

Специфические проблемы электромагнитной совместимости систем электропитания радиоэлектронных комплексов

В.Ф. Дмитриков, Д.В. Шушпанов, Н.В. Антонец, Д.Н. Кушнерёв

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича
191186, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург
наб. р. Мойки, 61

Спроектировано и разработано устройство защиты человека от поражения токами утечки в трехфазной сети с изолированной нейтралью мощной системы электропитания радиолокационной станции. Спроектировано и разработано устройство измерения сопротивления изоляции трехфазной сети с изолированной нейтралью между фазами и корпусом, которой включены конденсаторы фильтрации несимметричных помех суммарной величиной 1200 мкФ. В России такие устройства не выпускаются.

Ключевые слова: ИПН, радиолокационная станция, фильтр, ток утечки, компенсация, защита.

Введение

В современных мощных (единицы МВт) радиолокационных системах электропитание осуществляется по модульному принципу с двухступенчатым преобразованием (рис. 1, а).

Для решения проблемы электромагнитной совместимости (ЭМС) импульсных преобразователей с первичной сетью используют фильтры радиопомех (ФРП), ограничивающие симметричные и несимметричные помехи. Следует отметить, что электрическое взаимодействие каскадного соединения ФРП и преобразователя оказывает существенное влияние на режим работы аппаратуры в целом. Неправильное проектирование фильтра и силового преобразователя может привести к возникновению автоколебаний [1–7] и, как следствие, к потере работоспособности системы в целом.

Для устранения несимметричных помех в ФРП ставят конденсаторы C_{Y1} , C_{Y2} и C_{Y3} (рис. 1, а). Аналогично для уменьшения несимметричных помех между модулями ставят конденсаторы C_{Y4} , C_{Y5} (рис. 1, а). Величина этих конденсаторов ограничивается ГОСТом [8; 9] по допустимому значению токов утечки. Так как таких параллельно включенных модулей в современных радиолокационных системах сотни, то получившиеся значения конденсаторов (рис. 1, б), подключенных к корпусу, в сотни раз превышают допустимые значения, обусловленные ограничением токов утечки. Следовательно, величина

токов утечки при таком построении устройств электропитания современных радиолокационных систем будет в сотни раз превышать нормативные требования.

Для компенсации тока утечки в системе состоящей из сотен АС-DC преобразователей были рассмотрены возможности пассивного и активного методов компенсации. При касании человека любой фазы и корпуса системы, через человека протекает ток, ограниченный суммарной величиной конденсаторов, включенных между корпусом и фазными проводами и сопротивлением человека. В рассматриваемой нами модели суммарная емкость между каждой фазой и корпусом представлена конденсаторами по 400 мкФ, эквивалентное сопротивление человека равно 1 кОм.

В связи с огромным значением суммарной емкости между каждой фазой и корпусом на уровне сотни микрофарад, пассивный метод компенсации не представляется возможным реализовать. Использование активных методов компенсации токов утечки из-за распределенного характера систем электропитания мощных радиолокационных систем и необходимости мощного устройства компенсации токов утечки также не представлялось возможным в уже разработанном устройстве электропитания радиолокационной станции. Поэтому было принято решение не компенсировать ток утечки пассивными или активными методами, а защитить человека от поражения токами утечки на время его касания

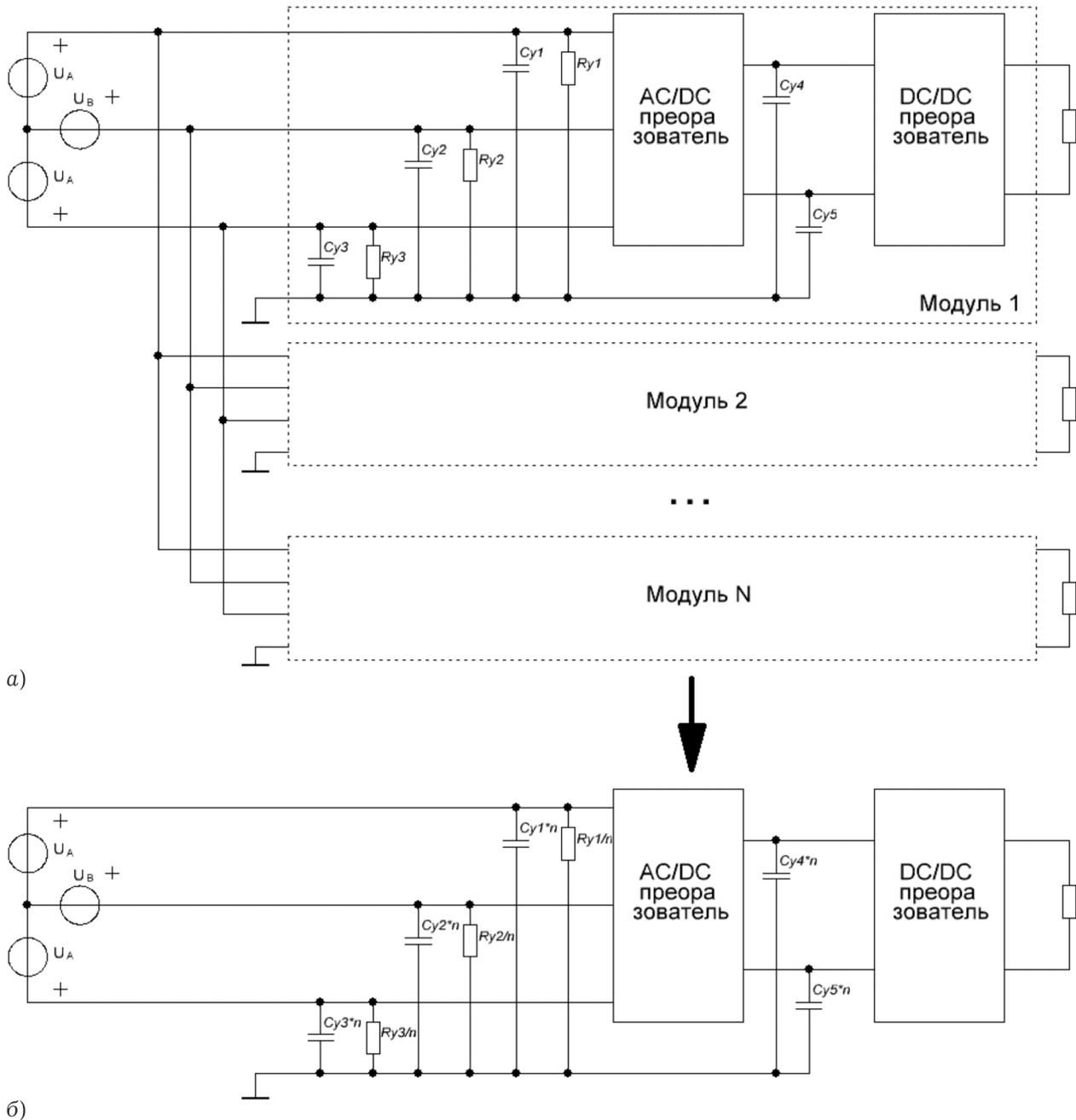


Рис. 1. Система электропитания радиолокационных систем

корпуса и фазы, закорачивая мощным ключом данную фазу на корпус.

