

# Анализ джиттера в высокоскоростных цифровых устройствах на примере опции R&S RTO-K12

## Часть 1

Николай Лемешко (nlem83@mail.ru),  
Павел Струнин (Pavel.Strunin@rohde-schwarz.com)

**Джиттер является одним из основных факторов, ограничивающих быстродействие современных цифровых устройств. В первой части статьи рассматриваются причины его возникновения, классификация его составляющих, основные подходы к их снижению и типовые последствия проявления данного процесса в работе цифровых устройств.**

### ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время цифровые устройства (ЦУ) являются основным классом разрабатываемых электронных технических средств. Для них характерны применение хорошо отлаженных способов проектирования и возможность реализации очень широкого спектра функций. Дополнительным и не менее значимым преимуществом ЦУ является высокая защищённость цифровых сигналов от радиопомех, достигаемая за счёт пороговой обработки [1].

Несмотря на широкую номенклатуру разрабатываемых ЦУ, можно выделить типовые функции их основных узлов, к которым следует отнести создание, хранение, передачу и обработку информации. Данные функции реализуются с использованием современной элементной базы и специального программного обеспечения для управления аппаратными средствами цифровых устройств. Однако возможности ЦУ не являются безграничными – их производительность во многом определяется разрядностью и тактовой частотой. Следует признать, что оба этих фактора к настоящему времени стали ограничительными: кратное повышение разрядности приводит к чрезмерному усложнению топологии печатных узлов ЦУ и к снижению их надёжности, а предельная тактовая частота ограничена возможностями компонентной базы. К настоящему времени классическая технология производства микроэлектронной компонентной базы фактически подошла к физическому пределу [2], именно поэтому предельные рабочие частоты ЦУ не растут так быстро, как 10 лет назад.

Вместе с тем для создания высокоскоростных ЦУ предельная тактовая частота имеет первоочередное значение. С повышением частоты тактирования всё большую роль начинают играть ранее малозначимые процессы, как в интегральных компонентах, так и на уровне печатного узла. Одним из проявлений таких процессов является джиттер [3] – «дрожание» фронтов и спадов в цифровых сигналах, т.е. непостоянство интервалов, приходящихся на передачу единичного бита. Согласно определению [4], джиттер проявляется в вариациях по времени расположения фронтов и спадов сигнала относительно некоторого идеального положения.

В быстродействующих ЦУ форма сигнала близка к трапецевидной и переходные процессы занимают значительную часть битового интервала. Согласно действующим представлениям, надёжный захват цифрового сигнала ещё обеспечивается, если длительность фронта (спада) в цифровом сигнале составляет не более 25% битового интервала. Наличие джиттера приводит к «размыванию» расположения фронтов и спадов по времени, что эквивалентно увеличению их длительности и ведёт к снижению допустимой тактовой частоты. В этом и состоит влияние джиттера на предельное быстродействие.

Считается, что если суммарный джиттер занимает более 15% битового интервала, то цифровой сигнал деградирует настолько, что ЦУ будет не способно выполнять свои функции из-за большого количества битовых ошибок [4]. Если речь идёт о широко применяемых сегодня дифференциальных парах, то

допустимый уровень джиттера снижается практически вдвое. Связанные с джиттером проблемы не проявляются разве что в случае узкого класса элементов ЦУ, работающих в асинхронном режиме (триггеры, блоки автоматики и т.п.), для которых допускается варьирование длительности фронтов, спадов и битового интервала в широких пределах, но такие элементы обычно не работают на высоких частотах.

Практика проектирования высокоскоростных ЦУ однозначно свидетельствует о том, что достижение не только предельных, но и плановых показателей быстродействия возможно только при оптимизации формирования, передачи и обработки цифровых сигналов, и в это понятие, несомненно, следует вкладывать и минимизацию джиттера. По этой причине важно понимать природу возникновения джиттера в цифровых сигналах, а также уметь оценивать его уровень с использованием современных средств измерений.

