

Санкт-Петербургский Государственный Морской Технический Университет

Д.В. Вилесов, А.А. Воршевский, В.Е. Гальперин, С.А. Сухоруков

**ВОЗНИКНОВЕНИЕ И РАСПРОСТРАНЕНИЕ ИМПУЛЬСНЫХ ПОМЕХ  
В СУДОВЫХ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ**

Учебник пособие

Санкт-Петербург  
1987

**ПРЕДИСЛОВИЕ**

Современное судно является сложной системой включающей в себя многие технические средства с различными функциями и принципами действия. При этом характерно широкое использование в них электротехнических и электронных элементов. Электромагнитные процессы) происходящие при работе каждого такого элемента, в той или иной мере влияют на процессы, протекающие в других элементах, и, в свою очередь оказываются подверженными влиянию с их стороны. Подчас это взаимное электромагнитное влияние может приводить к сбоям в работе отдельных технических средств и серьезным нарушениям нормального функционирования судна в целом. В электроэнергетических системах возникают основные, наиболее сильные электромагнитные возмущения распространяющиеся кондуктивно и пространственно. Соображения обеспечения надежной и бесперебойной работы судов обуславливают необходимость мер гарантирующих нормальную совместную (в электромагнитном смысле) работу всех технических устройств и систем. Непрерывно происходящие рост мощности судовых электротехнических устройств, повышение чувствительности устройств судовой радиоэлектроники и расширение использования бортовых средств вычислительной техники в такой мере усугубили сложность обеспечения их совместной бесперебойной работа, что в судостроении возникла острая проблема электромагнитной совместимости (ЭМС) судовых технических средств. Современные и эффективные решения задач ЭМС при создании и эксплуатации судов возможны лишь при условии специальной подготовки инженеров-кораблестроителей в этой области. Они должны уметь прогнозировать и оценивать работу электротехнического и электронного оборудования в реальной электромагнитной обстановке судка и знать методы предотвращения и устранения возможных наблюдаемых сбоев из-за взаимного влияния. Именно с этими целями в Санкт-Петербургском государственном морском техническом университете при подготовке инженеров по электротехническим специальностям, предусматривается изучение электромагнитной совместимости судовых технических средств в виде отдельной дисциплины. Изучение вопросов электромагнитной совместимости в судовых электроэнергетических системах затруднено, так как нет необходимых учебных материалов. Это и определило замысел авторов дать студентам кораблестроительных вузов с электротехническим профилем подготовки сжатое изложение основных вопросов ЭМС в настоящем учебнике.

Содержание учебника должно дать студентам возможность самостоятельно изучить элементы теории электромагнитной совместимости применительно к задачам ее обеспечения в условиях судовых электроэнергетических систем (СЭЭС). Предполагается, что изучение теоретического материала будет сопровождаться выполнением соответствующих учебных расчетных и экспериментальных работ. Данный учебник рассчитан на студентов старших курсов, имеющих законченную общетехническую подготовку и подготовку по фундаментальным электротехническим дисциплинам.

# 1. ПРОБЛЕМА ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ СУДОВОГО ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО И ЭЛЕКТРОННОГО ОБОРУДОВАНИЯ

## 1.1. Общие понятия

Технические устройства судна, работа которых связана с использованием электротехнических и электронных элементов, оказывают взаимное электромагнитное влияние при достаточно близком их взаимном расположении и при существовании между ними кондуктивных связей. Это влияние сказывается в возникающих при совместной работе изменениях напряжений и токов в цепях и напряженностей, составляющих поля в окружающем пространстве. Если такое влияние превосходит уровни, характерные и определенные два каждого из них, то нормальное функционирование этих технических средств нарушается. Происходят либо временные нарушения режима работы (сбои) устройств, либо недопустимые необратимые изменения их параметров (выход из строя).

Внешнее электромагнитное воздействие на техническое устройство, которое вызывает нарушение его нормального функционирования называется электромагнитной помехой (ЭМП). Предельные уровни электромагнитных воздействий, при которых нарушается нормальная работа технического устройства, определяют его восприимчивость к помехам.

ЭМП, которые проявляются в виде отклонений от нормальных значений напряжений и токов, называются помехами проводимости (кондуктивные помехи). ЭМП в форме свободного электромагнитного поля, характеризуемого напряженностями его составляющих, называются помехами излучения (полевые помехи).

Способность совокупности любым образом связанных технических средств функционировать совместно, не создавая электромагнитных помех, называется электромагнитной совместимостью (ЭМС) этих средств.

Процесс взаимного электромагнитного влияния технических средств связан тремя компонентами (рис.1.1): 1) источником электромагнитного воздействия; 2) путями распространения воздействия; 3) рецепторами (объект воздействия).

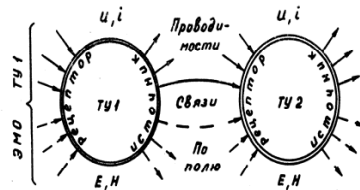


Рис.1.1. Схемы кондуктивного и полевого электромагнитного взаимодействия двух устройств TU1 и TU2 технической системы

Источниками ЭМП на судне обычно являются: 1) устройства систем генерирования и распределения электрической энергии (синхронные генераторы, трансформаторы, шинопроводы, кабельные трассы, коммутационные аппараты); 2) устройства преобразования электрической энергии (электроприводы, полупроводниковые преобразователи, аппаратура управления, электротехнологические установки, газосветные приборы); 3) радиолокационные и гидролокационные установки. Электротехнические установки создают помехи проводимости и помехи полевые (помехи излучения). Кроме того ЭМП могут возникать как следствие внешнего атмосферного электромагнитного воздействия на судно (грозовые разряды, работа радиопередающих установок).

Рецептором называется любое техническое устройство (элемент или система), на которое воздействует ЭМП. Рецепторы являются приемниками ЭМП. На судах рецепторами, особенно чувствительными к электромагнитным воздействиям, являются средства

вычислительной техники, средства радиоэлектронной техники, радиолокационная и навигационная аппаратура, внутрисудовые информационные системы, элементы и устройства автоматики и управления судовыми техническими средствами. Рецепторы оказываются подверженными воздействию ЭМП по цепям питания электроэнергией и информационным цепям, а так-же воздействию ЭМП излучения. Различные рецептора оказываются наиболее восприимчивыми к определенным видам ЭМП.

ЭМП проводимости распространяются на судах по проводам и кабелям, а также по проводящим конструктивным элементам (корпусные конструкции, оплетка кабеля, валы и др.). ЭМП полевые распространяются в пространстве между источниками и рецепторами.

Любое техническое устройство в общем случае может являться источником ЭМП для других устройств и одновременно быть рецептором ЭМП в отношении электромагнитных воздействий других устройств (см. рис 1.1).

Технические средства судна работают совместно. Каждый рецептор оказывается под совместным электромагнитным воздействием ряда других средств. Совокупность одновременно существующих электромагнитных воздействий на рецептор определяет электромагнитную обстановку (ЭМО), в которой он должен функционировать. Прогнозирование, определение ЭМО, зависящей от действия нескольких и тем более многих источников воздействий (помех), является сложной расчетной задачей.

Взаимное электромагнитное влияние некоторых характерных элементов СЭЭС показано на условной схеме (рис 1.2).

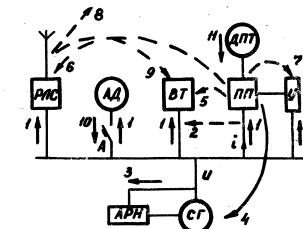


Рис.1.2. Схемы взаимного кондуктивного (—) и полевого (---) электромагнитного влияния элементов СЭЭС

Напряжение  $u$  судового синхронного генератора (СГ) искажается (рис.1.3) из-за несинусоидальности тока  $i$  полупроводникового преобразователя (ПП), что обуславливает кондуктивные 1 и полевые 2 ЭМП (см.рис .1.2) для других потребителей электроэнергии (асинхронного двигателя (АД), средств вычислительной техники (ВТ) и радиолокационных систем (РЛС)). Вместе с тем, нормальная работа системы автоматического регулирования на пржения (АРН) этого генератора нарушается из-за ЭМП в виде искажении синусоидальности напряжения 3. Полупроводниковый преобразователь двигателя постоянного тока (ДПТ) вызывает искажение формы напряжения и тока 4 в СЭЭС (ЭМП) и появление в окружающем пространстве существенных по величине полевых ЭМП, влияющих на работу средств ВТ 5 и РДС 6.

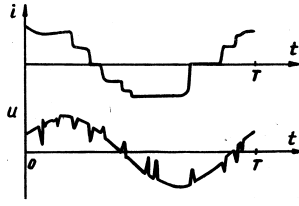


Рис.1.3. Искажение форм напряжения  $u$  и тока  $i$  судового синхронного генератора с полупроводниковой нагрузкой

Электронные схемы блоков управления (У) преобразователя также оказываются чувствительными рецепторами в отношении воздействующих кондуктивных 1 и полевых 7 ЭМП. Радиоэлектронные средства РЛС судна, с одной стороны, восприимчивы к кондуктивным 1 и полевым 6 ЭМП, а с другой - создают электромагнитное излучение (поле) не только полезной направленности 8, но и побочное (паразитное), которое вызывает ЭМП, в частности, для средств ВТ 9. Коммутации автоматического выключателя (А) и в щеточном аппарате ДПТ создают в СЭЭС существенные ЭМП прежде всего кондуктивного характера 10 и 11.

Следует отметить, что человек также подвержен влиянию электромагнитных процессов и является рецептором ЭМП, начиная с определенных ему свойственных уровней восприимчивости, существенно зависящих от их продолжительности.

### 1.2. Характеристики электромагнитных помех

ЭМП описываются отклонениями от нормальных значений параметров состояния электрических цепей (напряжений и токов) и электромагнитного поля в рассматриваемом пространстве (напряженности электрического и магнитного полей). В зависимости от видов электромагнитных процессов и специфической восприимчивости рассматриваемых рецепторов для описания ЭМП выбираются конкретные количественные показатели - параметры помех.

ЭМП подразделяются на импульсные, периодические и постоянные в зависимости от характера их протекания во времени. Распространенным видом ЭМП в СЭЭС являются импульсные искажения напряжения. Импульсная помеха напряжения  $u_{и}$  рассматривается как разность между мгновенными значениями напряжения  $u$  при помехе и неискаженного в ее отсутствии нормального напряжения  $u_{норм}$ , т.е.  $u_{и} = u - u_{норм}$ .

Импульсные помехи напряжения описываются следующими параметрами (рис.1.4): амплитудой  $U_{и}$ , длительностью  $t_{и}$ , длительностью фронта  $t_f$ , а в случае пачки импульсов (см. рис.1.4,в) - частотой следования пачек  $f_n$ , длительностью пачек  $T_n$  и частотой следования импульсов в пачке  $f_i$ . Аналогично описываются ЭМП при импульсах тока и напряженностей электрического и магнитного полей.

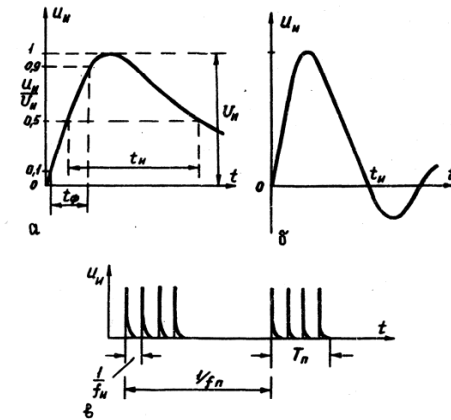


Рис.1.4. Типичные формы импульсов напряжения

Кратковременные провалы напряжения и перенапряжения в питающей сети характеризуются глубиной провала и амплитудой перенапряжения, которые определяются так же, как и амплитуда импульса.

Периодические ЭМП ( $u, i, E, H$ ) описываются параметрами частотных характеристик в нужных диапазонах спектра частот (низких, средних и высоких). При этом значения переменных выражаются либо в физических единицах (А, В, ...), либо в децибеллах. В частности, расчет напряжения в децибеллах производится по формуле

$$U = 20 \lg(U[B]/10^{-6}[B])$$

Примером простого описания периодических искажений напряжения в физических единицах является амплитудно-частотная зависимость гармонических составляющих кривой. В нижеследующей таблице дано несколько значений действующих напряжений гармоник  $U$  малых порядков  $K = \omega/314$ . Для кривой, изображенной на рис.1.3:

$K$	1	3	5	7	9	11	13	15
$U_K, В$	393	7	25	9	15	12	7	12

На рис.1.5 показаны в качестве примеров графики частотных характеристик ЭМП (напряжения  $U$  и магнитного поля  $B$ ) в логарифмических масштабах.

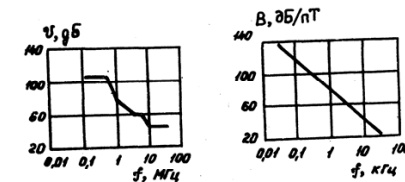


Рис.1.5. Амплитудно-частотные характеристики ЭМП (напряжения  $U$  и магнитного поля  $B$ )

Периодические искажения (в основном напряжения) описываются также обычными параметрами несинусоидальных периодически изменяющихся величин (коэффициент амплитуды, несинусоидальности). Например, искажение кривой напряжения, изображенной

на рис1.3, определяется коэффициентом несинусоидальности 0,11.

ЭМП подразделяются также по длительности их действия (длительные, непродолжительные, кратковременные), по регулярности возникновения, по диапазонам частот.

Параметры кондуктивных ЭМП рассматриваются для определенных цепей, по которым они достигают рецепторов. Так, напряжения помехи могут быть симметричными (между фазами линии) и несимметричными (между фазами и корпусом). Параметры полевых помех определяются для конкретных сочетаний пространственных координат их источников и рецепторов.

Выбор характеристик ЭМП, существенных для решения задач ЭМС, определяется исследованиями их воздействий на различные виды оборудования (рецепторы).

### 1.3. Вопросы обеспечения электромагнитной совместимости

Количественные характеристики (параметры) ЭМП и чувствительность электротехнического и электронного оборудования регламентируются нормативно-технической документацией (стандартами). В настоящее время это нормирование находится в стадии становления. Действующие национальные стандарты (нормы) в области ЭМС отличаются как составом регламентируемых параметров, так и числовыми значениями. В национальных стандартах и правилах разных стран (ФРГ, США, Дания и др.) используется от нескольких до полутора десятков нормируемых характеристик ЭМС. Примером такой характеристики является следующая совокупность параметров импульсного напряжения экспоненциальной формы (см.рис1.4.а), нормируемых для цифровых технических средств, питаемых от сети переменного тока 220 В, 50 Гц: длительность импульсов  $t_n=50$  мкс, длительность переднего фронта  $t_f=1,2$  мкс, амплитуда импульсов  $U_n$  - от 500 до 2000 В, частота следования импульсов 1 Гц.

Нормирование уровней ЭМП устройств-источников и восприимчивости устройств-рецепторов является совершенно необходимой организационной основой решения задач обеспечения ЭМС.

Техническое обеспечение ЭМС реализуется путем совершенствования принципов работы, конструкций, схем, режимов работы отдельных устройств-рецепторов, направленного на снижение их восприимчивости к ЭМП, иначе говоря, повышения их помехоустойчивости.

Другая, весьма важная группа технических мероприятий по ЭМС, направлена на улучшение ЭМО особенно для наиболее чувствительных рецепторов. Такими мероприятиями является: пространственное разнесение источников и рецепторов ЭМП, а также связанных с ними кабельных трасс, группирование кабелей с учетом их взаимного электромагнитного влияния, экранирование кабелей, применение волоконно-оптических кабелей, использование фильтров, "заземление" корпусов приборов и устройств. Благодаря таким мерам повышается помехозащищенность судовых технических средств от ЭМП. Средствами улучшения ЭМО являются также технические меры по снижению уровней ЭМП их источников.

Мероприятия по обеспечению ЭМС во многих случаях оказываются весьма дорогостоящими, и стоимость их реализации существенно увеличивается по мере создания судна на разных стадиях проектирования, постройки и ввода в эксплуатацию. Выявление необходимых для обеспечения ЭМС мероприятий и их реализация должны быть проведены в возможно более ранний период создания судна. Последнее определяет большую значимость методов расчетной оценки и проектного обеспечения ЭМС судовых технических средств.

Комплексная, многосвязная задача обеспечения ЭМС электро-технического и электронного оборудования судов охватывает следующие основные направления:

изучение закономерностей физических процессов возникновения, распространения и воздействия ЭМП;

разработку приборов и методов измерения параметров ЭМО;  
определение параметров оценки восприимчивости оборудования к ЭМП;  
создание норм, регламентирующих уровни создаваемых ЭМП и уровни восприимчивости к помехам;

разработку средств и методов снижения ЭМП источников и новыения помехозащищенными технических средств;

создание методов испытаний помехоустойчивости технических средств, контроля ЭМО на судах и диагностики причин нарушений ЭМС;

разработку системных методов проектирования судов,обеспечивающих ЭМС электротехнического и электронного оборудования.

## 2. ВОЗНИКНОВЕНИЕ ИМПУЛЬСНЫХ ПОМЕХ В СУДОВЫХ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

### 2.1. Импульсные помехи при работе полупроводниковых преобразователей

Основными источниками периодических импульсных помех (ИП) в СЭЭС являются ПП параметров электрической энергии: выпрямители, инверторы, преобразователи частоты и регуляторы переменного напряжения [5]. Принцип действия ПП предполагает периодические переключения цепей, которые приводят к возникновению регулярно повторяющихся переходных процессов нарастания и спадения тока в системе с активно-реактивными элементами. Если удельная мощность ПП невелика (доли процента от мощности генераторов в СЭЭС), то генераторы можно считать в этом случае идеальными источниками напряжения. При относительной мощности ПП, начиная от единиц процентов падение напряжения на внутреннем сопротивлении генераторов при переходных процессах изменения тока сопровождающих работу ПП, становится заметным. При этом и в напряжении сети тоже возникают периодические импульсные помехи (ИП).

Типичная осциллограмма ИП при работе мощного выпрямителя показана на рис.2.1, откуда видно, что периодические ИП носят характер регулярно повторяющихся (в данном случае через 3,3мс) импульсов определенной длительности  $\gamma$ , обусловленных коммутациями вентилей. Положение коммутационных импульсов на кривой напряжения основной частоты определяется углом регулирования вентилей ПП  $\alpha$ . В момент начала и окончания коммутационных импульсов в ПП происходят колебательные процессы, приводящие к возникновению высокочастотных ИП (показаны в выделенной части осциллограммы на рис.2.1 в другом масштабе времени для момента окончания коммутационного импульса).

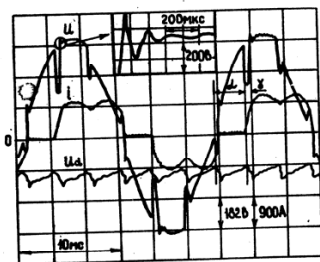


Рис.2.1. Осциллограмма линейного напряжения, фазового тока и выпрямленного напряжения при работе генератора МСР 1250-750 на трехфазной мостовой ПП типа КУВ

#### 2.1.1. Импульсные помехи, возникающие при переходах тока с вентиль на вентиль.

- ⊙ Наибольшее распространение в СЭЭС получили трехфазные мостовые управляемые ПП, работа которых обычно рассматривается при следующих допущениях:
- ⊙ выпрямленный ток ПП  $I_d$  полностью сглажен (индуктивность в цепи постоянного тока  $L_d = \infty$ );
- ⊙ емкости сети и ПП не оказывают влияния на процесс коммутации;
- ⊙ активные сопротивления элементов СЭЭС пренебрежимо малы;
- ⊙ вентили ПП идеальны, импульсные искажения напряжения (ИИН) не влияют на работу систем фазового управления вентилями. Управление симметрично.