На рис. 2 представлена схема устройства защиты обслуживающего персонала от поражения токами утечки: конденсаторно-измерительный модуль (КИМ) определяет информацию об изменении напряжений между фазными проводами и корпусом, которое может свидетельствовать о касании человеком фазного провода, схема управления определяет какой фазы коснулся человек и закорачивает соответствующим ключом (S_1 , S_2 или S_3) фазный провод, которого коснулся человек, на корпус.

Согласно ГОСТу [10] через человека, при соприкосновении его с сетью напряжением 220 В, 50 Гц, допустимо протекание тока 400 мА в течение не более 100 мс. Исходя из этого условия устройство защиты должно срабатывать за 80–100 мс. За это время необходимо определить фазу, которой коснулся человек, и закоротить ее на корпус.

Кроме защиты человека от поражения токами утечки необходимо было контролировать сопротивление изоляции трехфазной сети с изолированной нейтралью между фазами сети и корпусом устройства электропитания которого

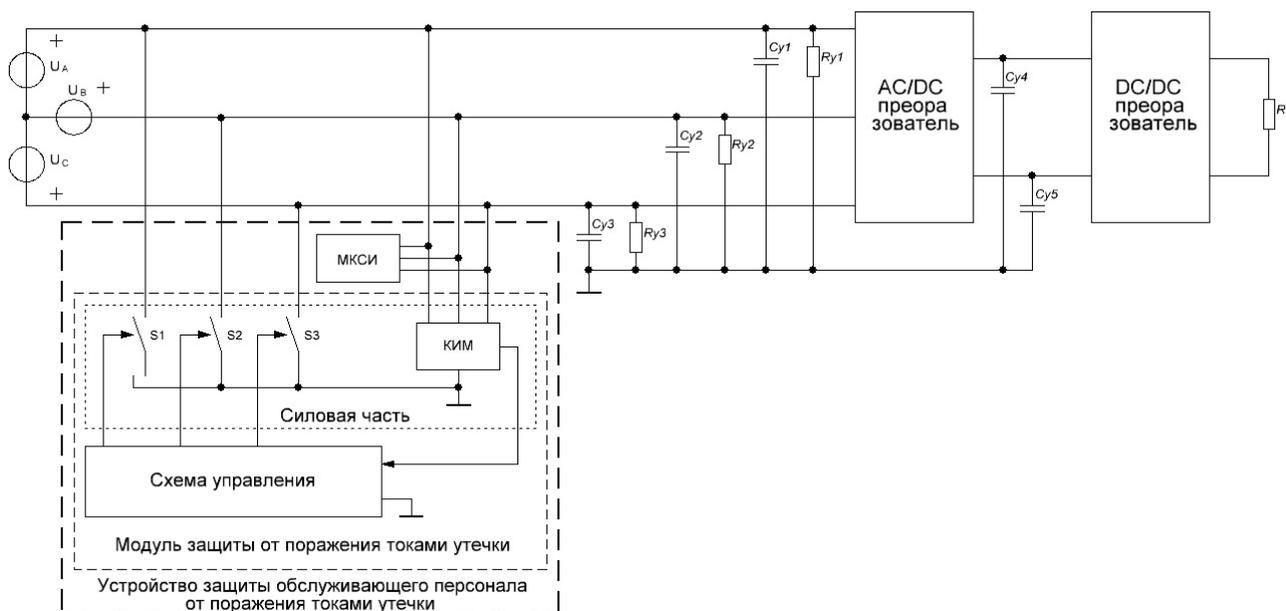


Рис. 2. Система электропитания радиолокационных систем с устройством защиты обслуживающего персонала от поражения токами утечки

включены в рассматриваемой радиолокационной станции конденсаторы для фильтрации несимметричных помех суммарной величиной 400 мкФ.

В России устройства измерения сопротивления изоляции для таких систем электропитания не выпускаются.

Поскольку определение времени касания человеком фазы и его защиту от поражения током утечки необходимо определить в течение 80–100 мс, а сопротивление изоляции сети, минимальное значение которого задано величиной 15 кОм, то для контроля сопротивления изоляции и разработки системы защиты человека от поражения токами утечки было принято решение делать два модуля отдельно. Модуль защиты от поражения токами утечки, который быстро (80–100 мс) определяет к какой фазе прикоснулся человек и закорачивает эту фазу на корпус, и модуль контроля сопротивления изоляции (МКСИ), который за значительно большее время (десятки секунд) определяет в нормальном ли состоянии (больше 15 кОм) сопротивление изоляции.

1. Модуль защиты обслуживающего персонала от поражения токами утечки

При разработке методики определения фазы касания человеком были последовательно проанализированы различные возможности определения фазы касания человека со своими достоинствами и недостатками.

Первая рассмотренная методика – определение фазы касания человеком с использованием фазных токов [11; 12].

Данная методика заключается в использовании в качестве конденсаторно-измерительного модуля конденсаторов С1–С3 совместно с датчиками тока (ДТ), которые выдают информацию о токах измерительных конденсаторов в каждой фазе $i_A(t)$, $i_B(t)$, $i_C(t)$ и суммарном токе $i_\Sigma(t) = i_A(t) + i_B(t) + i_C(t)$. Величина токов измерительных конденсаторов соответствует токам через конденсаторы C_{y1} , C_{y2} , C_{y3} и отличается только по абсолютной величине пропорционально отношению емкостей измерительных и фильтрующих конденсаторов. Поэтому измеренные токи $i_A(t)$, $i_B(t)$, $i_C(t)$ можно назвать «фазными токами утечки», а $i_\Sigma(t)$ – «суммарным током утечки». Далее с помощью измеренных значений определяется к какой фазе прикоснулся человек.

В идеале (когда все конденсаторы для фильтрации несимметричных помех C_{y1} , C_{y2} , C_{y3} одинаковые, амплитуды напряжений каждой фазы равны), то до прикосновения человеком фазы суммарный ток $i_\Sigma(t)$ равен нулю. После касания человеком фазы суммарный ток будет пропорционален напряжению фазы, к которой прикоснулся человек. Т. е. при одинаковых конденсаторах C_{y1} , C_{y2} , C_{y3} и одинаковых амплитудах фазных напряжений определить фазу, которой коснулся человек, не составляет труда.

Рассмотрим возможные методы определения фазы касания человеком при разбросе параме-

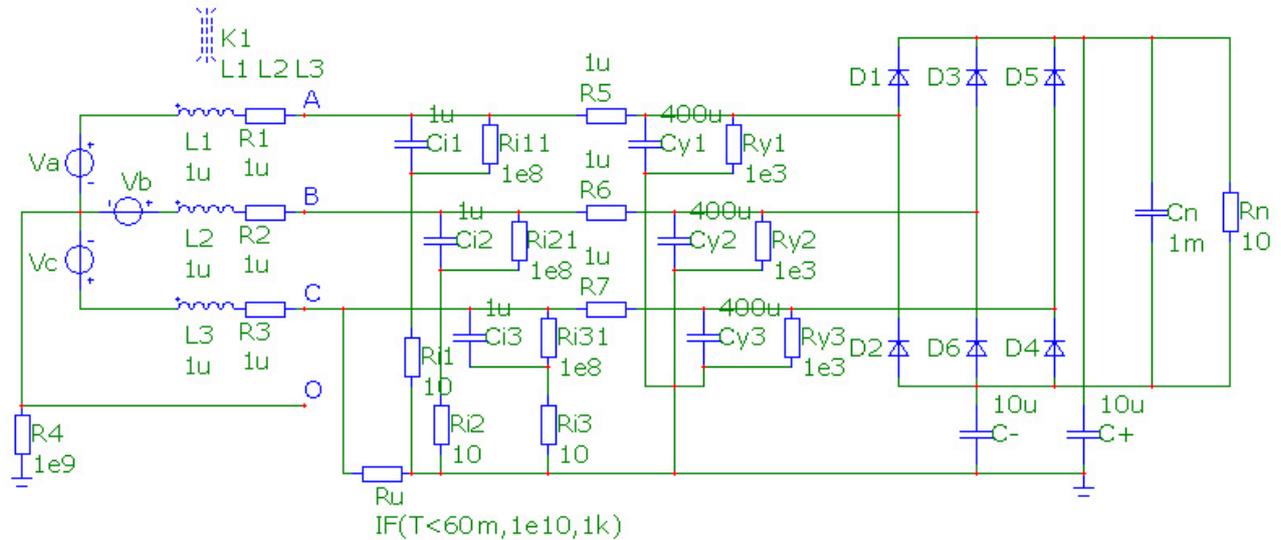


Рис. 3. Компьютерная модель входной цепи системы электропитания радиолокационных станций с силовой частью модуля защиты от токов утечки (через фазные токи утечки)