### ПРИЧИНЫ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ДЖИТТЕРА И ЕГО ТИПИЧНЫЕ ПРОЯВЛЕНИЯ В ЦУ

Причины возникновения джиттера, а также влияющие на его характеристики факторы должны рассматриваться в контексте функционирования печатных узлов, реализующих схемы ЦУ. Необходимо учесть, что линии передачи цифровых сигналов работают в условиях паразитного взаимодействия друг с другом, а источники цифровых сигналов – в условиях непостоянства внешних воздействующих факторов.

В настоящее время принято считать, что джиттер имеет детерминированные и случайные компоненты [4]. Детерминированная составляющая определяется системными источниками, такими как перекрёстные и межсимвольные помехи, а также колебаниями напряжения электропитания. Она всегда ограничена и может быть охарактеризована пиковым значением для заданной топологии и конфигурации цифрового узла.

Случайная составляющая джиттера определяется такими физическими процессами, как дробовой шум, тепловые колебания атомов и фликер, который описывает колебания токов и напряжений, вызванных нежелательными воздействиями со стороны любых посторонних по отношению к интегральным компонентам и линиям передачи факторов (кроме тех, которые определяют детерминированный джиттер). Случайный джиттер может быть описан нормальным законом распределения, и его невозможно прогнозировать.

Детерминированный джиттер (ДД) может быть учтён при тщательном поиске его причин и точной оценке его характеристик. Для упрощения решения этой задачи введена следующая классификация источников детерминированного джиттера (см. рис. 1): ДД включает в себя периодический, датазависимый джиттер, а также компоненту, вызванную перекрёстными помехами. При этом в уровень датазависимого джиттера вносят вклад искажения длительности цикла передачи бит (битового интервала) и межсимвольные искажения.

Искажение длительности цикла является результатом любых изменений в значении времени, отведённого для логических состояний в переменной последовательности бит. Это может быть следствием как варьирования длительности фронтов и спадов, так и изменения порогов смены логического состояния. Межсимвольные искажения определяются влиянием на временное положение фронтов и спадов ранее переданных бит. Таким образом, искажения длительности фронта и межсимвольные искажения являются функциями истории передачи и обработки предыдущих бит. Ввиду того что датазависимая компонента вносит значительный вклад в суммарный джиттер, её составляющие следует рассмотреть несколько подробнее.

Искажение длительности цикла имеет две основные причины. Первая из них состоит в смещении порога переключения передатчика, например выходного буфера микросхемы, от его идеального уровня. Пунктирная линия на рисунке 2 показывает идеальное значение порогового уровня, равное 50% от размаха напряжения, что соответствует одинаковой длительности передачи нулевых и единичных бит. Штрихпунктирная линия соответствует положительному сдвигу порога переключения, в результате чего длительность цикла при передаче единичных бит становится мень-

