

УДК 621.391.823

С.А. Киракосян, В.Г. Галалу

ПОМЕХИ ПО ШИНАМ ЗАЗЕМЛЕНИЯ В СИСТЕМАХ ПРОМЫШЛЕННОЙ АВТОМАТИЗАЦИИ

Цель исследования: экспериментальная оценка уровня помех по шинам заземления на нескольких предприятиях. Выработка рекомендаций для монтажа датчиков и нормирующих усилителей в системах промышленной автоматизации. Рассмотрены основные схемы включения силовой сети на промышленных предприятиях. Показано, что лучшей является система TN-S, которую, к сожалению, трудно реализовать на предприятиях. Худший случай разводки питания – это системы TN-C и TN-C-S, которые встречаются в 90 % случаев. В соответствии с требованиями ПУЭ все оборудование должно быть обязательно подключено к шине заземления, что приводит к образованию множества точек и контуров заземления. Применение тиристорных преобразователей, преобразователей AC/DC, DC/DC, частотного электропривода, контактной сварки и т.д. приводит к появлению большого количества импульсных помех на шине заземления. Основная причина появления высокочастотных помех – это коммутационные процессы в перечисленных устройствах. Экспериментальная проверка показала, что даже на 10 метрах шины заземления могут наблюдаться постоянное напряжение до 100 мВ, переменное напряжение 50 Гц (400 Гц) – до 200 мВ и большое количество мощных импульсных помех с амплитудой до нескольких вольт. Наибольшее количество импульсных помех наблюдается в утренние часы при включении оборудования. Закон распределения импульсных помех близок к логарифмически-нормальному ($p=0,95$), часто наблюдаются отдельные импульсные помехи, амплитуда которых превышает 10σ ($p=0,01$). Самые большие амплитуды наблюдаются при совпадении помех от нескольких источников одновременно. Помехи по шине заземления для устройств обработки информации являются синфазными помехами. Экспериментальная проверка коэффициента подавления синфазных помех по шине заземления при помощи настроенного инструментального усилителя АМР02Е показала, что короткие импульсные помехи очень плохо подавляются, всего в 3–4 раза. Это приводит к сбоям АЦП и существенно снижает точность измерения физических величин.

Шина заземления; синфазные помехи; импульсные помехи; прецизионный инструментальный усилитель.

S.A. Kirakosyan, V.G. Galalu

NOISE ON THE GROUND BUS IN INDUSTRIAL AUTOMATION SYSTEMS

Research objective: an experimental assessment of noise level on ground buses at several enterprises. A development of recommendations for sensors and the precisions amplifiers installation in systems of industrial automation. The main power network inclusion schemes at the industrial enterprises have been considered. It has been shown that the best is the TN-S system which, unfortunately, is difficult for implementing at the enterprises. The worst case of breeding a power busses are the TN-C and TN-C-S systems which meet in 90 % of cases. According to requirements of industrial safety standards all equipment should be surely connected to the ground bus that leads to formation a lot of points and ground loops. The use of the thyristor converters, the AC/DC, DC/DC converters, the frequency electric drives, contact weldes, etc. leads to emergence of a large number of impulse noises on the ground bus. A basic reason of high-frequency noise emergence is switching processes in the listed devices. The experimental check has shown that even on 10 meter ground bus constant voltage to 100 mV, an alternating voltage 50 Hz (400 Hz) – to 200 mV and a large number of powerful impulse noises with up to several volts amplitude can be observed. The greatest number of impulse noises is observed in the morning when equipment turns on. The law of impulse noises distribution is close to logarithmic normal ($p=0,95$), separate impulse noises with amplitude exceeding 10σ ($p=0,01$) are often observed. The biggest amplitudes are observed at coincidence of noises from several sources at the same time. Noises on the ground bus are synphased noises for data processing units. The experimental check of suppression cophased noises coefficient on the ground bus by means of the adjusted tool amplifier АМР02Е has shown that short impulse noises are suppressed very badly, by only 5–10 times. It leads to failures of ADC and significantly reduces the measurement accuracy of physical quantities.

Ground bus; synphased interference; impulse noise; high accuracy instrumentation amplifier.

Введение. Совершенствование технологических процессов повышает требования к точности, надежности и быстродействию измерительных систем. Выполнение этих требований связано с преодолением определённых трудностей, среди которых особое место принадлежит помехам по шине заземления. Помехи, проникая на входы АЦП, приводят в лучшем случае к увеличению погрешностей измерений, а в худшем – к недопустимому искажению результатов измерения. Причем, в реальных условиях эксплуатации систем сбора данных трудно сразу определить, чем вызвано изменение измеряемой величины – самим технологическим процессом или воздействием помех. Следствием неправильного заземления являются: изредка появляющиеся сбои, повышенная погрешность измерения, зависание и медленная работа систем автоматизации [1–3]. В работах, посвящённых вопросам электромагнитной совместимости средств автоматизации [1–8] нет детального исследования уровней синфазных помех и законов распределения помех на шине заземления. Приведена статистика, что 40% сбоев в системах автоматизации вызвана помехами по шине заземления, однако не приведены уровни помех, приводящих к этим сбоям [4]. Известные рекомендации по подавлению помех на шине заземления [5], сводятся к применению изолирующих АЦП и усилителей, но реальные уровни помех в ней не представлены. В работах [6, 7] приведены данные по форме тока в нейтральном проводе в зависимости от количества подключённых персональных компьютеров, т.е. решается частная задача. Таким образом, рассматриваемая проблема является актуальной и нуждается в проведении тщательных измерений по шинам заземления.