тров конденсаторов и постоянно меняющихся параметрах сети.

В реальной аппаратуре всегда присутствует разброс емкостей конденсаторов (в соответствии с Техническим заданием $\pm 5\%$), входных напряжений (при работе от дизельной электростанции: отклонение номинального напряжения до $\pm 20\%$; переходное отклонение частоты при сбросе и набросе нагрузки до $\pm 10\%$). Т. е. нужно определить фазу касания человеком при разбросе параметров конденсаторов и постоянно меняющихся параметрах сети.

Сложность задачи в определении фазы касания человеком заключается в том, что при разбросе емкостей конденсаторов, подключенных к различным фазам, и изменении входного напряжения (которое в отличие от разброса емкостей конденсаторов постоянно меняется и с разной скоростью) амплитуда суммарного тока (тока утечки) может достигать больших значений (5–8 А), а при касании человека какой-либо фазы изменение амплитуды суммарного тока достигает всего лишь доли процентов, т. е. в сотни-тысячи раз меньше. Еще меньше изменения фазных напряжений при касании человека.

Поэтому при проектировании устройства защиты необходимо разработать алгоритм определения фазы, которой коснулся человек, при исполнении всех перечисленных факторов:

- разбалансе параметров конденсаторов фильтрации несимметричных помех C_{y1} , C_{y2} , C_{y3} ;
- отклонении амплитуды напряжения, как по абсолютному значению, так и по разбалансу между фазами, а так же частоты напряжения входной сети при сбросе/набросе нагрузки;

– наличии третьей и высших гармоник во входном напряжении (несинусоидальность сети), что обуславливается характером нагрузки – трехфазным выпрямителем с емкостным фильтром.

Самый очевидный способ определения фазы, которой коснулся человек, заключается в измерении и запоминании мгновенных значений суммарного тока утечки, определяемого измерительными конденсаторами, $i_{\Sigma}(t)$ за несколько периодов сетевого напряжения в качестве эталонного ($(i_{\Sigma}(t))_k$) и в дальнейшем сравнении его с текущим суммарным током ($(i_{\Sigma}(t))_{k+1}$):

$$\Delta_I(t) = (i_{\Sigma}(t))_{k+1} - (i_{\Sigma}(t))_k. \quad (1)$$

Если начальная фаза, получившейся разницы суммарного тока сети, $\Delta_I(t)$ совпадает с начальной фазой одного из фазного напряжения ($u_A(t)$ или $u_B(t)$, или $u_C(t)$), то можно сделать вывод что человек прикоснулся к этой фазе. Если начальная фаза $\Delta_I(t)$ не совпадает с начальной фазой ни одного из фазных напряжений, то вновь измеренное значение суммарного тока ($(i_{\Sigma}(t))_{k+1}$) берется за эталонное и сравнивается со следующим значением суммарного тока ($(i_{\Sigma}(t))_{k+2}$) и т. д.

На рис. 3 представлена компьютерная модель входной цепи системы электропитания радиолокационных станций с силовой частью модуля защиты от токов утечки. В данной схеме согласно ТЗ система электропитания радиолокационных станций имеет: конденсаторы фильтрации несимметричных помех C_{y1} , C_{y2} , C_{y3} до 400 мкФ, параллельно которым включены резисторы R_{y1} , R_{y2} , R_{y3} порядка 200 кОм,

