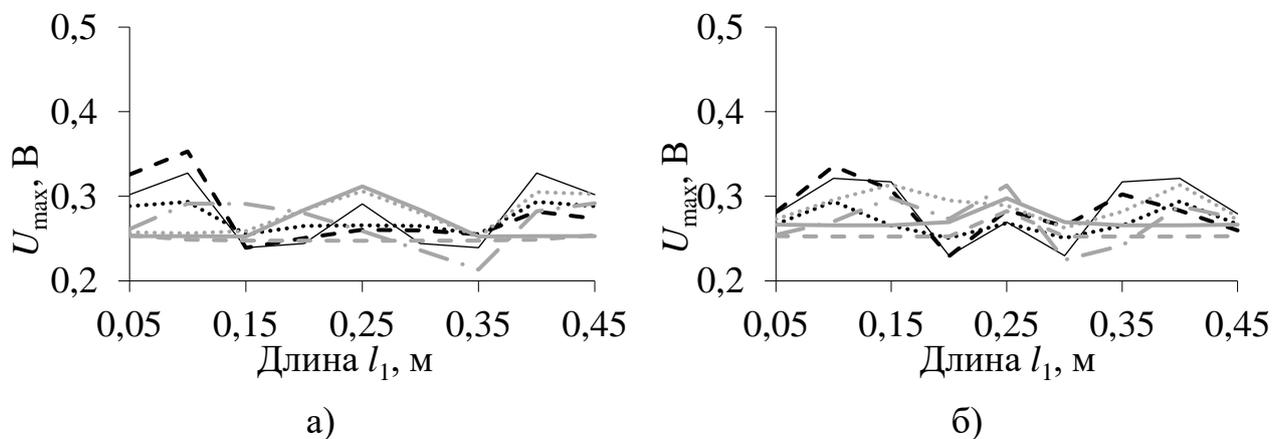


Рис. 10. Зависимости  $U_{\max}$  от  $l_1$  при отказе типов XX–XX (····), XX–КЗ (КЗ–XX) (- -), КЗ – КЗ (—), XX–замыкание на П2 (- - -), XX–замыкание на ПЗ (— ·), замыкание на П2 (- · ·), замыкание на ПЗ (····) для варианта переключения 3 для структуры с исходными (а) и оптимизированными (б) параметрами

На рис. 11 представлены зависимости  $U_{\max}$  на дальнем конце резервируемого проводника структур с исходным и оптимальным наборами параметров после отказа 2 вдоль проводника, на одном расстоянии от начала линии, от номера вычисления.

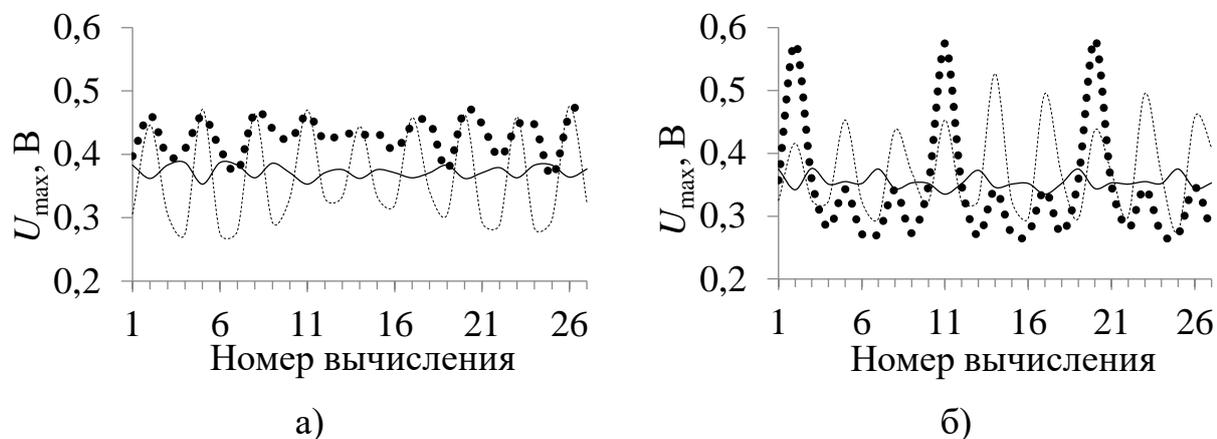


Рис. 11. Зависимости  $U_{\max}$  на дальнем конце резервируемого проводника структур с исходным (а) и оптимизированными (б) наборами параметров после отказа 2 от номера вычисления при вариантах переключения 1 (- -), 2 (••) и 3 (—)

Из рис. 11 а видно, что  $U_{\max}$  изменяется до 0,46, 0,48, 0,38 В для вариантов 1, 2 и 3, соответственно. Из рис. 11 б видно, что  $U_{\max}$  изменяется до 0,53, 0,57, 0,37 В для вариантов 1, 2 и 3, соответственно. При варианте 3 для рис. 11 а и б, наблюдаются наименьшие значения и перепады  $U_{\max}$  при 27 вычислениях.

На рис. 12 представлены зависимости  $U_{\max}$  для вариантов переключения 1, 2, 3 после отказов вдоль проводников. Из рис. 12 а видно, что после отказа 1 для варианта 2 наименьшее  $U_{\max}=0,3$  В, а после отказа 2 наименьшее  $U_{\max}=0,38$  В для варианта 3. Таким образом, нельзя сделать однозначного вывода, какой вариант переключения оптимален для неоптимизированного набора параметров.

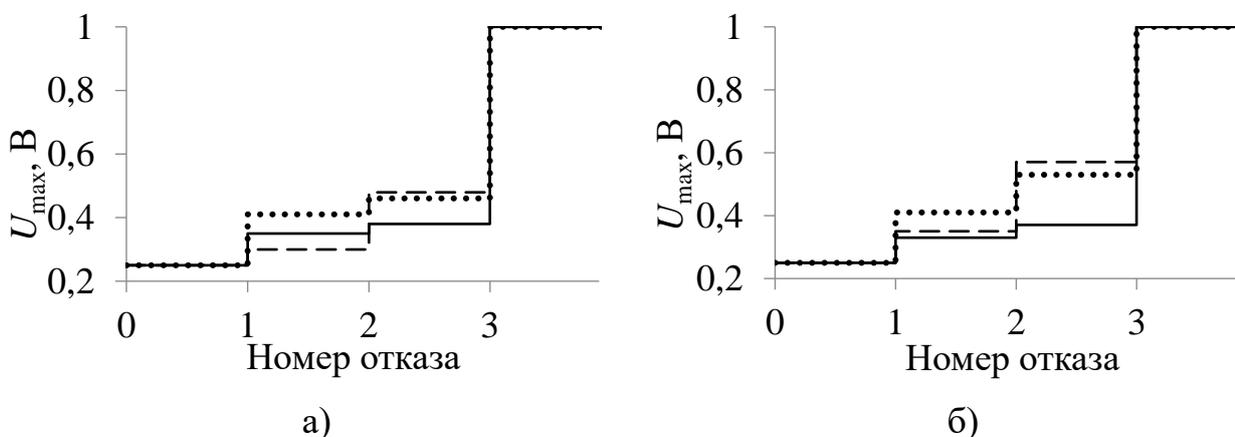


Рис. 12. Зависимости  $U_{\max}$  для вариантов переключения 1 (•••), 2 (- -), 3 (—) от номера отказа вдоль проводника для структур с исходным (а) и оптимизированными (б) наборами параметров

Из рис. 12 б видно, что после отказов 1 и 2 наименьшие значения  $U_{\max}$  у варианта 3. Они равны 0,33 В и 0,37 В, соответственно. Таким образом, для оптимизированного набора параметров оптимален вариант переключения проводников 3.

В таблице 1 представлены зависимости  $U_{\max}$  для вариантов 1, 2, 3 от отказов вдоль проводников, а также отказов вдоль проводников, которые выводят из строя сразу два проводника (обозначены серым цветом) в сравнении с отказами на концах проводников, рассмотренных в [11].

Таблица 1 – Зависимости  $U_{\max}$  для вариантов 1, 2, 3 от отказов на конце (—), вдоль проводников (- - -) и двух проводников одновременно (—■—)

Вариант	Исходные	Оптимальные
1		
2		
3		

Видно, что изменение значения  $U_{\max}$  для оптимального варианта переключения (вариант 3) меньше, чем для остальных. При этом,  $U_{\max}$  при отказах сразу

двух проводников входит в диапазон  $U_{\max}$ . Таким образом, из анализа отказов на конце и вдоль проводников структур с оптимизированным набором параметров оптимален вариант переключения 3, поскольку значения  $U_{\max}$  после отказов 1 и 2 на 13 и 69 % меньше, чем для максимальных значений  $U_{\max}$  других вариантов.

### Структура с исполнением опорного проводника вокруг

Далее представлены моделирование, оценка и выбор оптимального порядка переключения цепей с трехкратным МР для структуры с исполнением опорного проводника вокруг, после отказов вдоль проводников.

Поперечное сечение структуры представлено на рис. 13. Исходный набор параметров: радиусы проводников  $r_{\text{п}}=1,5$  мм, радиусы диэлектриков  $r_{\text{д}}=1,75$  мм, радиус опорного проводника  $r_{\text{о}}=4,35$  мм и  $\varepsilon_r=10$ . Оптимальный набор параметров:  $r_{\text{п}}=900$  мкм (проводник П1);  $r_{\text{п}}=800$  мкм (проводник П2);  $r_{\text{п}}=700$  мкм (проводник П3);  $r_{\text{п}}=800$  мкм (проводник П4);  $r_{\text{д}}=970$  мкм (диэлектрик П1);  $r_{\text{д}}=950$  мкм (диэлектрик П2);  $r_{\text{д}}=950$  мкм (диэлектрик П3);  $r_{\text{д}}=950$  мкм (диэлектрик П4);  $r_{\text{о}}=3500$  мкм;  $\varepsilon_r=30$  (диэлектрик П1);  $\varepsilon_r=16$  (диэлектрик П2);  $\varepsilon_r=6$  (диэлектрик П3);  $\varepsilon_r=5$  (диэлектрик П4). Эквивалентная схема структуры приведена на рис. 1.

