

УДК 537.87

Исследование уровней и спектров высших гармоник тока в электрических сетях питания компьютерной техники и основные мероприятия по обеспечению электромагнитной совместимости

Викторов В. А., Мешалкин В. А., Салтыков В. М.

Постановка задачи: в настоящее время персональный компьютер является основным техническим устройством и источником побочных электромагнитных излучений в широком диапазоне частот в офисных помещениях, которое в свою очередь неблагоприятно воздействует на здоровье человека. Кроме того, за счет побочных электромагнитных излучений формируется электромагнитный канал утечки информации. Основными составными частями персонального компьютера являются: системный блок, разнообразные устройства ввода/вывода информации (клавиатура, дисковые накопители, принтер, сканер), а также средство визуального отображения информации. Все эти элементы персонального компьютера формируют сложную электромагнитную обстановку при работе должностного лица в офисном помещении. Отметим, что число эксплуатируемых компьютеров и интенсивность их применения возрастают, а электромагнитное поле от компьютерного оборудования становится весьма существенным фактором общей электромагнитной обстановки и электромагнитной безопасности, поэтому зачастую возникают задачи, связанные с инструментальным анализом уровней и спектральных составляющих побочных электромагнитных излучений компьютерного оборудования. **Целью работы** является исследование уровней и спектров высших гармоник тока в электрических сетях питания компьютерной техники и формулирование основных рекомендаций по организации мероприятий обеспечения электромагнитной совместимости в кабельных каналах и в системах связи. **Используемые методы:** измерения уровней и исследования спектров высших гармоник проводились анализатором качества электроэнергии СА 8334 в строгом соответствии с инструкцией по эксплуатации. **Новизна:** в работе представлены результаты исследования уровней и спектров высших гармоник тока в электрической сети при отдельном и совместном питании компьютера и принтера, сети вводов питания компьютерной техники офисного здания. Исследованы уровни при совместной работе от двух до пяти компьютеров. Получены аналитические модели, аппроксимирующие: а) значения тока основной частоты и токов высших гармоник учитываемого порядка; б) коэффициенты отношения токов высших гармоник к току основной частоты учитываемого порядка. Для оценки точности каждой аппроксимации приводится коэффициент достоверности. **Результаты:** полученные в собственном экспериментальном исследовании представлены в таблицах и графически, сопоставлены с предельно допустимыми значениями ГОСТ Р 5131.3.2-99 для выявления нарушений предписанных требований. **Практическая значимость:** состоит в том, что представленные результаты позволяют численно оценить уровни и провести анализ спектров высших гармоник тока в электрической сети питания компьютерной техники, а также провести оценку превышения предельно допустимых значений, регламентируемых ГОСТ Р 5131.3.2-99. Сформулированы основные рекомендации по организации мероприятий обеспечения электромагнитной совместимости в кабельных каналах и в системах связи.

Ключевые слова: электромагнитная обстановка, электромагнитное поле, электромагнитная безопасность, спектры, высшие гармоники тока, электромагнитная совместимость.

Библиографическая ссылка на статью:

Викторов В. А., Мешалкин В. А., Салтыков В. М. Исследование уровней и спектров высших гармоник тока в электрических сетях питания компьютерной техники и основные мероприятия по обеспечению электромагнитной совместимости // Системы управления, связи и безопасности. 2019. № 4. С. 381-402. DOI: 10.24411/2410-9916-2019-10415.

Reference for citation:

Viktorov V. A., Meshalkin V. A., Saltykov V. M The research of the levels and spectra of higher harmonics of current in electrical power networks of computer equipment and the basic activities of the electromagnetic compatibility provision. *Systems of Control, Communication and Security*, 2019, no. 4, pp. 381-402. DOI: 10.24411/2410-9916-2019-10415 (in Russian).

Введение

Побочные электромагнитные излучения и наводки (ПЭМИН), создаваемые средствами вычислительной техники (узлами, блоками и иными элементами персональной электронно-вычислительной машины, коммуникационным и офисным оборудованием), наводятся на сигнальные кабельные линии, линии электропитания и заземления и могут распространяться по ним на большие расстояния. Составной частью обеспечения надежности в электроустановках является выполнение требований электромагнитной совместимости (ЭМС) в электрических сетях офисных зданий по высшим гармоникам тока, нормируемых ГОСТ Р 51317.3.2-1999 (МЭК 61000-3-2-95) [1]. Значительная часть компьютерной техники и офисного оборудования представляет собой нелинейную электрическую нагрузку, что создает искажения в питающей сети. Искажения вызывают проблемы мгновенного и длительного влияния. Проблемы мгновенного влияния включают:

- искажение формы питающего напряжения;
- падение напряжения в распределительной сети;
- эффект гармоник, кратных трем (в трехфазных сетях);
- резонансные явления на частотах высших гармоник;
- наводки в телекоммуникационных и управляющих сетях.

Проблемы длительного влияния включают:

- нагрев и дополнительные потери в трансформаторах и электрических машинах;
- нагрев конденсаторов; нагрев кабелей распределительной сети.

Анализ доступной литературы показал, что учеными всего мира проводятся исследования, связанные с попыткой оценить влияние электромагнитных полей (ЭМП) офисной оргтехники как со стороны защиты информации так и со стороны воздействия электромагнитных излучений на организм человека, но ни в одном из найденных источников не представлены исследования, в которых бы приводились результаты исследований уровней и спектров высших гармоник тока в электрической сети при отдельном и совместном питании компьютера и принтера, сети вводов питания компьютерной техники офисного здания, а также численные характеристики уровней при совместной работе от двух и более компьютеров.

Так, в работе [2] зарубежных авторов, представлен подход к оценке тока по ЭМП от печатной платы, приводятся зависимости величин результатов измерений ЭМП вблизи печатных плат и их токов. Измерениям ЭМП компьютеров с процессорами Intel со встроенными радиаторами посвящена работа [3]. При помощи измерений ЭМП лазерных принтеров в работе [4] авторы восстанавливают напечатанное изображение. Автором в [5] представлен эксперимент, в ходе которого были проведены измерения распределения тока на поверхности кабеля видеоинтерфейса и плотности тока на поверхности системного блока персонального компьютера (ПК). Исследования электромагнитной обстановки на рабочем месте пользователя рассматриваются в [6, 7].

Таким образом, задача исследований уровней и спектральных составляющих побочных электромагнитных излучений компьютерной оргтехники явля-

ется актуальной. Результаты исследования позволят выявить нарушения предписанных требований по ГОСТ Р 5131.3.2-99.

Целью работы является исследование уровней и спектров высших гармоник тока в электрических сетях питания компьютерной техники с применением анализатора качества электроэнергии СА 8334 и формулирование рекомендаций по организации мероприятий обеспечения электромагнитной совместимости в кабельных каналах и в системах связи.

Исследование уровней и спектров высших гармоник тока в электрической сети питания компьютеров

Проведенные экспериментальные исследования в системах электроснабжения (СЭС) офисных зданий показывают, что основным источником высших гармоник (ВГ) в СЭС являются компьютеры. При этом, как показано на рис. 1, форма потребляемого ими тока из электрической сети имеет импульсный характер.

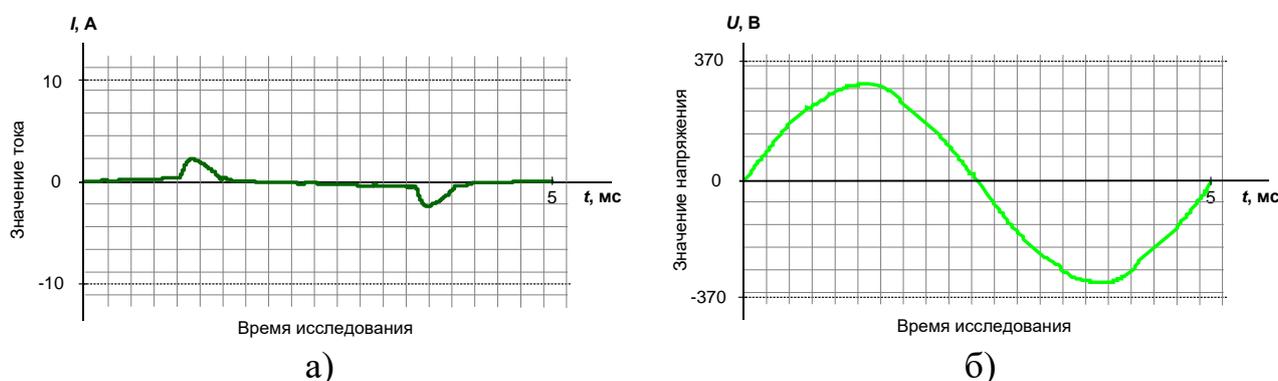


Рис. 1. Осцилограммы мгновенных значений в двухпроводной сети питания (49,99 Гц) компьютера: а) тока ($I_0 = 0,8$ А); б) напряжения ($U_0 = 232,6$ В)

Результаты исследований ВГ токов в сети питания компьютера в виде коэффициентов n -х гармонических составляющих (линейчатого спектра) $K_{I(n)}$, %, показаны на рис. 2 и в таблице 1.