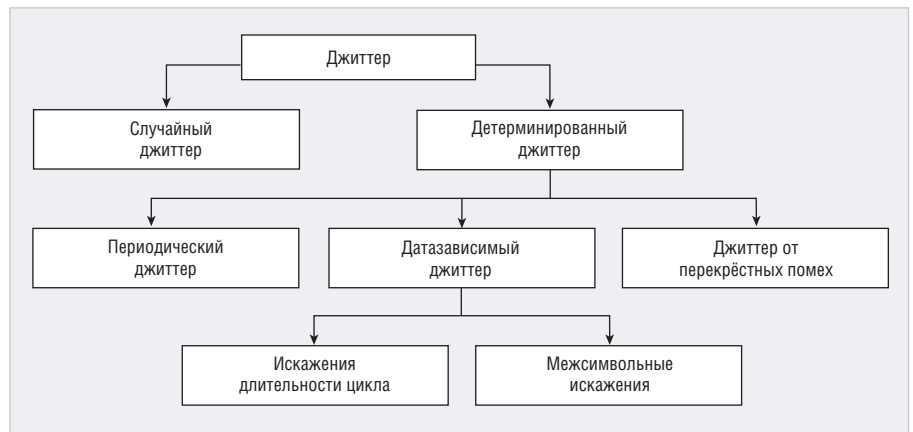


Рис. 1. Классификация компонентов джиттера

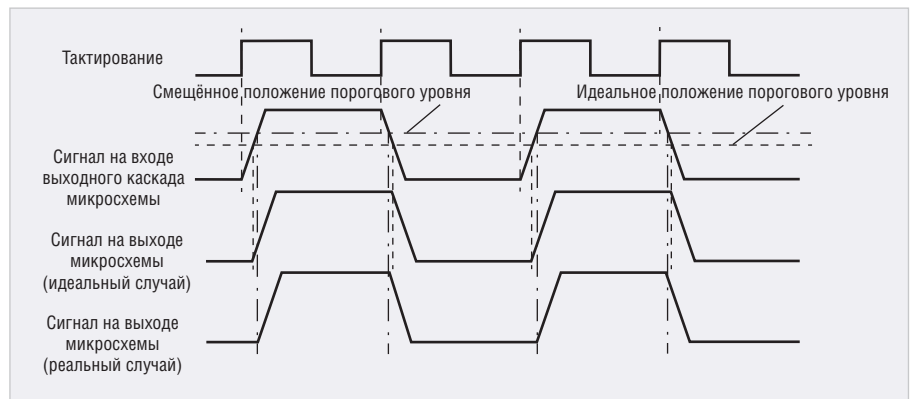


Рис. 2. Влияние порога переключения на изменение битового интервала

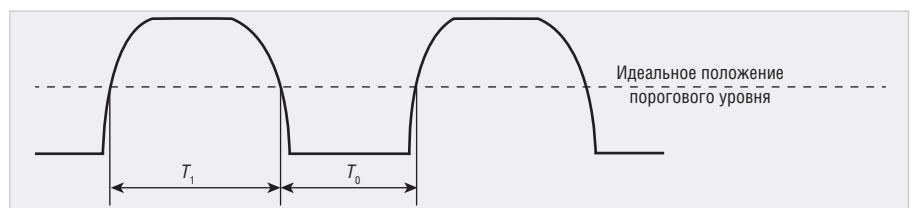


Рис. 3. Асимметрия фронтов и спадов в цифровом сигнале

ше, чем при передаче нулевых бит, как это показано на рисунке. При этом само значение порогового уровня не является постоянным: оно зависит в первую очередь от постоянства напряжения электропитания и температуры [5]. В свою очередь, стабильность, или, как сейчас принято говорить, целостность напряжения электропитания, зависит от предпринятых мер по локализации сквозных токов, протекающих в выходных каскадах интегральных компонентов, и от параметров топологии печатного узла, т.е. от индуктивности и ёмкости монтажа. Этот пример показывает, в чём состоит сложность расчётного способа оценки детерминированного джиттера: модель получается слишком сложной, для её построения обычно недостаточно исходных данных, и потому она не обладает необходимой точностью.

Ещё одной причиной искажения длительности цикла является асимметрия фронтов и спадов цифровых сигналов. Трапецевидная форма сигналов, показанная на рисунке 2, соответствует идеальному случаю, а фронты и спады часто имеют экспоненциальную форму. Если скорость спада меньше, чем скорость нарастания фронта, то длительность передачи логической единицы будет больше, чем для логического нуля. На рисунке 3, иллюстрирующей такую ситуацию,  $T_0$  и  $T_1$  – длительности битовых интервалов для логического нуля и единицы соответственно.

Введённое ранее понятие длительности цикла относится к последовательной передаче единичного и нулевого бита и имеет одноимённую характеристику, показывающую, какую долю времени занимает передача единичного бита. В представленном на рисунке 2