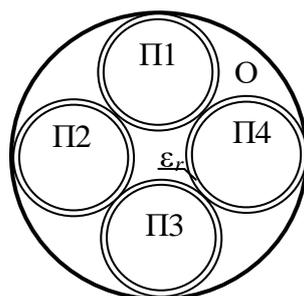


Рис. 13. Поперечное сечение структуры с исполнением опорного проводника вокруг, где проводники: П1, П2, П3, П4 – сигнальные (резервируемый и резервные); О – опорный

На рис. 14 представлены формы напряжений на дальнем конце активного проводника структуры для исходного и оптимального наборов параметров. При импульсах длительностью 80 и 55 нс, подаваемых на вход структуры длиной 1 м, получено  $U_{\max}=0,5, 0,29$  В, соответственно.

На рис 15, 16 и 17 представлены зависимости  $U_{\max}$  от  $l_1$  при отказе 1 вдоль проводника структуры с исходным и оптимизированным наборами параметров после отказа 1 для вариантов переключения 1, 2, 3, соответственно.

Из рис. 15 а, 16 а и 17 а видно, что  $U_{\max}$  изменяется до 0,464, 0,5, 0,5 В, соответственно. Из рис. 15 б, 16 б и 17 б видно, что  $U_{\max}$  изменяется до 0,465, 0,62, 0,62 В, соответственно.

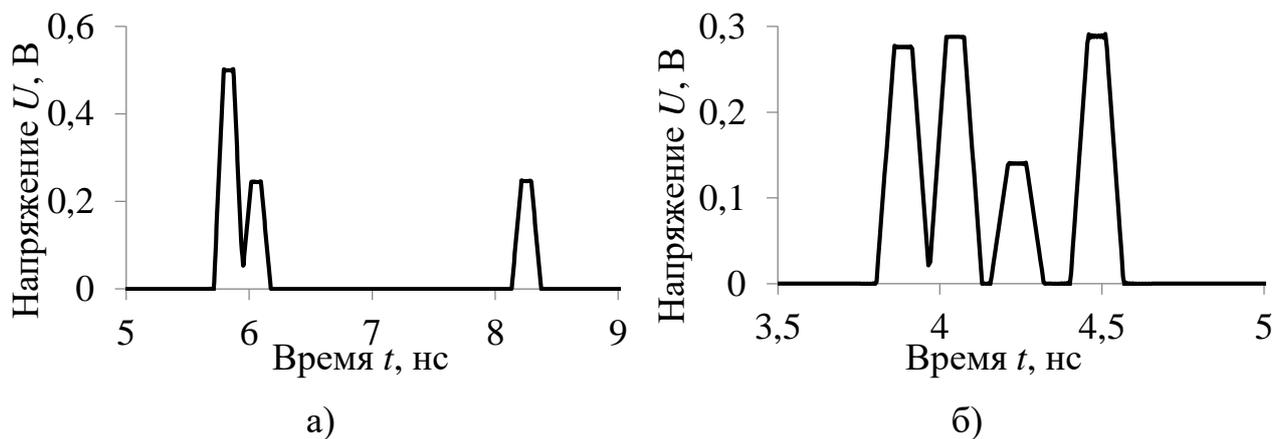


Рис. 14. Формы напряжения на дальнем конце активного проводника структуры для исходного (а) и оптимизированного (б) наборов параметров

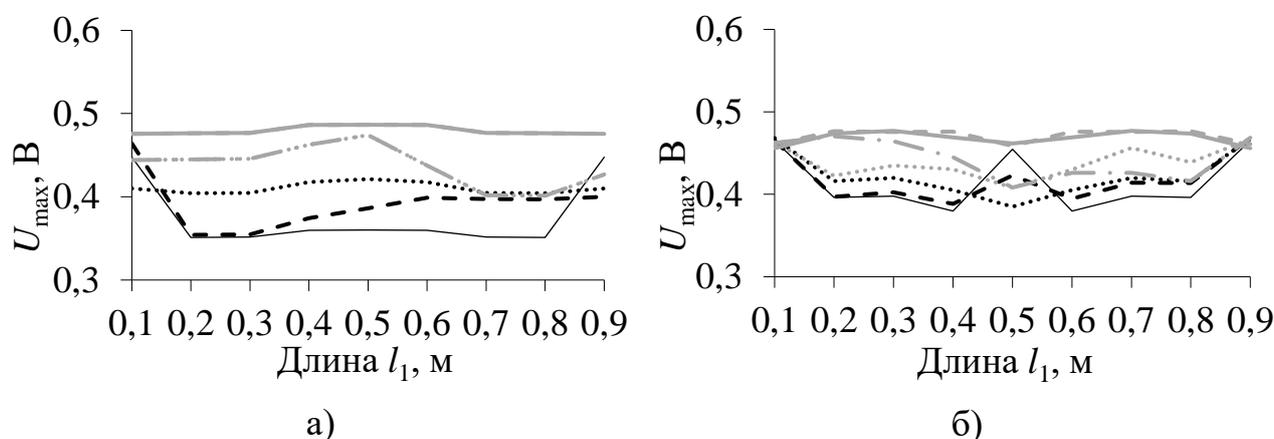


Рис. 15. Зависимости  $U_{\max}$  от  $l_1$  при отказе типов XX–XX (·····), XX–К3 (К3 – XX) (- · - ·), К3 – К3 (—), XX–замыкание на П3 (- - -), XX–замыкание на П4 (—), замыкание на П3 (- · · -), замыкание на П4 (·····) для варианта переключения 1 для структур с исходными (а) и оптимизированными (б) параметрами

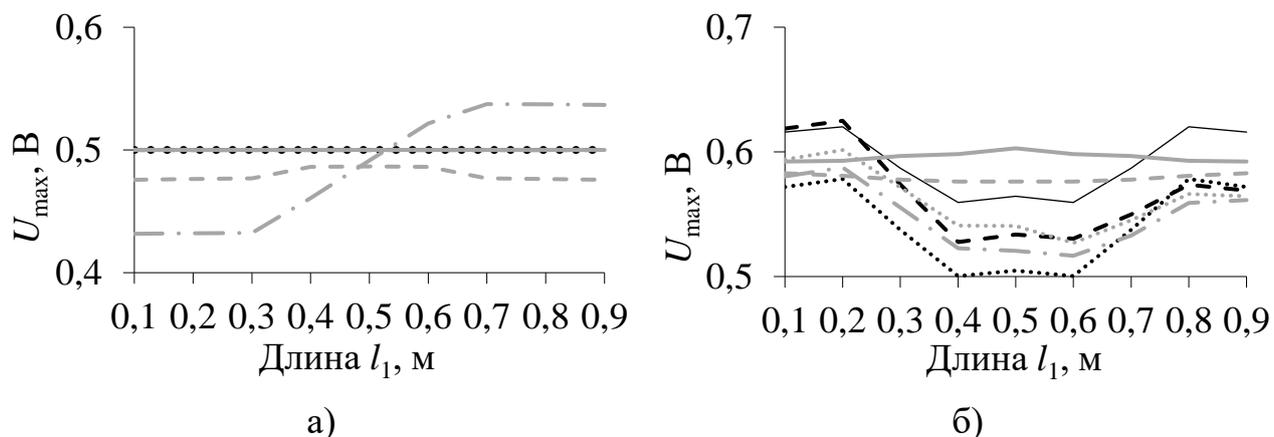


Рис. 16. Зависимости  $U_{\max}$  от  $l_1$  при отказе типов XX–XX (·····), XX–К3 (К3 – XX) (- · - ·), К3 – К3 (—), XX–замыкание на П2 (- - -), XX–замыкание на П4 (—), замыкание на П2 (- · · -), замыкание на П4 (·····) для варианта переключения 2 для структур с исходными (а) и оптимизированными (б) параметрами

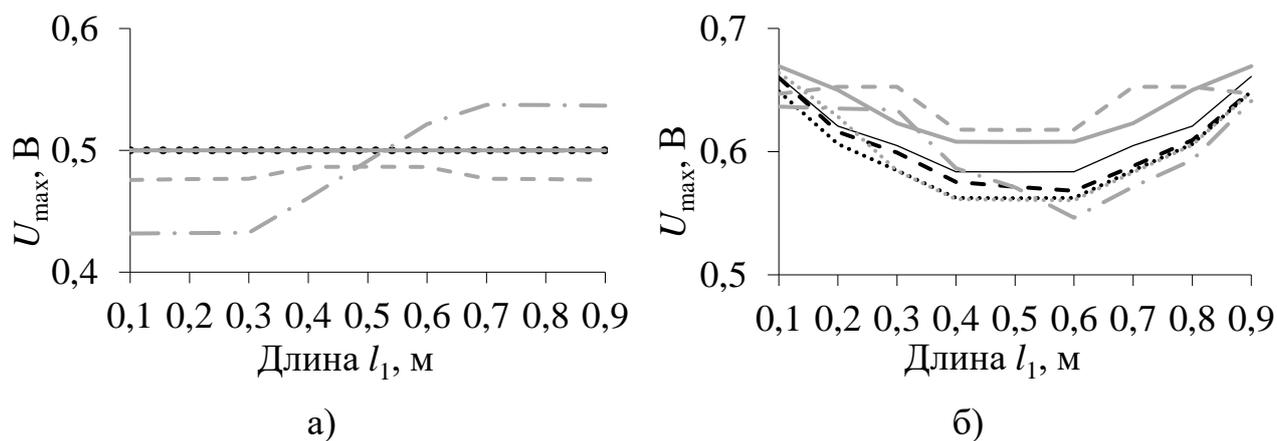


Рис. 17. Зависимости  $U_{\max}$  от  $l_1$  при отказе типов XX–XX (⋯⋯), XX–КЗ (КЗ – XX) (---), КЗ – КЗ (—), XX–замыкание на П2 (---), XX–замыкание на П3 (—), замыкание на П2 (- · -), замыкание на П3 (⋯⋯) для варианта переключения 3 для структур с исходными (а) и оптимизированными (б) параметрами

С целью анализа после отказа 2, выполнено 27 вычислений при отказах 1 и 2 вдоль проводника структур с исходным и оптимальным наборами параметров на одном расстоянии от начала линии для вариантов переключения 1, 2, 3. После отказа 2  $U_{\max}$  изменяется до 0,6, 0,5, 0,5 В для исходного набора параметров и до 0,8 В – для оптимального.

