

УДК 621.372.211

А.А. Дроздова, М.Е. Комнатнов

Квазистатический анализ восприимчивости к воздействию электростатического разряда силовой шины электропитания космического аппарата

Выполнен квазистатический анализ восприимчивости к воздействию электростатического разряда (ЭСР) силовой шины электропитания (СШЭП) космического аппарата. Анализ проведен, используя принципиальную схему макета СШЭП с проводными отводами. Принципиальная схема состоит из последовательно соединённых линий передачи, которые представлены поперечными сечениями каждого элемента СШЭП. В качестве воздействия принят импульс ЭСР с формой тока по 4-й степени жесткости ГОСТ Р 51317.4.2–2010. Представлены формы напряжения в начале и конце СШЭП при воздействии ЭСР на проводные отводы. Выполнена локализация максимума напряжения на участке СШЭП при воздействии на неё ЭСР. Выявлено, что при воздействии ЭСР на экранирующую ленту ЛМAMс, покрывающую отрицательный отвод, наблюдается максимальное затухание (13,5 раза) на положительном отводе и минимальное затухание (1,6 раза) на отрицательном отводе.

Ключевые слова: электромагнитная совместимость, силовая шина электропитания, электростатический разряд.

В настоящее время стремительно развивается освоение космического пространства, что ужесточает существующие и предъявляет новые требования к современным космическим аппаратам (КА). Повышение помехоустойчивости и надежности создаваемых КА позволяет повысить срок их активного существования. При обеспечении помехоустойчивости и надежности радиоэлектронных средств (РЭС), входящих в состав КА, необходимо учитывать все возможные сигналы и воздействия, возникающие при эксплуатации КА. Статистика показывает, что наиболее частой причиной отказов КА является электростатический разряд (ЭСР) [1]. ЭСР является наиболее опасным и разрушительным видом электромагнитного воздействия, способным повредить РЭС КА. Также ЭСР оказывает влияние на работоспособность различных РЭС, в том числе наземной. Так, например, проведен анализ воздействия ЭСР на персональный компьютер (ПК), используя имитационное моделирование [2].

Результаты анализа показали, что наиболее опасным местом воздействия ЭСР на ПК являются вентиляционные отверстия, воздействие на которые приводит к повышению напряженности электрического поля внутри корпуса до 11 В/м, а при нарушении целостности корпуса, напряженность электрического поля достигает 70 В/м. Представлены [3] результаты сравнения имитационного моделирования с экспериментальными данными при воздействии ЭСР на металлическую крышку РЭС, которые показали, что конструктивные методы защиты крайне важны, необходимо стремиться к непрерывности электромагнитного экранирования корпусом электрических цепей, а вентиляционные отверстия должны перекрываться металлической сеткой с мелкими, до 1 мм, отверстиями.

В [4] исследуются временные характеристики прерывания тактового сигнала кварцевого генератора Пирса, при воздействии на него ЭСР. Первые опыты математического моделирования воздействия

ЭСР на силовые цепи электропитания КА (солнечная батарея, бортовая кабельная сеть, энергопреобразующий компонент) показали неожиданные результаты [5]. С одной стороны, реальные образцы демонстрируют в полёте работу без сбоев и деградаций. С другой стороны, моделирование выявило амплитуды тока и напряжения на элементах в силовых цепях, существенно превышающие допустимые пределы для обеспечения их нормальной работы. Силовая шина электропитания (СШЭП) является одним из важных компонентов бортовой кабельной сети, от которой зависит существование КА, поскольку СШЭП не резервируется, но электрически связывает жизненно важные системы электропитания КА. Таким образом, одним из важных требований при испытаниях СШЭП является испытание на восприимчивость к воздействию ЭСР.

Цель работы – выполнить моделирование восприимчивости к воздействию ЭСР на макет СШЭП.

Конструкция СШЭП

Разработана и создана конструкция СШЭП с помехозащитным фильтром (рис. 1).



Рис. 1. Лабораторный макет СШЭП

Она состоит из основания 1, проводных отводов 2, на конце которых имеются соединители 3, и помехозащитного фильтра 4, к которому подходят от основания СШЭП собственные проводные отводы 5 и помехозащитный фильтр 4, имеет собственные про-

водные отводы 6, на концах которых имеются соединители 7 для соединения СШЭП с нагрузкой КА, не имеющей помехозащитного фильтра.