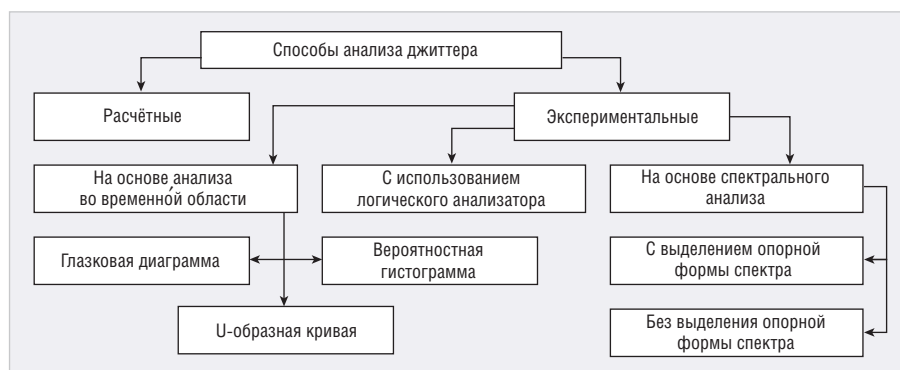


Рис. 4. Классификация способов анализа джиттера

примере длительность цикла составляет менее 50%, а на рисунке 3 – более 50% ( $T_1/T_0 > 1$ ).

Особую роль в формировании датазависимого джиттера в виде межсимвольных искажений играет дисперсия, проявляющаяся в частотной зависимости скорости распространения сигналов в линиях передачи. В быстродействующих ЦУ используются сигналы со спектром, который простирается до частот порядка 10 ГГц и выше [4], и он при передаче случайной битовой последовательности является нестационарным. В ходе передачи сигнала линия не только задерживает его, но и вносит амплитудно-фазовые искажения, проявляющиеся, в том числе, в потерях, по сути, работая по принципу фильтра нижних частот. Способность линий передачи запасать энергию в магнитном и электрическом полях также благоприятствует проявлению датазависимого джиттера. Большие потери в линиях передачи усиливают любые виды джиттера.

Эффекты, аналогичные ограничению полосы пропускания, проявляются и при существенной неоднородности волнового сопротивления вдоль линии распространения сигналов. Для электрически коротких линий в основном наблюдается скругление фронтов и спадов сигнала с непостоянной задержкой, а для длинных линий переходные процессы приобретают ступенчатый характер [3].

Уровень межсимвольных искажений зависит от длины и содержания битовой последовательности. При прочих равных условиях более высокий джиттер имеют более длинные битовые последовательности, а также те, которые характеризуются большим количеством фронтов и спадов.

Периодический джиттер, как правило, имеет постоянную частоту и амплитуду. Он определяется повторяющимися эффектами, не коррелирующими с потоком данных, в основном – регу-

лярными коммутационными помехами по цепям электропитания. Джиттер, вызванный перекрёстными помехами, определяется случайным состоянием линий передачи цифровых сигналов, находящихся в нежелательном индуктивно-ёмкостном взаимодействии между собой. Если процесс индуцирования помехонесущего тока имеет сходную с фронтом или спадом направленность, то длительность переходного процесса будет снижаться, и наоборот. Практика проектирования ЦУ показала, что отклонение фронтов и спадов, вызванное перекрёстными помехами, может достигать  $\pm 0,2$  нс, что составляет до 15% значения характерной для типовых линий печатного монтажа задержки. Переход к технологиям производства печатных узлов с более плотной топологией в целом способствует усилению такого нежелательного взаимодействия.

Наличие повышенного джиттера в цифровых сигналах, помимо ограничения предельных рабочих частот, приводит к следующим типичным проблемам:

- неработоспособность высокоскоростных ЦУ из-за постоянных ошибок в захвате логического состояния;
- нарушение тактирования в устройствах с жёсткими требованиями по синхронизации;
- появление нерегулярных сигнальных аномалий, появляющихся в силу особого сочетания передаваемых бит и вызывающих нестабильное функционирование ЦУ;
- повышение системной задержки и снижение быстродействия.

Влияние джиттера на функционирование некоторых ЦУ может быть критическим, поэтому следует предпринимать меры по его снижению. К ним относятся повышение стабильности питающих напряжений, снижение уровня перекрёстных помех, устранение рассогласований в линиях передачи, комплексное обеспечение тайминга

ЦУ. К технологическим мерам относятся снижение проектных норм микросхем, симметрирование плеч выходных каскадов микросхем, достижение минимальных отличий характеристик элементарных вентилях и их стабильности [6]. Одной из возможных мер, как это показано далее, является повышение напряжения электропитания.