Цель работы: экспериментальная оценка уровня помех по шинам заземления на нескольких предприятиях, определение основных источников помех, и выработка рекомендаций для монтажа датчиков и нормирующих усилителей в системах промышленной автоматизации. Научная новизна представленной работы заключается в определении основных источников высокочастотных помех по шинам заземления, соотношений между амплитудами импульсных и периодических помех, определении спектра и закона распределения амплитуд помех. Необходимые оценки могут быть получены только при многократных измерениях уровней помех по шинам заземления с применением всего имеющегося набора современных измерительных средств [3] (цифровых осциллографов GWInstek GDS-820C, Tektronix TDS2022B, TPS2012, Fluke 199C, систем сбора данных NI PXI) и аппарата математической статистики NI LabVIEW и STATISTICA Base.

Теория. Рассмотрим продольные помехи, представляющие собой разность потенциалов между точкой заземления источника сигнала (датчика) и точкой заземления измерительного устройства (входы АЦП). Такие помехи часто называют помехами общего вида или синфазными помехами.

Режим заземления нейтрали и открытых проводящих частей оборудования обозначается двумя буквами: первое обозначает режим нейтрали источника питания (силового трёхфазного трансформатора (6–10)/0,4 кВ), вторая – открытых проводящих частей оборудования. В обозначениях используют начальные буквы французских слов: Т (terre – земля) – заземлено; N (neutre – нейтраль) – присоединено к нейтрали источника питания; I (isolé) – изолировано. Тогда обозначение TN означает, что нейтраль источника глухо заземлена и корпуса оборудования присоединены к нейтральному проводу.

Режим TN может быть трех видов.

TN-C (англ. common) – нулевой и защитный проводники объединены на всем протяжении силовой проводки. Объединенный нулевой проводник называется PEN (англ. protective each, neutral – защитная земля, нейтраль).

TN-S (англ. separate – разделенный) – нулевой рабочий проводник N и защитный проводник PE разделены.

TN-C-S – нулевой рабочий и защитный проводники объединены на головных участках цепи в проводник PEN и далее разделены на проводники N и E.

Вид связи нейтрали с землей в значительной степени определяет уровень помех и электромагнитную совместимость устройств автоматизации в нормальных условиях работы и при коротком замыкании. Очевидно, что только одна схема TN-S обеспечивает минимальный уровень помех. К сожалению, в промышленных условиях чаще всего встречается схема TN-C-S, так как в соответствии с ПУЭ основной заземлитель всегда устраивается возле трансформаторной подстанции предприятия, и дополнительные заземлители устраиваются в каждом цеху предприятия, при удалении цеха более чем на 100 м от основного заземлителя [9].

Чаще всего шина заземления выполняется в виде открытой стальной шины сечением 30×4 мм или 40×4 мм, проложенной по внутреннему контуру промышленного здания. К этому контуру подключаются все металлические части или корпуса промышленного оборудования (резервуары, нагревательные печи, компрессоры и т.д.). Это делается с целью защиты обслуживающего персонала от поражения электрическим током. Силовая проводка, как правило, также ведется по внутреннему контуру здания и подводится непосредственно к оборудованию в металлических трубах. В случае если длина шины заземления превышает 100 м, устраиваются дополнительные заземлители. Таким образом, только в очень редких случаях встречается схема подключения сети TN-S, которая обеспечивает минимальный уровень помех. Чаще всего встречается схема TN-C-S (почти в 90 % случаев). Общее сопротивление шины заземления не должно превышать 0,1 Ом (в особых случаях 0,01 Ом) [2, 5, 10].

По нашему мнению, основной причиной появления высокого уровня помех на шине заземления в производственных условиях является использование объединенной шины заземления TN-C-S. Применение в системах промышленной автоматизации частотно-регулируемого электропривода, современных высокоэффективных преобразователей AC/DC, DC/DC приводит к появлению в нейтрали, и, следовательно, на шине заземления, мощных импульсных токов. Аналогичные выводы получены и в других работах [4–8, 11, 12].