Основание 1 и проводные отводы 3 СШЭП имеют площадь поперечного сечения каждого полюса 50 мм² из расчета протекания максимального тока 200 А.

Модель СШЭП

Созданы геометрические модели поперечных сечений для основания (рис. 2, а, б) и проводных отводов (рис. 2, з-е) элементов и устройства СШЭП, которые содержат проводники для прямых 1 и обратных 2 токов, выполненные в виде металлических пластин, и изоляторы: лак ЭП-730 ($\epsilon_r = 4$) 3; полиамидная пленка с односторонним липким слоем ($\epsilon_r = 2,3$) 4 и стеклотекстолит ($\epsilon_r = 4,3$) 5. В местах соединения СШЭП с проводниковыми отводами имеется герметик 7 (см. рис. 2, б). Снаружи СШЭП покрыта лентой из арамидных нитей с обмоткой из медной посеребренной проволоки (ЛМAMс) 6 для защиты её от ЭСР. Каждый проводный отвод выполнен из 10 проводов БС 35-1298 (5 – для прямых и 5 – для обратных токов) (см. рис. 2, д). Вблизи СШЭП поперечное сечение («+/-» отвода) представляет собой набор проводов БС 35-1298, расположенных друг над другом (см. рис. 2, в, з) на расстоянии $w_2 = k_1 = 4$ мм. Проводный отвод (см. рис. 2, з) необходим для соединения СШЭП с помехозащитным фильтром. Все проводные отводы покрыты экранирующей лентой ЛМAMс. Для снижения индуктивности L и повышения ёмкости C , провода разной полярности размещены в непосредственной близости друг от друга. При этом для поперечного сечения положительный и отрицательный выводы располагаются в вертикальной плоскости (положительный сверху) (см. рис. 2, в, з).

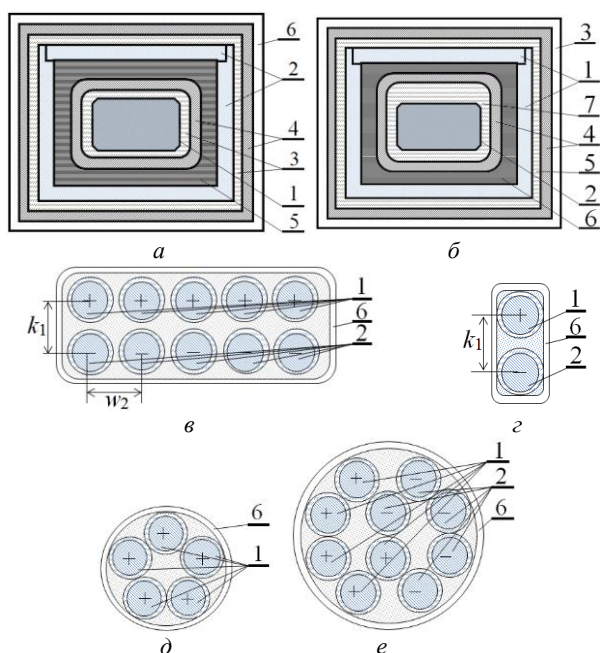


Рис. 2. Поперечные сечения элементов СШЭП

Для разработки принципиальной схемы (рис. 3) использованы перечисленные выше поперечные

сечения (см. рис. 2). Участки с ответвлениями (Trl_{13} и Trl_{17}) имеют длину $l_1 = 30$ мм с поперечным сечением (рис. 2, в), а участки (Trl_{14} и Trl_{16}) $l_2 = 215$ мм (см. рис. 2, а). Участок соединения СШЭП с помехозащитным фильтром (Trl_{15}) имеет длину $l_1 = 10$ мм (см. рис. 2, б). Проводные отводы (Trl_{18} и Trl_{19}) имеют длину $l_1=80$ мм (см. рис. 2, з), а в местах соединения с помехозащитным фильтром (Trl_{21} и Trl_{22}) $l_1 = 20$ мм.