На рис. 18 представлены зависимости  $U_{\max}$  для вариантов переключения 1, 2, 3 от отказов.

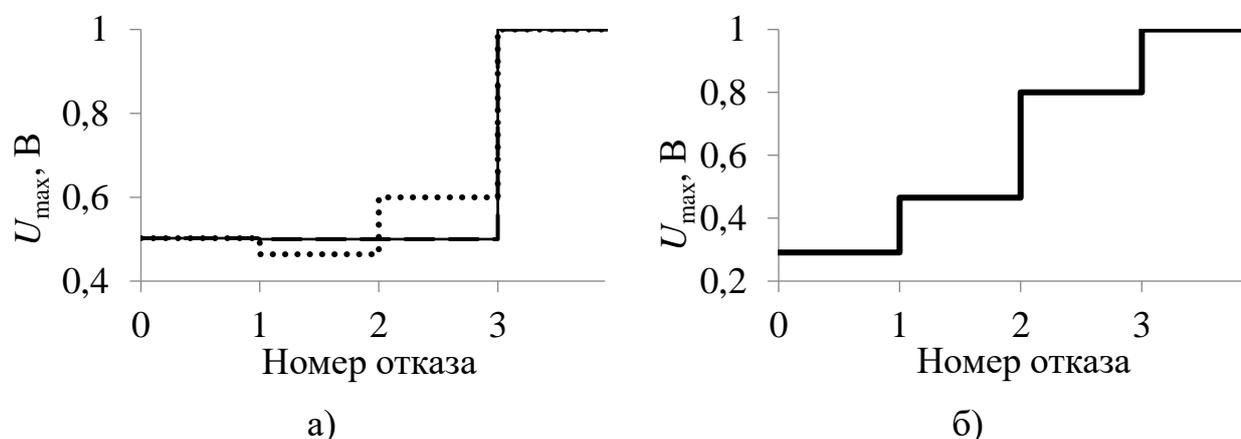


Рис. 18. Зависимости  $U_{\max}$  для вариантов 1 (⋯⋯), 2 (---), 3 (—) от номера отказа вдоль проводника для структур с исходным (а) и для варианта 1 (—) – с оптимальным (б) наборами параметров

Из рис. 18 а видно, что после отказа 1 для варианта 2 будет наименьшее значение  $U_{\max}$  равное 0,3 В, а после отказа 2 наименьшее значение  $U_{\max}$  равное 0,38 В будет для варианта 3. Таким образом, нельзя сделать однозначного вывода, какой вариант переключения оптимален для неоптимизированного набора параметров.

Из рис. 18 б видно, что после отказов 1 и 2 наименьшие значения  $U_{\max}$  у варианта 3. Они равны 0,33 В и 0,37 В, соответственно. Таким образом, для оптимизированного набора параметров оптимален вариант переключения проводников 3.

На рис. 19 и 20 представлены зависимости  $U_{\max}$  для вариантов 1, 2, 3 от отказов на конце и вдоль проводников, а также отказов вдоль проводников, которые выводят из строя сразу два проводника (обозначены серым цветом).

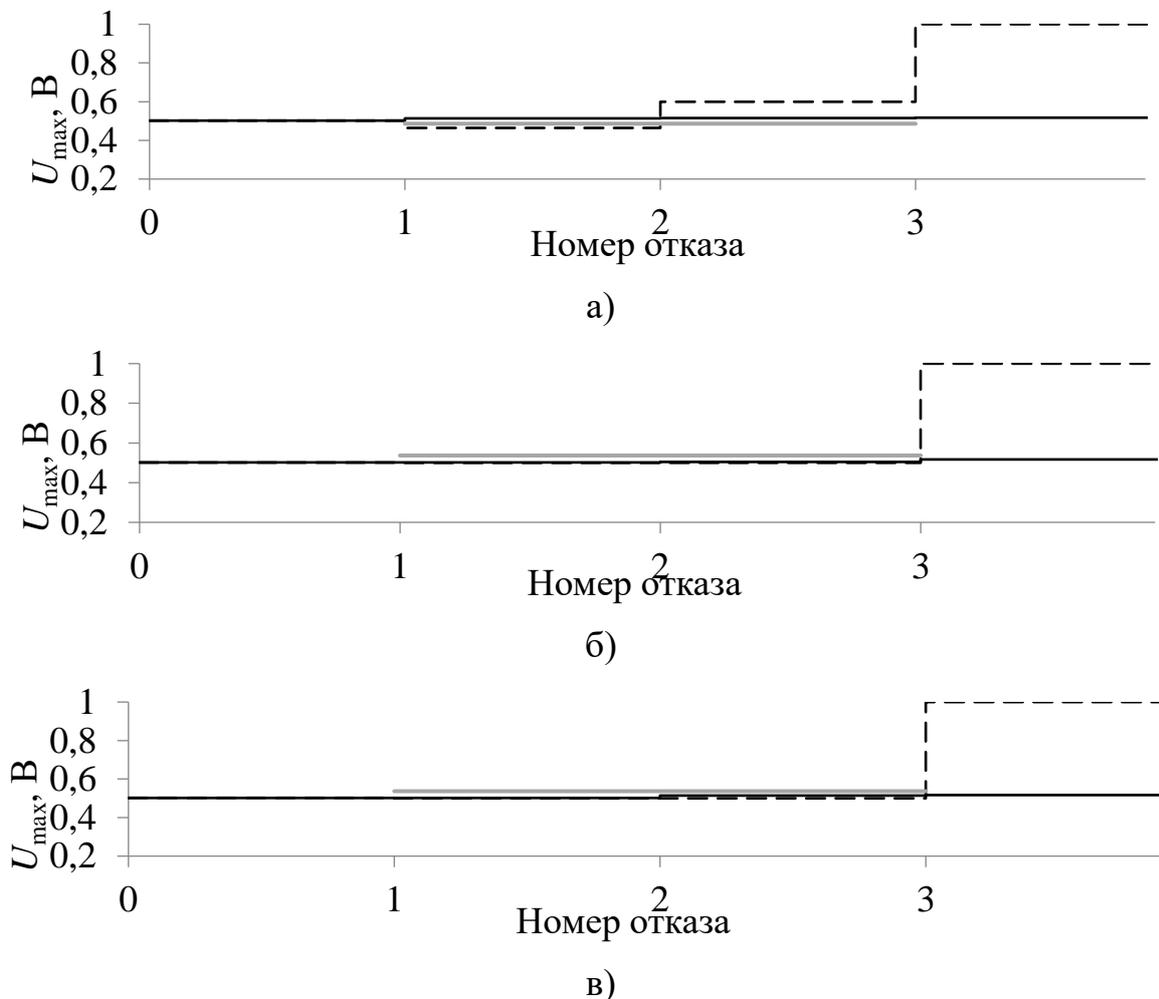


Рис. 19. Зависимости  $U_{\max}$  для вариантов 1 (а), 2 (б), 3 (в) от отказов на конце (—), вдоль проводников (- - -) и отказов двух проводников одновременно (—)



Рис. 20. Зависимости  $U_{\max}$  для оптимального варианта 3 от отказов на конце (—), вдоль проводников (- - -) и отказов двух проводников одновременно (—)

Видно, что изменение значения  $U_{\max}$  для оптимального варианта переключения меньше, чем для остальных вариантов. При этом  $U_{\max}$  для отказов сразу двух проводников входит в диапазон  $U_{\max}$  для отказов на конце и вдоль проводников. Таким образом, из анализа отказов на конце и вдоль проводников структур с исходным набором параметров оптимальны варианты переключения 2 и 3, а с оптимизированным – вариант 1, поскольку  $U_{\max}$  после отказов 1 и 2 на 5 и 38 % меньше, чем для максимальных значений  $U_{\max}$  других вариантов.

### Структура с исполнением опорного проводника сверху и снизу (многослойная печатная плата)

Далее представлены моделирование, оценка и выбор оптимального порядка переключения цепей с трехкратным модальным резервированием для структуры с исполнением опорного проводника сверху и снизу [9] после отказов вдоль проводников. Поперечное сечение структуры представлено на рис. 21. Исходные параметры поперечного сечения:  $s=200$  мкм,  $w=200$  мкм,  $t=35$  мкм,  $h=180$  мкм,  $\epsilon_{r1}=10$ ,  $\epsilon_{r2}=4,3$ , расстояние от стенок до структуры 360 мкм (сверху и снизу). Оптимальные параметры:  $s=200$  мкм (без изменений);  $w=260$  мкм;  $t=135$  мкм;  $h=100$  мкм;  $\epsilon_r$  не менялись. Эквивалентная схема структуры приравнена на рис. 1.

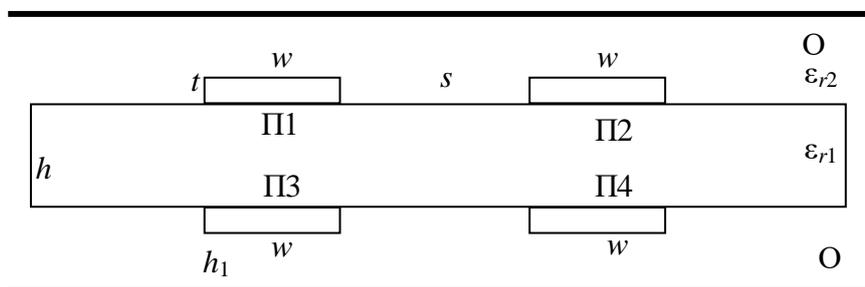


Рис. 21. Поперечное сечение структуры с исполнением опорного проводника сверху и снизу, где проводники: П1, П2, П3, П4 – сигнальные (резервируемый и резервные); О – опорный

На вход структуры длиной 0,5 м, с исходным и оптимальным наборами параметров до отказов, подавались импульсы с ЭДС 2 В и  $t_{\Sigma}=50, 120$  пс, соответственно (в соответствии с пунктом 1 алгоритма, рассмотренного выше, для каждого набора параметров). Из вычисленных форм напряжений на дальнем конце активного проводника видно (рис. 22), что воздействующие импульсы раскладываются на 4 импульса со значениями  $U_{\max}$  по 0,25 и 0,243 В для исходного и оптимизированного наборов параметров, соответственно.