Следует, однако, отметить, что иногда джиттер может оказаться полезным. В таких интерфейсах, как PCI и ATA, его намеренно увеличивают вплоть до допустимого предела, чтобы снизить уровень помехоэмиссии. Поскольку джиттер меняет продолжительность битовых интервалов, одновременно изменяется положение минимумов и максимумов спектральной плотности по частоте. Наличие джиттера приводит к снижению средних значений эмиссии излучаемых помех.

Ограничение джиттера на уровне, приемлемом для выбранного класса компонентной базы, является одним из условий надёжной работы ЦУ, и поэтому на практике широко применяют различные способы приборного контроля характеристик джиттера.

### Методы оценки показателей джиттера

Методы оценки показателей джиттера можно разделить на расчётные и экспериментальные (см. рис. 4), а последние, в свою очередь, – на методы логического анализа и измерительные методы в частотной и временной областях.

Как отмечалось ранее, проблема джиттера и причины его появления настолько многогранны, что при нынешних научно-технических возможностях построить модель его формирования, обладающую достаточной для решения инженерных задач точностью, не представляется возможным. Вместе с тем при моделировании ЦУ на поведенческом и схемном уровне в обязательном порядке рассматривают вопросы тайминга, включающие в себя оценку задержки и временной асимметрии цифровых сигналов при групповой обработке [3, 4]. При использовании расчётных методов джиттер обычно характеризуется минимальным и максимальным показателями, а также дисперсией. Использование традиционных математических моделей схем ЦУ [7], учитывающих факторы, определяющие детерминированный джиттер, позволяет оценить его уровень и предпринять корректировку топологии печатных узлов для его снижения,



однако не даёт возможности рассчитать случайные составляющие джиттера. Аналогичные оценочные расчёты могут быть сделаны для периодического джиттера. Таким образом, основная ценность расчётной оценки джиттера состоит не в определении его реального уровня, а в выработке действенных мер по его снижению.

Спектральный метод анализа джиттера может реализовываться как с выделением опорной формы спектрограммы, так и без него. Для получения опорной формы сигнала выполняется усреднение по ряду спектрограмм, для чего удобно использовать приборы реального времени. На основе результатов сравнения опорной формы спектрограммы с текущей реализацией формируется разностная функция, для которой используется быстрое преобразование Фурье. При таком подходе оказывается возможным выделить некоторые закономерности в формировании джиттера, например его периодичность. Для реализации подобных измерений необходимо специальное программное обеспечение.

Второй вариант анализа джиттера на основе представления сигналов в частотной области основан на классическом спектральном анализе с полосой разрешения от 1 Гц и менее с режимом удержания минимума. О величине джиттера судят по ширине области минимума между первым и вторым лепестками спектрограммы. Если она лежит в интервале частот  $f_1 \dots f_2$ , то битовый интервал меняется в пределах значений  $1/f_2 \dots 1/f_1$ , что в некотором приближении и характеризует джиттер. Общими недостатками спектральных методов являются их высокая погрешность и недостаточная информативность, т.к. по получаемым результатам трудно судить о степени соответствия сигналов нормам обеспечения их целостности.

Некоторые характеристики джиттера можно получить с использованием логического анализатора, например разброс значений битового интервала для логических нулей и единиц при заданном значении порогового уровня. Логические анализаторы удобно использовать при анализе джиттера, вызванного перекрёстными помехами, сопоставляя по времени формальное представление цифровых сигналов в исследуемой и соседних линиях.

На анализе во временной области базируются особые способы представления информации о цифровых сигналах, которые позволяют измерять

типичные характеристики джиттера. Ими являются глазковая диаграмма (ГД), вероятностная гистограмма и U-образная кривая. Глазковая диаграмма – это суммарный вид ряда битовых периодов измеряемого сигнала, наложенных друг на друга. Если в середине ГД расстояние между максимумом и минимумом достаточно велико, то возникновение битовой ошибки маловероятно. С помощью ГД могут быть измерены качественные и количественные параметры джиттера. Так, например, множество отдельных фронтов и спадов говорит о датазависимом джиттере.