Офисное оборудование (персональные компьютеры (далее – ПК), мониторы, принтеры, сканеры и т.д.), а также подавляющее большинство бытовой техники комплектуются импульсными источниками питания, которые потребляют токи на пике входного напряжения. Импульсное значение потребляемого тока для одного ПК достигает 2–5 А при общей потребляемой мощности 100–500 Вт. Ток в нейтрали определяется как векторная сумма от всех нагрузок, поэтому если от одной фазы питаются 10 компьютеров, то это приводит к большому импульсному потреблению тока (до 50 А) и появлению помехи на нейтральном проводе величиной в несколько вольт.

В преобразователях AC/DC, DC/DC для получения большого КПД используют мощные и быстродействующие коммутирующие устройства: тиристоры, полевые MOSFET транзисторы, силовые *p-n-p*-транзисторы и т.д. Все эти элементы обеспечивают большую крутизну нарастания токов нагрузки до 1000 А/мкс. Это приводит к появлению паразитных колебаний в нагрузке с частотами до 100 МГц и, соответственно, к появлению таких же колебаний в нейтральном проводе и шине заземления. Применяемые высокочастотные фильтры только несколько улучшают ситуацию, но не позволяют полностью избавиться от этих высокочастотных колебаний [13, 14]. Таким образом, шину заземления можно рассматривать как мощный коллектор и излучатель высокочастотных колебаний, которые действуют в основном на фронтах коммутирующих импульсов преобразователей DC/DC. Подавить такие колебания в нейтральном проводе чрезвычайно трудно.

Стандартная шина заземления 30×4 мм имеет удельное сопротивление $r_0=0,130$ МОм/м и удельную индуктивность $L_0=0,85$ мкГн/м, тогда на частоте 1 МГц участок заземления длиной $l_3=10$ м будет иметь сопротивление ($R = r_0 l_3$)

$R=1,3$ мОм, а индуктивное сопротивление составит ($X_L = \omega L = 2\pi f L_{0,3}$) $X_L = 53,4$ Ом. При таком значении реактивного сопротивления даже незначительные изменения высокочастотного тока в нейтральном проводе I и шине заземления приводят к появлению достаточно больших высокочастотных колебаний. Падение напряжения на отдельном участке заземления будет определяться величиной X_L и током I . Например, при токе $I=10$ мА, для нашего участка получим амплитуду помехи ($U_{XL} = X_L \cdot I$) $U_{XL} = 534$ мВ.

Экспериментальные данные. На рис. 1 представлена осциллограмма потребления тока одним ПК в рабочем режиме, импульс тока потребления достигает 4 А (сопротивление шунта $R=68$ мОм).

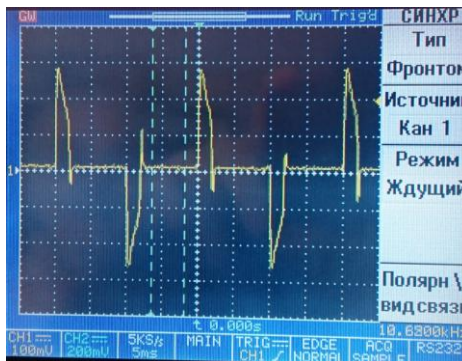


Рис. 1. Осциллограмма тока потребления одного рабочего ПК

На рис. 2 представлена более детальная осциллограмма одного импульса тока, на которой видны импульсные помехи от мощного источника с частотой 900 Гц. «Паразитные» импульсы могут составлять до 30% амплитуды основного импульса тока.

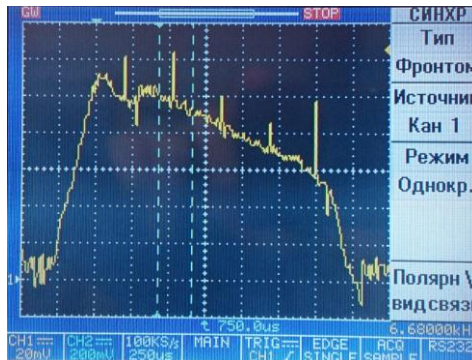


Рис. 2. Детальная осциллограмма тока потребления одного рабочего ПК

На рис. 3 представлена осциллограмма тока в нейтральном проводе для 5-и одновременно работающих ПК, подключенных к одной фазе питающего напряжения. Измерение производилось на омическом сопротивлении нейтрального провода равном $R=0,05$ Ом (медный провод 6 мм² длиной 2 м). Максимальная амплитуда тока составляет более 20 А.

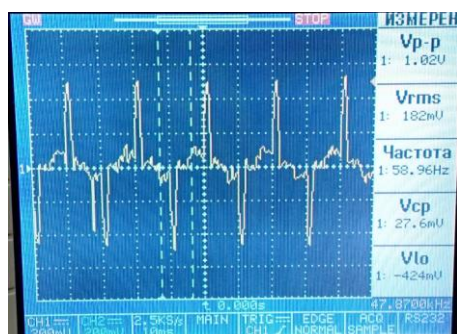


Рис. 3. Осциллограмма потребления тока на нейтрали с 5-ью включёнными ПК

На рис. 4 представлена осциллограмма высокочастотных колебаний в цепи нейтрального провода для ПК в ждущем режиме на шунте $R=68$ мОм, амплитуда импульсов тока составляет 1 А, частота паразитных колебаний равна 10 МГц.