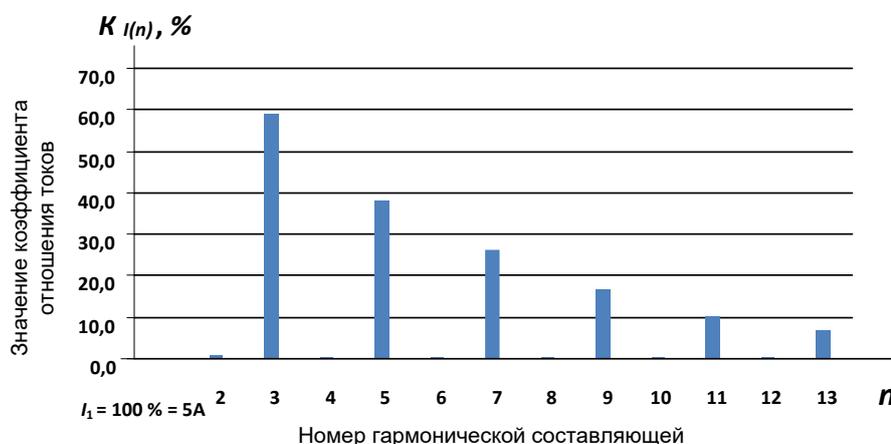


Рис. 2. Коэффициенты n -х гармонических составляющих тока $K_{I(n)}$, %, в двухфазном проводе электрической сети с нагрузкой компьютера ($I_1 = 100\% = 0,5$ А)

При этом получено, что коэффициент несинусоидальности (коэффициент искажения синусоидальности кривой фазного тока) $K_{I, n=2-40}$, %, по токам высших гармоник порядка $n = 2 \dots 40$ составляет $K_{I, n=2-40} = 78,5$ %.

Из рис. 2 также видно, что изменения токов высших гармоник в двухпроводной сети питания компьютера имеют нелинейный характер, а их значения могут быть аппроксимированы выражениями:

в экспоненциальном виде:

$$K_{I, n}, \% = 120,07 e^{-0,222 n}; \quad (R^2 = 0,9986); \quad (1)$$

$$I_n, A = 0,6028 e^{-0,2229 n}; \quad (R^2 = 0,9985); \quad (2)$$

или в логарифмическом виде:

$$K_{I, n}, \% = -37,077 \ln n + 99,303; \quad (R^2 = 0,9982); \quad (3)$$

$$I_n, A = -0,1854 \ln n + 0,497 = -0,1854 \ln n + I_{n=1}; \quad (R^2 = 0,9984); \quad (4)$$

где $n = 1, 3, 5, 7, 9, 11, 13$ – порядковый номер учитываемых гармоник тока; $K_{I, n}$, % коэффициенты отношения токов высших гармоник к току основной частоты учитываемого порядка в процентах (%); I_n , А – значения тока основной частоты и токов высших гармоник учитываемого порядка в амперах; $I_{n=1}$, А – значения тока основной частоты (50 Гц) в амперах; R^2 – коэффициент, который характеризует достоверность аппроксимации: чем ближе значение R^2 к единице, тем надежнее линия графика, аппроксимирующего исследуемый процесс.

При изменении тока основной частоты соотношения токов высших гармоник будут определяться, в частности, выражениями (2, 4). В таблице 1 дополнительно показаны допустимые по ГОСТ Р 51317.3.2-1999 (МЭК 61000-3-2-95) для технических средств (ТС) класса А уровни высших гармоник токов I_n , А, I_n , % нечетного порядка: $n = 3, 5, 7, 9, 11, 13$, а также их соотношения с нормируемыми значениями.

Таблица 1 – Токи высших гармоник в проводе питания компьютера и их сравнение с нормами ГОСТ Р 51317.3.2-1999 (для ТС класса А)

№ гармоник тока, n	I_n , %	I_n , А	Нормируемые по ГОСТ 51317.3.2, $I_{n, норм}$, А	$K_{I_n}, \% = \frac{I_n}{I_{n, норм}} \times 100\%$	$K_{I_n, норм} = \frac{I_{n, норм}}{I_n}$	Допустимые по ГОСТ 51317.3.2, $I_{n, доп}$, А
1	100	0,5	16			3,00
3	59,09	0,295	2,3	12,83	7,8	1,77
5	37,91	0,190	1,14	16,7	6,0	1,14
7	26,33	0,132	0,77	17,1	5,8	0,79
9	16,82	0,084	0,4	21,0	4,76	0,50
11	10,25	0,051	0,33	15,4	6,47	0,31
13	6,69	0,033	0,21	15,7	6,36	0,20

Примечание: жирным шрифтом отмечены значения, превышающие нормы.

Из таблицы 1 следует, что с целью не нарушения требований ГОСТ Р 51317.3.2-1999 (МЭК 61000-3-2-95) по высшим гармоникам токов, допустимым является подключение не более 6-ти одинаковых компьютеров в двухфазной сети электроснабжения, а суммарный ток первой гармоники (промышленной частоты) не должен превышать: $I_1 = 3 \text{ А}$.

Для проверки указанного обстоятельства на рис. 3 показан характер изменения тока в двухпроводной сети от числа питаемых разнотипных компьютеров при последовательном включении нагрузки от 1-го до 5-ти и компьютеров.

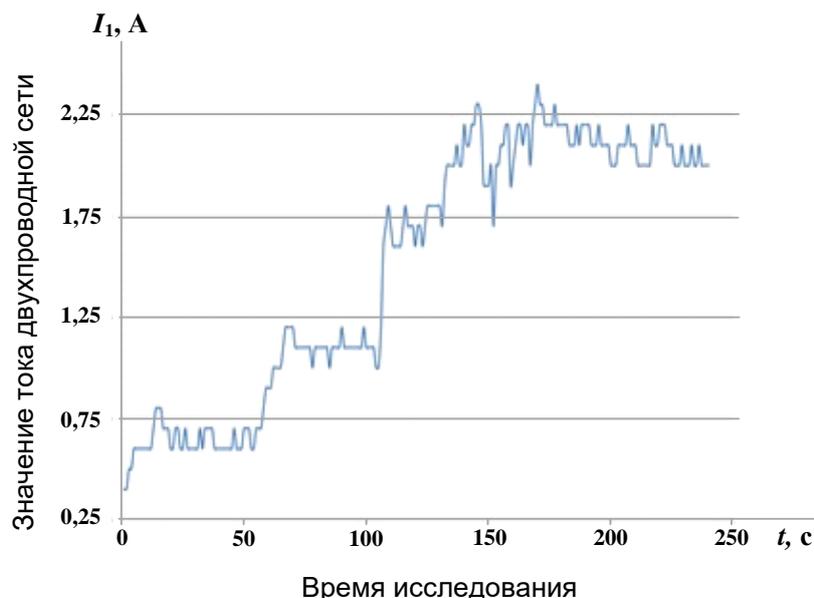


Рис. 3. Характер изменения тока в двухпроводной сети от числа подключаемых компьютеров от одного до пяти

Из рис. 3 видно, что значения тока $I_{1(1)} = 0,4 \text{ А}$ для одного компьютера последовательно увеличиваются до максимального значения на уровне $I = 2,4 \text{ А}$ и устанавливается для пяти компьютеров на уровне $I_{1(5)} = 2,1 \text{ А}$.

Дополнительно для высших гармоник тока последовательно подключаемых компьютеров были получены спектральные характеристики в виде коэффициентов n -х гармонических составляющих $K_{I(n)}$, %, которые сведены в таблице 2.

Таблица 2 – Токи I_n , %/А высших гармоник питания от 1-го до 5-ти компьютеров и их сравнение с нормами ГОСТ Р 51317.3.2-1999 (для ТС класса А)

№ гармоник тока, n	Нормируемые по ГОСТ 51317.3.2, $I_{n, \text{норм}}$, А	Число подключенных компьютеров				
		1	2	3	4	5
1	16	100/0,4	100/0,7	100/1,1	100/1,6	100/2,1
3	2,3	62,2/0,25	71,4/0,5	84,4/0,93	85,8/1,37	86,4/1,8
5	1,14	52,6/0,21	63,2/0,44	70,9/0,78	68,8/1,1	67,3/ 1,41
7	0,77	34,3/0,14	49,9/0,35	51,9/0,57	46,9/0,75	43,7/ 0,92
9	0,4	21,8/0,09	31,6/0,22	30,2/0,33	23,9/0,38	20,1/0,4
11	0,33	12,3/0,05	17,4/0,12	12,5/0,14	6,1/0,1	9,1/0,19
13	0,21	4,2/0,02	5,0/0,04	3,3/0,04	5,4/0,09	8,2/0,17

Примечание: жирным шрифтом отмечены значения, превышающие нормы.