На рис. 23, 24 и 25 представлены зависимости  $U_{\max}$  от  $l_1$  при отказах вдоль проводника после отказа 1 для вариантов переключения 1, 2, 3, соответственно.

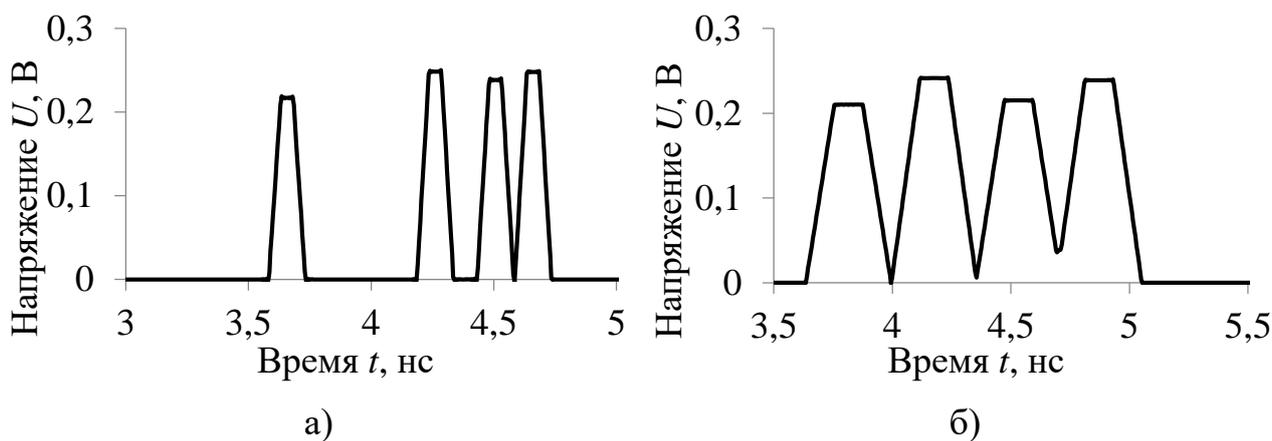


Рис. 22. Формы напряжения на дальнем конце активного проводника структуры для исходного (а) и оптимизированного (б) наборов параметров

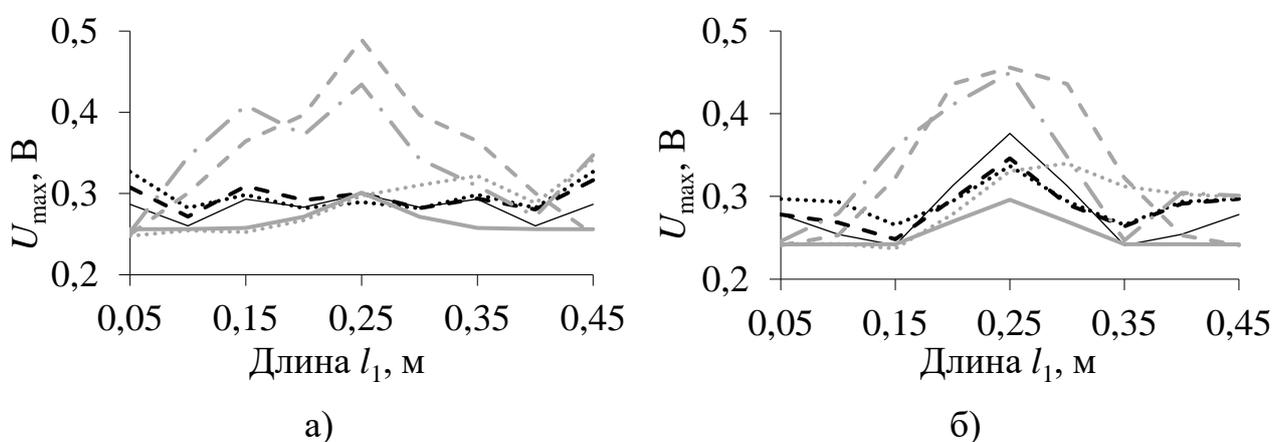


Рис. 23. Зависимости  $U_{\max}$  от  $l_1$  при отказе типов XX–XX (····), XX–КЗ (КЗ – XX) (- - -), КЗ – КЗ (—), XX–замыкание на ПЗ (- - -), XX–замыкание на П4 (—), замыкание на ПЗ (- · -), замыкание на П4 (····) для варианта переключения 1 для структур с исходными (а) и оптимизированными (б) параметрами

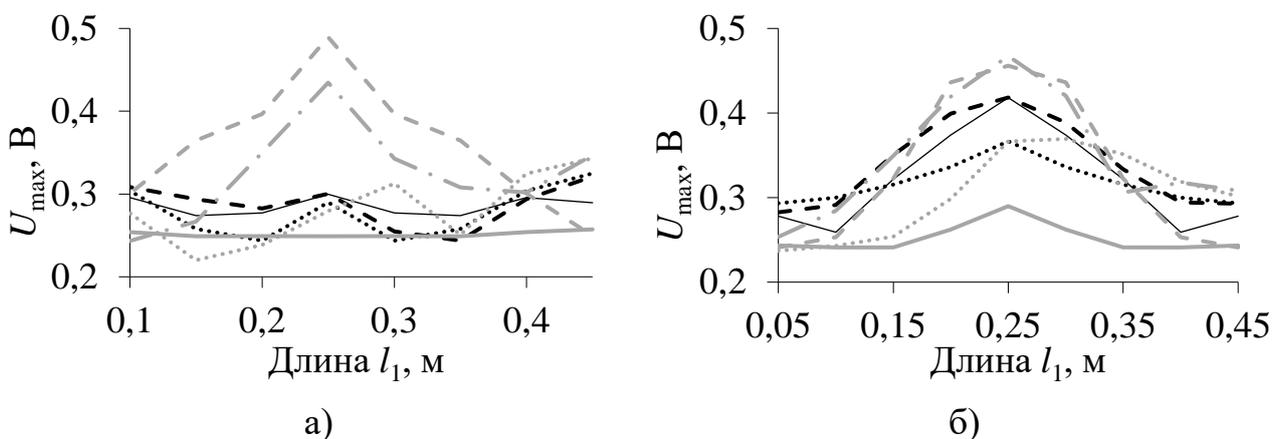


Рис. 24. Зависимости  $U_{\max}$  от  $l_1$  при отказе типов XX–XX (····), XX–КЗ (КЗ – XX) (- - -), КЗ – КЗ (—), XX–замыкание на П2 (- - -), XX–замыкание на П4 (—), замыкание на П2 (- · -), замыкание на П4 (····) для варианта переключения 2 для структур с исходными (а) и оптимизированными (б) параметрами

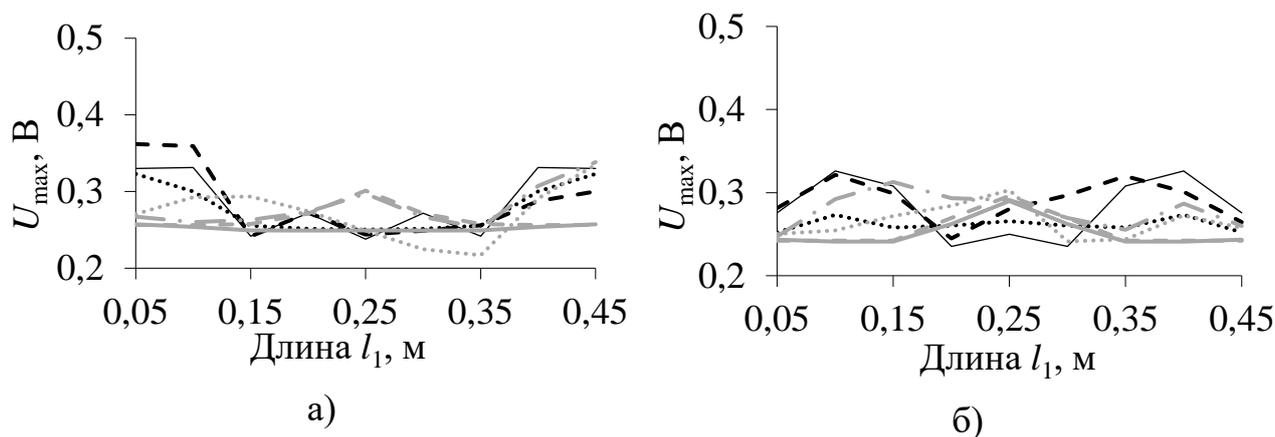


Рис. 25. Зависимости  $U_{\max}$  от  $l_1$  при отказе типов XX–XX (⋯), XX–К3 (К3 – XX) (---), К3 – К3 (—), XX–замыкание на П2 (- · -), XX–замыкание на П3 (—), замыкание на П2 (- · -), замыкание на П3 (⋯) для варианта переключения 3 для структур с исходными (а) и оптимизированными (б) параметрами

Из рис. 23 а, 24 а и 25 а видно, что  $U_{\max}$  изменяется до 0,33, 0,32, 0,33 В, соответственно. Из рис. 23 б, 24 б и 25 б видно, что  $U_{\max}$  изменяется до 0,37, 0,42, 0,33 В, соответственно.

На рис. 26 представлены зависимости  $U_{\max}$  на дальнем конце резервируемого проводника структур, с исходным и оптимальным наборами параметров после отказа 2 вдоль проводника на одном расстоянии от начала линии, от номера вычисления.