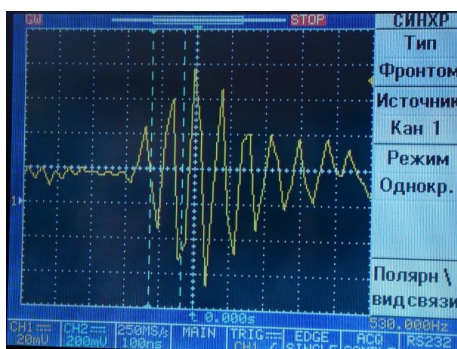


Рис. 4. Осциллограмма высокочастотных колебаний

Таким образом, в нейтральном проводе, а, следовательно, и в шине заземления формируется мощный источник высокочастотных колебаний, и шину можно рассматривать как коллектор для множества подключенных потребителей. Была проведена оценка уровня помех по шинам заземления на нескольких промышленных предприятиях и в научно-исследовательских учреждениях. Результаты измерений представлены в таблице 1. Здесь l_3 – это длина участка заземления, U_{Sp-p} – это амплитуда периодических помех (50 и 400 Гц) от пика до пика, U_{Pp-p} – импульсные помехи. Практически на всех исследуемых предприятиях применяется тип заземления TN-C-S и имеется множество точек заземления (самый худший случай).

Таблица 1

Показатели помех на разных предприятиях

Предприятие	l_3 , м	U_{Sp-p} , мВ	U_{Pp-p} , мВ	Спектр частот
Завод «Прибой»	14	10–20	256–332	1–2 МГц, 15 МГц
Лаборатория 1, ЮФУ	10	10–15	190–392	60 кГц, 1–2 МГц
Лаборатория 2, ЮФУ	18	1200–1500	45–100	55 кГц, 1–2 МГц
НКБ МИУС ЮФУ	40	40–60	<2000	1 кГц, 0,05–2 МГц
100 кв. жилой дом	20	200–900	300–600	60 кГц, 12–50 МГц

Большое количество потребителей с импульсным потреблением тока приводит к искажению работы нейтрального провода. Например, при почти равных фазных токах 35-40 А ток в нейтрали не должен превышать 5 А, а при экспериментальном исследовании было установлено, что ток нейтрали составляет более 15 А. Это было вызвано работой нескольких компьютерных классов одновременно. Более детальный анализ влияния ПК на режим нейтрали представлен в работах [6, 7].

Был проведен следующий эксперимент. Осциллограф был подключен к шине заземления в двух удаленных точках (длина участка шины заземления составляла $l_3 \approx 40$ м, TN-C-S), и проводились замеры помех в течение $(24 \pm 0,15)$ часов в один рабочий день. На рис. 5 представлен полученный график. Начало эксперимента в 18:00, измерения проводились один раз в минуту. Выборка составляла 2500 отсчетов за 100 мс, общее количество отсчетов за сутки равно 3602500.

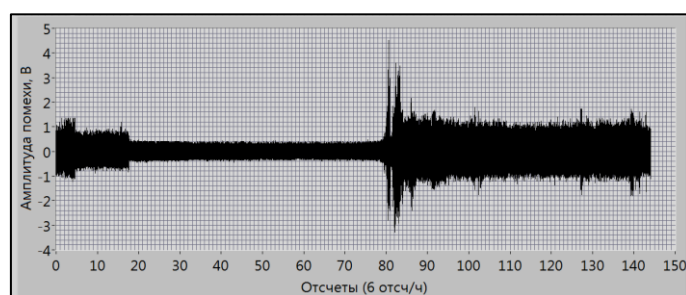


Рис. 5. Уровень помех по шине заземления в течение суток

Из графика видно, что наибольшая активность возникает в промежутке от 7:30 до 9:00 часов (между 80 и 86 отсчетами), что соответствует началу рабочего дня, и включению рубильников питания рабочих мест и приборов, станков и т.д.

Спектральный анализ показал, что на шине заземления в разное время суток присутствует сетевая помеха 50 Гц и нечётные гармоники с 3-й по 21-ю. Спектр высокочастотных колебаний простирается вплоть до 20 МГц. Амплитуда помех U_{ni} достигала ± 4 В. Более детальные измерения в ждущем режиме показали, что наблюдаются отдельные помехи амплитудой до ± 15 В и длительностью до 50 мкс. Пример одного из таких импульсов представлен на рис.6. Синфазные помехи такой амплитуды легко могут вывести из строя входы чувствительных АЦП и операционных усилителей [14–17].