Тогда СЭЭС с ПП можно эквивалентировать расчетной схемой представленной на

рис.2.2,а. Здесь параллельно работающие генераторы заменяется одним суммарной мощности, который представлен в виде трехфазной симметричной системы си нусоидальных ЭДС  $e_a, e_b, e_c$ , соединенных последовательно с эквивалентным реактивным сопротивлением коммутации сети -

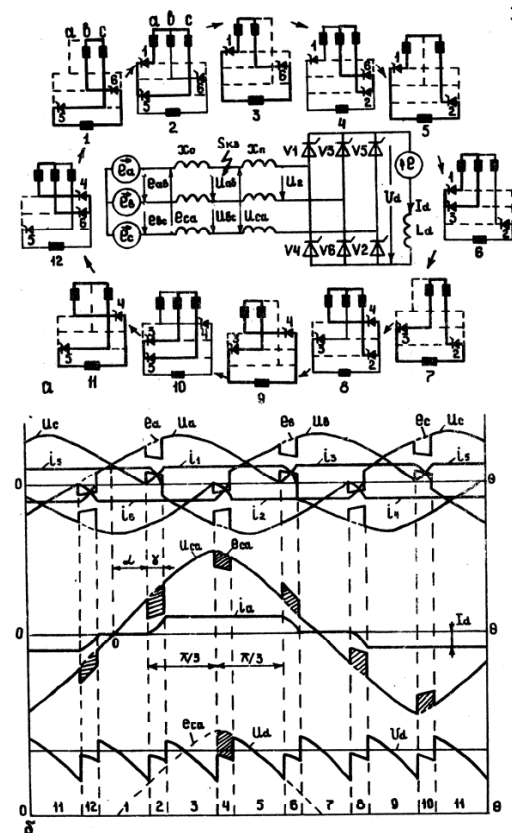


Рис.2.2. Возникновение периодических ИИН: а - эквивалентная схема СЭЭС; б - временные диаграммы работы

$x_c$  к индуктивному сопротивлению трансформатора (или токо-ограничивающего реактора) ПП  $x_n$ .

Сопротивление

$$x_c = 1 / \sum_{k=1}^n / x_{ki} \quad (2.1)$$

где  $x_{ki}$  - коммутационные сопротивления генераторов и активных потребителей -АД. Для генератора  $x_{ki}$  примерно равно сопротивлению обратной последовательности  $x_2$ , которое обычно задается в относительных единицах ( $x_2^*$ ). Если базисное сопротивление принимается равным начальному сопротивлению нагрузки генератора, то

$$\alpha_2 = \alpha_2^* U_{ГН}^2 / S_{ГН}, \quad (2.2)$$

где  $U_{ГН}$  и  $S_{ГН}$  - соответственно номинальное линейное напряжение и полная номинальная мощность генератора. Для АД  $x_{кзд}$ -сопротивление короткого замыкания. Обычно принимают  $x_{кзд}^* = 0,16$  о.е., а  $x_{кзд}$ , определяют из соотношения

$$\alpha_{КАД} = \alpha_{КАД}^* U_{Н}^2 / S_{ААН}, \quad (2.3)$$

где  $U_{Н}$  и  $S_{ААН}$  - соответственно номинальное линейное напряжение сети и суммарная номинальная полная мощность всех одновременно работающих в данном режиме АД. Сопротивление  $x_{п}$  представляет собой индуктивное сопротивление короткого замыкания трансформатора или анодного реактора ПП:

$$\alpha_{п} = \alpha_{п}^* U_{Н}^2 / S_{ТН}, \quad (2.4)$$

где  $e_{к}^*$ ,  $S_{ААН}$  - соответственно напряжение короткого замыкания трансформатора и его полная номинальная мощность. Для упрощения дальнейших рассуждений считаем трансформатор ПП приведенным к первичной обмотке (коэффициент трансформации  $h_{т} = 1$ ).

Временная диаграмма, поясняющая возникновение ИИН, показана на рис.2.2,б.

Кривую линейного напряжения сети  $u_{са}$  можно представить в виде суммы неискаженной синусоиды  $e_{са}$  с амплитудой  $E_m$  и ИП (показаны штриховкой), которые обозначены  $u_{к}$  (рис.2.3). С точки зрения оценки работоспособности потребителей электроэнергии (и их защищенности) при периодических ИИН рассматриваются следующие параметры  $u_{к}$ : максимальное значение, длительность фронта, спектральный состав, относительное содержание высших гармоник в напряжении  $u_{к}$  (коэффициент несинусоидальности), отклонения напряжения по его действующему значению в сети и среднему значению на нагрузке ПП, коэффициент пульсаций выпрямленного напряжения ПП.

ИП достигают максимального значения (наибольшего мгновенного отклонения от синуса  $e_{са}$ ) на интервалах 2 и 8 (см.рис.2.3):

$$u_{км} = E_m \sin(\alpha + \gamma) x_c / (x_c + x_n).$$

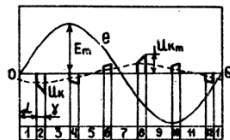


Рис.2.3. Периодические ИП

Если  $\alpha + \gamma = \pi/2$  и  $x_c = x_n$  (что соответствует приближенно полной загрузке генератора мощностью ПП), то  $u_{км} = 0,5 E_m$

Длительность  $u_{к}$  определяется углом коммутации  $\gamma$ , который зависит от угла  $\alpha$ , амплитуды тока короткого замыкания  $I_{км}$  на интервале комутации (рис.2.4,а) и тока нагрузки ПП  $I_d$  (рис.2.4,б) в соответствии с соотношением

$$\cos \alpha - \cos(\alpha + \gamma) = I_d / I_{км}, \quad (2.6)$$

где

$$I_{км} = \sqrt{2} E_2 / 2 (\alpha_c + \alpha_n) = E_m / 2 (\alpha_c + \alpha_n). \quad (2.7)$$

Здесь  $E_2$  - действующее значение линейной ЭДС вторичной обмотки ПП (при  $h_{т} = 1$ ,  $\sqrt{2} E_2 = E_m$ )

Наибольшего значения  $\gamma$  достигает, когда генератор полностью загружен мощностью неуправляемого ПП ( $\alpha = 0$ ,  $x_c = x_n$ ). Тогда  $\gamma \approx (30-35)^\circ \approx (1,7-2)$  мс при основной частоте сети 50 Гц. Этот случай возможен в гребных электрических установках двойного рода тока, в СЭЭС

же обычно  $\gamma \leq 20^\circ$ .

Длительность переднего фронта  $u_{к}$  зависит от собственных параметров вентиля и лежит в пределах 1-5 мкс.

Спектральный состав  $u_{к}$  определяется гармониками с порядковыми номерами  $\nu = h m \pm 1$  для рассматриваемого случая  $m = 6$ , поэтому  $\nu = 6h \pm 1$ . Точное определение амплитудных

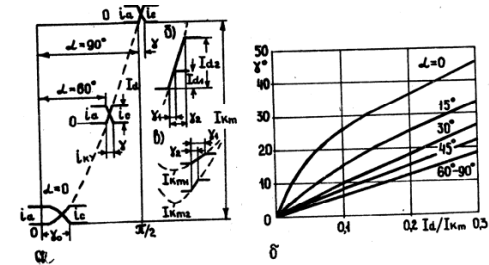


Рис.2.4. График изменения угла  $\gamma$

значений гармоник  $U_{mv}$  требует учета большого числа факторов [5]. С достаточной для практических оценок точностью  $u_{к}$  могут быть описаны равнодействующими прямоугольниками той же длительности  $\gamma$  [7]. Тогда относительные амплитуды гармоник  $U_{mv}^* = U_{mv} / \sqrt{2} E_2 = U_{mv} / E_m$  (для  $h_{т} = 1$ ) подчиняется соотношению

$$U_{mv}^* \approx P_d / S_{кз} \cdot [\sin \gamma / 2 / \gamma / 2], \quad (2.8)$$

где  $P_d = U_{до} I_d$  - мощность ПП на стороне постоянного тока;  $U_{до}$  - выпрямленное напряжение в режиме холостого хода ПП,

при  $\alpha = 0$   $U_{до} = 3\sqrt{2} E_2 / \pi$ ;  $S_{кз}$  - полная мощность симметричного короткого замыкания СЭЭС на стороне переменного тока ПП. Ее можно определить по формуле:

$$S_{кз} = \sum_{i=1}^n S_{ГН_i} / \alpha_{2i}^* + S_{ААН} / \alpha_{КАД}^*, \quad (2.9)$$

где  $n$  - число параллельно работающих генераторов. Формула (2.8) справедлива и для фазового напряжения сети с той лишь разницей, что  $U_{mv}$  выражены в долях от амплитуда фазной ЭДС  $E_m \text{mf} = E_m / \sqrt{3}$ . Из (2.8) следует, что  $U_{mv}$  практически не зависит от  $\gamma$  и  $\nu$  при малых значениях  $\gamma$ . Действительно, значения  $U_{mv}$  для  $\nu = 5, 7, 11, 13$  при  $\gamma = 0$  совпадают с точностью до долей процента (рис.2.5). Поскольку  $U_{mv}$  падает с ростом  $\gamma$ , в предварительных расчетах для оценки порядка максимальных значений амплитуд 5-й, 7-й, 11-й и 13-й гармоник можно приближенно считать  $U_{mv}^* \approx P_d / S_{кз}$ . Типичная картина диапазона изменения  $U_{mv}^*$  в процессе работы ПП по казана на рис.2.6, из которого видно, что при  $\nu > 25-29$  гармоника практически затухают и при оценке работоспособности потребителей их можно не учитывать.

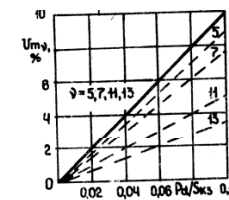


Рис.2.5. Амплитуды гармоник напряжения сети:  
—  $\gamma = 5^\circ$ ; ---  $\gamma = 20^\circ$

Аналогично могут быть оценены параметры ИП и влияние на качество напряжения и при работе других схем ПП. При одновременной работе многих ПП влияние на качество напряжения и при работе других схем ПП. При одновременной работе многих ПП влияние на качество напряжения будет меньше, чем при работе одного ПП суммарной мощности.

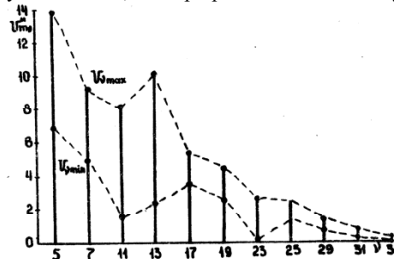


Рис.2.6. Диапазон изменения амплитуд гармоник напряжения генератора ИСК 1250-750 в рабочих режимах ПП типа КВБ

Содержание высших гармоник в напряжении судовой сети оценивается с помощью коэффициента несинусоидальности, значение которого в СЭЭС не должно превышать 0,1 или 10%:

$$R_{nc}(\sum_{v=2}^{\infty} U_v^2)^{1/2} / U_1$$

где  $U_1, U_v$  - соответственно действующее значение первой в высших гармонических составляющих напряжения. При работе рассматриваемой схемы ПП  $h_{nc}$  достаточно точно можно определить по приближенной формуле

$$h_{nc} \approx 0,96 \sin(\alpha + \gamma/2) \sqrt{\gamma} x_c / (x_c + x_n) \quad (2.10)$$

При прочих равных условиях  $h_{nc}$  будет максимальным в режиме работы ПП, когда  $\alpha + \gamma/2 = \pi/2$ . Этот случай в соответствии с (2.10) показан на рис.2.7. Учитывая, что  $x_c/x_n + x_n \approx P_d/S_{гн} + S_{алн}$  как видно из рис.2.7, в СЭЭС накладываются заметные ограничения на удельную мощность.

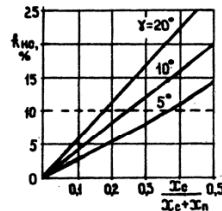


Рис.2.7 Коэффициент несинусоидальности напряжения сети

Появление периодических ИП приводит к отклонениям действующего значения  $U$  напряжения генератора, которое в СЭЭС не должно превышать  $\pm 2,5\% U_n$ . Автоматические регуляторы напряжения судовых генераторов не обеспечивают стабилизацию  $U$  в этих условиях из-за особенностей построения их измерительных органов, которые определяют отклонение либо среднего  $U_{cp}$ , либо амплитудного  $U_m$  значения напряжения. Это при переменности коэффициентов формы и амплитуда напряжения в зависимости от параметров ИИН приводит к нестабильности  $U$ . Граничные значения отклонений  $U$  от  $U_n$  можно найти, полагая, что  $h_{nc}$  определится одной из высших гармоникой напряжения,  $h_{nc} = U_v/U_1$ . Тогда отклонения  $\Delta U^* = (U - U_n)/U_n$  при стабилизации  $U_m$  и  $U_{cp}$  примут вид:

Стабилизируемый параметр	$\Delta U_{min}^*$	$\Delta U_{max}^*$
$U_m$	$-k_{nc}(2+k_{nc})/2(1-k_{nc})$	$k_{nc}(2-k_{nc})/2(1+k_{nc})$
$U_{cp}$	$-k_{nc}(2+\gamma k_{nc})/2(1-k_{nc})$	$k_{nc}(2-\gamma k_{nc})/2(1+k_{nc})$

Результаты расчета абсолютной величины наибольших граничных значений  $|\Delta U^*|$  при  $v=5$  показаны на рис.2.8,

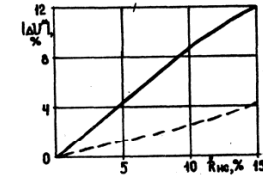


Рис.2.8. Предельные отклонения действующего значения напряжения сети: —  $U_m = \text{const}$ ; - - -  $U_{cp} = \text{const}$ .

откуда видно, что  $|\Delta U^*| > 5\%$  уже при  $h_{nc} = 10\%$  и  $U_m = \text{const}$ . Это требует принятия специальных мер по стабилизации  $U$  либо ограничения  $h_{nc} \leq 5\%$  (в таком случае с использованием рис.2.7 при  $S_{алн} = 0$  и  $\gamma = 20^\circ$  получается  $P_d/S_{гн} \leq 5\%$ ).

Влияние ИИН в цепи нагрузки ПП оценивается по спектральному составу  $U_d$  и изменению его среднего значения [5].

### 2.1.2. ИП, возникающие при переходных процессах включения и отключения вентиля.

Рассмотрим процессы включения и отключения вентиля в схеме ПП (рис.2.9) для тех же допущений и обозначений величин, которые были приняты ранее при анализе переходов тока с вентиля на вентиль, но теперь учтем емкость в цепях ПП. Емкость  $C_\phi$ , включает собственную емкость фазы трансформатора и емкость шин, соединяющих трансформатор с вентильным блоком относительно корпуса,  $C_\phi(1-10)$  нФ. Емкости полюсов  $C_{n1}, C_{n2}$  - собственные емкости образования, подключенного к полюсам и емкости помехоподавляющих конденсаторов, которые вносят основной вклад в  $C_{n1}, C_{n2}$ . В дальнейшем будем считать

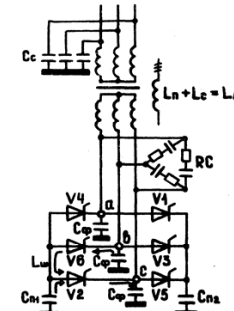


Рис.2.9. Схема ПП с учетом емкостей оборудования

$C_{n1} = C_{n2} = (1-10)$  мкф. В схему ПП включают также цепочки RC, предназначенные для демпфирования колебательных процессов отключения вентиля. Кроме этого судовая сеть имеет значительную собственную емкость фазы относительно корпуса  $C_c = (5-20)$  мкф,

которая оказывает влияние на параметры высокочастотных ИП.

Наличие в схеме не только емкостей, но и индуктивностей (шин  $L_{ш}$  и анодной индуктивности  $L_n+L_c$ ) приводит к тому, что периодически повторяющиеся в ней возмущения (при включении и выключении вентилей) вызывают появление колебательных процессов в контурах LC. Для их оценки необходимо знать величины скачков анодного напряжения при включениях и отключениях вентилей.

Кривая анодного напряжения вентиля  $u_a$  (напряжения между анодом и катодом) показана на рис.2.10 без учета колебательных процессов. Она формируется из участков линейных напряжений  $u_2$  на вторичной обмотке трансформатора, подобных линейным напряжениям сети (см.рис.2.2,б).

При включении вентиля (в момент, соответствующий углу  $\alpha$ ) и изменяется от значения  $U_{ск1}$  до 0:

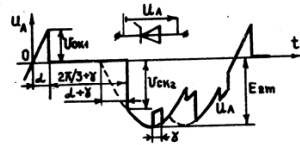


Рис.2.10. Анодное напряжение вентиля

$$U_{ск1} = E_{2m} \sin \alpha, \quad (2.11)$$

где  $E_{2m}$  - амплитуда линейной ЭДС вторичной обмотки трансформатора (для  $h_m=1$ ,  $E_{2m}=E_m$ )  
При включении вентиля (в момент  $2\pi/3+\alpha+\gamma$ )  $u_a$  возрастает от нуля до значения

$$U_{сн2} = E_{2m} \sin(\alpha+\gamma). \quad (2.12)$$

Теперь рассмотрим процесс включения вентиля, например V2 (см.рис.2.9). До момента включения V2 ток проводят V6 и V1. При этом напряжение на каждой емкости  $C_{\phi}$  сопадает с соответствующей фазной ЭДС, напряжение на емкости  $C_{n1}$  равно ЭДС фазы в, на емкости  $C_{n2}$  - ЭДС фазы а. Анодное напряжение на V2 в момент его включения (см.рис.2.10)  $u_a=U_{ск1}$ . Таким образом, при включении V2 напряжение на  $C_{n1}$   $C_{\phi}$  фазы в выше, чем напряжение на  $C_{\phi}$  фазы С. Сразу же после включения V2 начинается перезаряд этих емкостей (выравнивание их напряжений) с протеканием соответствующих токов (показаны стрелками на рис.2.9). В образованные контуры кроме емкостей входят индуктивности шин (проводов), соединяющих точки в и С. Поэтому включение вентиля возбуждает в схеме ИП собственные колебания, частота которых определяется индуктивностями шин  $L_{ш}$  и емкостями ( $C_{\phi}$ ,  $C_{n1}$  или  $C_{n2}$ ). Оценим порядок частот возбуждаемых колебаний и их амплитуду. Эквивалентная схема для включения вентиля V2 показана на рис.2.11,а, где  $R_{ш}$  - сопротивление шин ИП на пути тока, а эквивалентная емкость  $C_3=2C_{\phi}C_{п}/(2C_{\phi}+C_{п})$ . Частота собственных колебаний имеет порядок при  $L_{ш} = 10^{-5}$  Гн и  $C_3 = 10^{-8}$  Ф.

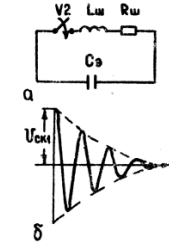


Рис.2.11. Колебания при выключении вентиля: а - эквивалентная схема; б - характер колебаний

$$f = 1/2\pi\sqrt{L_{ш}C_3} = 1/2\pi\sqrt{10^{-5} \cdot 10^{-8}} \approx 10^5 \text{ Гц}.$$

Начальное значение амплитуды напряжения колебаний на  $C_3$  (см. рис.2.11)  $U_{ск1}=E_{2m}\sin\alpha \approx 10^2$  В. Колебания (см. рис. 2.11) затухают быстро, поскольку  $R_{ш} \approx 10^{-2}$  Ом, а декремент затухания  $R_{ш}/L_{ш} \approx 10^3$ . Эти кондуктивные ИИН не оказывают заметного влияния на работу элементов в СЭЭС. Они передаются главным образом излучением, создавая помехи радиоприему. Типичный спектральный состав напряжения помех  $U_n$  показан на рис.2.12. Снижение уровня помех обеспечивается высокой степенью экранирования корпусом ИП в морском исполнении (корпуса ИП - литые).