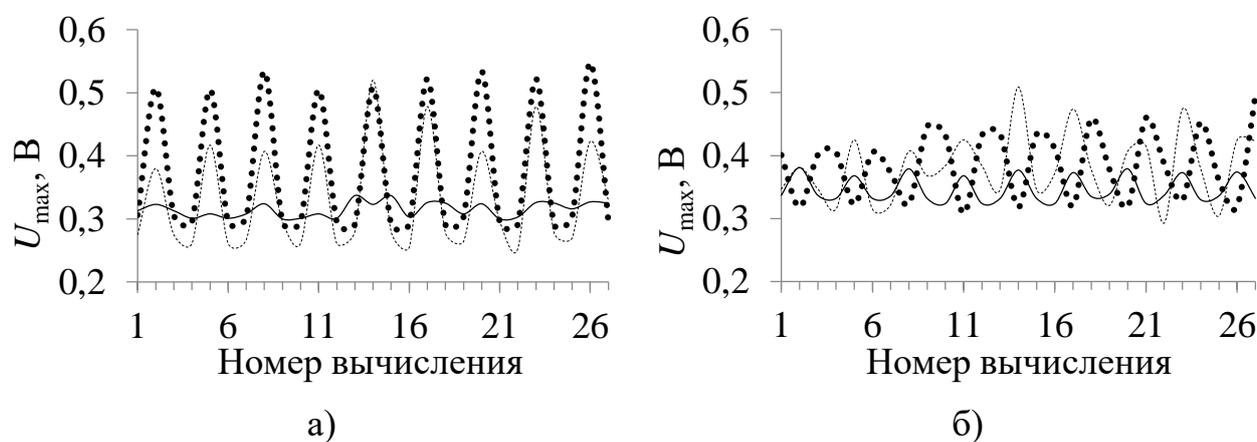


Рис. 26. Зависимости  $U_{\max}$  на дальнем конце резервируемого проводника структур с исходным (а) и оптимальным (б) наборами параметров после отказа 2 от номера вычисления при вариантах переключения 1 (---), 2 (⋯) и 3 (—)

Из рис. 26 а видно, что при вариантах переключения 1, 2, 3 после отказа 2 наблюдается изменение значения  $U_{\max}$  до 0,52, 0,55 и 0,34 В, соответственно. После отказа 2 оптимален вариант переключения 3 для структуры с исходными параметрами. А для рис. 26 б наблюдается изменение значения  $U_{\max}$  до 0,52, 0,55 и

0,34 В, соответственно. После отказа 2 оптимальным вариантом переключения 3 для структуры с оптимизированными параметрами.

На рис. 27 представлены зависимости  $U_{\max}$ , для вариантов переключения 1, 2, 3, от номера отказов.

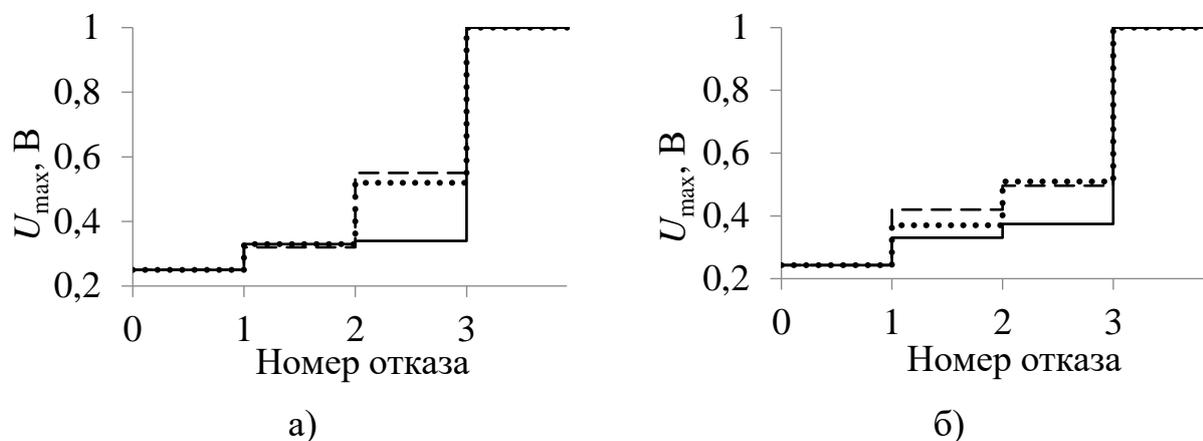


Рис. 27. Зависимости  $U_{\max}$  для вариантов 1 (···), 2 (- -), 3 (—) от номера отказа вдоль проводника для структур с исходным (а) и оптимальным (б) наборами параметров

Из рис. 27 а видно, что после отказа 1 для варианта 2 будет наименьшее значение  $U_{\max}=0,3$  В, а после отказа 2 наименьшее значение  $U_{\max}=0,38$  В будет для варианта 3. Таким образом, нельзя сделать однозначного вывода, какой вариант переключения оптимален для неоптимизированного набора параметров. Из рис. 27 б видно, что после отказов 1 и 2 наименьшие значения  $U_{\max}$  будут у варианта 3. Они равны 0,33 В и 0,37 В, соответственно. Таким образом, для оптимизированного набора параметров оптимален вариант переключения проводников 3.

В таблице 2 представлены зависимости  $U_{\max}$  для вариантов 1, 2, 3 от отказов на конце и вдоль проводников, а также отказов вдоль проводников, которые выводят из строя сразу два проводника (обозначены серым цветом).

Видно, что изменение значения  $U_{\max}$  для оптимального варианта переключения (вариант 3) меньше, чем для остальных вариантов. При этом  $U_{\max}$  для отказов сразу двух проводников входит в диапазон  $U_{\max}$  для отказов на конце и вдоль проводников. Таким образом, из анализа отказов на конце и вдоль проводников структур с оптимизированным набором параметров оптимален вариант переключения 3, поскольку  $U_{\max}$  после отказов 1 и 2 на 8 и 54 % меньше, чем для максимальных значений  $U_{\max}$  других вариантов.

Таблица 2 – Зависимости  $U_{\max}$  для вариантов 1, 2, 3 от отказов на конце (—), вдоль проводников (- - -) и двух проводников одновременно (—)

Вариант	Исходные	Оптимизированные
1		
2		
3		

### Структура с исполнением опорного проводника в виде боковых полигонов

Далее представлены моделирование, оценка и выбор оптимального порядка переключения цепей с трехкратным модальным резервированием, для структуры с исполнением опорного проводника в виде боковых полигонов [10], после отказов вдоль проводников. Поперечное сечение структуры представлено на рис. 28. Исходные параметры поперечного сечения:  $s=510$  мкм;  $w=1600$  мкм; ширина опорного проводника  $w_1=1600$  мкм;  $t=35$  мкм;  $h=500$  мкм;  $d=1600$  мкм (в данной структуре это расстояние между опорным проводником до ближайшего сигнального);  $\epsilon_r=4,5$ . Оптимальные параметры:  $s=220$  мкм;  $w=500$  мкм;  $w_1=1600$  мкм (без изменений);  $t=18$  мкм;  $h=300$  мкм;  $d=800$  мкм.

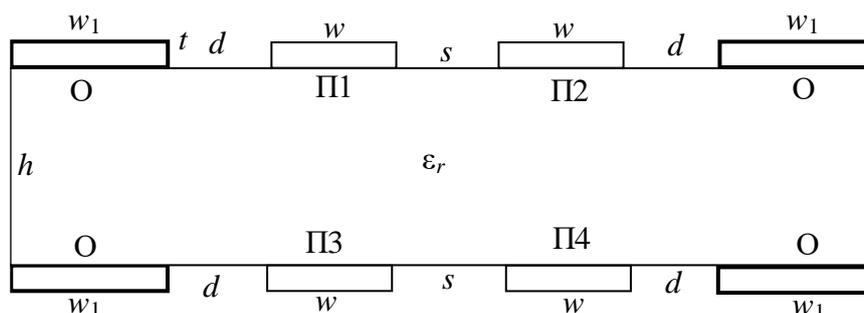


Рис. 28. Поперечное сечение структуры с исполнением опорного проводника в виде боковых полигонов (двусторонняя ПП), где проводники: П1, П2, П3, П4 – сигнальные (резервируемый и резервные); О – опорный

На вход структуры длиной 0,5 м с исходным и оптимизированным наборами параметров до отказов, подавались импульсы с ЭДС 2 В с  $t_{\Sigma}=70, 80$  пс, соответственно (в соответствии с пунктом 1 алгоритма, рассмотренного выше, для каждого набора параметров). Из вычисленных откликов на выходе (рис. 29) видно, что воздействующие импульсы раскладываются на 4 импульса с  $U_{\max}=0,25$  В.

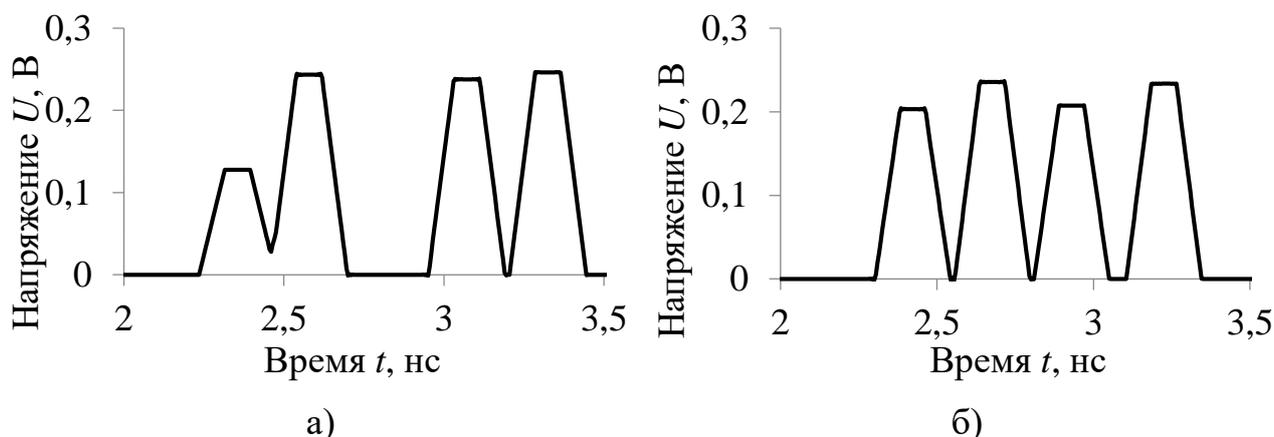


Рис. 29. Формы напряжения на дальнем конце активного проводника структуры для исходного (а) и оптимального (б) наборов параметров

На рис. 30, 31 и 32 представлены зависимости  $U_{\max}$  от  $l_1$  при отказах вдоль проводника после отказа 1 для вариантов переключения 1, 2, 3, соответственно.