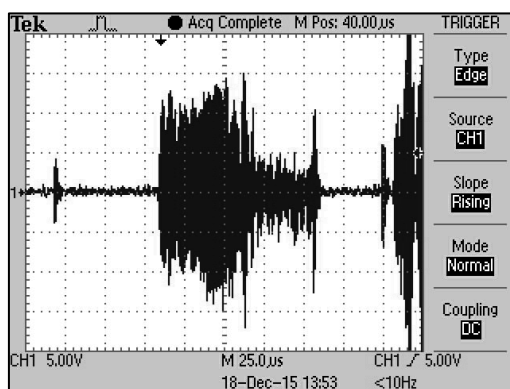


Рис. 6. Типичная импульсная помеха по шине заземления

Законы распределения импульсных помех изменяются от нормального в ночное время до логарифмически-нормального в утренние часы, когда наблюдаются большое количество импульсных помех большой амплитуды. Это означает, что для подавляющего большинства амплитуд наблюдается нормальное распределение импульсов, однако изредка проскакивают импульсы очень большой амплитуды, которые могут на порядок превосходить среднеквадратичное отклонение (СКО). На рис. 7,а,б показаны гистограммы распределений амплитуд помех в ночное (с 17 по 79) и рабочее (с 103 по 127) время без участков с явными выбросами. Показаны ожидаемые гистограммы нормальных распределений [18, 19].

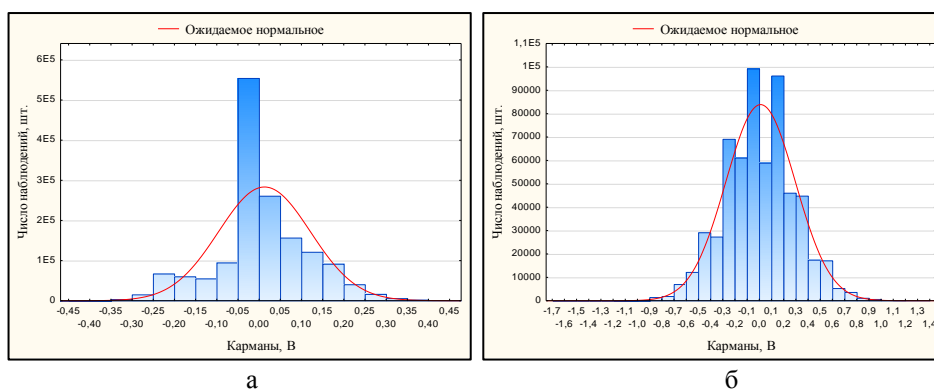


Рис. 7. Гистограмма распределения помех: а – ночью, б – днём

В табл. 2 представлено число попаданий амплитуд помех Un_i в заданные интервалы для всего исследуемого процесса. Основной характеристикой проведенных наблюдений является СКО, $\sigma=0,2293$ В. В интервал от 0 до 3σ укладывается 98,7 % всех наблюдений. В интервал 0,69 – 5 В попадает небольшое число импульсных помех (1,3 %), однако именно они приводят к сбоям или существенному искажению результатов измерений.

Таблица 2

Таблица частот попадания в интервалы

$ Un_i , \text{В}$	0 ... 0,23	0,23 ... 0,46	0,46 ... 0,69	0,69 ... 0,92	0,92 ... 5	0 ... 5
Кол-во, шт.	2675118	706121	174470	35041	11750	3602500
Кол-во, %	74,26	19,60	4,84	0,97	0,33	100

Ещё одной характеристикой уровня помех на шине заземления может служить напряжение, которое наводится в петле провода в рабочих условиях. В табл. 3 приведены результаты замеров амплитуд шумов с помощью осциллографов.

Характер наводок в петле провода в точности повторяет характер помех по шине заземления. Наблюдаются мощные импульсные помехи, модулированные высокочастотными колебаниями, например в НКБ МИУС наблюдались регулярные импульсные помехи с частотами 800 Гц, 2 кГц, 15 кГц, 64 кГц, 100 кГц, некоторые импульсы заполнены высокочастотной модуляцией порядка 10–20 МГц.

Таблица 3

Результаты измерений на петле провода

Длина петли, м	КЗ*	0,1	0,2	0,5	1	2	5	10
Предприятие	Амплитуда помехи U_{pp-p} , мВ							
Завод «Прибой»	<1	4	5	9	22	75	153	292
Лаб. Е-208, ЮФУ	<1	-	8	20	32	100	295	630
ОПБ ЮФУ	<1	-	7	13	24	75	205	430
НКБ МИУС ЮФУ	<1	-	-	15	40	101	240	580
100 кв. жилой дом	<3	5	12	25	50	88	120	240

* КЗ – короткое замыкание щупов осциллографа

Проведённые исследования показывают, что даже на небольшом открытом участке неэкранированного провода измерительной линии длиной 3–5 см могут наводиться помехи в несколько мВ, которые снизят разрядность высокочувствительного АЦП до уровня 8-9 разрядов.