Таблица 3 – Напряжения U_n , % высших гармоник питания от 1-го до 5-ти компьютеров и их сравнение с нормами ГОСТ Р 54149-2010

№ гармоник тока, n	Нормируемые по ГОСТ Р 54149-2010, $U_{n, \text{норм}}$, %	Число подключенных компьютеров				
		1	2	3	4	5
1	100	100 (217,4 В)				
3	5,0	0,5	0,6	0,7	0,9	1,0
5	6,0	1,2	1,3	1,1	1,1	1,1
7	5,0	0,9	1,0	1,1	1,3	1,3
9	1,5	0,8	0,9	0,8	0,9	0,9
11	3,5	0,7	0,6	0,7	0,6	0,6
13	3,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Из таблицы 2 видно, что при увеличении числа подключаемых к электрической сети компьютеров (от 1-го до 5-ти) гармонический спектр токов остается практически неизменным по сравнению с нормативным, но требования ГОСТ Р 51317.3.2-1999 (для ТС класса А) при этом нарушаются уже при 5-ти компьютерах по значениям гармоник тока: $n = 5$ и $n = 7$.

Следует отметить, что искажения напряжения, создаваемые в двухпроводной сети нагрузкой от 5-ти компьютеров, не приводят к нарушению требований ГОСТ Р 54149-2010 [8] по высшим гармоникам напряжения, как это следует из результатов, приведенных в таблице 3.

Исследования уровней и спектров высших гармоник тока в электрической сети при отдельном и совместном питании компьютера и принтера

Наиболее распространёнными электроприемниками в двухпроводной электрической сети офисных помещений являются компьютеры и принтеры. При этом, как известно, возможна их отдельная и совместная работа.

На рис. 4 показан характер изменения тока при питании от двухпроводной электрической сети одиночного компьютера.

На рис. 4 видно, что при включении компьютера в электрическую сеть происходит резкий бросок тока до $I_{1(k)} = 1,8$ А, продолжающийся, примерно, 4 с. Дальнейшая работа компьютера сопровождается периодическими изменениями относительно установившегося среднего значения тока $I_{1(k)} = 0,7$ А в диапазоне ± 14 %. На рис. 5 показан характер изменения тока при питании от двухпроводной электрической сети одиночного принтера.

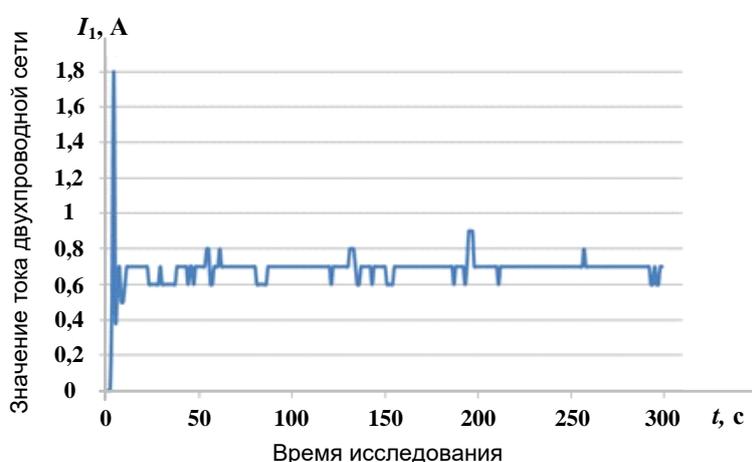


Рис. 4. Характер изменения тока при питании от двухпроводной электрической сети одиночного компьютера

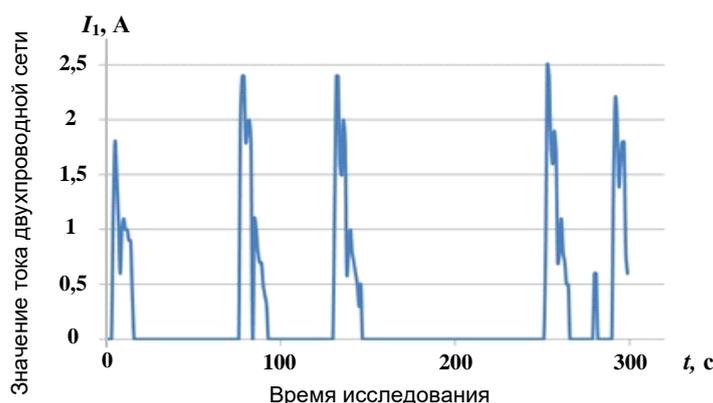


Рис. 5. Характер изменения тока при питании от двухпроводной электрической сети одиночного принтера

На рис. 5 видно, что при включении принтера в электрическую сеть происходит резкий бросок тока от $I_{1(np)} = 1,7$ А до $I_{1(np)} = 2,5$ А продолжительностью, примерно, 6-10 секунд. На рис. 6 показан характер изменения тока при

питании от двухпроводной электрической сети совместно компьютера и принтера.

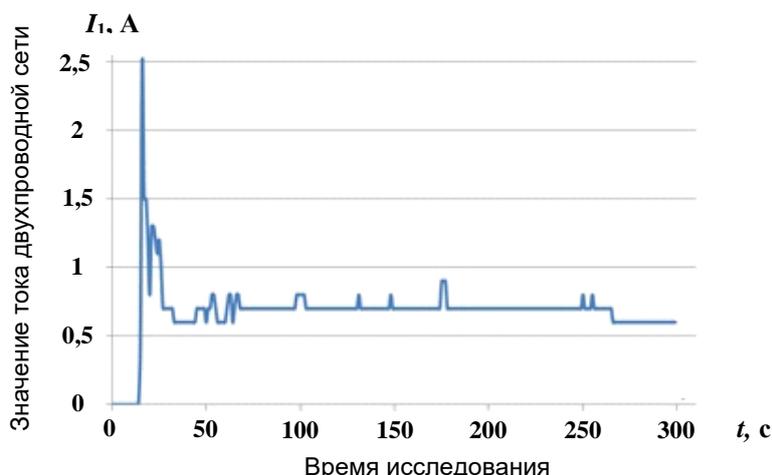


Рис. 6. Характер изменения тока при питании от двухпроводной электрической сети совместно компьютера и принтера

Из рис. 6 видно, что при питании от двухпроводной электрической сети совместно компьютера и принтера наблюдается сложный характер потребляемого тока, отражающий как импульсную нагрузку принтера, так и значение установившегося тока компьютера с отмеченными ранее для них особенностями.

Для определения состава (спектра) высших гармоник тока в электрической сети питания: отдельно компьютера, отдельно принтера и совместного питания компьютера и принтера, были получены осциллограммы мгновенных значений токов (напряжений). Для наглядности на рис. 7 приведены осциллограммы мгновенных значений тока ($I_0 = 2,5 \text{ A}$) и напряжения ($U_0 = 231,7 \text{ B}$) в двухпроводной сети питания совместно компьютера и принтера.