Колебательные процессы при выключении вентиля протекают аналогичным образом, с той лишь разницей, что теперь необходимо учитывать в колебательных контурах анодную индуктив-

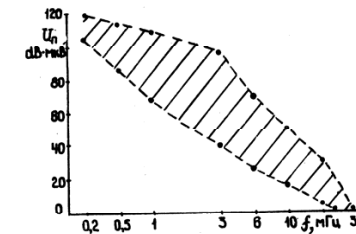


Рис.2.12. Спектр напряжений радиопомех

ность  $L_a=L_n+L_c$  (см.рис.2.9), где  $L_n=x_n/\omega$ ,  $L_c=x_c/\omega$ . Эквивалентная схема контура колебаний анодного напряжения (без учета активных сопротивлений фаз, демпфирующих RC цепочек и эквивалентной емкости сети) показана на рис.2.13,а. Емкости  $C_1$  и  $C_2$  в этой схеме равны

$$C_1 = C_{\phi} (C_{\phi} + C_{п}) / 3C_{\phi} + 2C_{п}; \quad (2.13)$$

$$C_2 = (C_{\phi} + C_{п})^2 / 3C_{\phi} + 2C_{п}, \quad (2.14)$$

$$L = 3L_a.$$

а индуктивность



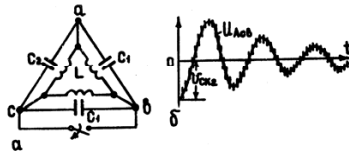


Рис. 2.13. Колебания анодного напряжения при выключении вентиля: а - эквивалентная схема; б - характер колебаний

Свободная составляющая колебаний анодного напряжения представляет собой двухчастотное колебание (см.рис.2.13,б):

$$u_{AcB} = U_{Ck2} (1/4 \cos \omega_1 t + 3/4 \cos \omega_2 t),$$

где частоты  $f_1 = \omega_1 / 2\pi$  и  $f_2 = \omega_2 / 2\pi$  равны:

$$f_1 = [3/L(C_1 + 2C_2)]^{1/2} / 2\pi, \quad f_2 = (1/LC_1)^{1/2} / 2\pi. \quad (2.15)$$

Оценка порядка частот при  $L=10^{-3}$  Гн,  $C_1=10^{-9}$  Ф и  $C_2=10^{-6}$  Ф дает  $f_1 \approx 10^3$  Гц,  $f_2 \approx 10^5$  Гц. Порядок начальной амплитуда колебаний, как и в предыдущем случае,  $U_{Ck2} \approx 10^2$  В. При активном сопротивлении фазы порядка  $R_\phi = 10^{-2}$  Ом декремент затухания (одинаковый для колебаний с частотами  $f_1$  и  $f_2$ )  $R_\phi / 2L \approx 10$ / Тагим образом, эти колебания затухают значительно медленнее, чем при включении вентиля. Они проявляются не только в ветви с выключаемым вентилем, но и во всей остальной части схемы, накладываясь на напряжение сети и выпрямленное напряжение. В рассмотренной схеме ПП эти ИП возбуждаются шесть раз за период напряжения сети (через 3,3 мс) и представляют опасность как для самого ПП (обратные включения вентиля, воздействие на изоляцию оборудования), так и для других потребителей энергии в СЭЭС. Использование демпфирующих цепочек RC позволяет примерно в 1,5 раза уменьшить амплитуду, и частоту ИП, обеспечив практически полное затухание через 1-1,5 периода [6]. Учет емкости фаз судовой сети относительно корпуса  $C_c$  приводят к уменьшению частоты колебаний. Тем не менее, они продолжают оставаться опасными для судовых электронных устройств и требуют учета при оценке защищенности этих устройств.

### 2.1.3. Примеры расчета параметров ИП.

Оценим параметры периодических ИП и их влияние на качество напряжения в СЭЭС при работе генератора МСК 113-4 на асинхронную нагрузку и электропривод грузовой лебедки с ПП типа АТРК 100-460, включенного в сеть через анодный реактор ( $h_t=1$ ). Исходные данные: полная номинальная мощность генератора  $S_{гн}=375$  кВА, сопротивление обратной последовательности  $X_2^* = 0,15$  о.е, номинальное напряжение генератора  $U_{гн}=400$  В суммарная полная номинальная мощность работающих АД,  $S_{адн} = 100$  кВА, сопротивление короткого замыкания АД  $X_{кад}^* = 0,16$  о.е, номинальное напряжение сети  $U_n=E=380$  В номинальная мощность ПП на стороне переменного тока  $S_{1n} = 48,3$  кВА, сопротивление короткого замыкания  $X_{пн}^* = e_{к}^* = 0,1$  о.е., напряжение холостого хода  $U_{до} = 460$  В, выпрямленный ток  $I_d = 60$  А, угол регулирования  $\alpha=60^\circ$ . Собственная емкость фазы  $C_\phi = 8 \cdot 10^{-9}$  Ф, емкость полюсов  $C_{п1} = C_{п2} = 5 \cdot 10^{-6}$  Ф. Автоматический регулятор на пряжения стабилизирует его амплитудное значение  $U_m$  -const.

1. Определяем сопротивления эквивалентной схемы (см. рис.2.2)  $x_c$  и  $x_n$  по формулам (2.1)-(2.4):

$$x_c = 400^2 / 375 \cdot 10^{-3} \cdot 0,2 = 0,063 \text{ Ом}; \quad x_{кад} = 380^2 / 100 \cdot 10^{-3} \cdot 0,16 = 0,23 \text{ Ом}; \\ x_n = 1 / (0,063 + 1 / 0,23) = 0,054 \text{ Ом}; \quad x_{пн} = 380^2 / 43,8 \cdot 10^{-3} \cdot 0,1 = 0,3 \text{ Ом}.$$

2. Находим наибольшее значение ИП по формуле (2.5)

$$U_{км} = \sqrt{2} \cdot 380 \cdot 0,054 / 0,054 + 0,3 = 0,157 \sqrt{2} \cdot 380 = 73,2 \text{ В}.$$

3. Определяем длительность ИП  $\gamma$ . Находим амплитуду тока короткого замыкания по

формуле (2.7)

$$I_{км} = \sqrt{2} \cdot 380 / 2(0,054 + 0,3) = 626 \text{ А}$$

по соотношению  $I_d / I_{км} = 60 / 626 = 0,095$  с учетом угла регулирования  $\alpha=60^\circ$  по Графику (см.рис.2.4) получаем  $\gamma=5^\circ$  или 0,56 мс.

4. Находим амплитудные значения гармоник в напряжении сети. Мощность короткого замыкания сети по формуле (2.9)  $S_{кз} = 375 / 0,2 + 100 / 0,16 = 2500$  кВА, Мощность ПП  $P_d = 460$  Вт  $= 27,6$  кВт. Для отношения  $P_d / S_{кз} = 27,6 / 2500 = 0,011$  и  $\gamma=5^\circ$  получаем по графику (см.рис.2.5)  $U_{m5}^* \approx U_{m7}^* \approx U_{m13}^* \approx U_{m15}^* = 1\% \cdot \sqrt{2} \cdot 380 / 100\% = 5,4 \text{ В}$

5. Определяем коэффициент несинусоидальности напряжения в соответствии с (2.10) при  $\gamma=5^\circ = 0,035$  рад:

$$R_{nc} = 0,96 \cdot \sin 62^\circ 30' \cdot \sqrt{0,035 \cdot 0,054 / 0,054 + 0,3} = 0,026 = 2,6\%.$$

6 Определяем максимальное отклонение действующего значения напряжения сети по графику (см.рис.2.8) при  $R_{nc} = 2,6\%$  и  $U_m = \text{const}$ . Получаем,  $|\Delta U^*| = 2,3\% U_n$ .

7. Определяем начальную амплитуду и частоту ИП при включении вентиля. Амплитудное значение (2.12)  $U_{Ck2} = \sqrt{2} \cdot 380 \sin 65^\circ = 482$  В. Параметры схемы (см.рис.2.13,а):  $L = 3(0,3/314 + 0,054/314) = 3 \cdot 10^{-3}$  Гн; емкость  $C_1$  (2.13).  $C_1 = 8 \cdot 10^{-9} (8 \cdot 10^{-9} + 5 \cdot 10^{-6}) / 3 \cdot 8 \cdot 10^{-9} + 2 \cdot 5 \cdot 10^{-6} \approx 4 \cdot 10^{-9}$  ф. Емкость  $C_2$  (2.14),  $C_2 = (8 \cdot 10^{-9} + 5 \cdot 10^{-6})^{1/2} \cdot 10^{-9} + 2,5 \cdot 10^{-6} \approx 2,5 \cdot 10^{-6}$  ф. Частота колебаний (2.15):  $f_1 = [3/10^{-3} (C_1 + 2C_2)]^{1/2} / 2\pi = 45860$  Гц.

## 2.2. Непериодические коммутационные импульсные помехи

### 2.2.1. Возникновение импульсных помех.

ИП в судовой сети имеют форму однополярных и колебательных импульсов напряжения и тока симметричного и несимметричного вида, наложенных на рабочие напряжения и токи. Причиной возникновения непериодических коммутационных импульсных помех является переходные процессы при нормальных и аварийных коммутациях в судовой электроэнергетической системе. Основными источниками помех могут быть названы следующие коммутации:

- включение потребителей электроэнергии (нагрузок);
- включение и отключение конденсаторов;
- выключение индуктивных цепей;
- аварийные замыкания.

Процесс возникновения ИП может быть пояснен с помощью схем (рис.2.14), которые содержат источник напряжения  $e$ , индуктивность  $L=10...100$  мкГн, отражающую индуктивность генераторов и кабелей, и сопротивление  $R=5...50$  Ом, отражающее волновые сопротивления кабелей и нагрузок в СЭЭС. Значения параметров схемы могут быть уточнены расчетным путем на основе осциллограммы ИП при включении известной нагрузки. Включение или выключение нагрузки (цепи) вызывает переходный процесс, приводящий

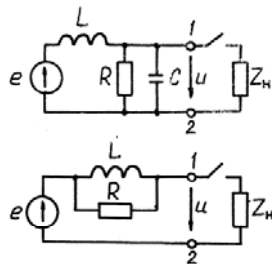


Рис.2.14. Схемы замещения судовой электроэнергетической системы для оценки ИП при коммутации нагрузок

к кратковременному отклонению напряжения в сети (точки 1-2) от напряжения  $e$ , т.е. к появлению ИП. Схема на рис.2.14,а более точно отражает свойства сети, но для приближенной оценки ИП возможно использование схемы на рис.2.14,б. Выключатель для случая замыкания контактов может замещаться идеальным ключом. При рассмотрении отключения нагрузки необходимо учитывать возможность возникновения дуги между расходящимися контактами выключателя. Расчет ИП заключается в составлении и решении дифференциальных уравнений, описывающих переходный процесс в схеме при конкретной коммутации. В результате расчета определяются аналитические выражения для линейных и фазных (фаза - корпус) напряжений, определяются амплитуда и длительность ИП

### 2.2.2. Включение нагрузок.

При включении активных сопротивлений и электродвигателей в судовой сети наблюдаются изменения мгновенного значения напряжения (например, рис.2.15). До замыкания контактов выключателя напряжение изменяется по синусоидальному закону с рабочей частотой сети переменного тока или равно рабочему напряжению в сети постоянного тока. При включении нагрузки

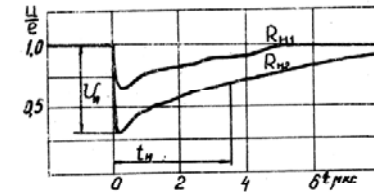


Рис.2.15. Изменения напряжения на шинах ГРЩ ледокола при включении нагрузки с сопротивлением  $R_{н1} = 10$  Ом и  $R_{н2} = 3$  Ом

( $t=0$ ) возникает провал мгновенного значения напряжения (не путать с провалом действующего значения), а затем происходит восстановление по кривой, близкой к экспоненте. Включение нагрузки с меньшим сопротивлением приводит к возникновению ИП большей амплитуды и длительности.

Потребители электроэнергии, не содержащие на своих зажимах конденсаторов, могут быть замещены волновым сопротивлением активного характера  $Z_n = R_n$ . В соответствии со схемой на рис. 2.14б включение активного сопротивления вызовет в сети изменение напряжения, описываемое выражением:

$$u = e \left[ 1 - \frac{R}{R + R_n} \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \right], \quad (2.16)$$

где  $\tau = \frac{L(R + R_n)}{R R_n}$ .

Амплитуда ИП (максимальное отклонение напряжения от величины  $e$ ) прямо пропорциональна мгновенному значению в момент, непосредственно предшествующий коммутации, и определяется формулой

$$U_n = \frac{R}{R + R_n} |e|, \quad (2.17)$$

а длительность ИП равна

$$t_n = 0,7 \frac{L(R + R_n)}{R R_n}. \quad (2.18)$$

Если в судовую сеть 380 В, 50 Гц с типичными параметрами  $L = 20$  мкГн,  $R = 20$  Ом включается нагреватель мощностью 6 кВт (фазное сопротивление  $R_{нф} = 24$  Ом), то, полагая  $e$  равным амплитудному значению  $U_{лн}$ , и  $R_n = 2R_{нф} = 48$  Ом максимальная амплитуда ИП равна

$$U_n = \frac{R}{R + R_n} U_{лн} = \frac{20}{20 + 48} 380 \sqrt{2} = 160 \text{ В}.$$

Амплитуда ИП на фазе относительно корпуса может достигать

$$U_{и.ф} = \frac{R}{R+R_H} U_{ф.н} = \frac{20}{20+48} 220\sqrt{2} = 90 \text{ В.}$$

Длительность ИП определяется по формуле (2.18):

$$t_{и} = 0,7 \frac{20 \cdot 10^{-6} (20+48)}{20 \cdot 48} = 10^{-6} \text{ с.}$$

При включении нагрузки в сеть 380 В, 50 Гц максимально возможная амплитуда ИП не превышает  $U_{ф.н}$  на фазах относительно корпуса и  $U_{лм}$  между фазами. Для сети 380 В эти величины составляют 310 и 540 В. Длительность ИП лежит в пределах  $10^{-1} \dots 10^2$  мкс.

### 2.2.3. Коммутация конденсаторов.

При включении конденсаторов или цепей с конденсаторами в судовой сети наблюдаются изменения мгновенного значения напряжения, представленные на рис.2.16. В момент включения ( $t=0$ ) возникает провал напряжения до начального напряжения на конденсаторе, а затем восстановление по колебательной кривой. Включение конденсатора с большей емкостью приводит к возникновению ИП большей длительности.

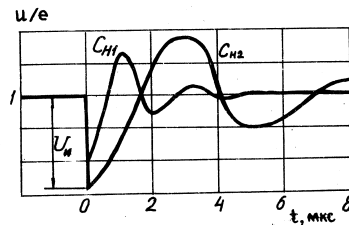


Рис.2.16. Изменение напряжения на шинах ГРЩ ледокола при включении разряженных конденсаторов с емкостью  $C_{н1} = 0,01$  мкФ и  $C_{н2} = 0,1$  мкФ

Расчет ИП при включении конденсаторов выполняется на основе схемы (см.рис.2.14б), где в качестве  $Z_n$  включен конденсатор  $C_n$ , который может быть заряжен после предшествующего отключения до напряжения  $U_{сн}$ . При замыкании контактов выключателя возникает переходный процесс, сопровождающийся изменением напряжения в сети в соответствии с выражением

$$u = e - (e - U_{сн}) \exp\left(-\frac{t}{2RC_H}\right) \left(\cos \omega t - \frac{1}{2RC_H \omega} \sin \omega t\right), \quad (2.19)$$

где

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{L C_H}} \sqrt{1 - \frac{L}{4R^2 C_H}}$$

ЭИ

Амплитуда ИП равна

$$U_{и} = |e - U_{сн}|. \quad (2.20)$$

Длительность ИП определяется по формуле

$$t_{и} = \frac{1}{\omega} \arctg(2RC_H \omega). \quad (2.21)$$

При включении конденсатора емкостью  $C_n = 5$  мкФ в сеть 380 В, 50 Гц с

параметрами  $R=20$  Ом,  $L=20$  мкГн возникает ИП колебательной формы с частотой колебаний

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{L C_H}} \sqrt{1 - \frac{L}{4R^2 C_H}} = \frac{1}{\sqrt{20 \cdot 10^{-6} \cdot 5 \cdot 10^{-6}}} \sqrt{1 - \frac{20 \cdot 10^{-6}}{4 \cdot 20^2 \cdot 5 \cdot 10^{-6}}} \approx 10^5 \text{ рад/с}$$

длительность

$$t_{и} = \frac{1}{\omega} \arctg(2RC_H \omega) = \frac{1}{10^5} \arctg(2 \cdot 20 \cdot 5 \cdot 10^{-6} \cdot 10^5) = 1,6 \cdot 10^{-5} \text{ с.}$$

Амплитуда ИП между фазами при включении конденсатора, заряженного после предшествующего отключения максимальна при  $U_{сн} = -U_{лм}$ ,  $e = U_{лм}$  достигает в соответствии с (2.30) величины

$$U_{и} = 2 U_{лм} = 2 \cdot 380\sqrt{2} = 1080 \text{ В.}$$

Аналогично при повторном включении конденсатора между фазой и корпусом амплитуда ИП на фазе может достигать удвоенного амплитудного значения фазного напряжения:

$$U_{и} = 2 U_{ф.н} = 2 \cdot 220\sqrt{2} = 620 \text{ В.}$$

### 2.2.4. Экспериментальное определение параметров схемы замещения.

Эквивалентное волновое сопротивление  $R$  и индуктивность  $L$  схемы замещения СЭЭС могут быть уточнены по осциллограмме изменения напряжения на винах ГРШ при подключении к ним известной цепи. Если подключался резистор  $R_H$  к винам АВ, то по осциллограмме напряжения между шинами (см.рис.2.15) можно определить отношение значения  $e$  (напряжение перед коммутацией) к амплитуде ИП  $U_{и}$ , постоянную времени восстановления напряжения  $\tau$  и рассчитать искомые параметры по формулам:

$$R = \frac{R_H}{\frac{e}{U_{и}} - 1};$$

$$L = \frac{\tau R R_H}{R + R_H}.$$

Для случая включения  $R_H = 3$  Ом (см.рис.2.15) имеем

$$\frac{e}{U_{и}} = \frac{1}{0,6} = 1,65;$$

$$\tau = 5 \text{ мкс};$$

$$R = \frac{3}{1,65 - 1} = 4,5 \text{ Ом};$$

$$L = \frac{5 \cdot 10^{-6} \cdot 4,5 \cdot 3}{4,5 + 3} = 9 \cdot 10^{-6} \text{ Гн.}$$

### 2.2.5. Включение трехфазных нагрузок и цепей.

При включении трехфазной нагрузки из-за неодновременности замыкания контактов выключателя возникает несколько ИП (рис.2.17), каждая из которых описывается выражением вида (2.16), Для нагревателей, электродвигателей, трансформаторов

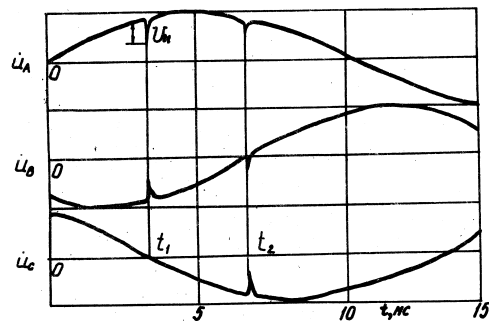


Рис. 2.17. Изменение напряжения на шинах ГЩ при включении трехфазной нагрузки:  $t_1$  - момент замыкания контактов выключателя фаз А и В;  $t_2$  - момент замыкания контактов выключателя фаз С

сопротивление по цепи фазы - корпус значительно больше междуфазного сопротивления и поэтому может не учитываться при рассмотрении переходного процесса. При замыкании первой пары контактов выключателя переходного процесса не возникает, т.к. замыкание второй пары контактов (момент  $t_1$ ) нагрузка оказывается подключенной с линейное напряжение (для определенности АВ). В соответствии с (2.17) между фазами АВ возникает ИП с амплитудой

$$U_{и.АВ} = \frac{R}{R+R_H} |e_{AB}| = \frac{R}{R+R_H} U_{Л.М} |\sin(\alpha + \frac{\pi}{6})|,$$

где  $\alpha = \Omega t_1$  - угол включения, определяемый через номинальную частоту тока в сети  $\Omega$  и момент замыкания контактов выключателя  $t_1$ .