На рис. 33 представлены зависимости  $U_{\max}$  на дальнем конце резервируемого проводника структур с исходным и оптимальным наборами параметров после отказа 2 вдоль проводника на одном расстоянии от начала линии от номера вычисления.

Из рис. 33 б видно, что при вариантах переключения 1, 2, 3 после отказа 2 наблюдается изменение значения  $U_{\max}$  до 0,495, 0,506 и 0,411 В. После отказа 2 оптимален вариант переключения 3.

На рис. 34 представлены зависимости  $U_{\max}$  для вариантов переключения 1, 2, 3 от отказов.

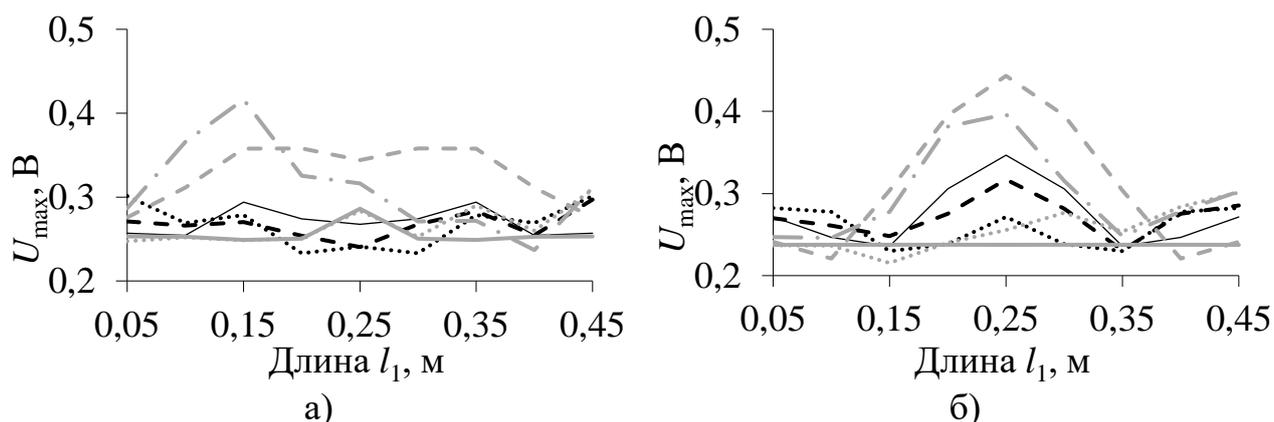


Рис. 30. Зависимости  $U_{\max}$  от  $l_1$  при отказе типов XX–XX (····), XX–К3 (К3 – XX) (- - -), К3 – К3 (—), XX–замыкание на П3 (- - -), XX–замыкание на П4 (—), замыкание на П3 (- · · -), замыкание на П4 (····) для варианта переключения 1 для структур с исходными (а) и оптимизированными (б) параметрами

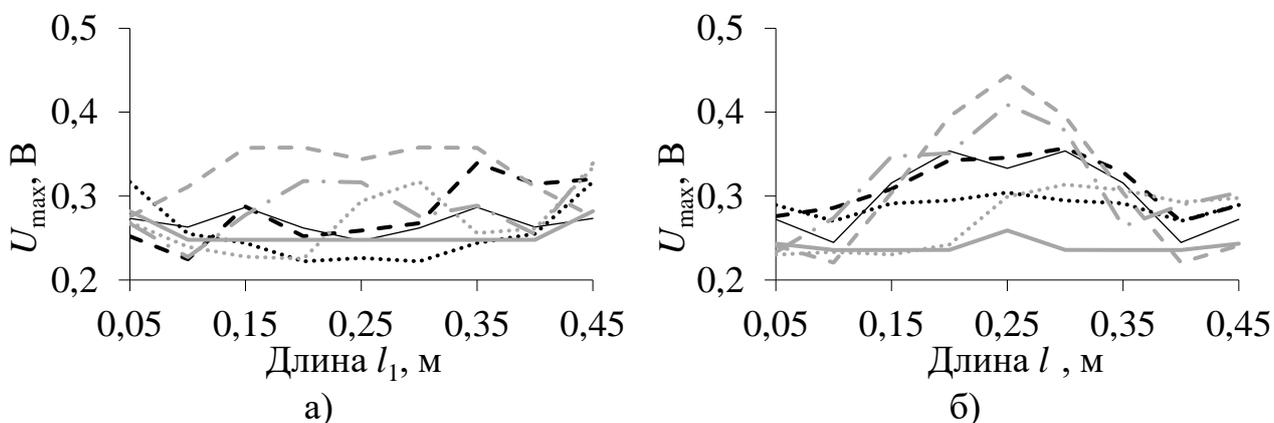


Рис. 31. Зависимости  $U_{\max}$  от  $l_1$  при отказе типов XX–XX (····), XX–К3 (К3 – XX) (- - -), К3 – К3 (—), XX–замыкание на П2 (- - -), XX–замыкание на П4 (—), замыкание на П2 (- · · -), замыкание на П4 (····) для варианта переключения 2 для структур с исходными (а) и оптимизированными (б) параметрами

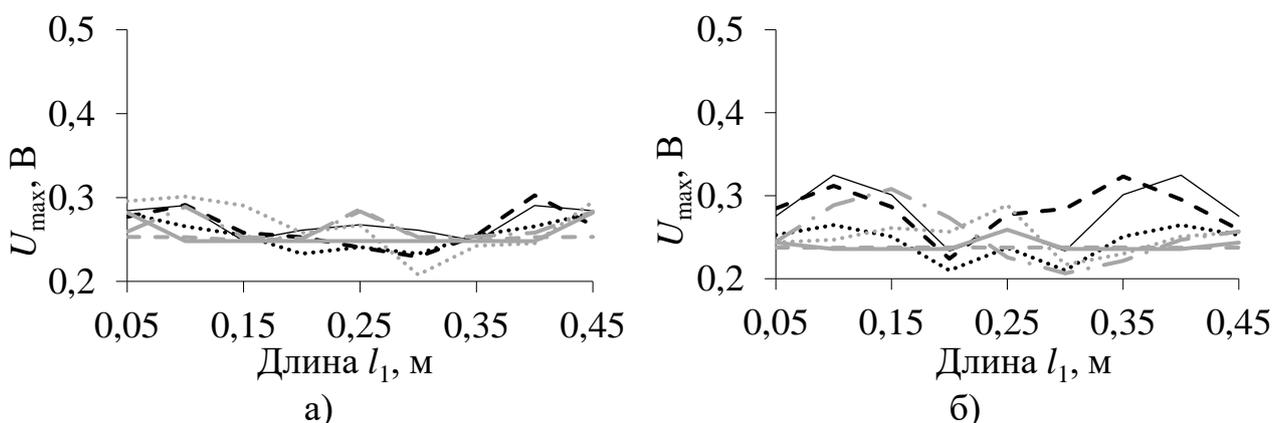


Рис. 32. Зависимости  $U_{\max}$  от  $l_1$  при отказе типов XX–XX (····), XX–К3 (К3 – XX) (- - -), К3 – К3 (—), XX–замыкание на П2 (- - -), XX–замыкание на П3 (—), замыкание на П2 (- · · -), замыкание на П3 (····) для варианта переключения 3 для структур с исходными (а) и оптимизированными (б) параметрами

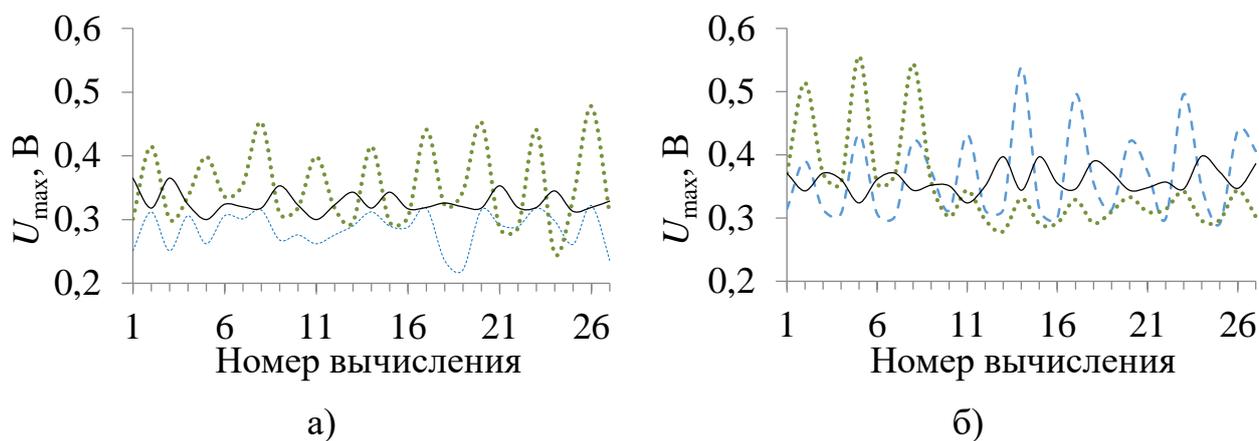


Рис. 33. Зависимость  $U_{max}$  на дальнем конце резервируемого проводника структур с исходным (а) и оптимизированными (б) наборами параметров после отказа 2 от номера вычисления при вариантах переключения 1 (- -), 2 (••) и 3 (—)