В начале и конце центрального проводника к СШЭП подключены отводы для соединения СШЭП с приборами, входящими в состав КА. При этом, поперечное сечение «+/-» отвода содержит 10 проводов БС 35-1298 ($Trl_9 - Trl_{12}$) длиной 350 мм (см. рис. 2, е). Возле соединителя провода разветвляются и имеют поперечное сечение для каждого полюса отдельное по 5 проводов ($Trl_1 - Trl_8$) длиной 100 мм (см. рис. 2, д). Изменение поперечного сечения в соединителях не учитывается, поскольку они имеют малую длину 25 мм.

Результаты моделирования

Для оценки воздействия ЭСР на СШЭП выполнено моделирование форм сигнала на ближнем и дальнем концах проводных отводов СШЭП. К началу и концу каждого отвода подключены сопротивления $R1-R16 = 50$ Ом стандартного измерительного тракта. При моделировании высота СШЭП над бесконечной плоскостью Земли составляла $h = 0,1$ м.

Выполнено моделирование воздействия ЭСР на ЛМAMс в двух случаях. В первом случае оно производилось в месте покрытия положительного отвода СШЭП. Для этого к сопротивлению $R2$ подключался генератор тока I_1 , имитирующий воздействие ЭСР. Во втором случае воздействие ЭСР на ЛМAMс производилось в месте покрытия отрицательного отвода СШЭП. Для этого к сопротивлению $R4$ подключался генератор тока I_2 , имитирующий воздействие ЭСР. Форма тока выбрана по 4-й степени жесткости ($\tau_1 = 1,1$ нс, $\tau_2 = 2$ нс, $\tau_3 = 12$ нс, $\tau_4 = 37$ нс, $I_1 = 30$ А, $I_2 = 16$ А, $n = 1,8$) согласно ГОСТ Р 51317.4.2-2010 [6].

Для первого случая представлены формы напряжения в начале (V_1) и конце (V_5) проводника, имитирующего ЛМAMс (рис. 4, а). Формы напряжения в начале (V_3, V_4) и конце (V_7, V_8) пассивных проводников представлены на рис. 4, б, в. Для второго случая представлены формы напряжения в начале (V_2) и в конце (V_6) ЛМAMс (рис. 4, з). Формы напряжения в начале (V_3, V_4) и конце (V_7, V_8) пассивных проводников представлены на рис. 4, д, е.

Из рис. 4 видно, что при воздействии ЭСР на ЛМAMс у положительного отвода амплитуда наводки в начале положительного проводника 418 В, а в конце проводника 37 В (рис. 4, б). При этом в начале отрицательного проводника амплитуда не превышает 82 В, а в конце не превышает 30 В (см. рис. 4, в). При воздействии ЭСР на ЛМAMс у отрицательного отвода амплитуда наводки не превышает 104 В в начале и 65 В в конце положительного проводника (см. рис. 4, д). При этом в начале отрицательного проводника амплитуда максимальна (430 В), а в конце не превышает 32 В (см. рис. 4, е).