Амплитуда ИП, наложенных на другие линейные и фазные напряжения, определяются через  $U_{и.АВ}$  по формулам

$$U_{и.А} = U_{и.В} = U_{и.СА} = U_{и.ВС} = \frac{1}{2} U_{и.АВ}; \quad U_{и.С} = 0. \quad (2.22)$$

При замыкании последней пары контактов выключателя (фазы С в момент  $t_2$ ) на фазе С возникает ИП с амплитудой

$$U_{и.С} = \frac{R}{R+R_H} |e_C| = \frac{R}{R+R_H} U_{Ф.М} |\sin(\alpha + \beta + \frac{2\pi}{3})|,$$

где  $\beta = \Omega(t_1 - t_2)$  - угол задержки замыкания последней пары контактов выключателя. Амплитуды ИП на других фазах будут равны

$$U_{и.А} = U_{и.В} = \frac{1}{2} U_{и.С}; \quad U_{и.ВС} = U_{и.СА} = \frac{3}{2} U_{и.С}; \quad U_{и.АВ} = 0. \quad (2.23)$$

При включении трехфазной батареи конденсаторов возникает несколько ИП, описываемых выражением (2.19). В общем виде конденсаторы могут быть заряжены после отключения от сети. Например, при отключении в порядке АВС или АСВ конденсаторы батарей по схеме звезда будут заряжены до напряжений

$$U_{сн.А} = U_{Ф.М} \sin \alpha_0;$$

$$U_{сн.В} = -\frac{1}{2}(\sqrt{3} \cos(\alpha_0 + \beta_0) + \sin \alpha_0) U_{Ф.М}; \quad (2.24)$$

$$U_{сн.С} = \frac{1}{2}(\sqrt{3} \cos(\alpha_0 + \beta_0) - \sin \alpha_0) U_{Ф.М},$$

где  $\alpha_0$  и  $\beta_0$  - угол размыкания контактов выключателя в

фазе А и угол запаздывания размыкания последующих пар контактов. Амплитуда ИП при включении конденсаторов зависят от напряжения заряда конденсаторов и от мгновенного значения напряжения в сети в момент замыкания контактов, определяемые углами  $\alpha_0$ ,  $\beta_0$ ,  $\alpha$ ,  $\beta$ . Связь амплитуд ИП на разных фазах определяется выражениями (2.22), (2.23).

Если  $\alpha_0 = \beta_0 = \frac{\pi}{2}$  то в соответствии с (2.24)

$$U_{сн.С} = -1,36 U_{Ф.М},$$

тогда при условии  $e = -U_{Ф.М}$  амплитуда ИП в соответствии с (2.20) достигает значения

$$U_{и} = |1 - 1,36| U_{Ф.М} = 2,36 U_{Ф.М}.$$

Можно показать, что максимальная амплитуда ИП на фазах не превышает  $2,36 U_{Ф.М}$ , а между фазами-  $2,36 U_{Л.М}$ , что для сети 380 В составляет 730 и 1270 В. Если конденсаторы разряжены, то амплитуда ИП не превышает на фазах  $U_{Ф.М}$  и между фазами  $U_{Л.М}$  (соответственно 310 и 540 В).

При включении батареи конденсаторов по схеме звезда с заземленной нулевой точкой ИП возникают при замыкании каждой пары контактов выключателя. Амплитуда ИП зависит от напряжений заряда конденсаторов  $C_H$  и емкости сети  $C_C$  оставшегося после предшествующего отключения, и от порядка и углов замыкания контактов. При наиболее неблагоприятном сочетании этих условий и для  $C_H \gg C_C$  амплитуда ИП может теоретически достигать  $4,36 U_{Ф.М}$ , при разряженной емкости сети  $-4 U_{Ф.М}$ , а при полностью разряженных конденсаторах не превышает  $1,7 U_{Ф.М}$ . Если  $C_H \ll C_C$ , то амплитуда ИП не превышает  $2 U_{Ф.М}$ , что для сети 380 В составляет 620 В.

Значение скорости изменения тока в кабеле максимально при включении заряженных конденсаторов через кабель малой длины, оно может быть оценено по формуле

$$\left(\frac{di}{dt}\right)_{\max} = \frac{|e - U_{сн}|}{L_k} = \frac{2,36 \cdot 380 \sqrt{2}}{5 \cdot 10^{-6}} < 3 \cdot 10^8 \text{ A/c},$$

где  $L_k$  - индуктивность кабеля длиной 5-10м. При увеличении длины кабеля значение скорости изменения тока пропорционально уменьшается. Поэтому можно положить, что скорость изменения тока в кабеле не превышает  $10^9 \text{ A/c}$ .

## 2.2.6. Выключение индуктивных цепей.

При размыкании контактов выключателя между ними возникает дуговой разряд, так как на малом расстоянии между расходящимися контактами напряженность электрического поля превышает 50 В/мкм, необходимый для вырывания электронов полем. Поток электронов бомбардирует противоположный контакт, происходит испарение металла, возникает дуга, которая продолжает гореть до тех пор, пока внешняя цепь обеспечивает напряжение, достаточное для преодоления контактного потенциала металл-воздух (10-20 В) и ток, достаточный для испарения металла

контактов (1-10 А).

Возникновение дуги предотвращает мгновенное прерывание больших токов, так как при горении дуги напряжение между контактами невелико и нагрузка остается подключенной к сети через дугу до того момента, пока дуга не погаснет при уменьшении напряжения в сети и тока дуги. Ток в момент погасания дуги называется током среза и не превышает единиц ампер.

Амплитуда ИП на шинах ГРЩ при отключении тока нагрузки определяется произведением величины R на значение тока среза I и для судовых условий не превышает 100-200 В.

Напряжение на отключаемой нагрузке зависит от ее характера. На активной нагрузке после погасания дуга напряжение скачком устанавливается равным нулю, на отключенных конденсаторах остается напряжение, равное напряжению в сети в момент отключения. При отключении индуктивных нагрузок (ненагруженного трансформатора, двигателя, реактора) на них возможно появление импульсных перенапряжений. После погасания дуги в индуктивной нагрузке возникает переходный процесс с начальными условиями  $i_L = I_{cp}$ ;  $\psi_L$ , представляющий собой колебания в контуре, образованном индуктивностью  $L_n$  и паразитной емкостью катушки  $C_L$ . Если дуга отсутствует, то напряжение на индуктивности может достигнуть величины

$$U_L = \sqrt{I_{cp}^2 \frac{L_n}{C_L} + e^2} \approx I_{cp} \sqrt{\frac{L_n}{C_L}}$$

Напряжения на трансформаторах и других индуктивных нагрузках могло бы достигать  $10^5 - 10^6$  В, так как их характеристические сопротивления  $\sqrt{L_n/C_L}$  имеют значения порядка  $10^5$  Ом.

Напряжение на контактах выключателя  $u_k = u - u_L$  имело бы такой же порядок. В действительности происходит серия повторных зажиганий и погасаний дуги, в результате которых рассеивается энергия, запасенная в L, и снижается перенапряжение. После первого среза тока ( $t=0$  на рис.2.18) напряжение на отключаемой нагрузке успевает возрасти лишь до величины в несколько десятков вольт, так как

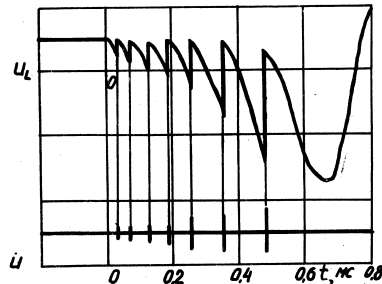


Рис.2.18. Напряжение на катушке индуктивности  $u_L$  и напряжения в сети  $u$  при отключении катушки

из-за небольшого расхождения контактов пробивная прочность промежутка между ними невелика. Дуга вновь загорается, а емкость  $C_L$  разряжается на сеть,

вызывая в ней появление высокочастотных колебаний напряжения (импульсных помех). Когда емкость  $C_L$  разрядится, дуга между контактами вновь гасится. Напряжение на емкости начинает нарастать, но уже по кривой с меньшей крутизной и меньшей ожидаемой амплитудой. Процесс повторных зажиганий и обрывов дуги продолжается до тех пор, пока напряжение на контактах не будет меньше напряжения пробоя. Чем больше повторных зажиганий и гарений дуги имеет место, тем больше рассеивается энергия, запасенная в L, и тем меньше амплитуда перенапряжений. Максимальное значение напряжения на нагрузке зависит от свойств выключателя, параметров отключаемой цепи и может в 4-5 раз превышать номинальное напряжение питания. Следует отметить, что при отключении ненагруженных трансформаторов перенапряжения частично трансформируются во все обмотки примерно пропорционально коэффициенту трансформации. Кратности перенапряжения возрастают при использовании выключателей с номинальными напряжениями более высокими, чем номинальное напряжение сети. Типы отключаемых трансформаторов или реакторов (величины  $L_n$  и  $C_L$ ) существенно меньше влияют на кратность перенапряжения. Длительность процесса отключения может составлять единицы миллисекунд, длительность задних фронтов - сотые доли микросекунды. Амплитуда ИП в сети (точки 1-2 на рис.2.14) при повторных зажиганиях дуги значительно меньше чем напряжения на отключаемой нагрузке и не превышает  $U_{фм}$ , так как  $C \gg C_L$  и  $\sqrt{L_n/C_L} \gg \sqrt{L/C}$ .

Длительность фронтов ИП определяется временем развития электрического пробоя и составляет (1-5)  $10^{-7}$  с

### 2.7. Аварийные замыкания в СЭЭС

СЭЭС - это система с изолированной нейтралью (рис.2.19), для которой основным видом аварийных замыканий является дуговое замыкание одной из фаз на корпус, сопровождающееся перенапряжениями и возникновением ИП.

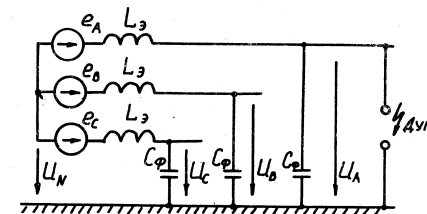


Рис.2.19. Упрощенная эквивалентная схема для анализа однофазных дуговых замыканий на корпус

Металлическое замыкание на корпус одной фазы приводит лишь к повышению напряжения на здоровых фазах до линейного напряжения, а ток замыкания определяется по формуле

$$I_3 = 3 \Omega C_\phi U_\phi$$

и зависит от емкости фазы на корпус  $C_\phi$ , которая на судах может достигать 0,2-20 мкФ. Если ток замыкания не превосходит 3-10 А, а электрическая прочность

промежутка между фазой и корпусом близка к амплитудному значению напряжения на нем, то возможно возникновение замыкания через перемежающуюся дугу. При этом дуга периодически зажигается и гаснет, ток замыкания представляет собой последовательность импульсов с паузами между импульсами не менее четверти периода рабочей частоты (рис.2.20).

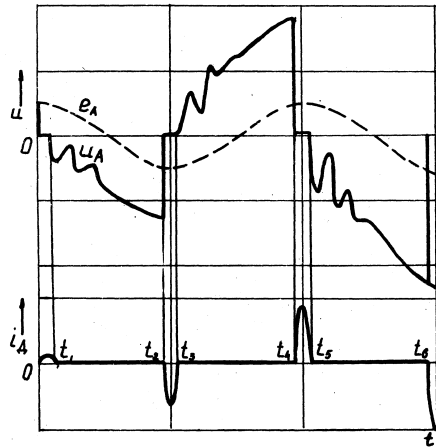


Рис.2.20. Изменение напряжения в судовой сети переменного тока при дуговом замыкании фазы А на корпус

При первом зажигании дуги между поврежденной фазой А и корпусом напряжение  $u_a$  падает до нуля за доли микросекунда, т.е. возникает ИП с амплитудой  $e_a$  (момент  $t=0$  на рис. 2.20), После чего возникает колебательный процесс в контуре, образованном емкостью сети и индуктивностью кабелей и генераторов, а ток изменяется по синусоидальному закону высокой частотой и в момент  $t_1$  переходит через ноль. При этом дуга гаснет и начинается выращивание зарядов фазных емкостей, в результате чего устанавливается на нейтрали напряжение

$$u_{N,уст} = \frac{u_A(t_1) + u_B(t_1) + u_C(t_1)}{3} .$$

Для наиболее неблагоприятного случая, когда фазное значение  $e_a$  близко к амплитуде  $U_{фм}$ ; и мало затухание колебаний, имеем

$$u_A(t_1) = 0 ; \quad u_B(t_1) = u_C(t_1) = -2,45 U_{фм} ; \\ U_{N,уст} = -1,63 U_{фм} .$$

Через полпериода рабочей частота в момент  $t_2$  напряжение на дуговом промежутке фазы А равно  $-2,63 U_{фм}$ . Дуга вновь загорится, и фазное напряжение  $u_a$  за доли микросекунды изменится от значения  $u_a = e_a + u_{N,уст}$  до 0. Этот скачок напряжения может рассматриваться как ИП с амплитудой, равной  $|e_a + u_{N,уст}|$  которое в данном случае может достигнуть  $2,63 U_{фм}$ . Напряжение нейтрали изменится до  $U_{фм}$ .

В момент перехода высокочастотного тока через ноль (момент  $t_3$ ) дуга гаснет, а

напряжения  $u_b$  и  $u_c$  достигают максимальных значений порядка  $4U_{фм}$ . После погасания дуга на нейтрали установится напряжение

$$u_{N,уст} = \frac{0 + 4 + 4}{3} U_{фм} = 2,66 U_{фм} .$$

С каждым последующим циклом зажигания - гашение дуги возрастает  $u_{N,уст}$  а следовательно, и амплитуда ИП. При определенных напряжениях дуга начинает повторно зажигаться во время переходного процесса, что ограничивает величину напряжения на нейтрали. Установлено, что для судовых условий  $u_{N,уст} < 2U_{фм}$  следовательно, амплитуда ИП на поврежденной фазе не превышает  $3U_{фм}$ .

### 2.2.8. Вероятностные характеристики импульсных помех.

Амплитуда ИП, возникающих при каждой конкретной коммутации, является случайной величиной, так как зависит от ряда случайных факторов: мгновенного значения напряжения в сети в момент коммутации контактов каждой фазы выключателя (углов  $\alpha, \beta$ ), последовательности их коммутации и величины остаточного напряжения на коммутируемых емкостях. Аналитические выражения, связывающие перечисленные факторы с амплитудой ИП, приведены выше. Плотность вероятностей амплитуды ИП  $P_i(U_m)$  наиболее полно описывает амплитуду ИП, возникающих в СЭЭС при коммутациях конкретной  $i$ - цепи. Математическое ожидание  $m$  и среднеквадратическое отклонение  $\delta$  амплитуды ИП может быть рассчитано, если известно  $P_i(U_m)$  известным формулам. График плотности вероятностей амплитуды ИП может быть получен методом статистических испытаний. Идея метода заключается в получении на ЦВМ по  $n$  значений (реализации) случайных величин  $(\alpha, \beta, \alpha_0, \beta_0)$  заданным распределением, расчете для каждой реализации случайных величин амплитуда ИП в соответствии с выражением для рассматриваемой коммутации. В результате получается  $n$  значений (реализации) амплитуды, проводя статическую обработку которых имеем приближенный график  $P_i(U_m)$  значения  $m$  и  $\delta$ .

Углы включения  $\alpha$  и отключения  $\alpha_0$  можно положить равномерно распределенные от 0 до  $2\pi$ , а углы запаздывания замыкания контактов трехфазного выключателя друг относительно друга - распределенными нормально с математическим ожиданием, равным нулю, и среднеквадратическим отклонением в зависимости от типа выключателя от 0 до  $2\pi$ . Для получения значений величин с таким распределением могут быть использованы стандартные подпрограммы. Порядок замыкания контактов может быть принят равновероятным.

Плотности вероятностей амплитуды ИП, рассчитанные методом статистических испытаний, приведены на рис.2.21. В табл.2.1 приведены значения величин  $U_{и, max}$ ,  $m$ ,  $\delta$ ,  $P_2$  и  $P_3$ , где  $P_2$  и  $P_3$  - вероятности превышения амплитудой импульса соответственно величин  $2U_{фм}$  и  $3U_{фм}$  дуговых однофазных замыканий на корпус данные определены экспериментально путем натурных измерений ИП при искусственно создаваемых замыканиях на нескольких судах и являются ориентировочными.

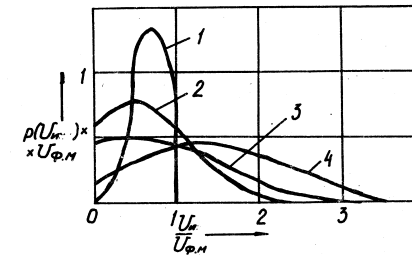


Рис.2.21. Плотности вероятностей амплитуды ИП на шинах ГРЩ при различных коммутациях в СЭЭС: 1 - включение активной нагрузки; 2 - включение заряженных конденсаторов; 3 - включение заряженных конденсаторов между фазами и корпусом; 4 - однофазное замыкание на корпус

Таблица 2.1

Вид коммутации	$\frac{U_{и, max}}{U_{фм}}$	$\frac{m}{U_{фм}}$	$\frac{\delta}{U_{фм}}$	$P_2, \%$	$P_3, \%$
I	2	3	4	5	6
1. Включение однофазных цепей с нагрузкой $R_H$ и разряженными конденсатором $C_H$	$\frac{\sqrt{3}}{2} \frac{R}{R+R_H}$	$0,5 \frac{R}{R+R_H}$	$0,3 \frac{R}{R+R_H}$	0	0
2. Включение трехфазной нагрузки	$\frac{\sqrt{3}}{2}$	0,5	0,3	0	0
3. Включение заряженной емкостной трехфазной цепи	$\frac{R}{R+R_H}$	$0,6 \frac{R}{R+R_H}$	$0,2 \frac{R}{R+R_H}$	0	0
4. Включение заряженной емкостной трехфазной цепи с заземленной нулевой точкой	2,36	0,8	0,5	<1	0

42

Продолжение табл.2.1

I	2	3	4	5	6
$C_H \ll C_C$	2	0,9	0,5	0	0
$C_H = C_C$	3,2	1	0,7	10	<0,1
$C_H \gg C_C$	4,2	1,2	0,8	20	<5
5. Однофазное замыкание на корпус	3,3	1,8	0,5	<30	<1

Для сети 380 В  $U_{фм} = 310$  В.

Наибольшая амплитуда ИП в сети наблюдается при коммутации заряженных емкостных цепей и замыканиях фазы на корпус. Вероятность появления ИП с амплитудой больше  $3U_{фм}$  при одной коммутации цепи с большой емкостью не

превышает нескольких процентов. Если емкость коммутируемых конденсаторов меньше емкости сети ( $10^{-6}$  -  $10^{-7}$ ) Ф или приняты меры к их разряду перед включением, то вероятность превышения амплитудой ИП  $3U_{\text{фм}}$  приближается к 0.

Частота появления ИП в СЭЭС определяется суммой частот коммутации отдельных потребителей. Малая длительность ИП ( $10^{-7}$  -  $10^{-4}$ ) с по сравнению с интервалом времени между коммутациями позволяет определить ИП как случайный импульсный поток с неперекрывающимися во времени импульсами, амплитуда которых случайна.

Частота появления ИП с амплитудой, превышающей заданную величину  $U$  (рис.2.22), может быть определена путем

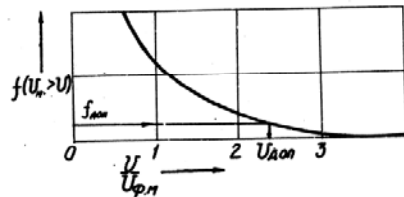


Рис.2.22. Частота следования ИП в СЭЭС, амплитуды которых превышает величину  $U_{\text{дон}}$

длительных натурных измерений амплитуда ИП на судах или теоретически в соответствии с выражением

$$f(U_n > U) = \sum_{i=1}^N f_i \int_U^{\infty} P_i(U_n) dU_n,$$

где  $N$ - количество коммутируемых с частотой  $f_i$  нагрузок (цепей) в СЭЭС;  $P_i(U_n)$ - плотность вероятностей амплитуды ИП, возникающих при коммутации  $i$ -й нагрузки.

По графику частоты  $f(U_n > U)$  на рис. 2.22 может быть определена возможная частота сбоев электронного оборудования, если известна минимальная амплитуда ИП  $U$ , при которых возникают сбои. Так же может быть решена и обратная задача: по заданной допустимой частоте сбоев определяется амплитуда ИП, которую должно выдерживать оборудование без сбоев т.е. определяется требование к помехозащищенности оборудования. В судовой сети с номинальным напряжением 390 В частота следования ИП с амплитудой, превышающей 1200 В. близка к нулю. Поэтому при выборе уровня помехозащищенности оборудования и расчете наводок в качестве расчетного импульса помехи в сети 360 В может быть взят экспоненциальный импульс напряжения с амплитудой 1000-1200 В с длительностью 1-100 мкс и фронтом 0,1 мкс и соответствующий ему импульс тока в кабеле со скоростью изменения тока на фронте  $10^8$ - $10^9$  А/с.