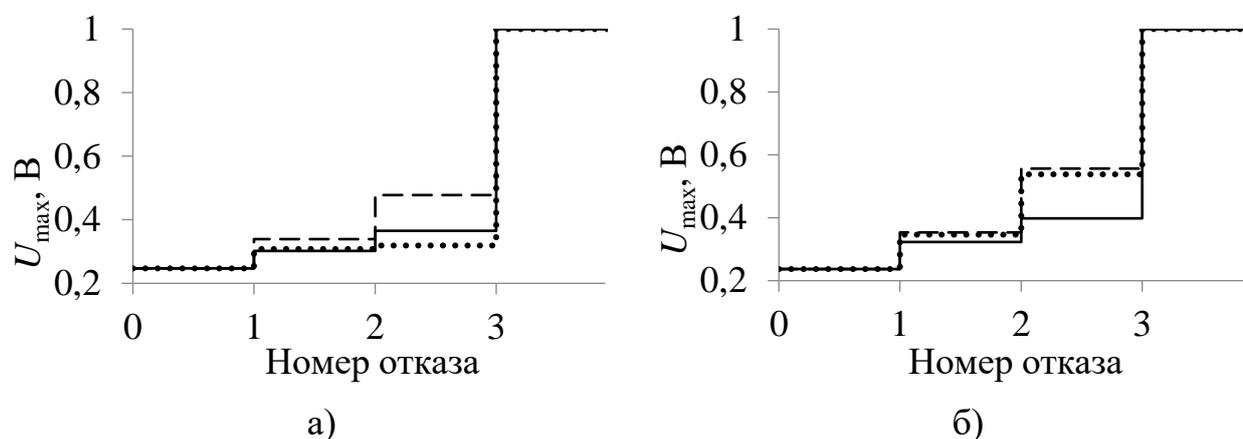


Рис. 34. Зависимости  $U_{max}$  для вариантов 1 (••), 2 (- -), 3 (—) от номера отказа вдоль проводника для структур с исходным (а) и оптимизированными (б) наборами параметров

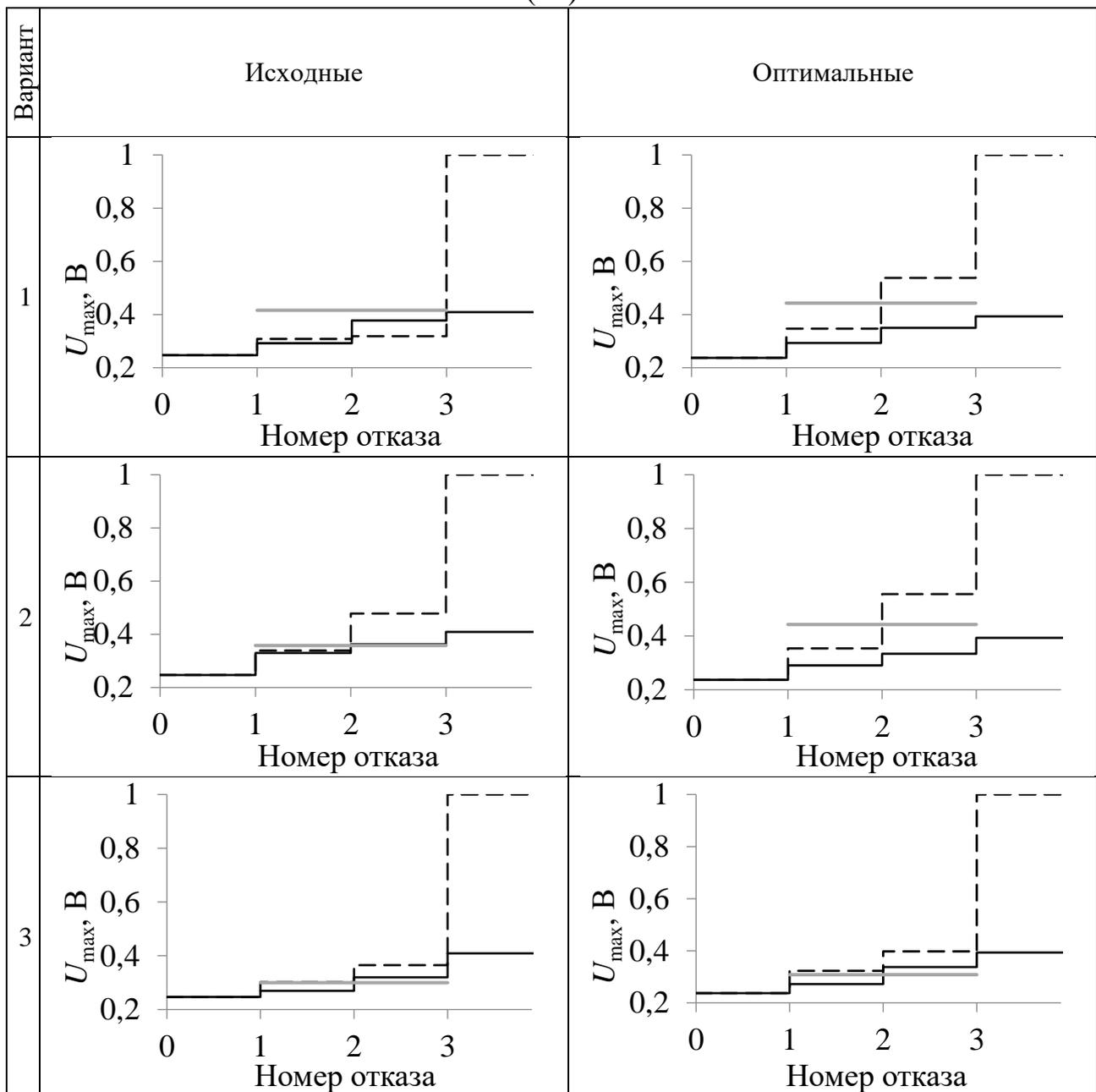
Из рис. 34 а видно, что после отказа 1 для варианта 2 будет наименьшее значение  $U_{max}$  равное 0,3 В, а после отказа 2 наименьшее значение  $U_{max}$  равное 0,38 В будет для варианта 3. Таким образом, нельзя сделать однозначного вывода, какой вариант переключения оптимален для неоптимизированного набора параметров.

Из рис. 34 б видно, что после отказов 1 и 2 наименьшие значения  $U_{max}$  будут у варианта 3. Они равны по 0,33 В и 0,37 В, соответственно. Таким образом, для оптимизированного набора параметров оптимален вариант переключения проводников 3.

В таблице 3 представлены зависимости  $U_{max}$  для вариантов 1, 2, 3 от отказов на конце и вдоль проводников, а также отказов вдоль проводников, которые выводят из строя сразу два проводника (обозначены серым цветом).

Видно, что изменение значения  $U_{\max}$  для оптимального варианта переключения (вариант 3) меньше, чем для остальных вариантов. При этом,  $U_{\max}$  для отказов сразу двух проводников входит в диапазон  $U_{\max}$  для отказов на конце и вдоль проводников. Таким образом, из анализа отказов на конце и вдоль проводников структуры с оптимизированным набором параметров оптимален вариант переключения 3, поскольку  $U_{\max}$  после отказов 1 и 2 на 19 и 72 % меньше, чем для максимальных значений  $U_{\max}$  других вариантов.

Таблица 3 – Зависимости  $U_{\max}$  для вариантов 1, 2, 3 от номера отказов на конце (—), вдоль проводников (- - -) и отказов двух проводников одновременно (—)



## Выводы

Таким образом, выполнены моделирование, оценка и выбор оптимального порядка переключения цепей с трехкратным модальным резервированием после отказов вдоль проводников. Практическая значимость определяется возможностью учета специфики таких отказов для задания оптимального порядка переключения. Так, для структуры с исполнением опорного проводника в центре с оптимизированным набором параметров оптимален вариант переключения 3, поскольку значения  $U_{max}$  после отказов 1 и 2 на 13 % и 69 % меньше, чем для наихудшего варианта. Для структуры с исполнением опорного проводника вокруг с оптимизированным набором параметров оптимален вариант 1, поскольку значения  $U_{max}$  после отказов 1 и 2 на 5 % и 38 % меньше, чем для наихудшего варианта. Для структуры с исполнением опорного проводника сверху и снизу с оптимизированным набором параметров оптимален вариант переключения 3, поскольку значения  $U_{max}$  после отказов 1 и 2 на 8 % и 54 % меньше, чем для наихудшего варианта. Для структуры с исполнением опорного проводника в виде боковых полигонов с оптимизированным набором параметров оптимален вариант переключения 3, поскольку значения  $U_{max}$  после отказов 1 и 2 на 19 % и 72 % меньше, чем для наихудшего варианта. Таким образом, выбор оптимального варианта переключения после отказов 1 и 2 для рассмотренных структур позволяет уменьшить максимальное выходное напряжение на 5–72 %.

Работа выполнена при финансовой поддержке российского научного фонда (проект №20-19-00446) в ТУСУРе.

## Литература

1. IEC 61508-1:2010. Functional Safety of Electrical/Electronic/Programmable Electronic Safety-Related Systems. Part 1: General requirements. Edition 2.0 2010-04. Geneva: International Electrotechnical Commission (IEC), 2010. 127 p.
2. Здухов Л.Н., Исаев А.П., Парфёнов Ю.В., Титов Б.А. Методика оценки вероятности сбоя цифровых устройств при воздействии сверхкоротких электромагнитных импульсов // Журнал радиоэлектроники. 2011. № 5. С. 6.
3. Pissoort D., Lannoo J., Van Waes J., Degraeve A., Boydens J. Techniques and measures to achieve EMI resilience in mission- or safety-critical systems // IEEE Electromagnetic Compatibility Magazine. 2017. Vol. 6. No. 4. P. 107–114.
4. Здухов Л.Н., Парфёнов Ю.В., Тарасов О.А., Чепелев В.М. Три возможных механизма возникновения отказов электронных устройств в результате электромагнитного воздействия // Технологии ЭМС. 2018. № 2(65). С. 22–34.
5. Gazizov A.T., Zabolotskii A.M., Gazizov T.R. Measurement and simulation of time response of printed modal filters with broad-side coupling // Journal of Communications Technology and Electronics. 2018. Vol. 63. No. 3. P. 270–276.
6. Gazizov T.R., Orlov P.E., Zabolotsky A.M., Kuksenko S.P. New concept of critical infrastructure strengthening // International Conference of Numerical Analysis and Applied Mathematics. 2016. Vol. 1738. № 1. P. 1–3.