Помехи, которые формируются на шине заземления, являются помехами общего вида или синфазными помехами, т.е., в сущности, они действуют между двумя точками заземления: землей датчика и землей измерительного устройства. Связь между этими двумя точками может быть кондуктивная и емкостная. Для сведения к минимуму воздействия синфазной помехи в случае прецизионной аппаратуры чаще всего применяют инструментальные усилители [2, 20]. Представляет определенный интерес оценка коэффициента подавления реальных синфазных помех при помощи инструментального усилителя. Исследовался прецизионный усилитель AMP02E фирмы Analog Devices, схема подключения стандартная, малозумящая, питание от двух батарей 9 В, коэффициент усиления $G=10,0$. В соответствии с паспортными данными усилителя коэффициент подавления составляет более 100 дБ для частот сигналов до 100 Гц и 40 дБ для частоты 100 кГц. В ходе эксперимента при подключении входов усилителей к реальной шине заземления с уровнем помех 150–200 мВ на выходе усилителя наблюдались короткие импульсы амплитудой в 40–50 мВ и длительностью 0,5–3 мкс, т.е. коэффициент подавления импульсных помех составляет всего 3–4. В ждущем режиме на выходе наблюдались наносекундные импульсы (до 20 нс) амплитудой до 100 мВ. Следует обращать самое серьезное внимание на подавление синфазных помех до инструментального усилителя. Например, даже простейшие RC-фильтры на входах усилителя $R=1$ кОм, $C=0,01$ мкФ подавляют импульсные помехи до приемлемого уровня в 1–2 мВ [2]. Также считаем необходимым применять стандартные схемы защиты входов с использованием стабилитронов или диодов, подключённых к шинам питания.

Заключение. Проведённые исследования показали, что шина заземления является мощным генератором импульсных помех, и уточнили характеристики помех, представленные в работах [1, 3–7]. Основная причина появления импульсных помех – это современные источники питания AC/DC, DC/DC, тиристорные регуляторы мощности, частотный электропривод (станки), компрессорные станции, офисное оборудование и т.д.

Синусоидальная помеха, как правило, незначительная (10–20 мВ на 1 м шины заземления). Постоянная составляющая – не более 10 мВ на 1 м шины заземления. Импульсные помехи на порядок больше и могут составлять 20–100 мВ на 1 м шины заземления. Частотный спектр помех по шине заземления колеблется от 50 Гц до 50 МГц. Как правило, импульсные помехи имеют длительность 1–50 мкс и представляют собой затухающие высокочастотные колебания. Мощные импульсные по-

межи амплитудой более 5–10 В и длительностью от 50 нс до 1 мкс, составляют менее 0,1% от общего числа помех, однако они представляют серьезную угрозу для входов измерительной аппаратуры. Дать рекомендации по определению универсального закона распределения амплитуд импульсных помех по шине заземлению не представляется возможным из-за обилия источников некоррелированных по времени, но с вероятностью $p=0,8$ его можно считать логарифмически нормальным.

Мощное силовое оборудование предприятия должно быть запитано или от отдельного трансформатора, или от отдельных обмоток и должно иметь свою отдельную шину заземления. Для высокоточных измерений рекомендуется применение специального сигнального заземления, подключенного к общей точке измерительной аппаратуры (TN-S).