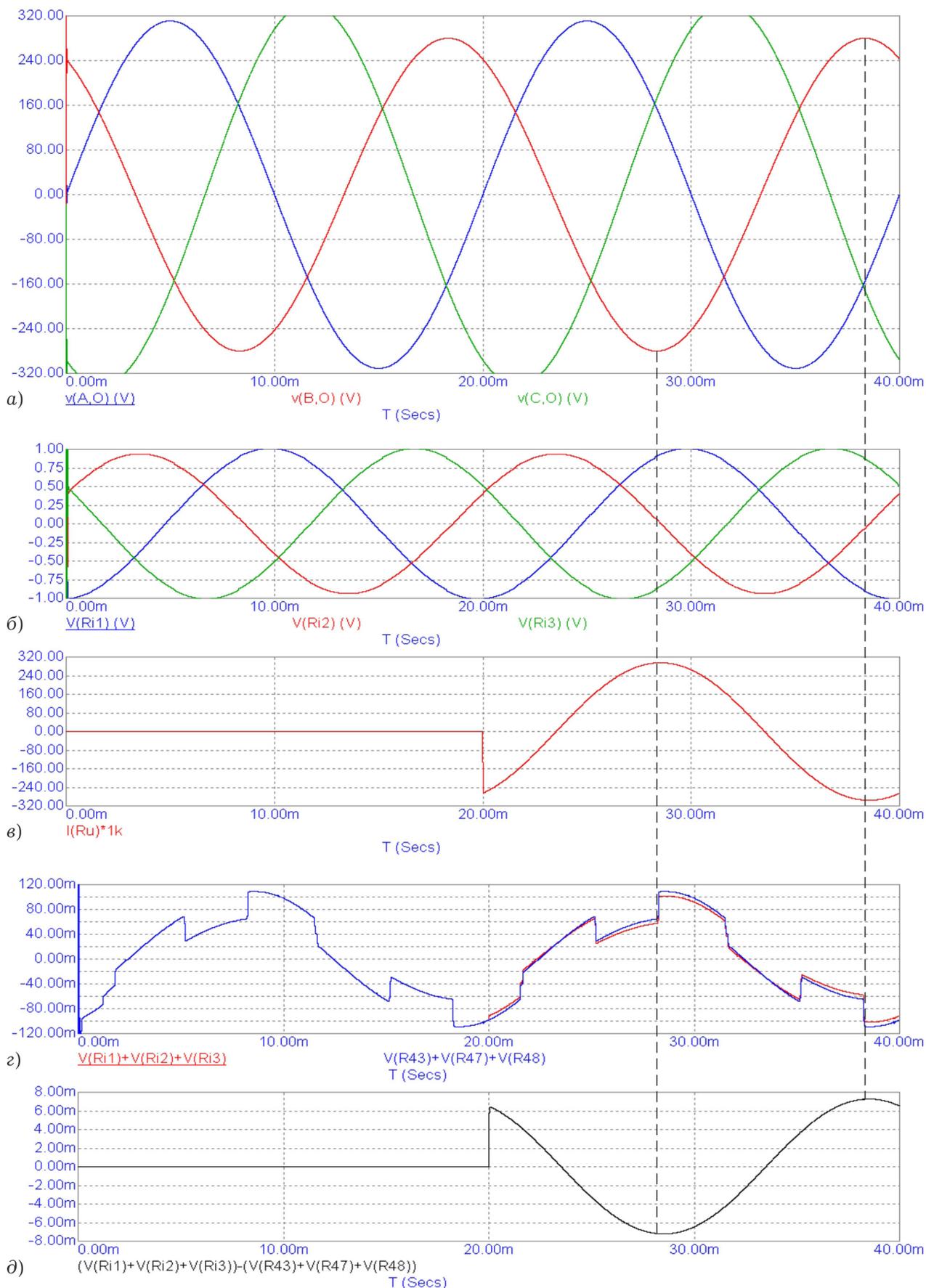


Рис. 4. Временные диаграммы, поясняющие алгоритм определения фазы касания человеком через запоминание суммарного тока сети – касание фазы В (разбаланс напряжений $\pm 10\%$, конденсаторов $\pm 5\%$): а) фазные напряжения ($u_A(t)$, $u_B(t)$, $u_C(t)$); б) фазные токи ($i_A(t)$, $i_B(t)$, $i_C(t)$); в) ток через человека (в mA); г) суммарные токи за два разных периода ($(i_{\Sigma}(t))_k$, $(i_{\Sigma}(t))_{k+1}$); д) разница суммарного тока сети, $\Delta_I(t)$

конденсаторы фильтрации несимметричных помех на выходе диодного моста $C_+ = C_- = 10$ мкФ. Схема измерения снимает информацию о фазных токах через напряжения на резисторах R_{i1} , R_{i2} и R_{i3} (рис. 3), определяет суммарный ток $i_{\Sigma}(t) = i_A(t) + i_B(t) + i_C(t)$ на каждом периоде и с помощью выражения (1) рассчитывается $\Delta_I(t)$, по которой определяется фаза касания человеком (рис. 3). Из-за наличия конденсаторов большой емкости на выходе диодного моста ($C_+ = C_- = 10$ мкФ) и малой величины резисторов ($R_{y1} = R_{y2} = R_{y3} = 1$ кОм), параллельно включенных входным конденсаторам, получаем увеличенный суммарный ток $i_{\Sigma}(t)$, в котором сложно различить влияние человека, но, используя выражение (1), сравнивающее запомненное (предыдущее) и мгновенное значения суммарного тока, фазу касания человеком определить легко. При разбалансе фильтрующих конденсаторов C_{y1} , C_{y2} , $C_{y3} \pm 5\%$ суммарный ток $i_{\Sigma}(t)$ значительно (в 5 раз) увеличивается по сравнению с предыдущим случаем, и различить влияние человека в нем еще более сложно (касание человека дает изменение суммарного тока на единицы процентов), но, используя выражение (1), фазу касания человеком определить легко (рис. 4).

Данная методика определения фазы касания человеком простая по принципу, но имеет, к сожалению, ряд существенных недостатков:

- требуется большая вычислительная мощность используемого процессора, т. к. необходимо держать в памяти множество отсчетов для более точного определения суммарного тока, т. к. касание человека изменяет на единицы процентов (рис. 4) или даже доли процентов при большей величине разбаланса различных параметров;

- при несинусоидальности сигнала (наличии третьей гармоники сетевого напряжения) необходимо либо проводить запоминание сигнала за несколько периодов сетевого напряжения и усреднять, либо произвести фильтрацию сигнала, что так же увеличивает необходимую вычислительную мощность схемы контроля и управления и увеличивает время определения фазы касания человеком;

- не позволяет определить фазу касания человеком при быстрых изменениях частоты сетевого напряжения.

Вышеперечисленные недостатки данной методики определения фазы касания человеком свя-

заны с тем, что фазное напряжение и, в особенности, ток имеют сложную форму. Чтобы уйти от работы со сложной формой сигнала, удобней работать с комплексными амплитудами первой гармоники тока и напряжения (50 Гц).

Для устранения недостатков, связанных со сложной формой фазного тока, исследовались методы выделения комплексной амплитуды с использованием либо быстрого преобразования Фурье, либо вычислением вещественной и мнимой составляющих первой гармоники. Данный метод устраняет недостатки предыдущего, позволяет определить фазу, которой касается человек при асимметрии конденсаторов несимметричных помех, сетевого напряжения, несинусоидальности напряжения сети, быстрых изменениях напряжения сети, но требует увеличения вычислительной мощности аппаратной части схемы контроля и управления и времени определения фазы, которой касается человек.

Сокращение времени расчета касания фазы человеком с выделением и использованием первой гармоники тока сети с использованием оптимального эллиптического фильтра (Золотарева – Кауэра) позволяет выделить только модуль и фазу первой гармоники тока, но не вещественную и мнимую составляющую тока. К сожалению, использование модуля и фазы может привести к ошибкам в определении фазы касания человеком.

Кроме схемы определения фазы, которой касается человек, через фазные токи проводились исследования определения фазы, которой касается человек, через фазные напряжения (рис. 5) [12]. В этом случае измерительные конденсаторы подключаются через общий резистор R_8 на корпус. В результате исследований показано, что определение фазы касания человека данным методом возможно, используя разность значений комплексных амплитуд напряжения на резисторе R_8 за предыдущий и последующий периоды:

$$\dot{\Delta}_U = (\dot{U}_{R8})_{k+1} - (\dot{U}_{R8})_k, \quad (2)$$

где $\dot{\Delta}_U = \Delta_U e^{j\varphi_{\Delta U}}$. В случае касания человека фазы A , возрастает модуль разности Δ_U , а аргумент разности совпадает с аргументом фазы A плюс 90° , т. е. $\varphi_{\Delta U} \approx \varphi_A + 90^\circ$. Аналогичная ситуация происходит и в случае касания человеком других фаз.

Во всех вышеперечисленных способах находятся комплексные амплитуды токов и/или

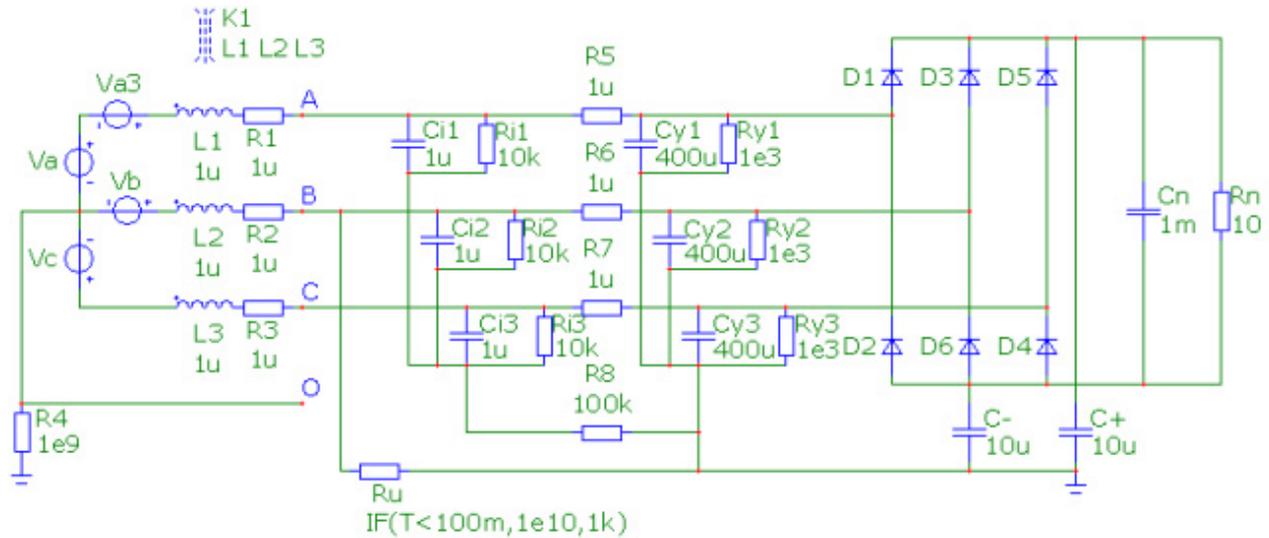


Рис. 5. Компьютерная модель входной цепи системы электропитания радиолокационных систем с силовой частью системы защиты от токов утечки (определение через фазные напряжения)