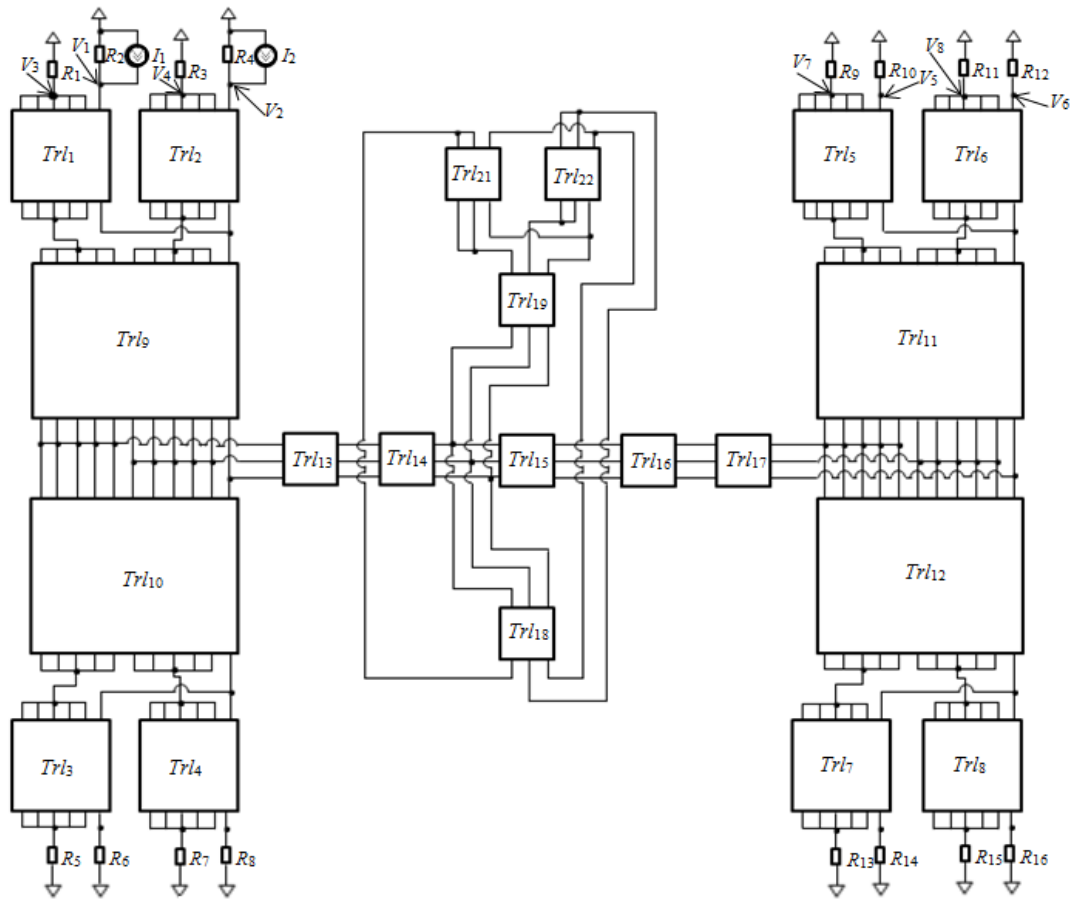


Рис. 3. Принципиальная схема СПЭП с проводными отводами в программе TALGAT

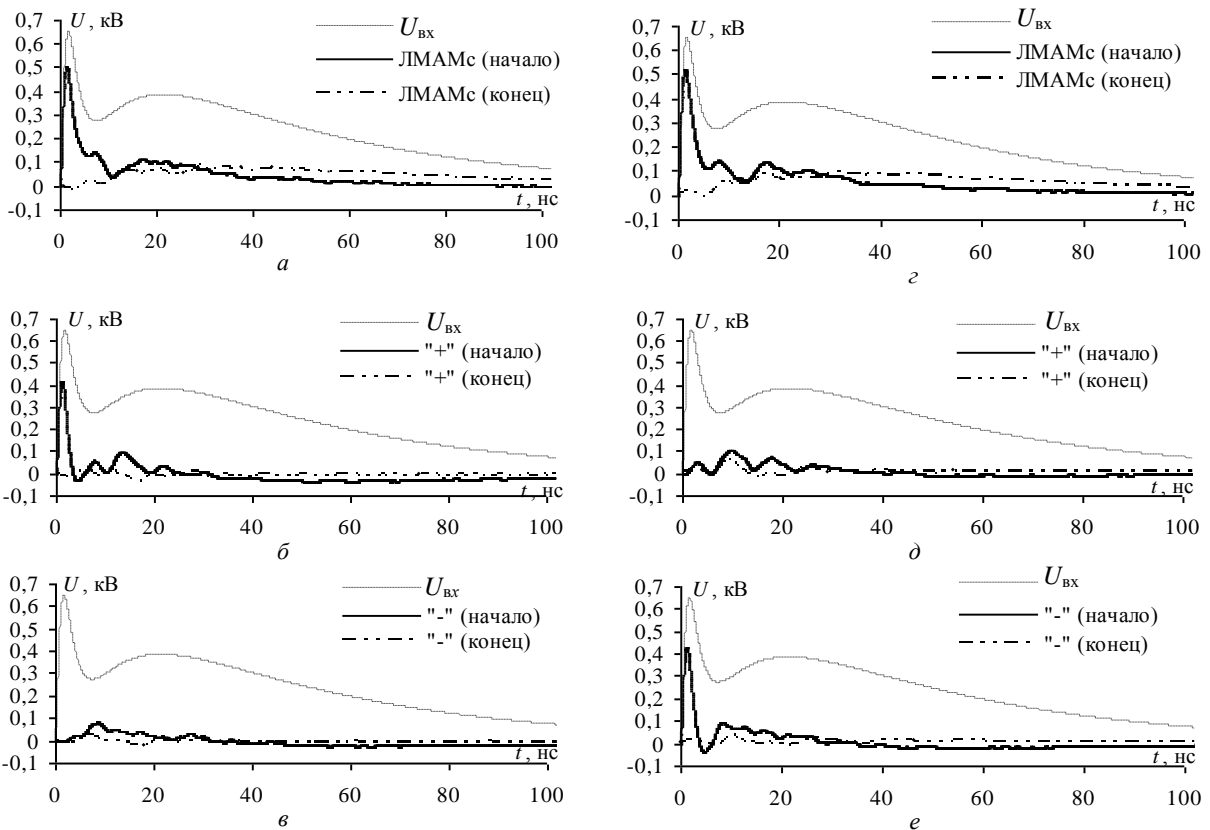


Рис. 4. Форма напряжения в начале и конце ЛМAMс (а), «+» (б) и «-» (в) отводов при воздействии ЭСР на ЛМAMс у положительного отвода и форма напряжения в начале и конце ЛМAMс (г), «+» (д) и «-» (е) отводов при воздействии ЭСР на ЛМAMс у отрицательного отвода

Для выявления опасных участков вдоль проводников элементов СШЭП дополнительно выполнена локализация максимума амплитуды напряжения от воздействия ЭСР. При воздействии ЭСР на ЛМAMc у положительного отвода на отрицательном отводе максимум амплитуды (179,5 В) наблюдается (рис. 5, а) на участке $Trl14$ на длине 50 мм от его начала. На рис. 5, б представлена форма напряжения на положительном отводе при воздействии ЭСР на ЛМAMc у отрицательного отвода. При этом максимум амплитуды напряжения (141,5 В) находится на том же участке ($Trl14$), но на длине 65 мм от его начала. Следовательно, на данном участке в реальной конструкции может быть целесообразным увеличить слой изоляции для избежания пробоя.

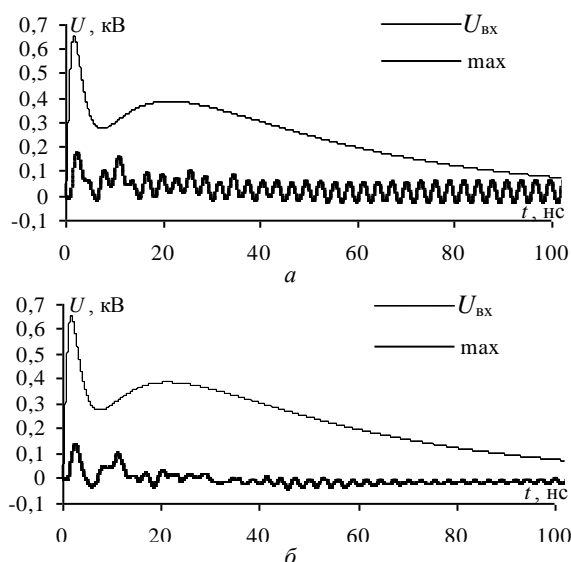


Рис. 5. Формы напряжения на участке $Trl14$ при воздействии ЭСР на ЛМAMc у «+» (а) и «-» (б) отводов