Для подавления синфазных помех рекомендуется в обязательном порядке применение на входах чувствительных дифференциальных АЦП или инструментальных усилителях защитных стабилитронов, диодов и низкочастотных фильтров (RC-фильтры).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Денисенко В., Халявко А.* Защита от помех датчиков и соединительных проводов систем промышленной автоматизации // Современные технологии автоматизации. – 2001. – № 1. – С. 68-75.
2. *Галалу В.Г.* Методы подавления помех на входах аналого-цифровых преобразователей: монография. – Таганрог: ТТИ ЮФУ, 2011. – 226 с.
3. *Шваб А.* Электромагнитная совместимость: пер. с нем. В.Д. Мазина и С.А. Спектора. – М.: Энергоатомиздат, 1995. – 480 с.
4. *Денисенко В.* Заземление в системах промышленной автоматизации // Современные технологии автоматизации. Ч. 2. – 2006. – № 3. – С. 76-92.
5. *Thomas Kugelstadt.* When good grounds turn bad – isolate! // Analog Applications Journal. Texas Instruments Incorporated Interface. – 2008. – 6 p.
6. *Капустин В., Лопухин А.* Компьютеры и трехфазная электрическая сеть // Современные технологии автоматизации. – 1997. – № 2. – С. 104-108.
7. *Demoulias C., Goutzamanis D., Gouramanis K.* Analysis of the voltage harmonic distortion at buses feeding office loads // IET Science, Measurement & Technology. – 2009. – Vol. 3, Issue 4. – P. 286-301.
8. *Ralph Morrison.* Grounding and Shielding: Circuits and Interference. – 5th Edition. – Wiley-IEEE Press, 2007. – 208 p.
9. *Казаков А.* Правила устройства электроустановок. – М.: КНОРУС, 2015. – 488 с.
10. *Elya B. Joffe, Kai-Sang Lock.* Grounds for Grounding: A Circuit to System Handbook. – Wiley-IEEE Press, 2010. – 1088 p.
11. *Горлов А.Н.* Анализ мероприятий по улучшению электромагнитной обстановки на объектах электроэнергетики // Научные труды SWORLD. – 2008. – Т. 4, № 2. – С. 8-10.
12. *Аббасова Т.С., Никифоров А.Г.* Электропитание и заземление телекоммуникационного оборудования // Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2007. – Т. 3, № 2. – С. 28-31.
13. *Sheng Ye, W. Eberle, Yan-Fei Liu.* A novel EMI filter design method for switching power supplies // IEEE Transactions on Power Electronics. – 2004. – Vol. 19, Issue 6. – P. 1668-1678.
14. *Henry W. Ott.* Electromagnetic Compatibility Engineering. – John Wiley & Sons, Inc. – New Jersey, 2009. – 872 p.
15. *Vijayaraghavan G., Mark Brown, Malcolm Barnes.* Practical Grounding, Bonding, Shielding and Surge Protection. – Elsevier, 2004. – 256 p.
16. *Jerry Gaboian.* A Survey of Common-Mode Noise // SLLA057. Application Report. Texas Instruments. – 1999. – 12 p.
17. *Yonggao Zhang, Yanli Gao, Ming Yao, Qiang Dong.* Research on common mode noise evaluation method // 2008 IEEE Conference on Cybernetics and Intelligent Systems. – 2008. – P. 1270-1274.
18. *Орлов А.И.* Прикладная статистика. – М.: Экзамен, 2004. – 483 с.

19. Гурвич И.С. Защита ЭВМ от внешних помех. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 224 с.
20. Китчин Ч. Предупреждение частых ошибок при разработке схем с операционными и инструментальными усилителями // Компоненты и технологии. – 2007. – № 76. – С. 119-122.

REFERENCES

1. Denisenko V., Khalyavko A. Zashchita ot pomekh datchikov i soedinitel'nykh provodov sistem promyshlennoy avtomatizatsii [Protection against interference of the sensors and connecting wires industrial automation systems], *Sovremennye tekhnologii avtomatizatsii* [Modern Technologies of Automation], 2001, No. 1, pp. 68-75.
2. Galalu V.G. Metody podavleniya pomekh na vkhodakh analogo-tsifrovyykh preobrazovateley: monografiya [Methods of interference suppression at the inputs of analog-to-digital converters: monograph]. Taganrog: TTI YuFU, 2011, 226 p.
3. Shvab A. Elektromagnitnaya sovmestimost' [Electromagnetic compatibility]: translated from the German V.D. Mazina i S.A. Spektora. Moscow: Energoatomizdat, 1995, 480 p.
4. Denisenko V. Zazemlenie v sistemakh promyshlennoy avtomatizatsii [Grounding in industrial automation systems], *Sovremennye tekhnologii avtomatizatsii* [Modern Technologies of Automation]. Part 2, 2006, No. 3, pp. 76-92.
5. Thomas Kugelstadt. When good grounds turn bad – isolate!, *Analog Applications Journal. Texas Instruments Incorporated Interface*, 2008, 6 p.
6. Kapustin V., Lopukhin A. Komp'yutery i trekhfaznaya elektricheskaya set' [Computers and three-phase electrical network], *Sovremennye tekhnologii avtomatizatsii* [Modern automation technology], 1997, No. 2, pp. 104-108.
7. Demoulias C., Goutzamanis D., Gouramanis K. Analysis of the voltage harmonic distortion at buses feeding office loads, *IET Science, Measurement & Technology*, 2009, Vol. 3, Issue 4, pp. 286-301.
8. Ralph Morrison. Grounding and Shielding: Circuits and Interference. 5th Edition. Wiley-IEEE Press, 2007, 208 p.
9. Kazakov A. Pravila ustroystva elektroustanovok [Rules of electrical devices]. Moscow: KNORUS, 2015, 488 p.
10. Elya B. Joffe, Kai-Sang Lock. Grounds for Grounding: A Circuit to System Handbook. Wiley-IEEE Press, 2010, 1088 p.
11. Gorlov A.N. Analiz meropriyatiy po uluchsheniyu elektromagnitnoy obstanovki na ob'ektakh elektroenergetiki [Analysis of measures for improvement of electromagnetic environment at electric power facilities], *Nauchnye trudy SWORLD* [Proceedings SWORLD], 2008, Vol. 4, No. 2, pp. 8-10.
12. Abbasova T.S., Nikiforov A.G. Elektropitanie i zazemlenie telekommunikatsionnogo oborudovaniya [Power supply and earthing of telecommunication equipment] *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy* [Electrical and Informational Complexes and Systems], 2007, Vol. 3, No. 2, pp. 28-31.
13. Sheng Ye, W. Eberle, Yan-Fei Liu. A novel EMI filter design method for switching power supplies, *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2004, Vol. 19, Issue 6, pp. 1668-1678.
14. Henry W. Ott. Electromagnetic Compatibility Engineering. John Wiley & Sons, Inc. New Jersey, 2009, 872 p.
15. Vijayaraghavan G., Mark Brown, Malcolm Barnes. Practical Grounding, Bonding, Shielding and Surge Protection. Elsevier, 2004, 256 p.
16. Jerry Gaboian. A Survey of Common-Mode Noise, SLLA057. Application Report. Texas Instruments, 1999, 12 p.
17. Yonggao Zhang, Yanli Gao, Ming Yao, Qiang Dong. Research on common mode noise evaluation method, *2008 IEEE Conference on Cybernetics and Intelligent Systems*, 2008, pp. 1270-1274.
18. Orlov A.I. Prikladnaya statistika [Applied statistics]. Moscow: Ekzamen, 2004, 483 p.
19. Gurvich I.S. Zashchita EVM ot vneshnikh pomekh [Protection of computers against external interference]. 2nd ed. – Moscow: Energoatomizdat, 1984, 224 p.
20. Kitchin Ch. Preduprezhdenie chastykh oshibok pri razrabotke skhem s operatsionnymi i instrumental'nymi usilitel'nyami [Warning frequent mistakes when designing circuits with operational and instrumental amplifiers], *Komponenty i tekhnologii* [Components and Technologies], 2007, No. 76, pp. 119-122.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор В.А. Денисенко.