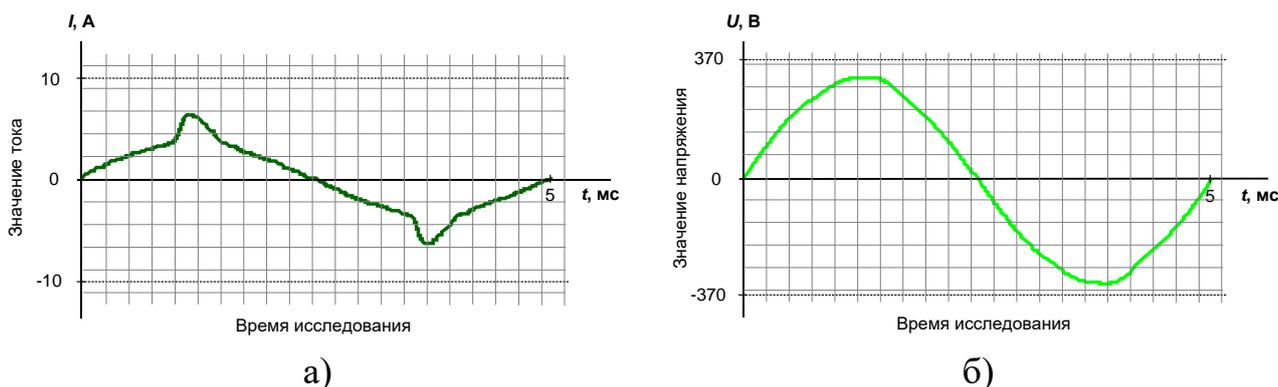
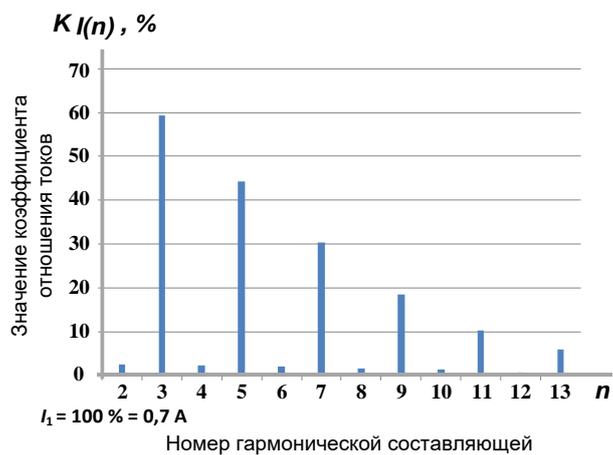
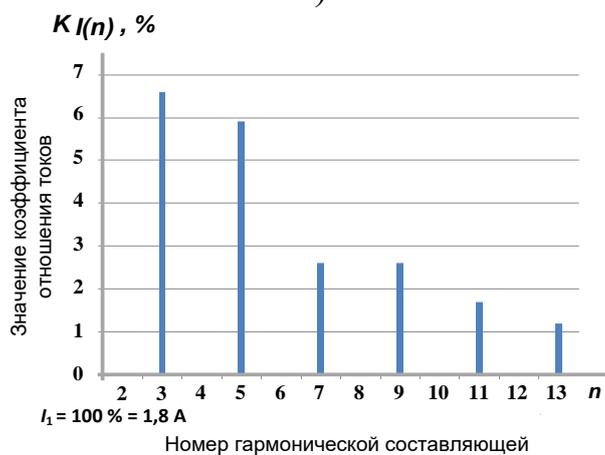


Рис. 7. Осциллограммы мгновенных значений в двухпроводной сети питания (50,01 Гц) совместно компьютера и принтера: а) тока ($I_0 = 2,5 \text{ A}$); б) напряжения ($U_0 = 231,7 \text{ B}$)

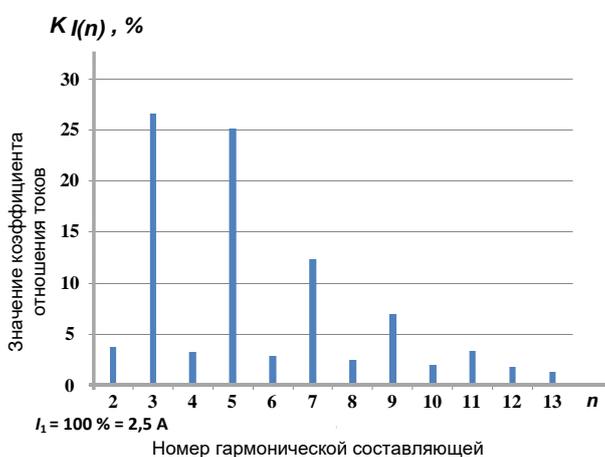
Результаты исследований ВГ токов в сети питания как отдельно компьютера и принтера, так и при их совместном питании, представленные в виде коэффициентов n -х гармонических составляющих $K_{I(n)}$, %, показаны на рис. 8.



а)



б)



в)

Рис. 8. Коэффициенты n -х гармонических составляющих тока $K_{I(n)}$, %, в двухпроводной электрической сети: а) рабочий режим компьютера ($I_1 = 100\% = 0,7\text{ A}$); б) рабочий режим принтера ($I_1 = 100\% = 1,8\text{ A}$); в) режим совместной работы компьютера и принтера ($I_1 = 100\% = 2,5\text{ A}$)

Из рис. 8 (а, б, в) видно, что изменения токов высших гармоник в проводе питания компьютера, принтера, совместного питания компьютера и принтера, имеют нелинейный характер, а их значения, в общем виде, могут быть аппроксимированы выражениями:

- при $I_1 = 100 \% = 0,7 \text{ А}$ в экспоненциальном виде:

$$K_{I,n}, \% = 131,26 e^{-0,2285 n}; \quad (R^2 = 0,99); \quad (5)$$

$$I_n, \text{ А} = 0,9186 e^{-0,2283 n}; \quad (R^2 = 0,9899); \quad (6)$$
 или в логарифмическом виде:

$$K_{I,n}, \% = -36,914 \ln n + 100,71; \quad (R^2 = 0,9974); \quad (7)$$

$$I_n, \text{ А} = -0,2583 \ln n + 0,7049; \quad (R^2 = 0,9974); \quad (8)$$

- при $I_1 = 100 \% = 1,8 \text{ А}$ в экспоненциальном виде:

$$K_{I,n}, \% = 38,706 e^{-0,3 n}; \quad (R^2 = 0,7687); \quad (9)$$

$$I_n, \text{ А} = 0,7009 e^{-0,301 n}; \quad (R^2 = 0,7713); \quad (10)$$
 или в логарифмическом виде:

$$K_{I,n}, \% = -35,168 \ln n + 76,582; \quad (R^2 = 0,7406); \quad (11)$$

$$I_n, \text{ А} = -0,6331 \ln n + 1,3786; \quad (R^2 = 0,7407); \quad (12)$$

- при $I_1 = 100 \% = 2,5 \text{ А}$ в экспоненциальном виде:

$$K_{I,n}, \% = 114,37 e^{-0,3289 n}; \quad (R^2 = 0,971); \quad (13)$$

$$I_n, \text{ А} = 2,9003 e^{-0,301 n}; \quad (R^2 = 0,9699); \quad (14)$$
 или в логарифмическом виде:

$$K_{I,n}, \% = -36,671 \ln n + 87,005; \quad (R^2 = 0,9046); \quad (15)$$

$$I_n, \text{ А} = -0,9173 \ln n + 2,1795; \quad (R^2 = 0,9053); \quad (16)$$

где $n = 1, 3, 5, 7, 9, 11, 13$ – порядковый номер учитываемых гармоник тока; $K_{I,n}, \%$ коэффициенты отношения токов высших гармоник к току основной частоты учитываемого порядка в процентах (%); $I_n, \text{ А}$ – значения тока основной частоты и токов высших гармоник учитываемого порядка в амперах; R^2 – коэффициент, который характеризует достоверность аппроксимации.

При изменении тока основной частоты соотношения токов высших гармоник будут определяться, в частности, выражениями (6, 8) при $I_1 = 100 \% = 0,7 \text{ А}$, выражениями (10, 12) при $I_1 = 100 \% = 1,8 \text{ А}$, выражениями (14, 16) при $I_1 = 100 \% = 2,5 \text{ А}$.

Появление четных гармоник в спектрах, показанных на рис. 8 (а, в), свидетельствует о несимметрии относительно оси положительной и отрицательной гармонических полуволн, но учитывая, что они имеют другой (линейный) характер и незначительны по отношению к нечетным гармоникам, то ими можно пренебречь. Для оценки условий электромагнитной совместимости в таблице 4 показаны значения высших гармоник тока для рассмотренных условий питания от электрической сети устройств компьютерной техники и допустимые по требованиям ГОСТ Р 51317.3.2-1999 (МЭК 61000-3-2-95) для технических средств (ТС) класса А уровни высших гармоник токов $I_n, \text{ А}$, $I_n, \%$, нечетного порядка: $n = 3, 5, 7, 9, 11, 13$.

Таблица 4 – Токи высших гармоник в проводе питания компьютера и принтера и их сравнение с нормами ГОСТ Р 51317.3.2-1999 (для ТС класса А)

№ гармоник тока, n	Нормируемые по ГОСТ 51317.3.2, $I_{n,норм}, A$	Компьютер		Принтер		Компьютер и принтер	
		$I_n, \%$	I_n, A	$I_n, \%$	I_n, A	$I_n, \%$	I_n, A
1	16	100	0,7	100	1,8	100	2,5
2	1,08	2,6	0,018	0	0	3,8	0,095
3	2,3	59,3	0,415	6,6	0,119	26,6	0,665
4	0,43	2,5	0,017	0	0	3,3	0,082
5	1,14	44,3	0,31	5,9	0,106	25,1	0,653
6	0,3	2,1	0,014	0	0	2,9	0,072
7	0,77	30,4	0,213	2,6	0,047	12,4	0,31
8	0,43	1,7	0,011	0	0	2,5	0,065
9	0,4	18,5	0,13	2,6	0,047	7	0,175
10	0,34	1,5	0,01	0	0	2	0,05
11	0,33	10,4	0,073	1,7	0,031	3,4	0,085
12	0,29	0,8	0,005	0	0	1,8	0,045
13	0,21	6	0,042	1,2	0,021	1,3	0,032

Примечание: жирным шрифтом отмечены значения, превышающие нормы ЭМП.