напряжений, и основная проблема этих способов – определение эталонных синусоидальных и косинусоидальных функций, по которым вычисляются комплексные амплитуды токов и/или напряжений, т. е.

$$\operatorname{Re}(i_1(t)) = \frac{1}{T} \int_0^T i(t) \cos(2\pi f_1 t) dt, \quad (3)$$

$$\operatorname{Im}(i_1(t)) = \frac{1}{T} \int_0^T i(t) \sin(2\pi f_1 t) dt,$$

где f_1 – частота сети (50 Гц), $T = 1 / f_1$.

Если вместо косинуса или синуса в (3) подставить другую базисную функцию, то мы разложим токи по этой функции.

Если в качестве базисной функции взять суммарный ток, тогда получим новую функцию, связывающую фазный ток $i_{\Phi i}(t)$ и суммарный ток $i_{\Sigma}(t)$:

$$F_i = \frac{1}{T} \int_0^T i_{\Phi i}(t) i_{\Sigma}(t) dt. \quad (4)$$

Для схемы измерения через напряжения (рис. 5), если в качестве базисной функции взять суммарный ток (напряжение на R8), получим следующую функцию:

$$\Psi_i = \frac{1}{T} \int_0^T u_{\Phi i}(t) i_{\Sigma}(t) dt. \quad (5)$$

С математической точки зрения выражения (4) и (5) представляют собой некую корреляционную функцию, связывающую фазный ток $i_{\Phi i}(t)$ (фазное напряжение $u_{\Phi i}(t)$) и суммарный ток $i_{\Sigma}(t)$. С физической точки зрения выраже-

ния (4) и (5) представляют среднюю мощность в конденсаторах в каждой фазе за период T из-за наличия токов утечки.

Проведенные исследования показали, что в случае разбаланса входных напряжений сети и входных конденсаторов $Cy1$, $Cy2$ и $Cy3$ функция Ψ для каждой фазы будет минимальной (в идеале равняться нулю, но из-за наличия конденсаторов большой емкости на выходе диодного моста $C_+ = C_- = 10$ мкФ и резисторов, параллельно включенных входным конденсаторам, равным $Ry1 = Ry2 = Ry3 = 200$ кОм, получаем функцию Ψ_i порядка $1-3 \times 10^{-6}$). При касании человеком i -ой фазы, функция Ψ_i по модулю будет минимальной (по сравнению с Ψ по другим фазам – порядка 12×10^{-3}), а по другим фазам функции Ψ по модулю будут значительно больше Ψ_i (в 50–60 раз), и противоположны по знаку. Разброс амплитуд входных напряжений, изменение частоты сети, несинусоидальность напряжения (наличие третьей гармоники) приводит к изменению функций Ψ , но это не влияет на определение фазы касания человеком – функция Ψ_i i -ой фазы, к которой прикоснулся человек, всегда будет находиться между функциями Ψ других фаз.

При разбалансе входных конденсаторов $Cy1$, $Cy2$ и $Cy3$ функции Ψ будут иметь значительную величину, превышающую в несколько раз значение функций Ψ при касании человека, и в случае касания человеком i -ой фазы функции Ψ будут изменяться незначительно, и определить фазу касания человеком в этом случае не представляется возможным.

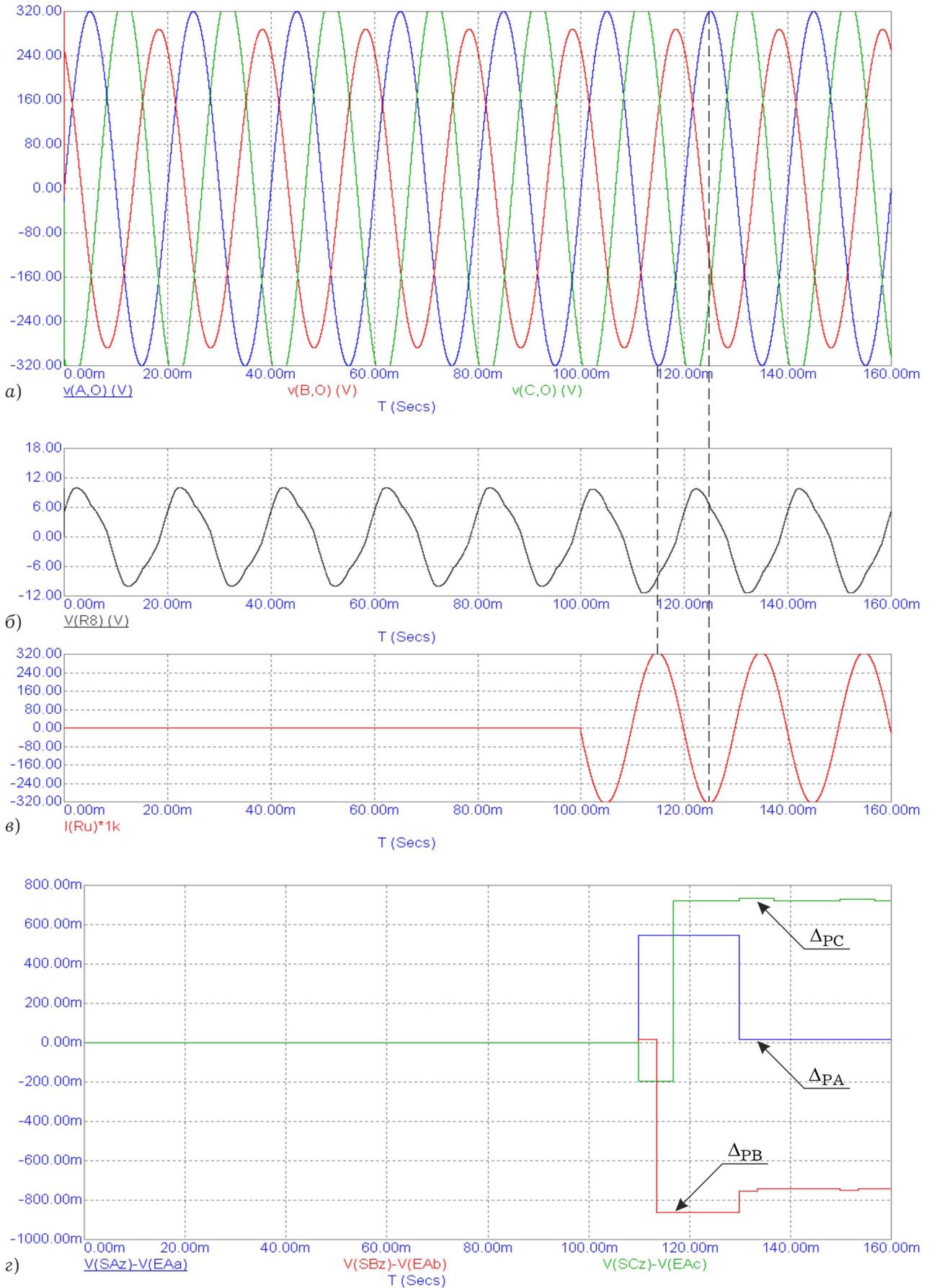


Рис. 6. Временные диаграммы, поясняющие алгоритм определения фазы касания человеком по формуле (6) – касание фазы А (разбаланс напряжений $\pm 10\%$, конденсаторов $\pm 5\%$): а) фазные напряжения ($u_A(t)$, $u_B(t)$, $u_C(t)$); б) напряжение на R8; в) ток через человека (в мА); г) Δ_{PA} , Δ_{PB} , Δ_{PC}