Энергия ИП определяется как

$$W = \frac{1}{R} \int_0^{t_m} (u - e)^2 dt \quad (2.25)$$

и принимает наибольшие значения при максимальных амплитудах, длительностях ИП и минимальном сопротивлении источника  $R$ . Практически значения энергии

ИП в СЭЭС составляют 0,1-10 мД/к. и не превосходят единиц джоулей.



### 2.3. Внешние электромагнитные импульсы

Наряду с ИП, возникающими в СЭЭС при коммутациях и работе мощных тиристорных преобразователей, существует вероятность воздействия на судовое электрооборудование ИП, возбуждаемых внешними по отношению к корпусу судна электромагнитными импульсами. Среди мощных внешних источников наибольшего внимания заслуживает электромагнитный импульс разряда молнии (ЭМИМ). Металлический корпус судна эффективно ослабляет импульсные электромагнитные поля. Поэтому основным каналом распространения энергии внешних электромагнитных импульсов во внутренние помещения судна являются кабели и другие электропроводящие элементы такие, как пиллерсы, трубопровода судовых систем и т.п.

#### 2.3.1. Возникновение импульсных напряжений и токов при разрядах молнии.

Многие судовые электрические системы связаны непосредственно или косвенно с кабельными коммуникациями или иными контурами, расположенными снаружи корпуса судна, на верхней палубе, надстройках и т.д. Например, навигационные огни имеют проложенную частично на верхней палубе сеть кабельных коммуникаций, непосредственно связанную с СЭЭС. Прямой разряд молнии в эти системы маловероятен, так как металлоконструкции судна служат естественным молниеотводом. Однако при разряде молнии в металлоконструкции судна или при разрядах молнии в непосредственной близости от судна возникают сильные электромагнитные поля. Они наводят в кабелях ЭДС и токи, которые проникают по кабелям внутрь корпуса судна, достигают чувствительного электрооборудования и могут давать сбой в его работе и даже повреждению. СЭЭС может получать питание от береговой сети (например, при постройке, ремонте судна). В режиме питания судна с берега появляется дополнительный канал проникания в СЭЭС энергии удаленных разрядов через питания с берега. При анализе явлений в электрооборудовании судна, сопровождающих ЭМИМ, необходимо по известным параметрам ЭМИМ определить амплитуду наведенных импульсных напряжений.

ЭМИМ может длиться около 1 с и состоять из нескольких импульсов тока большей амплитуды (рис.2.23.)

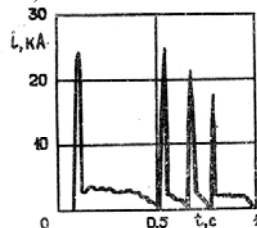


Рис.2.23. Электромагнитный импульс молнии

Разряд молнии над поверхностью суши характеризуется следующими параметрами: максимальный ток в канале разряда молнии  $I_m = 80...200$  кА, время

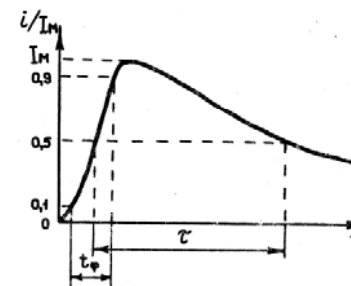


Рис.2.24. Параметры тока разряда молнии

нарастания (от уровня  $0,1I_m$  до уровня  $0,9I_m$ )  $t_\phi = 1$  мкс, длительность импульса (по уровню  $0,5 I_m$ )  $\tau = 50$  мкс, максимальная скорость нарастания тока  $(di/dt)_{max} = 80...100$  кА/мкс. При разрядах молнии над морской поверхностью скорость нарастания тока в 3-10 раз больше, а время нарастания  $t$  уменьшается до 90 нс.

Импульс тока молнии  $i_1$ , при протекании по проводнику (рис. 2.25) сопровождается падением напряжения на нем  $u_1$ , а также наводкой в близлежащих контурах напряжения  $u_2$  и тока  $i_2$ . Наиболее опасным для электрооборудования являются импульсные напряжения при прямом разряде молнии; они обусловлены протеканием тока через (токоведущие жилы кабеля, экранирующие оболочки и т.д.). Напряжение на металлических проводниках имеет преимущественно индуктивный характер. Так, при токе молнии 80 кА и скорости нарастания тока 80 кА/мкс в медном проводе длиной 1 м сечением  $10 \text{ мм}^2$  падение напряжения на омическом сопротивлением будет составлять

$$U_1 = I_m R \ell = 80 \cdot 10^3 \cdot 1,75 \cdot 10^{-3} \cdot 1 = 140 \text{ В},$$

а индуктивное падение напряжения при индуктивности прямого провода  $2 \text{ мГн/м}$  составит

$$U_1 = \ell L (di/dt)_m = 1 \cdot 2 \cdot 10^{-6} \cdot 80 \cdot 10^9 = 160 \text{ кВ}. \quad (2.26)$$

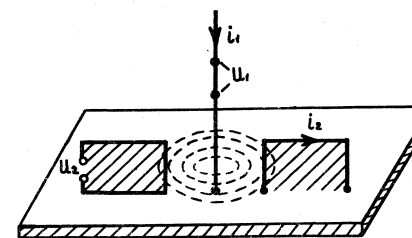


Рис.2.25. Возникновение наведенных молнией напряжений

Индуктированные напряжения вызваны изменением электромагнитного поля канала молнии или проводников, по которым протекает ток прямого разряда молнии. Максимальную величину индуцированного напряжения в витке, расположенном вблизи проводника с протекающим по нему импульсным током, можно определить, зная величину взаимной индуктивности витка и провода с током молнии

$$U_2 = \xi M (di/dt)_M \quad (2.27)$$

Если виток с индуцированным напряжением замкнут, то по нему протекает импульсный ток. Величину тока в короткозамкнутом витке с малым активным сопротивлением (например в витке, образованном экранирующей оболочкой кабеля) можно оценить, зная величину собственной индуктивности витка и величину индуктивности витка и провода с током:

$$I_2 = I_1 M / L \quad (2.28)$$

Форма тока  $i_2$  будет подобна форме тока  $i_1$ . Замкнутый виток может быть образован поверхностью палубы и металлической трубой, в которой проложен кабель. При этом часть тока проникает на внутреннюю поверхность трубы и приводит к появлению между жилами кабеля и трубой импульса напряжения и с амплитудой  $U_3$ , пропорциональной сопротивлению трубы  $R_0$ :

$$U_3 = \kappa R_0 I_2 \quad (2.29)$$

Время нарастания напряжения  $u_3$  на два порядка больше времени нарастания тока  $i_2$ .

### 2.3.2. Импульсные напряжения и токи, наводимые разрядом молнии в контурах на верхней палубе.

На основе уравнений (2.26)-(2.29) получены расчетные зависимости для оценки максимального значения наведенных импульсных напряжений и токов для типичных случаев взаимного расположения проводника с током молнии и чувствительного к наводке контура. Формулы сведены в табл. 2.2 для различных случаев взаимного расположения проводников, там же приведены оценочные данные о взаимной амплитуде наведенных импульсных напряжений и токов для судна в порту (разряд над сушей) и судна в море (разряд над поверхностью моря). Коэффициенты  $K_1$ ,  $K_2$ ,  $K_3$ ,  $K_4$  определяются из рис. 2.26, который позволяет определить коэффициент  $K_1$  (см. рис.2.26,а), связывающий скорость нарастания тока молнии в проводнике сечением  $s$  с падением напряжения на участке проводника длиной  $L$ , по которому протекает ток молнии. Графики рис.2.26,б позволяют определить коэффициент  $K_2$ , связывающий скорость нарастания тока молнии и напряжение, индуцированное в квадратном контуре со стороной  $a$ , удаленном от канала разряда или проводника с током молнии на расстояние  $L$ . Графики рис.2.26,в позволяют определить коэффициент  $K_2$ , связывающий скорость нарастания тока молнии с напряжением, индуцированным в удаленной на расстояние  $L$  от проводника с током молнии двухпроводной линии. Линия длиной  $a$  проложена параллельно проводнику с током молнии, проводники линии удалены друг от друга на расстояние  $b$ . Графики рис.2.26,г позволяют определить коэффициент  $K_2$  для аналогичной линии, расположенной перпендикулярно проводнику с током молнии. Графики рис.2.26,д позволяют определить

коэффициент  $K_3$ , связывающий ток молнии с током, наведенном в замкнутом на корпус судна проводнике радиусом  $r$ , длиной  $a$ , высотой прокладки проводника над корпусом судна  $h$ .

Импульсные напряжения и токи, наводимые разрядом молнии Таблица 2.2 б

Взаимное расположение проводников	График на рис.2.26	Формулы для определения максимальных значений индуцированных напряжений и токов	Размеры цепей для оценки $U_M$ и $I_M$	Индуктированные $U_M$ и $I_M$	
				В порту $(\frac{di}{dt})_M = 80 \frac{kA}{\mu s}$ $I_M = 100 kA$	В море $(\frac{di}{dt})_M = 500 \frac{kA}{\mu s}$ $I_M = 100 kA$
	а	$U_1 = \kappa_1 \left(\frac{di}{dt}\right)_M$	$S = 16 mm^2$ $\ell = 0,1 m$	6,4 кВ	40 кВ
	б	$U_2 = \kappa_2 \left(\frac{di}{dt}\right)_M$	$b = 100 mm$ $a = 1 m$ $\ell = 1 m$	2,4 кВ	15 кВ
	в	$U_2 = \kappa_3 \left(\frac{di}{dt}\right)_M$	$b = 10 mm$ $a = 10 m$ $\ell = 10 m$	80 В	0,5 кВ
	г	$I_2 = \frac{\kappa_4}{a} I_M$	$a = 1 m$ $h = 0,1 m$ $r = 20 mm$ $\ell = 0,5 m$	700 А	700 А
	д	$I_2 = \kappa_5 I_M$	$a = 1 m$ $h = 0,1 m$ $r = 20 mm$ $\ell = 0,5 m$	20 кА	20 кА
	е	$U_2 = \kappa_6 a I_M$ $I_2 = \kappa_7 \kappa_8 I_M$	$b = 1 mm$ $d = 2,54 mm$ $a = 10 m$	1 кВ	1 кВ

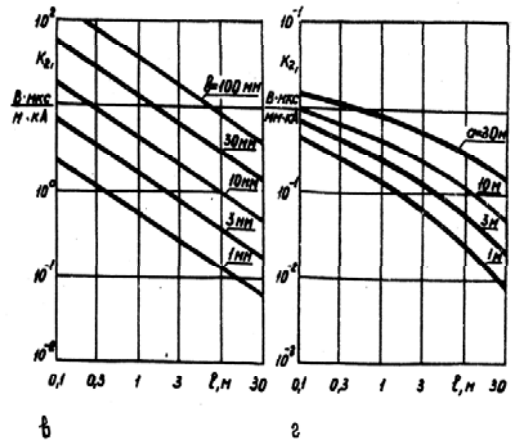
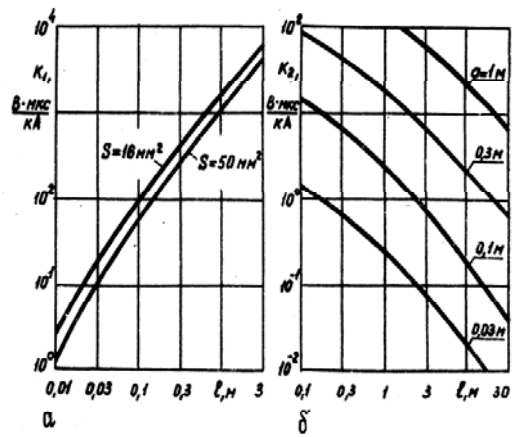
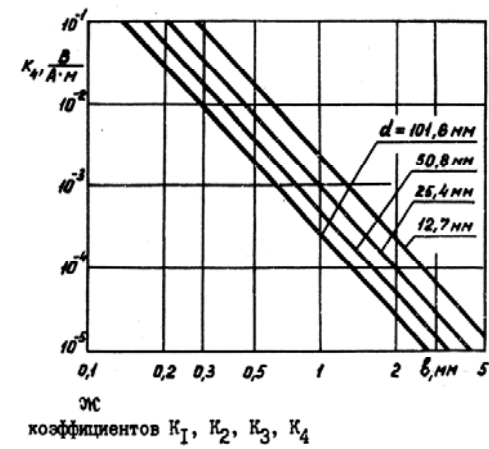
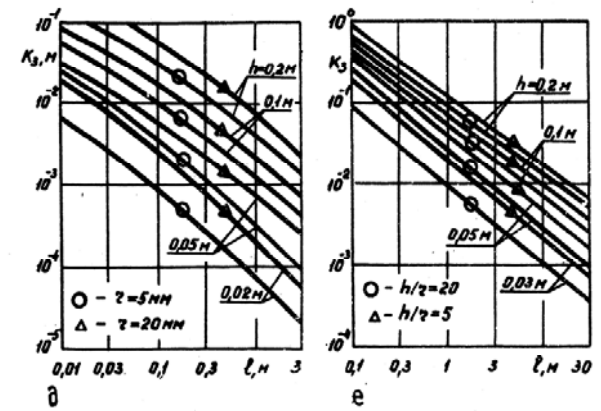


Рис.2.26. Графики для расчета



Проводник с током молнии перпендикулярен участку корпуса, над которым проложен проводник контура и удален от контура на расстояние  $L$ . Графики рис.2.26,е позволяют определить коэффициент  $K_3$  при расположении контура на участке корпуса, параллельном проводнику с током молнии. На рис.2.26,г,д одна из сторон замкнутого контура параллельна проводнику с током молнии. Графики рис.2.26,ж позволяют определить коэффициент  $K_4$ , связывающий ток, протекающий по стальной трубе ( $\delta_c=6 \cdot 10^6$  См/м,  $\mu=50$ ), с напряжением, индуцированным. На жилах кабеля, уложенного в трубу (длина  $a$ , средний диаметр  $d$ , толщина стенок  $v$ ). Труба на концах соединена с корпусом судна. Если ток в трубе наведен близким разрядом молнии, то при расчетах напряжения на жилах кабеля коэффициент  $K_4$  следует умножить на  $K_3$ . Напряжение на жилах кабелей с оплеточными экранами при протекании по ним тока будет определено позднее.

Оценку максимального значения индуцируемого в контуре площадью  $I$  м<sup>2</sup> напряжения  $U$  (В/м<sup>2</sup>) при разрядах молнии, удаленных на значительное расстояние от судна  $L$  (км), можно выполнить по следующей формуле

$$U = 2q/L.$$

Приведенные графики и формулы позволяют оценить амплитуду наведенных при разрядах молнии импульсных напряжений и токов в контурах, расположенных на верхней палубе судна. Полученные пиковые значения напряжений и токов указывают на необходимость полной экранировки кабелей верхней палубы для обеспечения защиты по меньшей мере изоляции электрооборудования судна. Хотя ток от места удара молнии до воды проходит в основном через палубу и борта, часть его может проникать во внутренние помещения судна и наводить в расположенных там контурах напряжения и тока.

### 2.3.3. Токи во внутренних помещениях судна

На рис.2.27 показаны возможные пути проникновения тока из контуров в незэкранированном пространстве во внутренние экранированные помещения судна. Наибольшие напряжения и токи наводит в контурах внутренних помещений кабель, проложенный

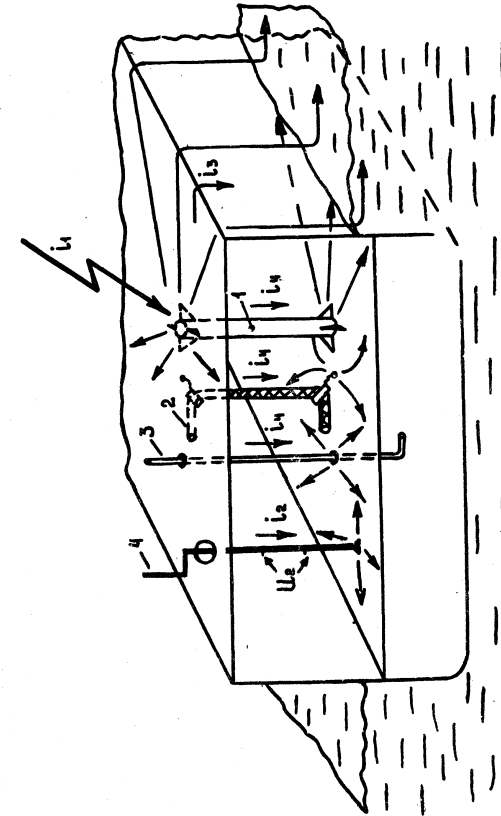


Рис.2.27. Пути проникновения тока разряда молнии во внутренние помещения судна

по верхней палубе без экрана. Проводники такого кабеля при проходе через палубный сальник не соединяются с палубой и поэтому индуцированные ЭВМ токи и напряжения беспрепятственно проникают во внутренние помещения судна. Максимальные значения тока  $i_2$  и напряжения  $u_1$  определяются по приведенной выше методике.

Часть тока  $i_1$  проходит во внутренние помещения через металлоконструкции судна, например, через пиллерсы. Возможно проникновение тока через экран кабелей, причем, как это показано на рис.2.27, кабель может и не выходить на верхнюю палубу, а лишь замыкать ее с первой палубой. Подобную роль выполняют трубопроводы судовых систем. Ток  $i_3$  через борта судна и ток  $i_4$  через соединяющие палубы проводники делятся в первом приближении обратно пропорционально активным и индуктивным сопротивлениям соответствующих токоведущих путей. Ток через металлоконструкции с малым активным сопротивлением в худшем случае при разряде молнии в палубу над замыкающим палубы проводником достигает значения

$$I_3 \approx (0,005 \dots 0,045) I_1 ,$$

а ток через экраны кабелей - значения

$$I_A \approx (1 \dots 20) \cdot 10^{-5} I_1 .$$

Поэтому при оценочных расчетах можно руководствоваться следующими параметрами тока  $I_3$ :

для проводников с малым сопротивлением (пиллерсов, трубопроводов)

$$I_{3M} = 1000 \text{ А} , \quad (di_3/dt)_M = 1000 \text{ А/мкс} ;$$

для проводников с большим сопротивлением (экраны кабелей)

$$I_{3M} = 1 \dots 20 \text{ А} , \quad (di_3/dt)_M = (1 \dots 20) \text{ А/мкс} .$$

Для внутренних помещений надстроек ток  $I_3$  может быть еще больше, так как сопротивление их стенок существенно меньше сопротивления бортов. Воспользовавшись графиками рис. 2.26 и приведенными параметрами тока  $I_3$ , можно оценить пиковые значения импульсных напряжений и токов, наведенных в контурах внутренних помещений судна ЭМИМ. Для неэкранированных контуров пиковое значение напряжения может достигать сотен вольт.

### 3. РАСПРОСТРАНЕНИЕ ИМПУЛЬСНЫХ ПОМЕХ В СУДОВОЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ.

#### 3.1. Распространение импульсных помех по судовой кабельной сети

##### 3.1.1. Однопроводная линия

При возникновении в точке коммутации ИП (скачка напряжения и тока) напряжение в остальных точках СЭС еще остается неизменным. Длительность фронта ИП соизмерима с временем распространения электромагнитных волн по судовым кабелям, что предопределяет необходимость учета волновых процессов в сети и рассмотрения судовых кабелей как длинных линий. От точки коммутации по кабелям движется электромагнитная волна, скорость которой составляет 150-200 м/мкс и определяется числом, взаимным расположением, материалом размерами жил кабеля, их удаленностью от корпуса и материалом изоляции. Распространение ИП в кабельной трассе, может быть сведено к распространению волн по однопроводным линиям (волновым каналам), под которыми понимается пара проводников или проводник над корпусом.