Киракосян Степан Айрапетович – Южный федеральный университет; e-mail: ksa_say@mail.ru; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44; тел.: +79526039071; аспирант.

Галалу Валентин Гаврилович – e-mail: v.galalu@mail.ru; тел.: +79281496612; кафедра ИИТиС; к.т.н.; доцент.

Kirakosyan Stepan Ajrapetovich – Southern Federal University; e-mail: ksa_say@mail.ru; 44, Nekrasovskiy, Taganrog, 347928, Russia; phone: +79526039071; postgraduate student.

Galalu Valentin Gavrilovich – e-mail: v.galalu@mail.ru; phone: +79281496612; cand. of eng. sc.; associate professor.

УДК 51-7

**Е.А. Шестова, Е.Д. Синявская, В.И. Финаев, О.В. Косенко, Ю.Ю. Близнюк,
В.В. Шадрин**

РАЗРАБОТКА МЕТОДА ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ И СЛЕЖЕНИЯ ЗА ХИРУРГИЧЕСКИМИ ИНСТРУМЕНТАМИ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ЛАПАРОСКОПИЧЕСКИХ ОПЕРАЦИЙ*

Рассматривается задача, связанная с обеспечением оптимальной области визуализации хирургического вмешательства при проведении малоинвазивных операций. Предлагается метод позиционирования и слежения за хирургическими инструментами при проведении лапароскопических операций. Существенным отличием метода является использование маркеров и опорных точек, располагающихся в видимой области (вне брюшной области), что позволяет вычислить координаты лапароскопа и хирургических инструментов внутри оперируемой области на основе методов векторной алгебры и геометрических преобразований без применения распознавания образов. На основе предложенного метода было определено положение хирургических инструментов и лапароскопа внутри оперируемой области за счет вычисления координат видимых частей инструментов снаружи. Для этой задачи использовалась оптическая система локализации на основе метода триангуляции. Задача автоматического слежения сводится к изменению положения и ориентации лапароскопа в соответствии с положением хирургического инструмента в области визуализации. Для определения оптимальной визуализации оперируемой области находится положение кончика инструмента, расположенного в центре видео изображения эндоскопа. Предложен алгоритм определения требуемого положения лапароскопа в зависимости от координат и ориентации хирургического инструмента, на основе которого генерируется ошибка позиционирования. Также указаны условия для достижения оптимальной визуализации оперируемой области. Определена область допустимого расположения лапароскопа относительно хирургического инструмента. Выполнена программная апробация предложенного метода позиционирования и слежения за хирургическими инструментами, подтверждающая состоятельность разработанного метода. Предложенный метод позиционирования и слежения является универсальным для разных типов роботизированных держателей с разным числом степеней свободы.

Метод позиционирования и слежения за хирургическими инструментами; роботизированный держатель; малоинвазивная хирургия; оптимальная визуализация; векторная алгебра ошибка позиционирования.

* НИР 213.01-07-2014/02ПЧВГ Разработка методов многокритериальной оптимизации параметров гибридных адаптивных интеллектуальных регуляторов плохо формализованных технических объектов.