Для построения ГД обычно не требуется использование дополнительных сигналов синхронизации, поскольку в средства измерения уже заложен специальный алгоритм восстановления тактовой частоты. Минимальными требованиями к осциллографу являются высокое качество синхронизации и наличие послесвечения экрана. Однако для получения численных характеристик джиттера удобнее использовать функцию автоматических измерений.

Если положение фронтов и спадов варьируется значительно, то определить временную протяженность битового интервала бывает затруднительно. Решить эту задачу с приемлемой точностью позволяют измерения на основе вероятностной гистограммы. Она характеризует плотность вероятности расположения фронта или спада в выбранном месте развёртки. Гистограммы используются для углублённого анализа при поиске неисправностей в ЦУ и при необходимости могут быть соотносены с режимами работы линий передачи для последующей корректировки топологии печатного узла. Например, если функция плотности вероятности имеет два максимума, то это означает наличие двух конкурирующих пар фронтов и спадов и свидетельствует о детерминированном джиттере. Гистограммы являются одним из самых действенных способов оценки эффективности мер по снижению джиттера.

U-образная кривая представляет собой график зависимости частоты ошибок по битам от положения пробной точки на протяжении битового интервала. Обычно она имеет симметричную форму. Вблизи краёв ГД вероятность ошибок максимальна и сравнительно постоянна, и это обычно объясняют случайным джиттером. Если U-образная кривая имеет выбросы, то это свидетельствует о детерминирован-

ном джиттере. При перемещении точки анализа к середине битового интервала вероятность битовой ошибки резко снижается. Данный метод позволяет разделять джиттер по природе его возникновения. По U-образной кривой определяют границы безошибочной передачи данных, а также запас устойчивости по джиттеру. Спадающая часть U-образной кривой обычно по форме соответствует функции нормального распределения, и по ней можно оценить статистические параметры случайного джиттера.

Как следует из изложенного, наиболее наглядным и информативным является анализ джиттера на основе представления цифровых сигналов во временной области. Данный метод обладает понятной физической интерпретацией. Поскольку анализ джиттера является одной из самых актуальных задач отладки высокоскоростных ЦУ, то для этого существуют специальные программные опции, работающие с аппаратными платформами современных осциллографов. Примером таких расширений является опция анализа джиттера R&S RTO-K12, обеспечивающая измерения его характеристик в автоматическом режиме в соответствии с настройками пользователя.

Во второй части статьи будут описаны функциональные возможности и особенности опции R&S RTO-K12, а также рассмотрены конкретные примеры анализа джиттера с применением данной опции.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Новожилов О.П. Основы цифровой техники. – М.: Радиософт, 2004. – 528 с.
2. Эннс В.И., Кобзев Ю.М. Проектирование КМОП-микросхем. Краткий справочник разработчика. 2-е изд. – М.: Горячая линия-Телеком, 2015. – 454 с.
3. Кечиев Л.Н. Проектирование печатных плат для цифровой быстродействующей аппаратуры. – М.: Группа ИДТ, 2007. – 616 с.
4. Кечиев Л.Н. Печатные платы и узлы гигабитной электроники. – М.: Грифон, 2017. – 424 с.
5. Лемешко Н.В., Кечиев Л.Н., Захарова С.С. IBIS-модели и их применение в задачах ЭМС. – М.: Грифон, 2016. – 192 с.
6. Коледов Л.А. Технология и конструкция микросхем, микропроцессоров и микросборок. – М.: Лань, 2007. – 400 с.
7. Алексеев О.В., Головкин А.А., Пивоваров И.Ю. и др. Автоматизация проектирования радиоэлектронных средств. Учебное пособие для вузов. – М.: Высшая школа, 2000. – 400 с.



НОВОСТИ МИРА

**Летняя школа  
по искусственному интеллекту**

Международная научно-практическая летняя школа по искусственному интеллекту, организуемая Российской ассоциацией искусственного интеллекта (РАИИ) при поддержке Московского физико-технического института (МФТИ) и компании «Яндекс», пройдёт с 4 по 7 июля 2019 г. в кампусе МФТИ. Сайт школы: <http://school-raai.org>.