Мгновенные значения волны тока и напряжения в линии связаны через волновое сопротивление  $Z$  по формуле

$$i = \frac{u}{Z} . \quad (3.1)$$

Величина  $Z$  зависит от геометрии линии и материала изоляции, для судовых кабелей она составляет 50-200 Ом. Например, для линии, состоящей из двух проводов диаметром  $d$  на расстоянии  $D$  между их центрами, волновое сопротивление равно

$$Z = \frac{120}{\sqrt{\epsilon}} \operatorname{arctg} \frac{D}{d} .$$

При  $D/d = 1,5$  и  $\epsilon = 3$  (кремнеорганическая резина) волновое сопротивление  $Z = 66$  Ом. Для одного провода диаметром  $d$ , центр которого расположен над корпусом на высоте  $h$  :

$$Z = \frac{60}{\sqrt{\epsilon}} \operatorname{arctg} \frac{2h}{d} .$$

При распространении волны по линии ее энергия частично расходуется в проводнике и корпусе, причем потери для отдельных частотных составляющих волны различны, что приводит к различию в скорости их распространения и к искажению фронта импульсной волны (рис.3.1). Длительность фронта возрастает, а амплитуда ИП уменьшается (рис.3.1 и 3.2). Если длина

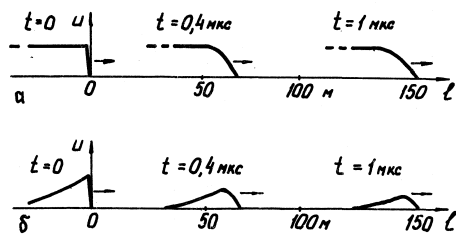


Рис.3.1. Изменение формы импульса напряжения различной длительности (а -  $t_{и} = 1 \text{ мкс}$ ; б -  $t_{и} = 0,1 \text{ мкс}$ ) при распространении по судовому кабелю

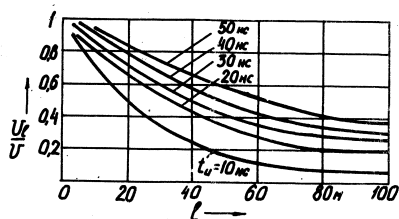


Рис.3.2. Изменение амплитуды импульса напряжения различной длительности при распространении по кабелю с ПВХ изоляцией

кабеля составляет несколько десятков метров, то длительность фронта ИП становится более 0,1 мкс, а амплитуда ИП малой длительности (менее 0,1 мкс) уменьшается в 2 и более раз.

Амплитуда более длительных ИП (свыше 1 мкс) практически не изменяется. При расчетах максимальной амплитуды ИП на удаленном потребителе электроэнергии исходят из наилучшего случая, когда амплитуда ИП при распространении сохраняется, а кабель является линией без потерь. При этом амплитуда ИП будет полностью определяться неоднородностями линии, соотношением сопротивления нагрузки и волнового сопротивления кабеля.

### 3.1.2. Отражение и преломление волн.

При достижении волной точки, в которой волновое сопротивление отличается от сопротивления линии (соединение различных кабелей в распределительном щите, нагрузка), возникает отражение части волны, а часть волны может продолжить распространение в том же направлении. Начальная волна  $u$  обычно называется падающей, в точке перехода она разделяется на отраженную  $u_{отр}$  и преломленную  $u_{пр}$  (рис. 3.3). Образование этих волн в точке перехода определяется законом Кирхгофа и удовлетворяет дифференциальным уравнениям линии пересечения и закону сохранения энергии. Для точки  $L_H$  перехода линии с волновым сопротивлением  $Z_1$  на линию с сопротивлением  $Z_2$  или точки подключения

нагрузки  $R_H = Z_2$  на конце линии справедливо

$$u_H = u + u_{отр}; \quad u_H = i Z_2; \quad (3.2)$$

$$i = \frac{u - u_{отр}}{Z_1}$$

откуда получаем

$$u_{отр} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} u = \alpha_{отр} u; \quad (3.3)$$

$$u_{пр} = u_H = \frac{2Z_2}{Z_2 + Z_1} u = \alpha_{пр} u, \quad (3.4)$$

где  $\alpha_{отр} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1}$  - коэффициент отражения;  $\alpha_{пр} = (1 + \alpha_{отр})$  - коэффициент преломления.

В точке перехода напряжение может в 2 раза превышать амплитуду падающей волны, если волновое сопротивление второй линии  $Z_2$  или нагрузки  $R_H$  много больше волнового сопротивления первой линии. Например, если волна с амплитудой 300 В, распространяясь по кабелю с волновым сопротивлением  $Z=150$  Ом, падает на трансформатор с волновым сопротивлением  $R_H = 10000$  Ом, то напряжение на трансформаторе достигает

$$u_H = u \cdot 2 \cdot R_H / (R_H + Z_1) = 300 \cdot 2 \cdot 10000 / (10000 + 150) = 600 \text{ В}$$

При  $R_H = Z_1$  отраженной волны не возникает, а  $u_H = u$ . При  $R_H < Z_1$  амплитуда напряжения на нагрузке меньше падающей волны.

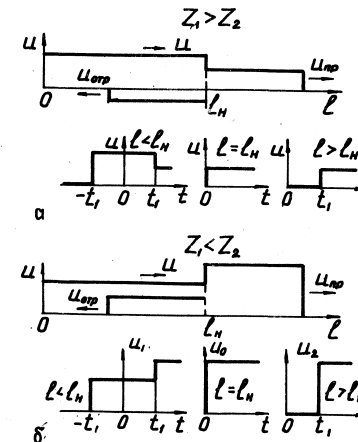


Рис.3.3. Изменение напряжения при падении волны по линии с волновым сопротивлением  $Z_1$  на линию с сопротивлением  $Z_2$  или на нагрузку с сопротивлением  $R_2 = Z_2$ : а -  $Z_1 > Z_2$ ; б -  $Z_1 < Z_2$

Расчет напряжения на произвольной нагрузке  $Z_H$  - включенной в конце линии,

может быть выполнен по схеме на рис.3.4. Для точки на конце линии с учетом (3.2) можно записать:

$$u_H = u + u_{отр} = u + u - Zi \text{ ,}$$

или

$$2u = u_H + Zi \text{ .}$$

Этому выражению соответствует схема замещения на рис. 3.4,б.

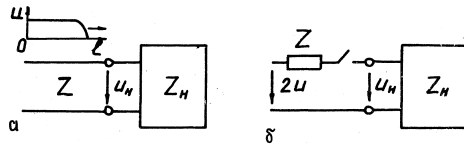


Рис.3.4. Падение волны напряжения на пассивный двухполюсник (а) и схема замещения для расчета напряжения на двухполюснике (б)

т.е. если на узел падает волна напряжения  $u$ , движущаяся по линии с волновым сопротивлением  $Z$ , то напряжение и ток в этом узле будут такими же, как при подключении источника напряжения  $2u$  с внутренним сопротивлением  $Z$  непосредственно к рассматриваемому узлу. Это позволяет определение напряжения на нагрузке в конце линии свести к расчету схемы с сосредоточенными параметрами.

Если на конце линии стоит индуктивность (рис.3.5), то напряжение на индуктивности при падении прямоугольной волны  $U$  изменяется в соответствии с выражением

$$u_H = 2U \exp\left(-\frac{tZ}{L_H}\right) \text{ .} \quad (3.5)$$

В начальный момент ток, проходящий через индуктивность, равен нулю и линия ведет себя подобно разомкнутой на конце, амплитуда напряжения в два раза превосходит амплитуду падающей волны. Затем индуктивность начинает постепенно пропускать ток и в установившемся режиме ведет себя как короткое замыкание. При ненулевой длительности фронта падающей волны амплитуда напряжения снижается.

Если на конце линии стоит конденсатор (см .рис 3.5), то напряжение на ней изменяется в соответствии с выражением

$$u_H = 2U \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{C_H Z}\right)\right] \text{ .} \quad (3.6)$$

В начальный момент времени напряжение на емкости равно нулю. Затем по мере заряда конденсатора напряжение возрастает до  $2U$  и в установившемся режиме конденсатор эквивалентен разомкнутой линии.

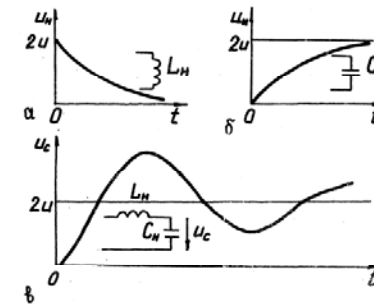


Рис.3.5. Изменение напряжения при падении волны на индуктивность (а), емкость (б) и LC-фильтр (в)

Если на конце линии стоит LC фильтр (см. рис. 3.5), то напряжение на конденсаторе фильтра при падении на фильтр прямоугольной волны  $U$  и при условии  $Z < 2\sqrt{L_H/C_H}$  изменится в соответствии с выражением

$$u_c = 2U \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right)\right] \left(\cos \omega_0 t + \frac{1}{\omega_0 \tau} \sin \omega_0 t\right) \text{ ,} \quad (3.7)$$

где

$$\tau = \frac{2L_H}{Z} \text{ ;} \quad \omega_0 = \sqrt{\frac{1}{L_H C_H} - \frac{Z^2}{4L_H^2}} \text{ .}$$

Амплитуда напряжения на конденсаторе при  $\omega_0 \gg 1/\tau$  может приближаться к четырем амплитудам падающей волны. Длительность фронта напряжения  $\Delta t$  определяется резонансной частотой фильтра  $\omega_0$ :  $t_{\phi} = \pi/\omega_0$ . Например, если по кабелю с волновым сопротивлением  $Z=150$  Ом на фильтр  $L_H=1$  мГн,  $C_H=1000$  пф падает волна с амплитудой  $U=300$  В, то

$$\tau = \frac{2 \cdot 10^{-9}}{150} \approx 13 \text{ мкс} \text{ ;} \quad \omega_0 = \sqrt{\frac{1}{10^{-9} \cdot 10^{-9}} - \frac{150^2}{4 \cdot 10^{-6}}} \approx 40^6 \frac{\text{рад}}{\text{с}} \text{ ;}$$

$$t_{\phi} = \frac{\pi}{40^6} \approx 3 \text{ нс} \text{ ;} \quad u_c(t_{\phi}) \approx 3,57 U = 1070 \text{ В} \text{ .}$$

### 3.1.3. Многократные отражения волн

При наличии нескольких узлов в линии возникают отраженные и преломленные волны при каждом прохождении через узлы падающих и отраженных от других узлов волн. Напряжение в заданной точке линии находится суммированием всех проходящих через точку волн. На рис.3.6 приведена схема линии

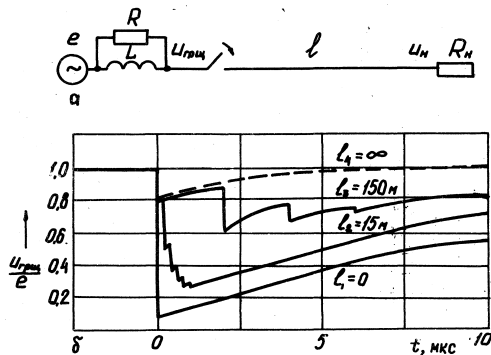


Рис.3.6. Схема замещения для расчета ИП методом распространяющихся волн (а) и изменение напряжения на шинах ГРЩ при включении нагрузки через кабель различной длины (б)

с двумя узлами: точкой соединения ГРЩ с кабелем и точкой окончания линии с включенным сопротивлением нагрузки  $R_n$ . Время двойного пробега электромагнитной волны по кабелю равно  $t_l = 2L/U$  (где  $L$  - длина кабеля;  $U$  - скорость распространения волны).

При замыкании контактов выключателя по кабелю в сторону нагрузки начинается распространяться волна напряжения:  $u = e \left[ 1 - \frac{k}{R+Z} \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \right]$ , при  $\tau = L(R+Z)/RZ$ .

Достигнув нагрузки, волна напряжения отразится от нее в соответствии с (3.3) с коэффициентом

$$\alpha_n = \frac{R_n - Z}{R_n + Z}$$

и будет распространяться в противоположном направлении. Через время  $t_l$  волна дойдет до ГРЩ и вновь отразится с коэффициентом

$$\alpha_c = \frac{p\alpha_c' - \frac{1}{\tau}}{p + \frac{1}{\tau}}; \quad \alpha_c' = \frac{R-Z}{R+Z}$$

Отраженная от шин ГРЩ волна аналогично дойдет и отразится от нагрузки и вновь возвратится к ГРЩ. Суммируя волны, можно рассчитать на ЦВМ изменение мгновенного значения напряжения на шинах ГЩ при включении нагрузки  $R_n$  через кабель различной длины. На рис.3.6 приведены результаты расчета ИП на ЦВМ при различных длинах кабеля. Наличие кабеля между ГРЩ и включаемой нагрузкой уменьшает амплитуду ИП и увеличивает длительность фронта. При возрастании длины фидера от 0 до  $\infty$  амплитуда уменьшается. Длительность фронта на уровне 0,9 может быть оценена по формуле

$$t_{\varphi} = -\frac{t_l}{\lg|\alpha_c' \alpha_n|} \quad (3.8)$$

Заметим, что длительность фронта увеличивается при увеличении длины кабеля  $t_l$  и при приближении  $\lambda_c \lambda_n$  к 1, что имеет место при уменьшении сопротивлений  $R_n$

и  $R$ . Кабель в этом случае влияет так же, как индуктивность, включенная последовательно с нагрузкой. Если  $R_n = Z$ , то кабель не оказывает влияния на процесс возникновения ИП. При  $R_n > Z$  кабель приводит к возникновению высокочастотных колебаний с периодом, равным четырем пробегам электромагнитной волны по кабелю, а величина амплитуды ИП будет определяться как.

Амплитуда ИП при этом много меньше мгновенного значения в вследствие того, что  $Z \gg R$ , т.е. последний случай не представляет интереса при анализе ЭМС. Если в сеть 380 В с параметрами  $L=20$  мкГн,  $R=20$  Ом включается нагрузка сопротивлением  $R_n=48$  Ом (нагреватель мощностью 6 кВт) через кабель длиной 15 м с волновым сопротивлением  $Z=150$  Ом, то коэффициенты отражения равны:

$$\alpha_c' = \frac{20-150}{20+150} = -0,76; \quad \alpha_n = \frac{48-150}{48+150} = -0,52$$

время двойного пробега волны по кабелю со скоростью  $U=150 \cdot 10^6$  м/с

$$t_l = \frac{2L}{U} = \frac{2 \cdot 15}{150 \cdot 10^6} = 0,2 \text{ мкс},$$

и длительность фронта определяется в соответствии с (3.8):

$$t_{\varphi} = -\frac{0,2}{\lg|0,76 \cdot 0,52|} = 0,5 \text{ мкс}$$

Аналогично можно определить изменение напряжения на удаленной нагрузке, если известно изменение напряжения на шинах ГРЩ.

### 3.1.4. Трехпроводная линия

Распространение ИП по симметричной трехпроводной линии (трехжильному кабелю) можно свести к распространению волны по несимметричному и симметричному каналам (однопроводным расчетным схемам) с соответствующими скоростями распространения и волновыми сопротивлениями  $Z_{несим}$  и  $Z_{сим}$ . При этом несимметричные и симметричные составляющие волны распространяются независимо, а отражения и преломления составляющих на неоднородностях линии и нагрузках можно рассматривать не зависимо. Несимметричная составляющая состоит из одинаковых волн на всех жилах и может быть определена как среднее арифметическое мгновенных значений напряжения на жилах:

$$u_{несим} = \frac{u_A + u_B + u_C}{3} \quad (3.9)$$

Распространение этой составляющей эквивалентно распространению волны по одному проводу над металлической поверхностью со скоростью

$$v_{несим} = \frac{1}{\sqrt{(L_{ж} + 2M)(C_{ж} + 2C_{жж})}}$$

при волновом сопротивлении

$$Z_{несим} = \sqrt{\frac{L_{ж} + 2M}{C_{ж} + 2C_{жж}}}$$

Симметричная составляющая состоит из волн, сумма которых на трех жилах равна нулю и которые могут быть определены как разность напряжений на жилах и несимметричной составляющей:

$$u_{сим, A} = u_A - u_{несим}; \quad u_{сим, B} = u_B - u_{несим}; \quad u_{сим, C} = u_C - u_{несим} \quad (3.10)$$

Распространение этой составляющей эквивалентно распространению волны по каналам жила - жила со скоростью



$$V_{\text{сим}} = \frac{1}{\sqrt{(C_{\text{жж}} - C_{\text{жк}})(L_{\text{ж}} - M)}}$$

при волновом сопротивлении

$$Z_{\text{сим}} = \sqrt{\frac{L_{\text{ж}} - M}{C_{\text{жж}} - C_{\text{жк}}}}$$

где  $L_{\text{ж}}$ ,  $C_{\text{ж}}$  погонные индуктивность и емкость жилы кабеля относительно корпуса;  $M$ ,  $C_{\text{жж}}$  - погонные взаимная индуктивность и междужилная емкость пары жил кабеля.

Если трехфазная нагрузка линии симметрична, а также равны сопротивления между каждой фазой и корпусом, то каналы распространения независимы и отражения в узлах одной составляющей не изменяют другой составляющей. Поэтому каждая составляющая может быть рассчитана отдельно путем суммирования отраженных и преломленных волн соответственно в цепях фаза - фаза и фаза - корпус. Напряжение на жилах кабеля находят суммированием симметричной и несимметричной составляющих.

При наличии в отдельных точках линии неравных сопротивлений между различными фазами или между фазами и корпусом канала распространения оказываются связанными и в этих точках возможен переход одной составляющей в другую. В этом случае приходится использовать полную трехпроводную схему и составлять систему уравнений для каждой точки с нарушением симметрии.

### 3.2. Распространение импульсных помех из сети через вторичные источники питания

Импульсные помехи достигают чувствительных к ним компонентов преимущественно по цепям питания. Поэтому важно знать, какое влияние на импульсные помехи оказывает вторичные источники питания (ВИП), связывающие СЭЭС с шинами питания электронных схем. Рассмотрим особенности распространения импульсных помех через компоненты ВИП: сетевой фильтр, трансформатор, полупроводниковые приборы.

#### 3.2.1. Распространение импульсных помех через сетевые фильтры ВИП.

В сетевых ВИП наибольшее применение нашли емкостные и индуктивно-емкостные фильтры. Емкостные фильтры построены с использованием проходных конденсаторов типа К75П-4, КПБ и др. Эти конденсаторы отличаются от обычных малой собственной индуктивностью (18-36 нГн) и наличие выводов большого сечения для пропускания тока цепей питания. На параметры импульсных помех при прохождении их через фильтры могут оказывать влияние собственная индуктивность конденсатора, индуктивность соединительных проводов и сопротивление источника импульсной помехи (рис.3.7,а). Для коротких импульсов последнее можно принять равным волновому сопротивлению сетевого кабеля. Так как в реальных сетевых фильтрах всегда выполняется условие  $C > 4/R_2$ , переходные процессы имеют аperiodический характер. При этом сопротивление источника совместно с индуктивностью образует дифференцирующую цепочку, а совместно с конденсатором - интегрирующую цепочку. Поэтому напряжение  $u_2$  на выходе фильтра будет иметь две составляющих: кратковременный выброс большой амплитуды и длинный импульс меньшей амплитуды, как это показано на рис. 3.7, б. Индуктивная составляющая может доминировать, поэтому учет ее обязателен. Индуктивность вывода из прямого провода круглого сечения зависит от его диаметра и длины (рис.3.8).

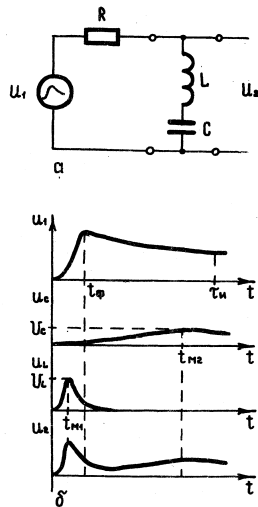


Рис.3.7. Эквивалентная схема цепей емкостного фильтра (а) и временные диаграммы импульсных напряжений на элементах цепи (б)

На рис. 3.9 приведены кривые, с помощью которых можно оценить изменение амплитуды и временных параметров экспоненциального импульса при прохождении его через емкостной фильтр с параметрами.

$$\beta_1 = RC/\tau_n; \quad \beta_2 = (L/R)t_{\phi}$$

Пример. К кабелю СЭЭС с волновым сопротивлением 200 Ом подключен помеходавляющий конденсатор емкостью 0,47 мкф с помощью проводника диаметром 2,5 мм и длиной 100 мм. Импульсная помеха в СЭЭС представляет собой одиночный экспоненциальный импульс с параметрами  $U_{M1}$  в 1000 В,  $t_{\phi} = 10$  нс,  $\tau_n = 1$  мкс. Оценить основные параметры импульса на выходе фильтра.