Для определения фазы касания человеком необходимо для каждой фазы взять разницу изменения функции Ψ_i за предыдущий и последующий периоды, что равносильно нахождению функции изменения мощности, возникающей из-за утечки, для i -ой фазы:

$$\Delta P_i = (\Psi_i)_{k+1} - (\Psi_i)_k. \quad (6)$$

В этом случае (с помощью выражения (6)) можно определить фазу касания человеком (рис. 6).

Определяя фазу касания человеком по выражению (6), необходимо определить эталонный период (т. е. при котором не было касания человека) с которым надо сравнивать последующие периоды. Изначально, за эталонный период принимается первый. Кроме того, для корректного сравнения по выражению (6) необходимо отметить, что только после двух периодов после касания человека можно определить к какой фазе он прикоснулся, т. е. необходимо, чтобы эти два сетевых периода эталонное значение не менялось. В этом случае вместо выражения (6) нужна более сложная обработка сигналов Ψ (выделение эталонного значения и текущего) для корректного определения фазы касания человеком, в особенности при изменении разбаланса входных конденсаторов, входных напряжений.

Т. к. емкости конденсаторов меняются медленно, то целесообразно разделить два процесса (касание человека и изменение емкостей) на «быстрые» и «медленные»: если за два-четыре периода произошло изменение модуля Ψ для двух фаз и знак изменения противоположен, а значение Ψ_i находится между ними, то к i -ой фазе прикоснулся человек («быстрый» процесс); если изменение произошло за значительно большее количество периодов, то это произошло из-за разбаланса конденсаторов или других дестабилизирующих факторов («медленный» процесс). Т. е. мы имеем 2 нормированные функции:

– за время t_1 (определяющее «быстрые» процессы – единицы периодов сетевого напряжения):

$$\Psi_{iB} = \int_0^{t_1} u_{\Phi i}(t) i_{\Sigma}(t) dt;$$

– за время t_2 (определяющее «медленные» процессы – сотни-тысячи периодов сетевого напряжения):

$$\Psi_{iM} = \int_0^{t_2} u_{\Phi i}(t) i_{\Sigma}(t) dt;$$

причем $t_1 \ll t_2$.

В этом случае разница между Ψ_{iM} и Ψ_{iB} определяет функцию, по которой определяется фаза касания человеком, т. е. вместо выражения (6) используется следующее

$$\delta P_i = (\Psi_{iB})_k - (\Psi_{iM})_j, \quad (7)$$

определяющее разницу между k -м «быстрым» процессом Ψ_{iB} и j -м «медленным» процессом Ψ_{iM} , взятым в качестве «эталонного». С помощью выражения (7) можно просто определить фазу касания человека при разбалансе конденсаторов, входных напряжений, изменения частоты сети. Но, к сожалению, при изменении амплитуды входного напряжения δP значительно возрастает, и определение фазы касания человеком не представляется возможным.

Чтобы функция δP оставалась независимой от изменения входного напряжения необходимо пронормировать ее, а точнее Ψ_{iB} и Ψ_{iM} к квадрату действующего напряжения первой гармоники фазного напряжения:

$$\Psi_{HiB} = \frac{\int_0^{t_1} u_{\Phi i}(t) i_{\Sigma}(t) dt}{\int_0^{t_1} u_{\Phi i1}(t) u_{\Phi i1}(t) dt},$$

$$\Psi_{HiM} = \frac{\int_0^{t_2} u_{\Phi i}(t) i_{\Sigma}(t) dt}{\int_0^{t_2} u_{\Phi i1}(t) u_{\Phi i1}(t) dt}.$$

В этом случае, заменяя Ψ на Ψ_H в выражении (7), т. е.

$$\delta Y_i = (\Psi_{HiB})_k - (\Psi_{HiM})_j, \quad (8)$$

получаем определение фазы касания человеком через «быстрое» и «медленное» определения нормированной характеристики Ψ_H в случае разбаланса конденсаторов, входного напряжения, изменения частоты сети, изменения входного напряжения. Т. к. функция Ψ_i с физической точки зрения представляет среднюю мощность, выделяемую за период T в i -ой фазе вследствие протекания токов утечки, то функции Ψ_{Hi} представляют интегральные за времена t_1 и t_2 проводимости утечки в i -ой фазе.

Все предыдущие случаи рассматривались при наихудшем случае (с точки зрения определения фазы касания человеком) – максимальном значении конденсаторов фильтрации несимметричных помех $C_{y1} \approx C_{y2} \approx C_{y3} \approx C_Y = 400$ мкФ. Но в

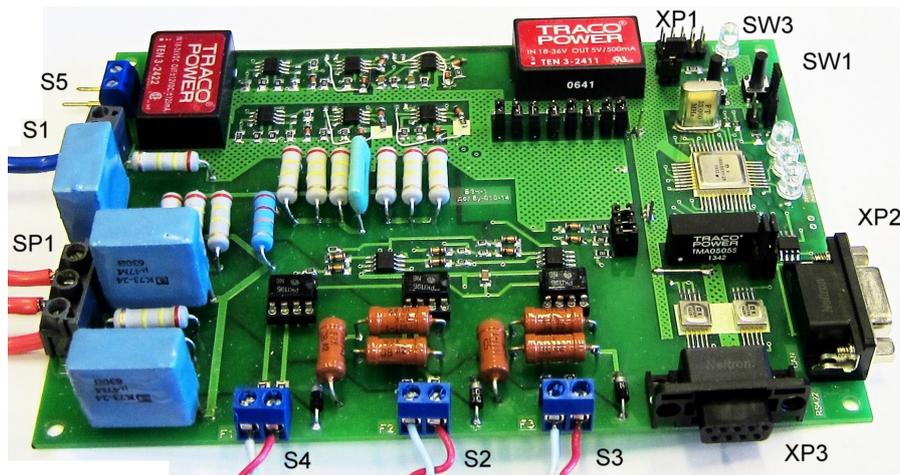


Рис. 7. Макет схемы управления модуля защиты человека от поражения токами утечки

зависимости от количества подключенных блоков емкость конденсаторов может меняться от 0,47 мкФ (1 блок) до 400 мкФ (800 блоков) [12].

В случае уменьшения емкости C_Y с 400 мкФ до 15 мкФ получаем заметное увеличение напряжения на R8 – с 10 В до 30 В, и значительное увеличение δ_{Y1} – с 0,5 В до 16 В [12]. Дальнейшее уменьшение емкости приводит к еще большему росту напряжения на R8 и δ_{Y1} .