Из таблицы 4 следует, что установившийся режим совместной работы компьютера и принтера полностью удовлетворяет требованиям ГОСТ Р 51317.3.2-1999 (МЭК 61000-3-2-95) по высшим гармоникам токов.

Исследования уровней и спектров высших гармоник тока в электрической сети вводов питания компьютерной техники офисного здания

В офисных зданиях крупных компаний используется большое количество компьютеров, установленных в одном помещении, как было показано ранее. Для электроснабжения компьютеров и дополнительного к ним электрооборудования (принтеров, ксероксов и др.) используется группа вводов. В качестве примера, на рис. 9 показана схема учетно-группового щитка для офисных помещений с учетом вида электроприемников (компьютеров и т.д.), подключаемых к однофазным сетям трехфазной системы электроснабжения офисного здания.

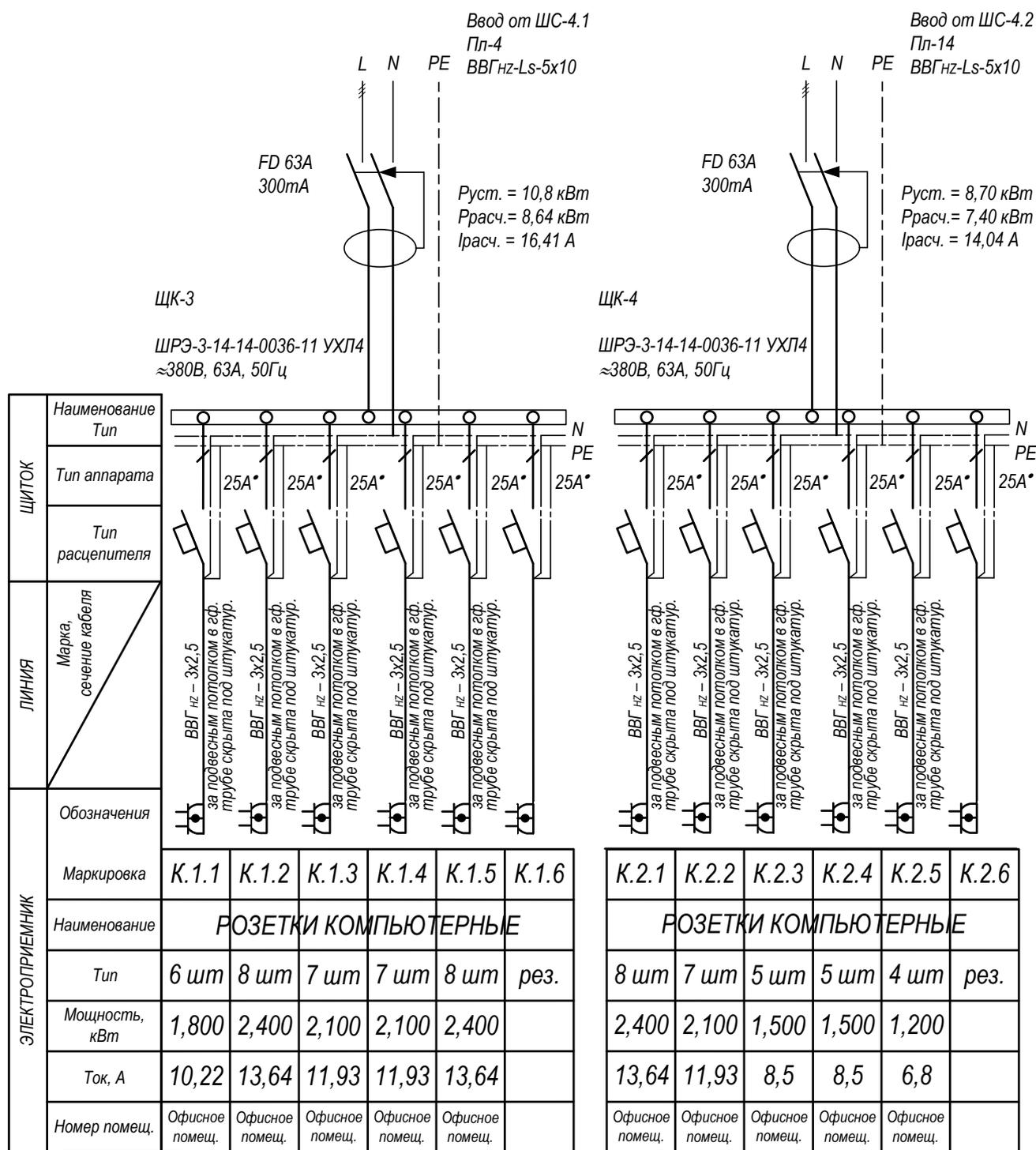


Рис. 9. Схема учетно-группового щитка для офисных помещений с учетом вида подключаемых электроприемников

Экспериментальные исследования, проведенные на вводах системы электроснабжения офисных помещений с компьютерной техникой, показывают, что характер токов, потребляемых из электрической сети остается нелинейным (рис. 10).

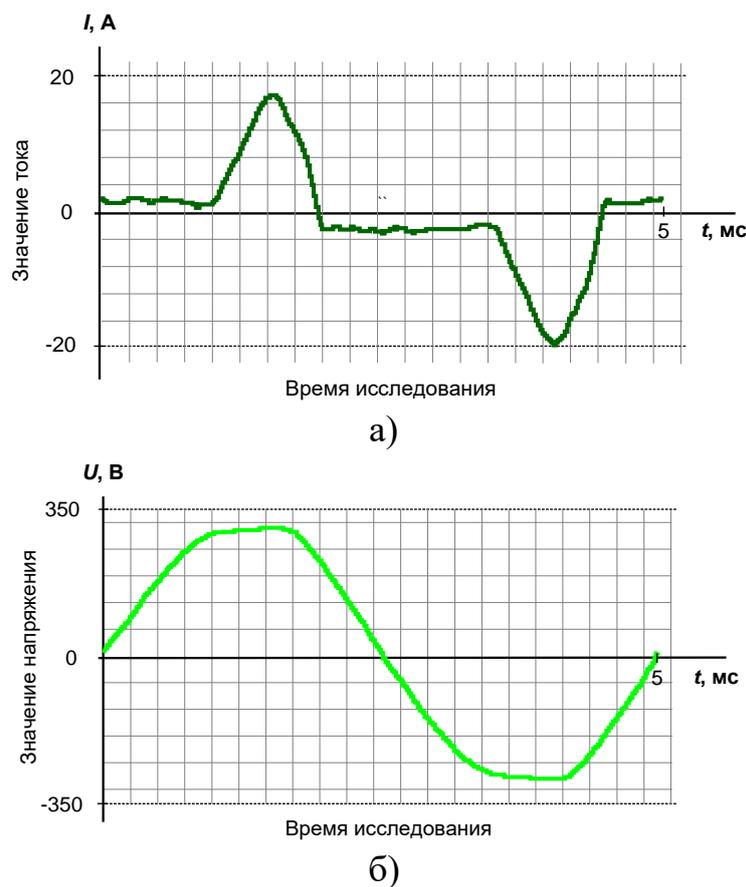


Рис. 10. Осциллограммы мгновенных значений на одном из вводов двухпроводной системы электроснабжения (50,01 Гц) офисного помещения с компьютерами: а) тока ($I_0 = 7,9$ А); б) напряжения ($U_0 = 231,6$ В)

При этом, текущие значения токов (нагрузки) промышленной частоты (50 Гц) в системе электроснабжения по вводам питания указанных электроприемников, как показано на рис. 11, имеют переменный (случайный) характер.

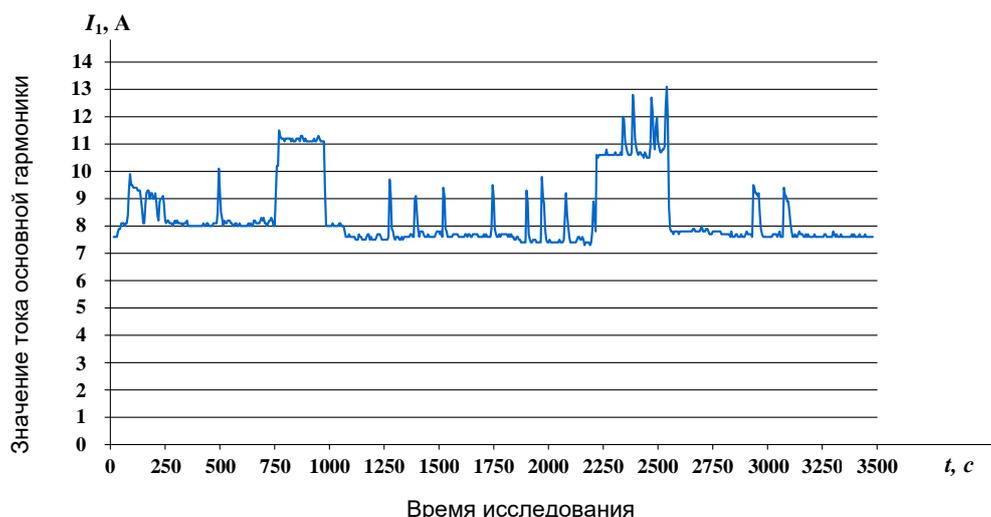


Рис. 11. Значения тока основной гармоники (50 Гц) I_1 , А нагрузки по вводам для помещения (этажа) с компьютерами офисного здания

Переменный характер токов по вводам нагрузки помещений по этажам офисных зданий, вероятно, определяется подключением электроприемников с непродолжительным циклом работы, например, принтеров и др.