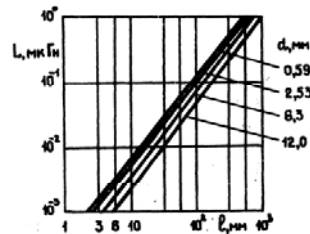


Рис.3.8. Индуктивность прямого провода круглого сечения

Из рис.3.8 определяем индуктивность соединительного провода  $L=90$  нГн. В полную индуктивность фильтра будет входить и собственная индуктивность конденсатора, которую принимаем равной 20 нГн. Тогда суммарная индуктивность со ставит 20 нГн, Определяем  $\beta_1$  и  $\beta_2$

$$\beta_1 = \frac{200 \cdot 0,47 \cdot 10^{-6}}{10^{-8}} = 95; \quad \beta_2 = \frac{110 \cdot 10^{-4}}{200 \cdot 10^{-9}} = 0,055$$

Из рис.3.9 определяем основные параметры импульса на выходе фильтра:

$$\frac{U_C}{U_1} = 10^{-2}; \quad U_C = 1000 \cdot 10^{-2} = 10 \text{ В}; \quad \frac{U_L}{U_1} = 3,5 \cdot 10^{-2};$$

$$U_L = 1000 \cdot 3,5 \cdot 10^{-2} = 35 \text{ В}; \quad \frac{t_{M2}}{t_{\phi}} = 4,4; \quad t_{M2} = 4,4 \cdot 10^{-8} \text{ с};$$

$$\frac{t_{M1}}{t_{\phi}} = 1,3 \cdot 10^{-1}; \quad t_{M1} = 1,3 \cdot 10^{-1} \cdot 10 \cdot 10^{-9} = 1,3 \cdot 10^{-9} \text{ с}.$$

Таким образом, импульсная помеха на выходе фильтра будет состоять из всплеска амплитудой 35 В, нарастающего за 1,2 нс и сравнительно пологого импульса с временем нарастания 4,4 мкс и амплитудой 10 В.

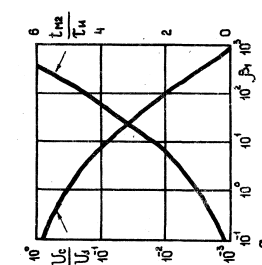
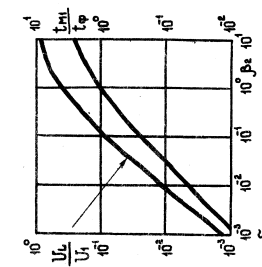


Рис.3.9. Графики для оценки изменения амплитуды и временных параметров экспоненциального импульса при прохождении его через емкостной фильтр: а - емкостная составляющая напряжения; б - индуктивная составляющая напряжения

Схема замещения для расчета параметров импульсных помех при распространении через LC -фильтр показана на рис. 3.10, а.

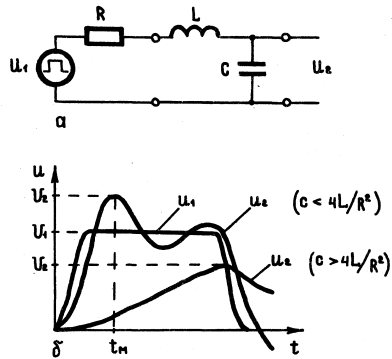


Рис.3.10. Эквивалентная схема цепей LC-фильтра (а) и временные диаграммы импульсных напряжений на элементах цепей (б)

В зависимости от соотношения параметров элементов схемы напряжение  $u_2$  может изменяться по аperiodическому закону, если  $C > 4L/R^2$ , или по колебательному закону, если  $C < 4L/R^2$ . Кривые выходного напряжения фильтра показаны на рис.3.10,б. Напряжение  $u_2$  в колебательном режиме может быть больше напряжения  $u_1$ . Время достижения напряжением  $u_2$  максимума  $t_m$  в большинстве случаев превышает время нарастания напряжения  $u_1$ .

Оценочные расчеты проведем для импульса длительностью  $t_n$  с бесконечно малым временем нарастания. Параметры элементов LC-фильтра для расчета удобно записать в следующей форме:

$$a = \frac{R}{2L}; \quad b = \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}}, \quad (C < 4L/R^2);$$

$$b = \sqrt{\frac{200^2}{4(9 \cdot 10^{-3})^2} - \frac{1}{9 \cdot 10^{-5} \cdot 10^{-6}}} = 3,514 \cdot 10^3;$$

$$\frac{a}{b} = \frac{11,1 \cdot 10^3}{3,514 \cdot 10^3} = 3,16;$$

$$a \tau_n = 11,1 \cdot 10^3 \cdot 10^{-6} = 11,1 \cdot 10^{-3} \approx 10^{-2}.$$

Из рис.3.11,б  $U_2/U_1 \approx 5 \cdot 10^{-5}$ ;  $U_2 = 1500 \cdot 5 \cdot 10^{-5} = 0,075$  В.  
Фильтр эффективно подавляет импульсные помехи.

### 3.2.2. Распространение импульсных помех из сети через трансформаторы ВИП.

В трансформаторах возможны два пути проникновения импульсных напряжений: через магнитную связь между обмотками (для симметричных помех); через межобмоточную емкость (для несимметричных помех).

В СЭЭС имеют место импульсные помехи как с симметричной, так и с несимметричной составляющими, что определяет необходимость учета обоих путей проникновения импульсных помех.

Механизм прохождения несимметричной составляющей импульсных помех может быть пояснен схемой замещения, показанной на рис.3.12,а. Импульс напряжения между фазой и корпусом судна проходит через межобмоточную емкость  $C_{12}$ , уменьшаясь по амплитуде из-за наличия емкости  $C_2$ , которая определяется в основном емкостью обмотки трансформатора относительно корпуса. Пиковое значение напряжения на емкости можно определить по формуле

$$U_2 = U_1 \cdot C_{12} / (C_{12} + C_2)$$

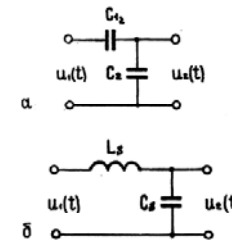


Рис.3.12. Схемы замещения трансформатора для расчета несимметричной (а) и симметричной (б) составляющих импульсных помех

Видно, что оно не зависит от коэффициента трансформации обмоток.

Для оценки прохождения симметричной составляющей импульсных помех через трансформатор воспользуемся схемой замещения (см.рис.3.12,б). В этой схеме  $L_s$  - индуктивность рассеяния,  $C_s$  - емкость обмотки. Согласно схеме замещения трансформатор выполняет роль LC-фильтра для симметричных импульсных помех. Поэтому для оценки параметров импульсных помех, прошедших через трансформатор, пригодны методы, описанные в предыдущем параграфе для LC-фильтров.

В технической документации на трансформаторы ВИП отсутствуют данные о величинах  $C_{12}, C_2, L_s, C_s$ .

Для экспериментального определения  $C_{12}, C_2$  выводы первичной и вторичной обмоток трансформатора соединяются так, как это показано на рис.3.13,а, и подключаются к генератору импульсов прямоугольной формы, осциллографу и магазину емкостей  $C_n$ . Осциллограф должен иметь высокое входное сопротивление, минимальную входную емкость. Для определения  $L_s$  и  $C_s$  можно воспользоваться схемой, приведенной на рис.3.13,б. Для устранения влияния естественной асимметрии соединительных проводников используется осциллограф с дифференциальным входом.

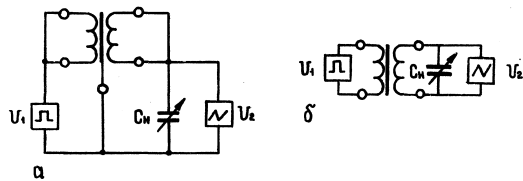


Рис.3.13. Схемы включения приборов для определения параметров трансформатора:  $C_{12}$  и  $C_2$  (а) и  $L$  и  $C$  (б)

Производятся два опыта: при  $C_n = 0$  и  $C_n$ , соизмеримой с  $C_2$ . Из осциллограммы импульсов напряжения (рис.3.14,а) определяют соответствующие величине  $C_n$  напряжения  $U_{22}$  и  $U_{21}$ . Искомые емкости определяются по формулам:

$$C_{12} = C_n \frac{U_{21} U_{22}}{U_1 (U_{21} - U_{22})}; \quad C_2 = C_n \frac{U_{22} (U_1 - U_{21})}{U_1 (U_{21} - U_{22})} - C_{вх},$$

где  $C_{вх}$  - емкость входных цепей осциллографа.

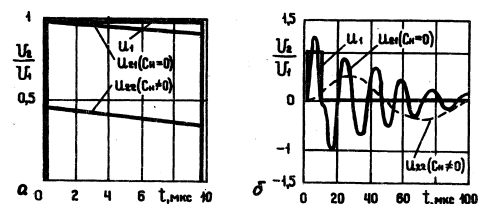


Рис.3.14. Характерные осциллограммы, получаемые при измерении параметров трансформатора  $C_{12}$ ,  $C_2$  (а) и  $L$ ,  $C$  (б)

Параметры  $L_s$  и  $C_s$ , необходимые для расчета импульсных напряжений, распространяющихся по симметричному пути, можно вычислить по осциллограммам (см.рис.3.14), полученным в опыте по рис.3.13. Если круговая частота колебаний равна  $\omega_1$  и  $\omega_2$  соответственно при  $C_n = 0$  и при  $C_n \approx C_s$  (т.е. для  $\omega_2 \approx \omega_1/2$ ), то параметры  $L_s$  и  $C_s$  вычисляются по формулам:

$$C_s = \frac{C_n}{\frac{\omega_2^2}{\omega_1^2} - 1}; \quad L_s = \frac{1}{\omega_1^2 \cdot C_s}$$

Унифицированные трансформаторы для питания радиоэлектронных устройств с рабочей частотой 50 Гц имеют следующие пределы значений параметров  $C_{12}$  и  $C_2$ :

- ТПП118...272  $C_2=80...300$  пФ,  $C_{12} = 50... 420$  пФ;
- ТА54...126  $C_2=50...200$  пФ,  $C_{12} = 200...400$  пФ;
- ТАН72...118  $C_2=20...50$  пФ,  $C_{12} = 700... 1000$  пФ.

Значения  $L_s$  и  $C_s$  существенно зависят от коэффициента трансформации и для высоковольтных обмоток на 200-350 В могут достигать значений  $L_s = 0,01...0,1$  Гн при  $C_s = 1$  нФ. Для низковольтных обмоток  $L_s \approx 10^{-6}$  Гн,  $C_s = 100$  пФ. В последнем

случае амплитуда импульса на вторичной обмотке оказывается больше, чем получается при умножении амплитуды входного импульса на коэффициент трансформации.

Для трансформаторов больших размеров и для малогабаритных трансформаторов при длительности входного импульса менее 1 мкс схемы замещения с сосредоточенными параметрами не пригодны. В этом случае становятся существенными резонансы на высших гармониках, обусловленные волновым характером распространения ИИН в обмотках трансформатора, поэтому необходимо прибегать к использованию сложных схем замещения с распределенными параметрами.

### 3.2.3. Импульсные помехи на шинах питания электронных устройств.

Основным фактором, приводящим к появлению импульсных помех на шинах питания электронных устройств, является емкостная асимметрия элементов устройств на корпус. Главным образом это емкостная асимметрия шин питания. На рис.3.15 приведена схема замещения, иллюстрирующая

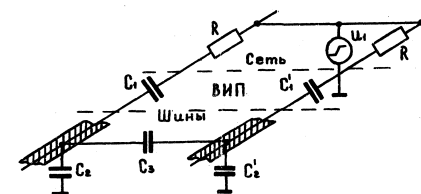


Рис.3.15. Схема замещения цепей ВИП для импульсных помех

механизм возникновения импульсных помех между шинами питания электронных устройств при воздействии на ВИП симметричных импульсных помех из сети. Конденсаторы  $C_1$  и  $C_1'$  эквивалентны проходной емкости ВИП (трансформаторы, вентили и т.п.),  $C_2$  и  $C_2'$  - емкость шин питания на корпус;  $C_3$  -емкость помехоподавляющего конденсатора между шинами питания;  $R_3$  -сопротивление источника помех (может быть приравнено волновому сопротивлению сетевого кабеля). Конденсаторы  $C_1$  и  $C_2$  образует для несимметричных импульсных помех емкостной делитель напряжения.

Величина симметричных импульсных помех (между шинами питания) будет зависеть от того, насколько различаются постоянные времени заряда конденсаторов  $C_2$  и  $C_2'$ . При  $C_3 = 0$ ;  $\beta_1 = RC_1 C_2 / (C_1 + C_2)$ ;  $\tau_{п1}$ ;  $\beta_2 = RC_1' C_2' / (C_1' + C_2')$ ;  $\tau_{п2}$  пиковое значение напряжения помех между шинами питания можно определить по графикам рис.3.16. Так как в реальных схемах обычно выполняемо условие  $C_1 > C_2$ , оценку можно производить, приняв  $\beta_1 = RC_2 / \tau_{п1}$ ;  $\beta_2 = RC_2' / \tau_{п2}$ . Емкость шин питания и проводного монтажа можно определить по формулам табл.3.1.

Если в цепях питания электронных устройств используются помехоподавляющие конденсаторы, то в большинстве случаев выполняемо соотношение  $C_1 > C_3 > C_2$ . Считая, что наилучшая ситуация возникает при выполнении условия  $C_2 \gg C_2'$ , т.е. при  $C_2 \approx 0$  можно определить пиковое значение напряжения импульсных помех на шинах питания по упрощенной формуле

$$U_2 = U_1 \frac{C_2}{C_3}$$

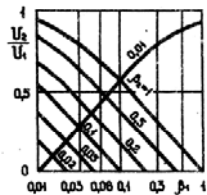


Рис. 3.16. Графики для определения амплитуды напряжения импульсных помех на выходе ВМП

Пример. Разводка питания печатной платы выполнена шиной шириной 10 мм, суммарной длиной 700 мм (общий провод) и шиной шириной 5 мм, суммарной длиной 1500 мм (плюсовой провод). Проводники печатной платы удалены от корпуса прибора на расстояние 5 мм. Соединение платы с ВИЛ выполнено проводником диаметром жилы 2 мм, проложенным на расстоянии 5 мм от корпуса прибора. Длина проводника 1 м. Общий провод набран из трех параллельных проводников, плюсовой провод – из одного. Сопротивление источника импульсных помех принять равным волновому сопротивлению сети 200 Ом. Длительность импульса помехи 1 мкс, максимальное значение напряжения 1000 В.

Таблица 3.1  
Формулы для расчета емкости шин питания и проводного монтажа ВМП

Номер п/п	Расположение проводников	C, пФ/м
1		$2\pi \frac{\epsilon \epsilon_0}{\ln \frac{2h}{d}}$
2		$2\pi \frac{\epsilon \epsilon_0}{\ln \frac{4h}{d}}$
3		$17,7 \cdot 10^{-12} \epsilon \left[ \frac{2b}{h} + \frac{1}{\pi} \left( 1 + \ln \left( 1 + \frac{2nb}{h} \right) \right) \right]$
4		$2\pi \frac{\epsilon \epsilon_0}{\ln \frac{4h}{d}}$

Емкость общего провода составляет:

$$C_1 = \frac{2\pi \cdot 8,86 \cdot 10^{-12} \cdot 3}{\ln \frac{4,5}{2}} + 17,7 \cdot 10^{-12} \left[ \frac{2 \cdot 10}{5} + \frac{1}{\pi} \left[ 1 + \ln \left( 1 + \frac{2\pi \cdot 10}{5} \right) \right] \right] \times$$

$$\times 0,7 = 156,4 \text{ пФ};$$

$$C_2 = \frac{2\pi \cdot 8,86 \cdot 10^{-12} \cdot 1}{\ln \frac{4,5}{2}} + 17,7 \cdot 10^{-12} \left[ \frac{2 \cdot 5}{5} + \frac{1}{\pi} \left[ 1 + \ln \left( 1 + \frac{2\pi \cdot 5}{5} \right) \right] \right] \times$$

$$\times 1,5 = 49,6 \text{ пФ};$$

$$\beta_1 = 200 \cdot 156,4 \cdot 10^{-12} / 10^{-6} = 0,0273;$$

$$\beta_2 = 200 \cdot 49,6 \cdot 10^{-12} / 10^{-6} = 0,01.$$

По рис. 3.16 определяем  $U_2/U_1 \approx 0,3$ , т.е.  $U_2 = 1000 \cdot 0,3 = 300 \text{ В}$ .

Если цепи питания зашунтированы на печатной плате конденсаторами суммарной емкостью 0,1 мкф, то, приняв емкость плюсовой цепи на корпус равной нулю, определим максимально возможную величину симметричной импульсной помехи на шинах питания:

$$U_2 = 1000 \cdot 136,4 \cdot 10^{-12} / 0,1 \cdot 10^{-6} = 1,364 \text{ В}.$$

### 3.3. Импульсные помехи, наведенные в информационных кабелях

Из-за дефицита места на судах для размещения оборудования и кабельных коммуникаций информационные кабели нередко прокладывают совместно с силовыми. Поэтому при возникновении в силовых кабелях импульсных помех они наводятся и в цепях информационных кабелей. Наиболее чувствительнее к помехам электрооборудование имеет информационные связи, выполненные экранированным кабелем, причем для судовых условий характерно применение проволочных экранов кабелей. Широко применяются на судах и неэкранированные информационные кабели для передачи сигналов релейной автоматики, информации на световые табло и т.п. При оценке характеристик наведенных импульсных помех необходимо различать кабели внутриотсечной прокладки и магистральные кабели. Внутриотсечные кабели являются основной группой, в которой сосредоточены наиболее чувствительные к помехам межблочные связи электрооборудования. Электрическую длину этих кабелей можно считать малой, поэтому при расчетах кабели и электромагнитные связи между ними можно эквивалентировать схемой с сосредоточенными параметрами. Магистральные кабели являются электрически длинными, поэтому при расчетах кабели и электромагнитные связи между ними следует эквивалентировать схемой с распределенными параметрами.

#### 3.3.1. Импульсные помехи, наведенные в электрически коротких неэкранированных информационных кабелях.

Электрически короткие кабели эквивалентируются схемой замещения с сосредоточенными параметрами, показанной на рис. 3.17. Цепь силового кабеля замещается индуктивностью жилы  $L_1$ , суммарной емкостью жилы и нагрузки на корпус и суммарным сопротивлением источника помехи и жилы кабеля  $C_1$ .

Цепи информационного кабеля замещаются индуктивностью жилы  $R_1$ , собственной емкостью жилы на корпус  $C_2$ , активным сопротивлением нагрузки по отношению к корпусу  $R_2/2$  и емкостями цепей нагрузки по отношению к корпусу  $C_{н1}$  и  $C_{н2}$ . Электромагнитные связи между цепями кабелей эквивалентируются взаимной емкостью  $C_{12}$  и взаимной индуктивностью  $M_{12}$  участка совместной прокладки силового и информационного кабелей.

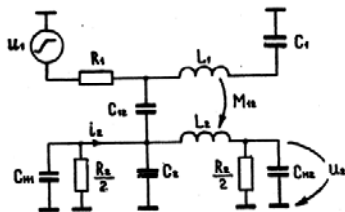


Рис. 3.17. Схема замещения кабелей для расчетов наведенных импульсных помех

При расчете наведенных импульсных напряжений влияние индуктивности  $L_2$  на их амплитуду мало, поэтому индуктивность  $L_2$  можно исключить из схемы замещения, полагая, что токи через нее малы. Для судовых условий характерно использование информационных цепей, не связанных с корпусом судна, поэтому

сопротивлением  $R_2$  будет являться сопротивление изоляции цепей. Кроме того, переходные процессы с максимальным значением напряжения протекают за время нарастания переднего фронта импульсной помехи, что позволяет считать характер протекания процессов в цепи силового кабеля за время  $t_{\phi}$  зависящим в основном от величин  $R_1$  и  $L_1$ .