Анализируя полученные результаты, можно сделать вывод, что максимальная амплитуда во всех случаях наблюдается со стороны воздействия ЭСР на СШЭП и ослабляется при его прохождении. Также при воздействии ЭСР на ЛМAMc максимальная амплитуда напряжения на отрицательном отводе проявляется на участке $Trl14$ на длине 50–65 мм.

В таблице представлены значения амплитуд напряжения в начале и конце проводников при воздействии ЭСР на ЛМAMc, положительный и отрицательный отводы.

Значения амплитуды напряжения при воздействии ЭСР на ЛМAMc, «+» и «-» отводы, В

Воздействие	ЛМAMc «+» отвода	ЛМAMc «-» отвода	«+» отвод	«-» отвод
«+» начало	417,76	103,92	540,73	165,01
«+» конец	36,82	64,48	189,55	36,76
«-» начало	81,5	429,17	118,08	527,31
«-» конец	29,18	31,82	45,86	161,06
ЛМAMc начало	502,27	518,97	429,6	424,37
ЛМAMc конец	84,03	98,57	50,41	35,03

Из таблицы видно, что при воздействии ЭСР на ЛМAMc у положительного отвода, амплитуда напряжения в конце линии, как на активном, так и на пассивных проводниках, уменьшилась. На ЛМAMc амплитуда напряжения уменьшилась в 6 раз, а на положительном и отрицательном отводах в 11,3 и 2,3 раза соответственно. В случае воздействия на ЛМAMc у отрицательного отвода, амплитуда в конце линии уменьшилась на отрицательном отводе в 13,5 раза, на ЛМAMc – в 5,3 раза, а на положительном – в 1,6 раза.