Следует отметить, что характер спектров токов высших гармоник по вводам помещения с компьютерами офисного здания, как показано на рис. 12 (а, б, в) (для продолжительных участков), изменяется и зависит от величины тока основной частоты.

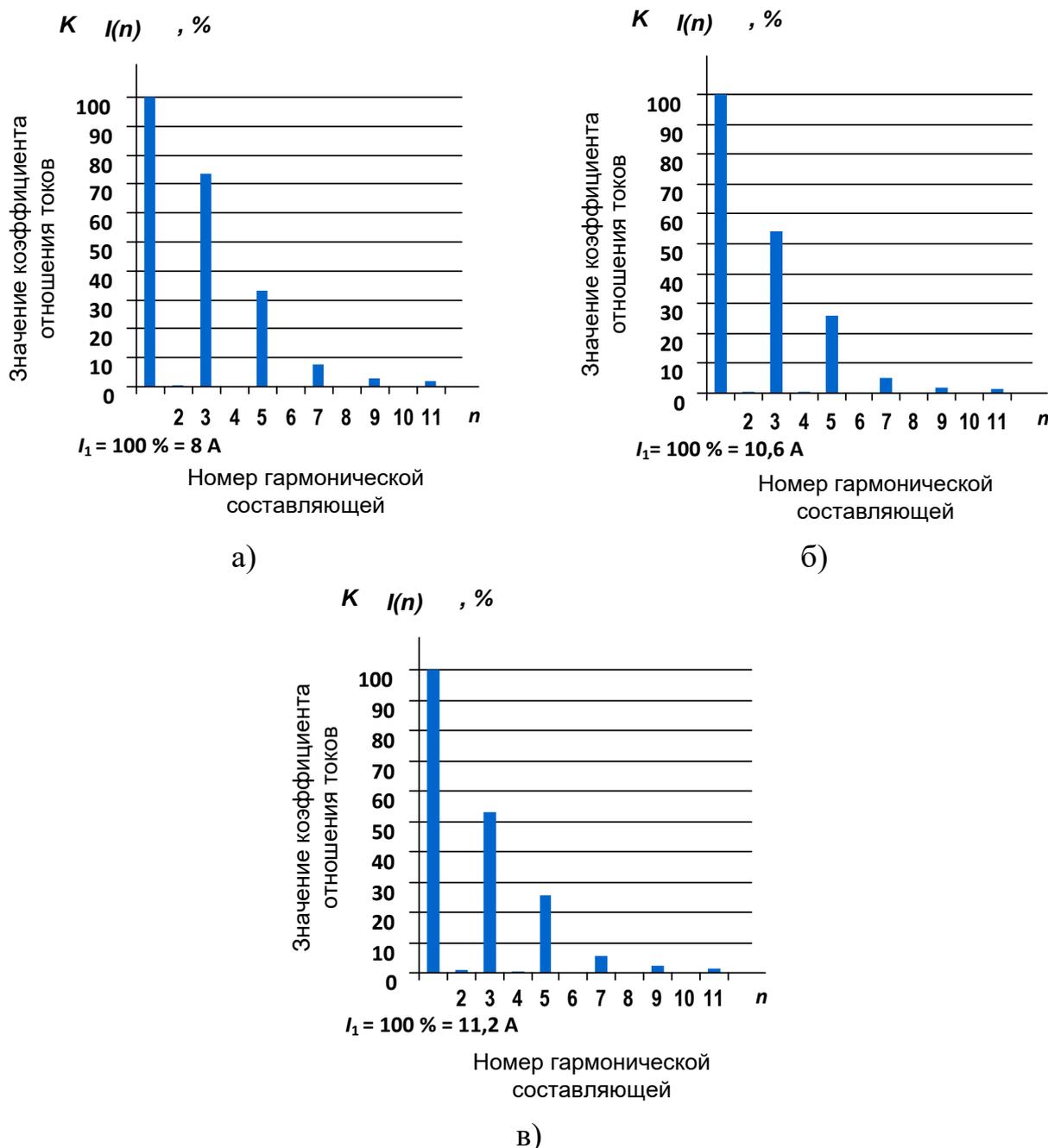


Рис. 12. Коэффициенты n -х гармонических составляющих тока $K_{I(n)}, \%$, на вводах помещения (этажа) с компьютерами офисного здания при различных значениях токов первой гармоники (основной частоты): а) $I_1 = 100\% = 8,0 \text{ A}$; б) $I_1 = 100\% = 10,6 \text{ A}$; в) $I_1 = 100\% = 11,2 \text{ A}$

Из рис. 12 (а, б, в) видно, что для вводов помещения (этажа) с компьютерами офисного здания, характерными (доминирующими) являются токи высших гармоник порядков $n = 3, 5, 7$. Изменения токов высших гармоник на вводах помещения (этажах) с компьютерами офисного здания могут быть аппроксимированы выражениями:

- при $I_1 = 100 \% = 8,0$ А в экспоненциальном виде:

$$K_{I, n}, \% = 201,03 e^{-0,4226 n}; \quad (R^2 = 0,9173); \quad (17)$$

$$I_n, \text{ А} = 16,116 e^{-0,4230 n}; \quad (R^2 = 0,9168); \quad (18)$$

- или в логарифмическом виде:

$$K_{I, n}, \% = -46,239 \ln n + 107,35; \quad (R^2 = 0,9152); \quad (19)$$

$$I_n, \text{ А} = -3,7005 \ln n + 8,588; \quad (R^2 = 0,9153); \quad (20)$$

- при $I_1 = 100 \% = 10,6$ А в экспоненциальном виде:

$$K_{I, n}, \% = 199,03 e^{-0,48 n}; \quad (R^2 = 0,9435); \quad (21)$$

$$I_n, \text{ А} = 21,147 e^{-0,4802 n}; \quad (R^2 = 0,9432); \quad (22)$$

- или в логарифмическом виде:

$$K_{I, n}, \% = -48,036 \ln n + 102,19; \quad (R^2 = 0,9922); \quad (23)$$

$$I_n, \text{ А} = -5,0913 \ln n + 10,031; \quad (R^2 = 0,9922); \quad (24)$$

- при $I_1 = 100 \% = 11,2$ А в экспоненциальном виде:

$$K_{I, n}, \% = 193,53 e^{-0,4715 n}; \quad (R^2 = 0,9515); \quad (25)$$

$$I_n, \text{ А} = 21,62 e^{-0,4705 n}; \quad (R^2 = 0,9519); \quad (26)$$

- или в логарифмическом виде:

$$K_{I, n}, \% = -47,998 \ln n + 101,82; \quad (R^2 = 0,9946); \quad (27)$$

$$I_n, \text{ А} = -5,3734 \ln n + 11,402; \quad (R^2 = 0,9947); \quad (28)$$

где $n = 3, 5, 7$ – порядковый номер учитываемых гармоник тока; $K_{I, n}, \%$ коэффициенты отношения токов высших гармоник к току основной частоты учитываемого порядка в процентах (%); $I_n, \text{ А}$ – значения тока основной частоты и токов высших гармоник учитываемого порядка в амперах; R^2 – коэффициент, который характеризует достоверность аппроксимации.

При изменении тока основной частоты соотношения токов высших гармоник будут определяться, в частности, выражениями (18, 20) при $I_1 = 100 \% = 8,0$ А, выражениями (22, 24) при $I_1 = 100 \% = 10,6$ А, выражениями (26, 28) при $I_1 = 100 \% = 11,2$ А.

Представляется целесообразным также рассмотреть значения токов высших гармоник по вводам помещения (этажа) с компьютерами офисного здания с позиции соответствия их требованиям ГОСТ Р 51317.3.2-1999 (для ТС класса А), так как для рассматриваемого случая токи первой гармоники (основной частоты) не превышают: $I_1 = 16$ А. С этой целью значения токов высших гармоник для установившихся (продолжительных) участков реализации значений тока основной гармоники $I_1, \text{ А}$, нагрузки по вводам для помещения с компьютерами офисного здания, показанной на рис. 11, сведены в таблице 5.