7. Шарафутдинов В.Р., Газизов Т.Р. Анализ способов резервирования на основе модальной фильтрации // Системы управления, связи и безопасности. 2019. № 3. С. 117–144.

8. Жечев Е.С., Белоусов А.О., Газизов Т.Р., Зоболоцкий А.М., Черникова Е.Б. Способ компоновки печатных проводников для цепей с модальным резервированием // Патент на изобретение RU 2751672 С1, опубл. 15.07.2021, бюл. №20. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=46476496> (дата обращения 21.05.2023).

9. Шарафутдинов В.Р., Газизов Т.Р., Медведев А.В. Способ трехкратного резервирования межсоединений // Патент на изобретение RU 2738955, опубл. 21.12.2020, бюл. №36. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44621770> (дата обращения 21.05.2023).

10. Газизов Т.Р., Орлов П.Е., Шарафутдинов В.Р. Способ трехкратного резервирования цепей в многослойных печатных платах // Патент на изобретение RU 2663230, опубл. 02.08.2018, Бюл. №22. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=38155960> (дата обращения 21.05.2023).

11. Belousov A.O., Medvedev A.V., Chernikova E.B., Gazizov T.R., Zabolotsky A.M. Switching order after failures in symmetric protective electrical circuits with triple modal reservation // Symmetry. 2021. Vol. 13. No. 6. P. 1–22.

12. Medvedev A.V., Zhechev Y.S., Gazizov T.R. Experimental Study of a Structure with Triple Modal Reservation Before and After Failures // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. 2022. Vol. 65. No. 1. P. 1–4.

13. Данилова Е.А. Классификация дефектов печатных плат // Труды международного симпозиума «Надежность и качество». 2013. Т. 1. С. 325–328.

14. Bin Y., Chen H., Lu Y., Luo D. Study of key failure modes of PTH in high density printed board and case study // 2014 15th International conference on electronic packaging technology. Chengdu, China. 2014. P. 923–927.

15. Kovtun I., Boiko J., Petrashchuk S. Nondestructive strength diagnostics of solder joints on printed circuit boards // 2017 International conference on information and telecommunication technologies and radio electronics (UkrMiCo). 2017. P. 1–4.

16. Lingayat T.D. Prediction of electrostatic discharge soft failure issue in case of a six layer PCB of a tablet using SIwave tool // 2016 IEEE International conference on recent trends in electronics, information & communication technology (RTEICT). Bangalore, India. 2016. P. 1361–1366.

17. Медведев А.В., Газизов Т.Р. Алгоритм анализа структур с трехкратным модальным резервированием после отказов // Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем (МЭС). 2021. № 4. С. 59–66.

18. Kuksenko S.P. Preliminary results of TUSUR University project for design of spacecraft power distribution network: EMC simulation // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. № 012110. P. 1–7.

## References

1. IEC 61508-1:2010. Functional Safety of Electrical/Electronic/Programmable Electronic Safety-Related Systems. Part 1: General requirements. Edition 2.0 2020-04. Geneva, International Electrotechnical Commission (IEC), 2010. 127 p.

2. Zdukhov L.N., Isaev A.P., Parfyonov Y.V., Titov B.A. *Metodika otcenke veroiatnosti sboev cifrovih ystroistv pri vozdeistvii sverhkorotkih ielktromagnitnih impulsov* [Methodology for estimating the failure probability of digital devices when exposed to ultra-short electromagnetic pulses]. *Jyurnal Radioelektroniki*, 2011, no. 5, pp. 1–6 (in Russia).

3. Pissoort D., Lannoo J., Van Waes J., Degraeve A., Boydens J. Techniques and measures to achieve EMI resilience in mission- or safety-critical systems. *IEEE Electromagnetic Compatibility Magazine*, 2017, vol. 6, no. 4, pp. 107–114.

4. Zdoukhov L.N., Parfenov Yu.V., Tarasov O.A., Chepelev V.M. *Tre vozmozhnih mehanizma vzniknovenia otkazov elektronih ystroistv v rezultate elektromagnitnogo vozdeistvia* [Three possible mechanisms for the failure of electronic devices as a result of electromagnetic interference]. *Tehnologii Elektromagnitnoi Sovmestivosti*, 2018, no. 2, pp. 22–34 (in Russia).

5. Gazizov A.T., Zabolotskii A.M., Gazizov T.R. Measurement and Simulation of Time Response of Printed Modal Filters with Broad-Side Coupling. *Journal of Communications Technology and Electronics*, 2018, vol. 63, no. 3, pp. 270–276.

6. Gazizov T.R., Orlov P.E., Zabolotsky A.M., Kuksenko S.P. New concept of critical infrastructure strengthening. *AIP Conference Proceedings*, 2016, vol. 1738, 4 p.

7. Sharafutdinov V.R., Gazizov T.R. *Analiz sposobov rezervirovaniya na osnove modalnoy filtracii* [Analysis of redundancy methods based on modal filtering]. *Sistemi Ypravlenia, Svazi i Bezopasnosti*, 2019, no. 3, pp. 117–144 (in Russia).

8. Zhechev E.S., Belousov A.O., Gazizov T.R., Zabolotsky A.M., Chernikova E.B. Method of printed conductor layout for modal redundant circuits // Patent Russian, no. RU 2751672 C1. Publish. 15.07.2021, bul. no. 20. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=46476496> (accessed 21.05.2023) (in Russian).

9. Sharafutdinov V.R., Gazizov T.R., Medvedev A.V. Method of triple interconnection reservation. Patent Russian, no. RU 2738955. Publish. 21.12.2020, bul. no. 36. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44621770> (accessed 21.05.2023) (in Russian).

10. Gazizov T.R., Orlov P.E., Sharafutdinov V.R. Method for triple circuit redundancy in multilayer printed circuit boards. Patent Russian, no. RU 2663230. Publish. 02.08.2018, bul. no. 22. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=38155960> (accessed 21.05.2023) (in Russian).

11. Belousov A.O., Medvedev A.V., Chernikova E.B., Gazizov T.R., Zabolotsky A.M. Switching order after failures in symmetric protective electrical circuits with triple modal reservation. *Symmetry*, 2021, vol. 13, no. 6, pp. 1–22.

12. Medvedev A.V. Zhechev Y.S., Gazizov T.R. Experimental Study of a Structure with Triple Modal Reservation Before and After Failures. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2022, vol. 65, no. 1, pp. 1–4.

13. Danilova E.A. *Klassifikacia defektov pechatnih plat* [Classification of PCB defects]. *Materialy Mezhdunarodnogo Simpoziuma «Nadezhnost' i Kachestvo»*, 2013, no. 1, pp. 325–328 (in Russia).

14. Bin Y., Chen H., Lu Y., Luo D. Study of key failure modes of PTH in high density printed board and case study. *2014 15th International Conference on Electronic Packaging Technology*, 2014, pp. 923–927.
15. Kovtun I., Boiko J., Petrashchuk S. Nondestructive strength diagnostics of solder joints on printed circuit boards. *2017 International conference on information and telecommunication technologies and radio electronics (UkrMiCo)*, 2017. pp. 1–4.
16. Lingayat T.D. Prediction of electrostatic discharge soft failure issue in case of a six layer PCB of a tablet using SIwave tool. *2016 IEEE International conference on recent trends in electronics, information & communication technology (RTEICT)*, Bangalore, India. 2016. pp. 1361–1366.
17. Medvedev A.V., Gazizov T.R. *Algoritm analiza stryktyr s trehkratnim modalnim rezervirovaniem posle otkazov* [Analysis algorithm for structures with threefold modal reservation after failures]. *Problemy Razvitiya Perspektivnyh Mikro- i Naoelektronnyh Sistem (MES)*, 2021, no. 4, pp. 59–66 (in Russia).
18. Kuksenko S.P. Preliminary results of TUSUR University project for design of spacecraft power distribution network: EMC simulation. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 2019, no. 012110, pp. 1–7.

### Информация об авторе

*Медведев Артём Викторович* – соискатель ученой степени кандидата технических наук. Младший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории фундаментальных исследований по электромагнитной совместимости. Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники. Область научных интересов: электромагнитная совместимость, устройства защиты, модальная фильтрация. E-mail: medart20@rambler.ru

Адрес: 634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, д. 40.

---

## Simulating, evaluating, and selecting the optimum switching order for circuits with triple modal reservation after failures along the conductors

A. V. Medvedev

**Problem statement:** When constructing competitive radioelectronic devices (REDs), particular attention should be paid to their high quality and reliability. This process must involve all stages of hardware production, starting with the design of printed circuit boards and cables. Modal reservation (MR) is a technique of improving electromagnetic compatibility and functional safety, which implies an increase in reliability. Theoretical studies of structures with MR have shown that failures at the ends of conductors in a reserved circuit can be successfully simulated by changing the boundary conditions: short circuit (SC) or open circuit (OC). However, various faults can also occur along the conductors. Their simulation models are more complex than those of faults at the ends of conductors. However, in order to determine the switching order of conductors more accurately, it is necessary to analyse various structures with triple MR and take into account failures both at the ends and along the conductors. **Purpose of work:** The purpose of this study is to simulate, evaluate, and select the optimum conductor switching order for circuits with triple MR, considering failures along the conductors. **Methods used:** To simulate, evaluate, and select the conductor switching order, we employ a quasistatic analysis system that uses an algorithm for analysing structures with triple MR before and after failures. **Novelty:** This is the first time, when structures with triple MR are analysed using initial and optimal

parameter sets after failures along the conductors. **Result:** The optimal switching order after failures along the conductors is determined for each of the structures. **Practical relevance:** The relevance is determined by the fact that the proposed approach allows taking into account the idiosyncratic nature of such failures to specify the optimal switching order of the conductors.

**Key words:** electromagnetic compatibility, functional safety, redundancy, modal reservation, printed circuit board, failure.

### Information about Author

*Artem Viktorovich Medvedev* – Doctoral Student. Research Assistant of the Research Laboratory of Fundamental Research on Electromagnetic Compatibility. Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics. Field of research: electromagnetic compatibility, protection devices, modal filtration. E-mail: medart20@rambler.ru

Address: Russia, 634035, Tomsk, Lenina prospect, 40.