При воздействии ЭСР на положительный отвод, амплитуда в конце линии уменьшилась на ЛМAMc в 8,5 раза, а на положительном и отрицательном отводах – в 2,9 и 2,6 раза соответственно. При воздействии ЭСР на отрицательный отвод амплитуда в конце линии уменьшилась на ЛМAMc в 12,1 раза, а на положительном и отрицательном отводах – в 4,5 и 3,3 раза, соответственно.

Таким образом, при воздействии ЭСР на ЛМAMc у отрицательного отвода наблюдается максимальное ослабление (13,5 раза) на положительном отводе и минимальное (1,6 раза) на отрицательном. Отметим, что максимальное и минимальное ослабления наблюдаются при воздействии ЭСР именно на ЛМAMc.

Заключение

Выполнено моделирование воздействия ЭСР на ЛМAMc СШЭП, которое показало уменьшение амплитуды от 6 до 13,5 раза. Выявлен участок СШЭП с максимальной амплитудой напряжения при воздействии ЭСР. Данный участок требует максимального внимания при испытаниях СШЭП. Минимальное (1,6 раза) и максимальное (13,5 раза) ослабления наблюдаются при воздействии ЭСР на ленту ЛМAMc, покрывающую положительный и отрицательный отводы соответственно.

Исследование по воздействию ЭСР выполнено за счет гранта РФФИ 19-37-51017 «Научное наставничество».

Исследование по локализации выполнено за счет гранта РФФИ 20-37-70020. Стабильность.

Литература

- Соколов А.В. Обеспечение стойкости бортовой радиоэлектронной аппаратуры космических аппаратов к воздействию электростатических разрядов: дис. ...д-ра техн. наук. – М., 2009.
- Гизатуллин З.М. Электромагнитная совместимость электронно-вычислительных средств при воздействии электростатического разряда // Проблемы в энергетике. – 2009. – № 1-2. – С. 104–112.
- Электромагнитная совместимость систем интеллектуального управления в условиях воздействия электростатических разрядов / А.М. Агафонов, А.А. Воршевский, П.А. Воршевский, Е.С. Гришаков, Ю.А. Губанов, А.М. Агафонов // Морские интеллектуальные технологии. – 2019. – № 1 (43). – С. 192–196.
- Ungru T. New Integrated Crystal Oscillator Design With Improved Robustness Against ESD Disturbances in Operation / T. Ungru, W. Wilkening, R. Negr // IEEE Transac-

tions on Electromagnetic Compatibility. – 2017. – Vol. 60. – P. 322–327.

5. Почебут Д.В. Моделирование работы электрической схемы системы электропитания космического аппарата для проведения расчетов переходных процессов токов и напряжений при воздействии электростатического разряда // Прикладная физика и космические технологии. – 2014. – № 2(8). – С. 10–15.

6. ГОСТ Р 51317.4.2–2010 (МЭК 61000-4-2:2008) Совместимость технических средств электромагнитная. Устойчивость к электростатическим разрядам. Требования и методы испытаний, 2010. – 26 с.

Дроздова Анастасия Александровна

Магистрант каф. телевидения и управления (ТУ)

Томского государственного ун-та

систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР)

Ленина пр-т, д. 40, г. Томск, Россия, 634050

Тел.: +7-999-619 37-70

Эл. почта: anastasiya.drozdova.00@list.ru

Комнатнов Максим Евгеньевич

Канд. техн. наук, доцент каф. ТУ ТУСУРа

Ленина пр-т, д. 40, г. Томск, Россия, 634050,

Научно-технологический университет «Сириус»,

Олимпийский пр-т, д. 1, г. Сочи, Россия, 354340

Тел.: +7-952-888-38-96

Эл. почта: maxmek@mail.ru