Таблица 5 – Токи высших гармоник по вводам помещения (этажа)
с компьютерами офисного здания и их сравнение с нормами
ГОСТ Р 51317.3.2-1999 (для ТС класса А)

№ гармоник тока, N	Нормируемые по ГОСТ 51317.3.2, $I_{n,норм}$, А	I_n , %	I_n , А	Допустимость тока, I_n , А	I_n , %	I_n , А	Допустимость тока, I_n , А	I_n , %	I_n , А	Допустимость тока, I_n , А
		рис. 12 а			рис. 12 б			рис. 12 в		
1	16	100	8,0	Доп.	100	10,6	Доп.	100	11,2	Доп.
3	2,3	73,4	5,87	Недоп.	54,0	5,72	Недоп.	52,9	5,92	Недоп.
5	1,14	33	2,64	Недоп.	26	2,76	Недоп.	25,5	2,86	Недоп.
7	0,77	7,8	0,62	Доп.	5,2	0,55	Доп.	5,5	0,62	Доп.
9	0,4	3,1	0,25	Доп.	1,7	0,18	Доп.	2,3	0,26	Доп.
11	0,33	1,8	0,14	Доп.	1,6	0,17	Доп.	1,4	0,16	Доп.
13	0,21	4,7	0,38	Недоп.	4,3	0,46	Недоп.	3,6	0,40	Недоп.

Из таблицы 5 видно, что при питании нелинейной нагрузки на вводах помещений с компьютерной техникой офисного здания требования ГОСТ Р 51317.3.2-1999 (для ТС класса А), в основном, не выполняются для токов высших гармоник порядков: $n = 3$ и 5 , что, в принципе, предполагает в этих точках системы электроснабжения офисного здания установку для них ограничительных фильтров.

Основные мероприятия по обеспечению электромагнитной совместимости в кабельных каналах и в системах связи

Компьютерные электронные и электрические устройства, как правило, удалены друг от друга, их компоненты связаны с сетью проводами питания, а между собой – сигнальными проводами, линиями управления и передачи данных в соответствии с предназначением устройства.

Основными частями связи между ними являются компьютерные сети, а также кабели питания компьютерных, электронных устройств и кабели питания силовой нагрузки офисных зданий, проложенных в кабельных каналах.

Основными требованиями при прокладке кабелей с позиции обеспечения электромагнитной совместимости являются следующие [9]:

- не вызывать нарушений нормальной работы, вызванных внешними помехами (токами молнии, замыканиями на землю, полями);
- предотвращать влияние силовых кабелей энергоёмких потребителей (приводов с выпрямителями, сварочных аппаратов и т.д.) на измерительные, регулирующие, управляющие устройства через их систему питания, сигнальные провода, линии управления и передачи данных;

- исключать взаимные влияния сигнальных проводов, линий управления и передачи данных.

Исходя из этих требований по устранению влияния на линии, можно сформулировать ряд рекомендаций по прокладке кабелей в устройствах и кабельных каналах.

1. Необходимо скручивание пары проводов (прямого и обратного) для сигналов. Это означает, что нельзя при многих сигналах использовать общий обратный провод (жилу или экран кабеля, корпус). Тем самым симметрируются емкости связей параллельных линий и предотвращается образование проводящих контуров. Если кабель для измерений, регулирования и управления, состоящий из отдельных экранированных пар проводов, экраны которых с одной стороны связаны с системой опорного потенциала, имеет металлическую защитную оболочку, то она заземляется с двух сторон и может быть использована для защиты от воздействия молнии. При этом экран может отсутствовать, если входные и выходные элементы электронного устройства достаточно помехоустойчивы. Например, двойные линии датчиков и систем регулирования обычно не экранируются.

2. Линии передачи данных и сигналов следует размещать на возможно большем расстоянии (более 10 см) от токовых цепей, силовых кабелей и проводов, в которых в нормальных режимах могут возникать быстрые изменения тока или напряжения.

3. Там, где существуют сильные низкочастотные помехи, сигнальные провода и линии передачи данных следует прокладывать в трубах или шлангах из ферромагнитной стали, которые одновременно защищают провода и кабели от механических повреждений. В пределах здания рекомендуется прокладывать кабели и провода в заземленных и закрываемых кабельных каналах, элементы которых надежно соединены электрически друг с другом. Каналы могут иметь несколько камер (например, три), в которых раздельно прокладываются несущие помехи и чувствительные к помехам кабели, например, в камере около стойки прокладываются силовые кабели 380 В, в средней камере – кабели управления 220 В, в крайней камере – сигнальные кабели.

4. Кабели, выходящие из здания и пересекающие некоторое закрытое пространство, должны иметь внешний экран, рассчитанный на пропускание сильного тока, или их следует прокладывать в трубчатых металлических каналах или в железобетонных каналах с электрически объединенными крышками.

5. Для предотвращения проникновения синфазных помех по проводам в сигнальный контур, необходимо выполнять разделение потенциалов при помощи электромагнитных, электромеханических или электрооптических устройств, которое осуществляется во входных и выходных цепях электронных промышленных устройств или в отдельных блоках.

Заключение

В результате исследований установлено:

- коэффициент искажения синусоидальности кривой фазного тока $K_{I, n=2-40}$, %, по токам высших гармоник порядка $n = 2...40$ составляет $K_{I, n=2-40} = 78,5$ %;
- при увеличении числа подключаемых к электрической сети компьютеров (от 1-го до 5-ти) гармонический спектр токов остается практически неизменным по сравнению с нормативным, но требования ГОСТ Р 51317.3.2 – 1999 (для ТС класса А) при этом нарушаются уже при 5-ти компьютерах по значениям гармоник тока: $n = 5$ и $n = 7$;
- искажения напряжения, создаваемые в двухпроводной сети нагрузкой от 5-ти компьютеров, не приводят к нарушению требований ГОСТ Р 54149 – 2010 по высшим гармоникам напряжения;
- изменения токов высших гармоник в проводе питания компьютера, принтера, совместного питания компьютера и принтера, имеют нелинейный характер и полностью удовлетворяет требованиям ГОСТ Р 51317.3.2 – 1999 (МЭК 61000-3-2-95) по высшим гармоникам токов;
- при питании нелинейной нагрузки на вводах помещений с компьютерной техникой офисного здания требования ГОСТ Р 51317.3.2 – 1999 (для ТС класса А), не выполняются для токов высших гармоник порядков $n = 3$ и 5 .

В работе сформулированы основные рекомендации по организации мероприятий обеспечения электромагнитной совместимости в кабельных каналах и в системах связи.

Среди методов решения физических и прикладных технических задач можно выделить экспериментальные и расчетно-теоретические. Следует отметить, что в задачах электромагнитной совместимости и информационной безопасности необходим анализ поля в непосредственной близости от технического средства с учетом реальных особенностей его размещения и наличия других технических средств, что накладывает известные трудности на корректное проведение эксперимента и воспроизводимость результатов, полученных эмпирическим путем. Это обстоятельство, очевидно, и обуславливает повышенный интерес к созданию методик расчетного прогнозирования электромагнитной обстановки. Поэтому, в дальнейшем, считаем целесообразно рассмотреть вопросы прогноза электромагнитного поля, создаваемого техническими средствами на основе современного численного метода.

Литература

1. ГОСТ Р 51317.3.2-99 (МЭК 61000-3-2-95). Совместимость технических средств электромагнитная. Эмиссия гармонических составляющих тока техническими средствами с потребляемым током не более 16А (в одной фазе). Нормы и методы испытаний. – М.: ИПК, Издательство стандартов, 2000. – 24 с.

2. Rinas D., Ahl P., Frei S. PCB current identification based on near-field measurements using preconditioning and regularization // *Advances in Radio Science*. 2016. No. 14. P. 121-127. doi: 10.5194/ars-14-121-2016.

3. Zhu B., Lu J., Li E. Electromagnetic radiation study of Intel Dual Die CPU with heatsink // *Proceeding of the 8th International Symposium on Antennas, Propagation and EM Theory*. (Kunming, 2–5 Nov. 2008). – Kunming, China, 2008. P. 949-952. doi: 10.1109/isape.2008.4735376.

4. Tosaka T., Taira K., Yamanaka Y., Nishikata A., Hattori M. Feasibility study for reconstruction of information from near field observations of the magnetic field of laser printer // *Proceeding of the 17th International Zurich Symposium on Electromagnetic Compatibility*. (Singapore, 27 Feb.–3 Mar. 2006). – Singapore, 2006. P. 630-633. doi:10.1109/emczur.2006.215013.