Основная идея школы – совместить теорию и практику и привлечь заинтересованных студентов и аспирантов как из России, так и из-за рубежа к участию в академических и наукоёмких индустриальных проектах в сфере искусственного интеллекта (ИИ). Каждый день школы условно разбивается на две части: лекции о передовых направлениях ИИ от ведущих учёных РАИИ и зарубежных лекторов из ведущих исследовательских центров мира и практические занятия от индустриальных партнёров (крупнейшие российские компании, использующие методы искусственного интеллекта в своей деятельности). В рамках практических занятий предусматривается возможность решения реальных бизнес-кейсов, проведение соревнований (хакатонов) и пр.

Молодые учёные (как студенты, так и аспиранты) приглашаются для подачи научных докладов по теме своих исследований на русском или английском языках. Прошедшие рецензирование и отобранные русскоязычные доклады будут опубликованы в сборнике трудов конференции (РИНЦ). Лучшие англоязычные работы планируются к публикации совместно с лекциями и туториалами в сборнике издательства Springer (Scopus). Доработанные и расширенные версии работ будут рекомендованы к публикации в журнале РАИИ «Искусственный интеллект и принятие решений» (РИНЦ, ВАК, Scopus, WoS). Подробности по оформлению и подаче докладов можно найти на сайте школы. Девиз школы: «Разрабатывая искусственное, не забывай о естественном».

*Организационный комитет летней школы РАИИ*

**Разработка «Росэлектроники» позволит извлекать ценные компоненты из отработанных растворов**

Холдинг «Росэлектроника» госкорпорации «Ростех» создал промышленную систему очистки воды, позволяющую выделять

из отработанных растворов, образующихся при производстве печатных плат и нанесении гальванических покрытий, химические компоненты для повторного применения в сельском хозяйстве.

Новая система, разработанная и запатентованная АО «КНИИТМУ» (входит в концерн «Вега» холдинга «Росэлектроника»), включает в себя химические составы и алгоритмы их применения для нейтрализации отработанных растворов и электролитов.

Разработка позволяет перерабатывать растворы, использованные для медно-аммиачного травления и гальванического меднения печатных плат, а также растворы химического никелирования на основе глицина и растворы хрома. На выходе система позволяет получить такие компоненты, как, например, гексагидрат сульфата меди-аммония, который может использоваться в тех же областях, что и медный купорос, – в качестве микроудобрения в растениеводстве, как лекарственное средство в животноводстве, а также для антибактериальной обработки воды.

*Пресс-служба холдинга «Росэлектроника»*

**СВЕРХТОНКИЕ ИСТОЧНИКИ ПИТАНИЯ  
НА DIN-РЕЙКУ**



- Выходные мощности 30, 50 и 70 Вт
- Размер передней панели на 44% меньше, чем у аналогов
- Выходные напряжения от 5 до 48 В
- КПД до 89% (для серии DPC70)
- Полная выходная мощность обеспечивается в диапазоне входного напряжения 100–264 В
- Потребляемая мощность в режиме холостого хода < 0,3 Вт (серии DPC30 и DPC50)
- Светодиодный индикатор включения выходного напряжения
- Полный комплект защит
- Широкий диапазон регулировки выходного напряжения
- Диапазон рабочих температур от -25 до +70°C

**PROSOFT®**  
WWW.PROSOFT.RU

ОФИЦИАЛЬНЫЙ ДИСТРИБЬЮТОР

МОСКВА  
(495) 234-0636  
info@prosoft.ru

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ  
(812) 448-0444  
info@spb.prosoft.ru

ЕКАТЕРИНБУРГ  
(343) 356-5111  
info@prosoftsystems.ru





# Электроника Транспорт 2019

13-я специализированная выставка электроники и информационных технологий  
для пассажирского транспорта и транспортной инфраструктуры

14-16 МАЯ, МОСКВА  
КВЦ «СОКОЛЬНИКИ»  
[WWW.E-TRANSPORT.RU](http://WWW.E-TRANSPORT.RU)