Максимальное значение напряжения на R8 ограничивается динамическим диапазоном работы схемы определения фазы касания человеком. Ограничимся 30 В, т. е. минимальным значением емкости $C_Y = 15$ мкФ. Т. е. необходимо, чтобы емкость конденсаторов с фазы на корпус всегда была не меньше 15 мкФ.

Значительное (на порядок и более) увеличение значений δ_{Y1} приводит к тому, что проблематично будет определить порог срабатывания схемы определения фазы касания человеком: в одном случае он равен 0,4 В, в другом – 12 В [12], т. е. разница составляет в 30 раз! Для корректного определения фазы касания человеком при различных значениях конденсаторов необходимо ввести корректирующий множитель, который либо умножается на пороговое значение (таким образом получаем плавающий порог в зависимости от значений емкостей конденсаторов), либо делят δ_{Y1} на него (тогда величины δ_{Y1} вне зависимости от емкостей конденсатора всегда меняются в одном и том же диапазоне). Деление выглядит более предпочтительным, т. к. позволяет избавиться от больших значений δ_{Y1} . Кроме введения корректирующего множителя необходимо скорректировать алгоритм определения фазы касания человеком [12].

На основании предложенного алгоритма был создан макет модуля защиты человека от пора-

жения токами утечки [12], состоящий из двух частей – силовая часть и схема управления. Силовая часть представляет из себя 3 IGBT-модуля (модуль M2TKIE-150-12, состоящий из двух IGBT-транзисторов, включенных по схеме с общим эмиттером; данный модуль работает на напряжение не ниже 1200 В, с максимальным током не более 300 А, напряжение насыщения коллектор–эмиттер 2,5 В), посаженных на радиатор. Макет схемы управления представлен на рис. 7. На схему управления, собранную на микропроцессоре 1886BE5, через разъем SP1 подключаются три фазных провода, через разъем S1 – «корпус»; питание схемы управление осуществляется через разъем S5; подключение программатора осуществляется через разъем XP1; SW1 – переключатель, переключающая режим работы (корректировка программы или исполнение программы); SW3 – кнопка «Сброс»; XP2 и XP3 – разъемы для CAN и RS; с выходов S4, S2 и S3 поступают сигналы на вход трех IGBT-модулей.

2. Модуль контроля сопротивления изоляции

В соответствии с ТЗ, емкость фильтра радиопомех (ФРП), включенных на входе потребителей электроэнергии может меняться от нуля до 400 мкФ по каждой фазе относительно корпуса. Максимальная суммарная емкость сети относительно корпуса составляет 1200 мкФ (рис. 8). Данное значение емкости превышает предельный уровень емкости фаз относительно корпуса, при которой современные мегомметры, выпускаемые отечественными предприятиями способны контролировать сопротивление изоляции. Например, цифровой мегомметр ЦМ1628.1

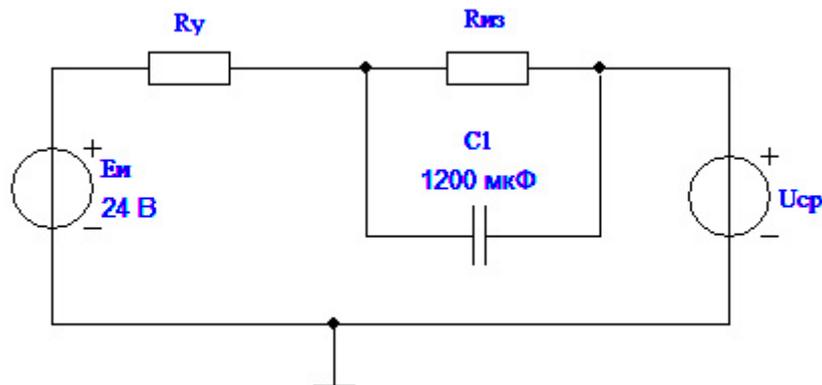


Рис. 8. Схема замещения трехфазной сети с изолированной нейтралью смешанного типа по постоянному току с измерителем сопротивления изоляции

производства ОАО «Вибратор» способен контролировать сопротивление изоляции при максимальной емкости сети относительно корпуса в 100 мкФ. При анализе зарубежных производителей было установлено, что немецкая фирма «BENDER» среди нескольких десятков наименований устройств контроля сопротивления изоляции, выпускает только один мегомметр «ISOMETER ISO PV» способный измерять сопротивление изоляции при суммарной емкости 1200 мкФ.

При разработке устройства контроля сопротивления изоляции, необходимо учитывать достаточно большую емкость сети, возможные коммутационные процессы, связанные с емкостями групп ФРП потребителей, также учесть род сети контролируемого объекта. При этом устройство должно быть надежным и простым в эксплуатации.

В результате исследований был предложен следующий алгоритм работы МКСИ. Первый этап: подключение положительного источника $E_{Н1}$ напряжением 24 В к сети и после заряда конденсатора емкостью 1200 мкФ в течение 60 с, измерение тока, протекающего через измерительный шунт. Второй этап: подключение второго источника питания $E_{Н2}$ с отрицательным напряжением – 24 В к измеряемой сети. Также как и на первом этапе после заряда конденсатора емкостью 1200 мкФ в течение 60 с измеряется ток, протекающий через измерительный шунт. После этого производится расчет сопротивления изоляции по формуле [12]. Если рассчитанное значение сопротивления изоляции более 15 кОм, то микроконтроллер (МК) выдаст на шины RS 485 и CAN сообщение «ОК», и продолжит измерения, подключив к цепи источник с другим напряжением. Если рассчитанное значение сопротивления изоляции равно или ниже значения 15 кОм, то срабатывает световая сиг-

нализация. Соответствующая информация передается по шинам RS 485 и CAN.

Устройство работает в постоянном циклическом режиме. К измеряемой сети подключаются поочередно источники постоянного напряжения +24 В, –24 В, выполняются все прописанные в алгоритме операции, производится расчет сопротивления изоляции.

В устройстве МКСИ регулярно измеряются напряжения источников подключаемых к сети (+24 В, –24 В). Если уровень напряжений на них выйдет за установленные пределы, МКСИ прекращает контроль сопротивления изоляции, а так же передает на шину RS 485 сообщение «авария источников» и включает соответствующий светодиод на плате. Восстановление работы МКСИ может быть произведено путем сброса программы МК, либо нажатием кнопки на плате, либо подачей сигнала по шине RS 485.