5. Филиппович А. Г. Моделирование побочных электромагнитных излучений ПЭВМ методом интегральных уравнений // *Доклады БГУИР*. 2012. №5 (67). С. 28-34.

6. Борботько Т. В., Колбун Н. В., Лыньков Л. М. Электромагнитные излучения средств телекоммуникаций. Методы защиты, безопасность организма человека. – Минск: Тонпик, 2004. – 406 с.

7. Бузов Г. А., Калинин С. В., Кондратьев А.В. Защита от утечки информации по техническим каналам. – М.: Горячая линия - Телеком, 2005. – 415 с.

8. ГОСТ Р 54149-2010. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – М.: ИПК Издательство стандартов, 2012. – 20 с.

9. Хабигер Э. Электромагнитная совместимость. Основы ее обеспечения в технике. – М.: Энергоатомиздат, 1995. – 293 с.

References

1. State Standard R 51317.3.2-99. Electromagnetic compatibility of technical equipment. The emission of harmonic components of the current is not more than 16A (in one phase). Standards and test methods. Moscow, IPK Publishing House of Standards, 2000. 24 p. (in Russian).

2. Rinas D., Ahl P., Frei S. PCB current identification based on near-field measurements using preconditioning and regularization. *Advances in Radio Science*, 2016, no. 14, pp. 121-127. doi: 10.5194/ars-14-121-2016.

3. Zhu B., Lu J., Li E. Electromagnetic radiation study of Intel Dual Die CPU with heatsink. *Proceeding of the 8th International Symposium on Antennas, Propagation and EM Theory*. Kunming, China, 2008, pp. 949-952. doi: 10.1109/isape.2008.4735376.

4. Tosaka T., Taira K., Yamanaka Y., Nishikata A., Hattori M. Feasibility study for reconstruction of information from near field observations of the magnetic field of laser printer. *Proceeding of the 17th International Zurich Symposium on Electromagnetic Compatibility*. Singapore, 2006, pp. 630-633. doi: 10.1109/emczur.2006.215013.

5. Filippovich A. G. Modeling of side electromagnetic radiation of a personal computer by the method of integral equations. *Doklady BGUIR*, 2012, no. 5, pp. 28-34 (in Russian).

6. Borotko T. V., Kolbun N. V., Lunkov L. M. *Jelektromagnitnye izlucheniya sredstv telekommunikacij. Metody zashhity, bezopasnost' organizma cheloveka* [Electromagnetic radiation of telecommunications. Methods of protection, human body safety]. Minsk, Tonpik Publ., 2004, 406 p. (in Russian).

7. Buzov G. A., Kalinin S. V., Kondratiev A. V. *Zashhita ot utechki informacii po tehničeskim kanalām* [Protection against information leakage through technical channels]. Moscow, Gorjachaja linija - Telekom Publ., 2005, 415 p. (in Russian).

8. State Standard R 54149-2010. Electric Energy. Electromagnetic compatibility of technical equipment. Quality standards for electric energy in general power supply systems. Moscow, IPK Publishing House of Standards, 2012. 20 p. (in Russian).

9. Habiger E. *Jelektromagnitnaja sovmestimost'. Osnovy ee obespechenija v tehnike* [Electromagnetic compatibility. Fundamentals of its provision in technology]. Moscow, Jenergoatomizdat Publ., 1995, 293 p. (in Russian).

Статья поступила 18 ноября 2019 г.

Информация об авторах

Викторов Владимир Александрович – соискатель ученой степени кандидата технических наук. Старший научный сотрудник научно-исследовательского центра. Военная академия связи имени Маршала Советского Союза С. М. Буденного. Область научных интересов: сбор и обработка информации, радиомониторинг, технология блокчейн, численные методы, системы связи с кодовым разделением каналов. E-mail: vova7dima@gmail.com

Мешалкин Валентин Андреевич – кандидат технических наук, доцент. Старший научный сотрудник научно-исследовательского центра. Военная академия связи имени Маршала Советского Союза С. М. Буденного. Область научных интересов: системы связи и управления, активные фазированные антенные решетки, электромагнитная совместимость технических средств, электромагнитная экология, педагогика, цифровая обработка сигналов, электродинамика, побочные электромагнитные излучения и наводки. E-mail: vameshalkin@rambler.ru

Адрес: 194064, Россия, г. Санкт-Петербург, Тихорецкий пр., д. 3.

Салтыков Валентин Михайлович – доктор технических наук, профессор. Почетный работник высшего профессионального образования Российской Федерации. Действительный член (академик) Международной академии наук по экологии и безопасности жизнедеятельности. Петербургский энергетический институт повышения квалификации. Область научных интересов: электромагнитная совместимость в электроэнергетических системах и электроустановках, электромагнитная безопасность в окружающей среде. E-mail: vmsaltykov@rambler.ru

Адрес: 196135, Санкт-Петербург, Авиационная ул., 23.

The research of the levels and spectra of higher harmonics of current in electrical power networks of computer equipment and the basic activities of the electromagnetic compatibility provision

V. A. Viktorov, V. A. Meshalkin, V. M. Saltykov

Purpose of the work. Nowadays, an office personal computer is the main technical device and the source of spurious electromagnetic radiation in a wide frequency range. It is proved that such devices can adversely affect human health. Also, an electromagnetic channel of information leakage due to spurious electromagnetic radiation is formed. The main components of a personal computer are: a system unit, a variety of devices to enter and withdraw of information (a keyboard, disk drives, a printer, a scanner), as well as a device for visual information display. All these elements of a personal computer form a complex electromagnetic environment when a person works in an office. It should be noted that the number of computers and the intensity of their use increase, and the electromagnetic field from computer equipment becomes a very significant factor in the overall electromagnetic environment and electromagnetic safety. That's why, tasks, related to the instrumentally analysis of levels and spectral components of spurious electromagnetic emissions from computer equipment arise regularly. **The purpose of the research** is to analyze the levels and spectra of higher harmonics of current in electrical power networks of computer equipment and to formulate the basic recommendations of the activities organization for ensuring electromagnetic compatibility in cable channels and communication systems. **Methods.** Level measurements and higher harmonics spectra analysis with the use of the SA 8334 power quality analyzer in strict accordance with the device manual are carried out. **Novelty.** The measurement results of the levels and higher harmonics spectra of current in an electric network with separate and combined power supply of a computer and printer, as well as in a power inputs network for office computer equipment are presented in the paper. The values of the levels of the combined work of two to five computers are obtained. Analytical models are obtained. The models approximate: a) the values of the basic frequency current and the higher harmonics currents of the accounted order; b) the coefficients of the ratio of the higher harmonics currents to the basic frequency current of the accounted order. To assess the accuracy of each approximation, a confidence coefficient is presented. **The results** of our experimental research are presented in the tables and graphics. They are compared with the threshold limit values of the State Standard R 5131.3.2-99 to identify irregularities of established requirements. **The practical relevance of the research.** Obtained results allow to assess the level values numerically, and to analyze the higher harmonics spectra of current in the power supply network of computer equipment. Also results allow to estimate the exceedance of the threshold limit values regulated by the State Standard R 5131.3.2-99. The basic recommendations to ensure electromagnetic compatibility in cable channels and communication systems are formulated.

Keywords: electromagnetic environment, electromagnetic field, electromagnetic safety, spectra, higher current harmonics, electromagnetic compatibility.

Information about Authors

Vladimir Aleksandrovich Viktorov – Doctoral Student. Senior Research Officer of Research Center. Military Communications Academy named after the Marshal of the Soviet Union S. M. Budenny. Field of research: collecting and processing of information, radiomonitoring, blockchain technology, numerical methods, code division multiple access communication systems. E-mail: vova7dima@gmail.com.

Valentin Andreevich Meshalkin – Ph.D. of Engineering Sciences, Associate Professor. Senior Research Officer of Research Center. Military Communications Academy named after the Marshal of the Soviet Union S. M. Budenny. Field of research: communication and control systems, active phased array antennas, electromagnetic compatibility of technical means, electro-magnetic ecology, pedagogy, digi-

tal signal processing, electro-dynamics, electromagnetic side radiation and interference. E-mail: vameshalkin@gmail.ru

Address: Russia, 194064, St. Petersburg, Tikhoretsky Ave., 3.

Valentin Mihailovich Saltykov – Dr. habil. of Engineering Sciences. Full Professor. The Honorary Worker of Higher Professional Education of the Russian Federation. Full Member (Academician) of the International Academy of Sciences on Ecology and Safety of Vital Functions. St. Petersburg energy Institute of advanced training. Field of research: electromagnetic compatibility in electric power systems and electrical installations, electromagnetic safety in the environment. E-mail: vmsaltykov@rambler.ru

Address: Russia, 196135, St. Petersburg, Aviation str., 23.