С учетом указанных упрощений схемы замещения амплитуду емкостной составляющей наведенной помехи можно определить по формуле

$$U_{2c} = U_1 \frac{C_{12} R_2}{t_m} (1 - \exp(-t_{\phi} / (C_{12} + C_{н1} + C_{н2} + C_2) R_2)),$$

а амплитуду магнитной составляющей наведенной помехи - по формуле

$$U_{2M} = U_1 \frac{M_{12}}{2 t_{\phi} R_1} (1 - \exp(-t_{\phi} / L_1)),$$

где  $t_{\phi}$  - длительность переднего фронта импульсной помехи  $u_1$ . В общем случае в цепи информационного кабеля возникают как емкостная, так и индуктивная наведенные помехи. При этом емкостная наводка изменяет потенциал всей цепи, а индуктивная создает разность потенциалов между концами жилы кабеля. Для оценочных расчетов примем, что в худшем случае обе составляющие наведенной импульсной помехи суммируются, т.е.

$$U_2 = U_{2c} + U_{2M}.$$

При оценке величины импульсного тока, наводимого в цепях информационного кабеля (например, в экранирующей оболочке), можно пренебречь влиянием емкостной составляющей электромагнитной связи между кабелями  $C_{12}$ . Кроме того, сопротивление заземляющих перемычек экрана мало и эффективно шунтирует емкости цепи информационного кабеля  $C_2$  и  $C_{н1}$  поэтому ими можно также пренебречь. Таким образом, цепь экранирующей оболочки эквивалентируется при расчете тока суммарной индуктивностью  $L_2$  и активным сопротивлением  $R_2$ . Если сопротивление  $R_2$  мало, то форма тока  $i_2$  будет повторять форму тока  $i_1$ . Амплитуду тока, наведенного в цепи экранирующей оболочки информационного кабеля, можно определить по формуле

$$I_2 = U_1 \frac{M_{12}}{L_2 R_1 R_2} \left\{ 1 + \frac{[\alpha_1 \exp(-\alpha_2 t_{\phi}) - \alpha_2 \exp(-\alpha_1 t_{\phi})]}{(\alpha_1 - \alpha_2)} \right\},$$

где  $\alpha_1 = R_1 / L_1$ ;  $\alpha_2 = R_2 / L_2$ ;  $\alpha_1 > \alpha_2$ .

Входящие в формулу значения собственной емкости и индуктивности проводников, проложенных параллельно металлическому корпусу, можно определить по следующим формулам;

$$C = 2\pi \epsilon_0 \epsilon_r \frac{L}{\ln \frac{4h}{d}}; \quad L = \frac{\mu_0 \mu_r}{2\pi} L \cdot \ln \frac{4h}{d},$$

где  $d$  - диаметр проводника;  $h$  - расстояние от оси проводника до корпуса судна;  $L$  - длина проводника;  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Ом с/м;  $\epsilon_0 = 8,86 \cdot 10^{-12}$  Кл/В м.

Величины взаимной емкости и взаимной индуктивности между проводниками силового и информационного кабелей определяются следующим образом:

$$C_{12} = \frac{\epsilon \cdot 2\pi \cdot \epsilon \cdot \epsilon_0 \cdot \ln \frac{b_1}{b_2}}{\ln \frac{4h_1}{d_1} \cdot \ln \frac{4h_2}{d_2} - \ln^2 \frac{b_1}{b_2}} ;$$

$$M_{12} = \frac{\mu \mu_0 \epsilon \cdot L_{12}}{2\pi} \left[ \ln \frac{2L_{12}}{b} - 1 \right] ,$$

где  $L_{12}$  -длина участка совместной прокладки силового и информационного кабелей, а, остальные параметры цепей соответствуют рис.3.18.

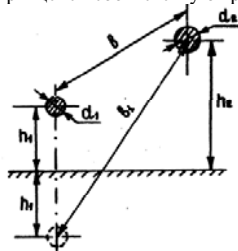


Рис.3.18. Параметры цепей для расчета взаимной индуктивности и емкости проводников

Если кабели плотно уложены в пучки, то диэлектрическая проницаемость среды будет отличаться от единицы. При оценочных расчетах в формуле для определения  $C_{12}$  можно принимать  $\epsilon=2$ .

Пример. Силовой и информационный кабели уложены в трассы, конфигурация которых показана рис.3.19. Индексы 1 и 2 принадлежат соответственно силовому и информационному кабелям. Участок их совместной прокладки обозначен  $L_{12}$ . Параметры участков трасс:

Длина участка, м	$l_1^I$	$l_1^{II}$	$l_1^{III}$	$l_{12}$	$l_2^I$	$l_2^{II}$
Высота прокладки над корпусом судна, м	$h_1^I$	$h_1^{II}$	$h_1^{III}$	$h_{12}$	$h_2^I$	$h_2^{II}$
	0,15	0,15	0,05	0,15	0,05	0,1

Силовой и информационный кабели имеют жилы диаметром соответственно 10 и 2 мм. Среднее расстояние между осями жил на участке совместной прокладки составляет 30 мм. Источник импульсной помехи имеет внутреннее сопротивление 200 Ом и генерирует импульс с пиковым значением напряжения 800 В, достигающим максимума за 20 нс. Информационный кабель нагружен на емкость монтажа  $C_{н1} = C_{н2} = 500$  пф и сопротивление изоляции  $R_2 = 1,5$  Мом. Оценить величину наведенной импульсной помехи.

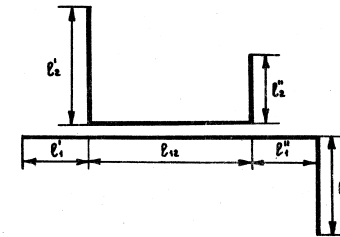


Рис.3.19. Конфигурация кабельных трасс к примеру расчета

Индуктивность жилы силового кабеля будет складываться из индуктивности участков с различной высотой прокладки:

$$L_1 = \frac{4\pi \cdot 10^{-7}}{2\pi} \left[ (5+5+10) \ln \frac{4 \cdot 0,15}{0,01} + 7 \ln \frac{4 \cdot 0,05}{0,01} \right] = 20,6 \cdot 10^{-6} \text{ Гн} .$$

Аналогично определяется собственная емкость жилы информационного кабеля

$$C_2 = 2\pi \cdot 8,86 \cdot 10^{-12} \left[ 5 \frac{1}{\ln \frac{4 \cdot 0,05}{0,002}} + 2 \frac{1}{\ln \frac{4 \cdot 0,1}{0,002}} + 10 \frac{1}{\ln \frac{4 \cdot 0,15}{0,002}} \right] = 179,1 \cdot 10^{-12} \text{ ф} .$$

Взаимная индуктивность и емкость жил кабелей на участке совместной прокладки:

$$M_{12} = \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 10}{2\pi} \left[ \ln \frac{2 \cdot 10}{0,05} - 1 \right] = 11 \cdot 10^{-6} \text{ Гн} ;$$

$$C_{12} = \frac{2\pi \cdot 8,86 \cdot 10^{-12} \cdot 10 \cdot 2 \cdot \ln \frac{\sqrt{0,15^2 + 0,05^2}}{0,05}}{\ln \frac{4 \cdot 0,15}{0,01} \cdot \ln \frac{4 \cdot 0,15}{0,002} - \ln^2 \frac{\sqrt{0,15^2 + 0,05^2}}{0,05}} = 87,6 \cdot 10^{-12} \text{ ф} .$$

Пиковое значение емкости и индуктивной составляющей импульсной наведенной помехи

$$U_{2c} = 800 \frac{87,6 \cdot 10^{-12} \cdot 1,5 \cdot 10^9}{20 \cdot 10^{-9}} \left[ 1 - \exp(-20 \cdot 10^{-9} / (87,6 + 500 + \right.$$

$$\left. 500 + 179,1) \cdot 10^{-12} \cdot 1,5 \cdot 10^6 \right] = 57,2 \text{ В} ;$$

$$U_{2M} = 800 \frac{11 \cdot 10^{-6}}{2 \cdot 20 \cdot 10^{-9} \cdot 200} \left[ 1 - \exp(-200 \cdot 20 \cdot 10^{-9} / (20,6 + 10^{-6})) \right] = 194,1 \text{ В} .$$

Максимально возможная амплитуда наведенной импульсной помехи составит

$$U_2 = 57,2 + 194,1 = 251,3 \text{ В} .$$

Пример. Информационный кабель имеет экранирующую оболочку диаметром 20 мм. Суммарное активное сопротивление экрана и заземляющих перемычек составляет 53 мОм. Остальные исходные данные берутся из предыдущего примера. Определить ток, наведенный в экранирующей оболочке кабеля. Индуктивность экрана кабеля

$$I_2 = \frac{4\pi \cdot 10^{-7}}{2\pi} \left[ 5 \ln \frac{4 \cdot 0,05}{0,02} + 2 \ln \frac{4 \cdot 0,1}{0,02} + 10 \ln \frac{4 \cdot 0,15}{0,02} \right] = 10,3 \cdot 10^{-6} \text{ Гн} .$$

Вспомогательные величины:

$$\alpha_1 = 200 / 20,6 \cdot 10^{-6} = 9,71 \cdot 10^6 ;$$

$$\alpha_2 = 53 \cdot 10^{-3} / 10,3 \cdot 10^{-6} = 5,14 \cdot 10^3 .$$

Определим пиковое значение тока экрана

$$I_2 = 800 \frac{11 \cdot 10^{-6}}{20 \cdot 10^{-9} \cdot 200 \cdot 53 \cdot 10^{-3}} \left[ 1 + (9,71 \cdot 10^6 \exp(-5,14 \cdot 10^3 \cdot 20 \cdot 10^{-9}) - 5,14 \cdot 10^3 \exp(-9,71 \cdot 10^6 \cdot 20 \cdot 10^{-9})) / (9,71 \cdot 10^6 - 5,14 \cdot 10^3) \right] = 8,15 \text{ А} .$$

### 3.3.2. Наведенные импульсные помехи в экранированных информационных кабелях.

В судовых информационных кабелях наиболее широко используются оплеточные экраны. Вид плетения такого экрана характеризует число жгутов, образующих экран, число проволок в каждом жгуте и число пересечений жгутов на единицу длины, а также угол плетения или угол между жгутом и осью экрана. На рис.3.20 показана типичная оплетка с узором плетения елочкой.

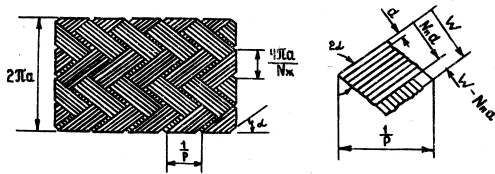


Рис.3.20. Конструкция оплеточного экрана кабеля

Параметры оплеточного экрана могут быть выражены через радиус экрана  $a$ , число жгутов в оплетке  $N_{ж}$ , число пересечений  $P$ , число проволок в жгуте  $N_n$ , диаметр проволоки  $d$  и угол плетения  $\lambda$  определяют параметры экрана:

- угол плетения  $\lambda = \arctg(4\lambda_{жар} / N_{ж})$  ;
- заполнение  $F = p N_n d / \sin \lambda = d N_n N_{ж} / 4 \pi a \cos \lambda$  ;
- оптическое перекрытие  $k = 2F - F^2$
- объем металла  $U = \pi^2 a d F$ .

Пример, Оплеточный экран характеризуется следующими параметрами: радиус экрана  $a = 1$  см; диаметр проволоки  $d = 0,16$  мм; угол плетения  $\lambda = 30^\circ$ ; число жгутов  $N_{ж} = 48$ ; число проволок в жгуте  $N_n = 11$ .

Заполнение  $F = 11 \cdot 0,16 \cdot 10^{-3} \cdot 48 / 4\pi \cdot 0,01 \cdot \cos 30^\circ = 0,7764$ . Оптическое перекрытие  $k = 2 \cdot 0,7764 - 0,7764^2 = 0,95$  (или 95%).

Влияние полей, проникающих через щели в экране, показано на рис.3.21. Часть магнитного поля на окружности, вызванного током в экране, может проникать через ромбовидную щель и замыкать цепь центрального проводника, вызывая взаимную индукцию между цепью экрана и цепью внутреннего проводника. По добным же образом часть внешнего электрического поля может проникать внутрь экрана, образуя емкостную связь. Величина емкости между экраном с низкой

оптической плотностью и внутренним проводником около  $10^{-3}$  пф/м, поэтому емкостная связь существенно меньше магнитной и при оценочных расчетах ею в большинстве случаев можно пренебречь.

Кроме магнитной и емкостной в экранированных информационных кабелях существует гальваническая связь. Ток импульсной помехи  $i_2$ , протекающий по экрану, приводит к появлению на его активном сопротивлении  $R_3$  падения напряжения  $i_2 R_3$  (рис.3.22). Это напряжение приводит к появлению тока, который протекает по корпусу судна за счет

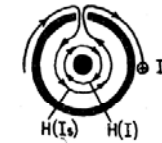


Рис.3.21. Механизм проникновения магнитного поля внутрь экрана с щелями

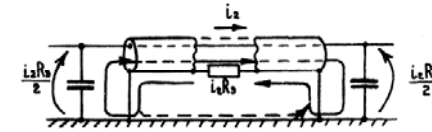


Рис.3.22. Механизм возникновения гальванической составляющей наведенного в экранированном кабеле напряжения

гальванической связи с экраном через заземляющие перемычки, а также тока в жиле кабеля за счет емкостных связей между экраном и цепями жил кабеля. На частотах выше звуковых вторая составляющая доминирует, так как индуктивность цепи жила-экран существенно меньше индуктивности цепи экран-корпус. При оценке наведенных импульсных помех можно принять, что напряжение экрана полностью приложено к нагрузкам жил.

Амплитуда наведенных несимметричных импульсных помех при протекании по экрану тока может быть определена отдельно для составляющей, обусловленной взаимной индукцией и гальванической связью

$$U_3(t < \tau_3) = \frac{M_{23} L_{12}}{2} \left( \frac{di_2}{dt} \right)_M ; U_3(t > \tau_3) = \frac{R_3 t_2}{2} I_2 ,$$

где  $\tau_3 = \mu_0 \delta_3 d^2$  - постоянная времени проникновения тока на внутреннюю поверхность экрана;  $M_{23}$  - взаимная индуктивность цепей экрана и внутренних проводников информационного кабеля;  $L_{12}$  - длина информационного кабеля;  $R_3$  - активное сопротивление экрана, а  $(di_2/dt)_M \approx I_2/t_2$ . Активное сопротивление экрана зависит от частоты, но для оценочных расчетов может быть приравнено сопротивлению экрана постоянному току:

$$R_3 = 4 / \pi d^2 N_n N_{ж} \sigma_3 \cos \alpha = 1 / \pi^2 a d \sigma_3 F \cos^2 \alpha ,$$



где  $\delta_3$  - удельная проводимость материала экрана.

Взаимную индуктивность экрана кабеля и его проводников можно определить, воспользовавшись выражением

$$M_{23} \approx \begin{cases} \frac{\pi \mu_0}{6 N_{ж}} (1-k)^{3/2} \frac{e^2}{E(e) - (1-e^2)K(e)} & (\alpha < 45^\circ); \\ \frac{\pi \mu_0}{6 N_{ж}} (1-k)^{3/2} \frac{e^2/\sqrt{1-e^2}}{K(e) - E(e)} & (\alpha > 45^\circ), \end{cases}$$

где  $k$  - оптическое перекрытие;  $N_{ж}$  - число жгутов;  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ ;  $k(e)$  и  $E(e)$  - полные эллиптические интегралы соответственно первого и второго видов с аргументом

$$e = \begin{cases} \sqrt{1 - \operatorname{tg}^2 \alpha} & (\alpha < 45^\circ); \\ \sqrt{1 - \operatorname{ctg}^2 \alpha} & (\alpha > 45^\circ). \end{cases}$$

Изменение  $M_{23}$  в зависимости от угла плетения при постоянном оптическом перекрытии показано на рис.3.23. Взаимная индуктивность на единицу длины быстро возрастает с увеличением угла плетения. Зависимость на рис.3.23 приведена для случая, когда радиус экрана составляет 10 мм, диаметр проволоки 0,16 мм, число проволок в жгуте 10, а число жгутов меняется в таких пределах, что оптическое перекрытие остается постоянным, равным 90%.

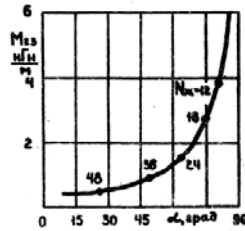


Рис.3.23. Изменение взаимной индуктивности  $M_{23}$  в зависимости от угла плетения при постоянном оптическом перекрытии

На рис. 3.24 показана зависимость эксцентриситета  $e$  щелей от изменения угла плетения от 0 до 70°. На рис.3.25 показана функция  $(1-k)^{3/2}$  в зависимости от оптического перекрытия  $k$ . Эти кривые могут быть использованы для оценки  $M_{23}$ . Для судовых кабелей  $M_{23} = 0,1 \dots 50$  нГн/м и  $R_3 = 0,5 \dots 50$  МОи/м.

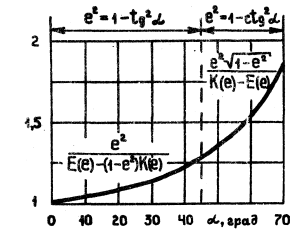


Рис.3.24. Зависимость эксцентриситета  $e$  щелей от изменения угла плетения

Пример. Кабель с такими же параметрами, как и в предыдущем примере, подвергается воздействию протекающего по экрану тока помехи амплитудой 8 А, нарастающего за время 20 нс. Экран кабеля сплетен из медной проволоки ( $\delta_3 = 5,8 \cdot 10^7$  См/м). Общая длина кабеля 17 м, длина участка совместной прокладки с силовым кабелем составляет 10 м. Каково напряжение импульсных помех, наводимое на жилах этого кабеля по отношению к экрану?

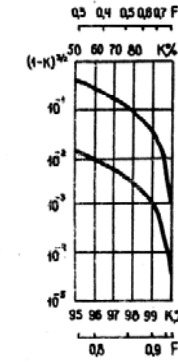


Рис.3.25. Зависимость функции  $(1-k)^{3/2}$  от оптического перекрытия

Из предыдущего пример: заполнение 0,7764 и оптическая плотность 95%. Сопротивление постоянному току

$$R_3 = 1/\pi^2 \alpha d \sigma_3 F \cos^2 \alpha = 1/\pi^2 \cdot 10^{-2} \cdot 0,16 \cdot 10^{-3} \cdot 5,8 \cdot 10^7 \times \\ \times 0,7764 \cdot \cos^2 30^\circ = 4,87 \cdot 10^{-3} \text{ Ом / м .}$$

Постоянная времени проникновения

$$\tau_3 = \mu_0 \sigma_3 d^2 = 4 \pi \cdot 10^{-7} \cdot 5,8 \cdot 10^7 (0,16 \cdot 10^{-3})^2 = 1,87 \cdot 10^{-6} \text{ с .}$$

Из рис.3.24 и 3.25 находим значения функции эксцентриситета 1,14 и  $(1-k)^{3/2} = 0,011$ . Взаимная индуктивность экрана и жилы

$$M_{12} = \frac{\pi \mu_0}{6 N_K} (1 - \kappa)^{3/2} \frac{e^2}{E(e) - (1 - e^2) \kappa(e)} =$$

$$= \frac{\pi \cdot 4\pi \cdot 10^{-7}}{6 \cdot 48} \cdot 0,011 \cdot 1,14 = 1,7 \cdot 10^{-10} \text{ Гн/м}$$

Индуктивная составляющая наведенной импульсной помехи

$$U_3(t < \tau_3) = \frac{1,7 \cdot 10^{-10} \cdot 10 \cdot 8,15}{2 \cdot 20 \cdot 10^{-9}} = 0,34 \text{ В}$$

Гальваническая составляющая наведенной импульсной помехи

$$U_3(t \gg \tau_3) = \frac{1,87 \cdot 10^{-9} \cdot 17 \cdot 8}{2} = 63,6 \cdot 10^{-3} \text{ В}$$

Таким образом, наведенная импульсная помеха имеет вид всплеска с амплитудой напряжения 340 мВ, длительностью 20 нс и гальванической составляющей с амплитудой 63,6 мВ, нарастающей за время 1,87 мкс.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

### Предисловие

1. Проблема электромагнитной совместимости судового электротехнического и электронного оборудования
  - 1.1. Общие понятия
  - 1.2. Характеристики электромагнитных помех
  - 1.3. Вопросы обеспечения электромагнитной совместимости
2. Возникновение импульсных помех в судовых электроэнергетических системах
  - 2.1. Импульсные помехи при работе полупроводниковых преобразователей
  - 2.2. Непериодические коммутационные импульсные помехи
  - 2.3. Внешние электромагнитные импульсы
3. Распространение импульсных помех в судовой электроэнергетической системе
  - 3.1. Распространение импульсных помех по судовой кабельной сети
  - 3.2. Распространение импульсных помех из сети через вторичные источники питания
  - 3.3. Импульсные помехи, наведенные в информационных кабелях

### Литература