В устройстве реализована защита от неверного измерения сопротивления изоляции, обусловленного коммутацией емкостей в измеряемой сети в процессе измерения сопротивления изоляции. Это происходит при подключении группы ФРП цепей потребителей. В случае если в процессе заряда емкостей ФРП значительно изменится их емкость, то к моменту времени измерения тока, протекающего через шунт МКСИ, будет продолжаться заряд конденсаторов ФРП потребителей подключенных к сети. И соответственно ток будет определяться не только сопротивлением изоляции, но еще и током неустановившегося процесса заряда емкостей. Если по значению данного тока произвести вычисление сопротивления изоляции оно будет неверно трактовано как ниже реально существующего уровня. Для предотвращения данных ошибок МКСИ производит два измерения напряжения на шунте с интервалом 2 с. И только

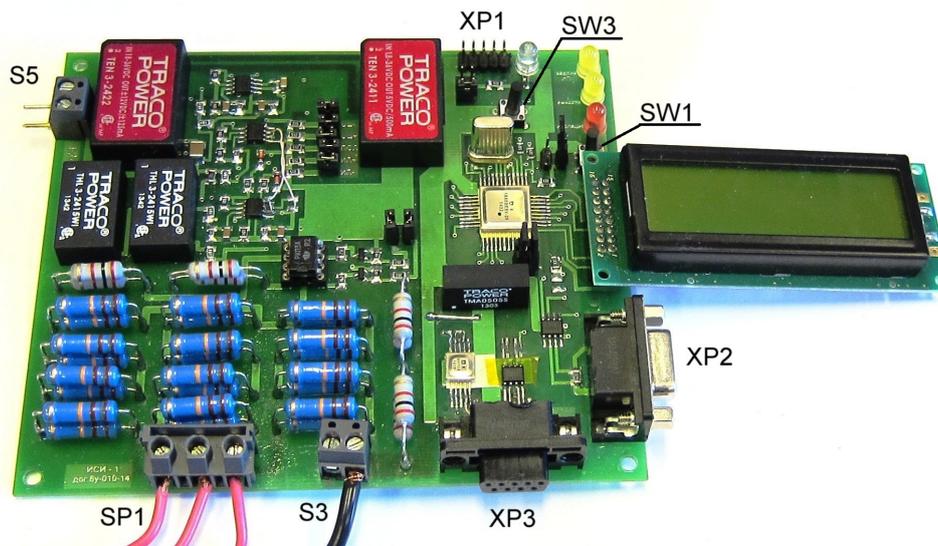


Рис. 9. Фотография макетного образца модуля контроля сопротивления изоляции

если разность измеренных значений будет меньше установленного порога, МК примет решение о том, что в цепи установившийся процесс и напряжение на шунте соответствует только току в цепи обусловленному величиной сопротивления изоляции. Тем самым будет устранено влияние коммутаций емкостей в сети на измерение тока и произведен корректный расчет сопротивления изоляции.

Для повышения точности МК при каждом измерении напряжения на шунте производит 4 измерения (запоминает 4 числа с выхода АЦП с последующим усреднением полученного значения).

На основе разработанной компьютерной модели МКСИ, выполненной в программной среде *Micro-Cap 10*, был разработан макет модуля контроля сопротивления изоляции (рис. 9) [12]. Для облегчения отладки и настройки макет МКСИ имеет возможность подключения дисплея.

Внешнее питание МКСИ осуществляется от источника постоянного напряжения 24 В, подключаемого к разъему S5. Подключение к трем фазам сети осуществляется через разъем SP1. Подключение к корпусу осуществляется через разъем S3. CAN шина подключается к разъему XP2 (рис. 9). RS 485 шина подключается к разъему XP3.

МК запрограммирован на два режима работы – режим контроль – коррекция, и рабочий режим. Переключение между режимами возможно в момент включения напряжения питания. При замкнутой кнопке SW3 (рис. 9) МК переходит в режим коррекции установленных констант через разъем RS 485 подключенный к

компьютеру (ноутбуку). В этом режиме возможна коррекция констант, использующихся при проведении измерения сопротивления изоляции.

При наличии в сети процессов коммутации емкостей между тремя фазами переменного напряжения и корпусом, устройство ожидает окончания коммутации и только после этого производит замеры и расчет сопротивления изоляции. Если процесс коммутации превысил запрограммированное время, МК D2 подает сигнал на включение светодиода HL2 – светодиод «Коммутация». При этом устройство продолжает работать, при прекращении режима коммутации светодиод погаснет, и устройство произведет расчет сопротивления изоляции.

Заключение

Разработано устройство защиты человека от поражения токами утечки в трехфазной сети с изолированной нейтралью мощной системы электропитания радиолокационной станции. Особенность данной системы электропитания, состоящей из нескольких сотен параллельно включенных модулей, состоит в том, что суммарная емкость конденсаторов ФРП для устранения несимметричных помех в сотни раз превышает величину конденсаторов, разрешенных допустимым значением токов утечки.

Вторая особенность и сложность создания и проектирования устройства защиты человека от поражения токами утечки состоит в том, что разброс конденсаторов, включенных между фазными проводами и корпусом, разброс значений фазных напряжений, изменение их частоты при сбросе/набросе нагрузки и т. д. сопровожда-

ется измерениями токов утечки в сотни и тысячи раз превышающих токи утечки, обусловленные касанием фазового провода человеком.

Кроме устройства защиты от поражения токами утечки спроектировано и разработано устройство измерения сопротивления изоляции трехфазной сети с изолированной нейтралью между фазами и корпусом, которой включены конденсаторы фильтрации несимметричных помех суммарной величиной 1200 мкФ. В России такие устройства не выпускаются.

Список литературы

1. Дмитриков В.Ф., Сергеев В.В., Самылин И.Н. Повышение эффективности преобразовательных и радиотехнических устройств. М.: Радио и связь, 2005. 424 с.
2. Шушпанов Д.В. Высокоэффективные импульсные преобразователи напряжения с ШИМ и распределенные системы электропитания на их основе: дис. ... канд. техн. наук. Специальность: 05.12.04 – «Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения». СПб., 2005.
3. Самылин И.Н. Развитие теории, принципов построения транзисторных преобразователей напряжения и распределенных систем электропитания на их основе: дис. ... д-ра техн. наук. Специальность: 05.12.04 – «Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения». СПб., 2006. 434 с.
4. Middlebrook R.D. Input filter considerations in design and application of switching regulators // IEEE Power Electronics Specialists Conference. 1977. P. 36–57.
5. Mitchell D.M. Power line filter design considerations for dc-dc converters // IEEE Industry Applications Magazine. November/December. 1999. P. 16–26.
6. Wildrick C.M. Stability of distributed power supply systems // Master's thesis / Virginia Polytechnic Institute and State University. Blacksburg, 1993. № 6.
7. Смирнов В.С. Эквивалентные частотные характеристики транзисторных ключевых устройств с отрицательной обратной связью: дис. ... канд. техн. наук. Специальность: 05.12.04 – «Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения». СПб., 2007. 261 с.
8. ГОСТ РВ 20.57.310-98. Комплексная система контроля качества. Аппаратура, приборы, устройства и оборудование военного назначения. Методы оценки соответствия конструктивно-техническим требованиям.
9. ГОСТ Р МЭК 335-1-94. Безопасность бытовых и аналоговых электрических приборов. Общие требования и методы испытаний.
10. ГОСТ 12.1.038-82. Электробезопасность. Предельно допустимые значения напряжений прикосновения и токов.
11. Защита обслуживающего персонала от поражения токами утечки в современных мощных радиолокационных системах / В.Ф. Дмитриков [и др.] // Электропитание. 2014. № 2. С. 62–66.
12. Работа по изготовлению и поставке «Устройства защиты от поражения токами утечки и контроля изоляции в системах с питанием от трехфазной сети переменного тока без нейтрали» / В.Ф. Дмитриков [и др.] // Пояснительная записка. СПб, 2015. 110 с.

The electromagnetic compatibility specific problems in power supply systems for radar stations

V.F. Dmitrikov, D.V. Shushpanov, N.V. Antonevich, D.N. Kushneryov

The device for leakage current protection in three-phase network without neutral terminal feeding powerful radar station supply system was designed and developed. The device for insulation resistance measuring in three-phase network without neutral terminal with capacitors having 1200 μF at all for asymmetrical interference filtration was designed and developed. There are not such devices in Russia.

Keywords: pulse voltage converter, radar station, filter, leakage current, compensation, protection.
