

УДК 681.5.04

doi: 10.17586/2226-1494-2019-19-5-901-911

ПЛАТФОРМЕННЫЕ РЕШЕНИЯ И МОДУЛЬНЫЙ ПРИНЦИП ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ КАК МЕТОД СТАНДАРТИЗАЦИИ И УНИФИКАЦИИ РАЗРАБОТОК

В.Ю. Прокопьев

Новосибирский государственный университет, Новосибирск, 630090, Российская Федерация
 Адрес для переписки: vprok1981@mail.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию 07.06.19, принята к печати 15.07.19
 Язык статьи — русский

Ссылка для цитирования: Прокопьев В.Ю. Платформенные решения и модульный принцип проектирования электронных устройств как метод стандартизации и унификации разработок // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2019. Т. 19. № 5. С. 901–911. doi: 10.17586/2226-1494-2019-19-5-901-911

Аннотация

Предмет исследования. Рассмотрена концепция применения платформенного решения при проектировании автоматизированных электронных устройств. Сопоставлены понятия «разработка на основе платформенного решения» и «унификация и стандартизация разработок». Анализ проведен на собственных примерах разработки семейства эллипсометрической аппаратуры и разработки платформы сверхмалых космических аппаратов стандарта CubeSat. **Метод.** Представлена декомпозиция указанных платформенных решений на унифицированные модули. Показаны основные шаги и критерии разбиения функционала по электронным модулям. В соответствии с действующей нормативной документацией вычислены количественные показатели межпроектной унификации разработок. По опыту типовое значение показателя межпроектной унификации, задаваемое в технических заданиях на разработку приборов, составляет от 60 % и выше. **Основные результаты.** По расчетам коэффициента межпроектной унификации для семейства эллипсометров получено значение 96,3 %. В результате вычисления коэффициента межпроектной унификации для платформы сверхмалых космических аппаратов получено значение 84 %. Обе величины значительно превосходят величину типовых задаваемых значений. Показано, что приведенные в работе разбиения платформы на унифицированные модули являются оптимальными с точки зрения разграничения функционала модулей. **Практическая значимость.** Продемонстрированы преимущества платформенного подхода на собственных примерах разработки семейства быстродействующего эллипсометрического оборудования и универсальной платформы сверхмалых космических аппаратов стандарта CubeSat. Показано, что полученные высокие показатели унификации достигаются за счет применения модульного принципа проектирования электронных систем. Многолетняя практика эффективного проектирования новых автоматизированных устройств в рамках имеющейся платформы согласуется с качественными расчетами. Количественное значение показателей стандартизации и унификации может служить индикатором для принятия инженерных и управленческих решений о внесении изменений в разрабатываемые изделия.

Ключевые слова

платформенное решение, модульный принцип проектирования, автоматизация физических измерений, эллипсометрическая установка, малый космический аппарат, стандарт CubeSat, стандартизация, унификация

Благодарности

Данная работа в части проектирования платформы малых космических аппаратов выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации: уникальный идентификатор RFMEFI57517X0154.

doi: 10.17586/2226-1494-2019-19-5-901-911

PLATFORM-BASED SOLUTIONS AND DESIGN MODULARITY FOR ELECTRONIC DEVICES AS STANDARDIZATION AND UNIFICATION ROUTINE

V.Yu. Prokopyev

Novosibirsk State University, Novosibirsk, 630090, Russian Federation
 Corresponding author: vprok1981@mail.ru

Article info

Received 07.06.19, accepted 15.07.19
 Article in Russian

For citation: Prokopyev V.Yu. Platform-based solutions and design modularity for electronic devices as standardization and unification routine. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2019, vol. 19, no. 5, pp. 901–911 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2019-19-5-901-911

Abstract

Subject of Research. The paper considers a concept of platform approach for automated electronic devices design. The concepts of “platform-based development” and “unification and standardization of developments” are compared. Analysis was carried out on our own examples of ellipsometric equipment family development and the development of a nanosatellite platform of the CubeSat standard. **Method.** The decomposition of these platform solutions into unified modules is presented. Quantitative indicators of project-to-project unification were calculated for these two cases in accordance with regulatory documents. By experience, the typical value of the project-to-project unification indicator specified in the technical tasks for the development of devices ranges from 60 % and higher. **Main Results.** For the family of ellipsometers the value of project-to-project unification coefficient equal to 96.3 % was calculated. For the nanosatellite platform a value of project-to-project unification coefficient equal to 84 % was obtained. Both values exceed significantly the value of typical given values. It is shown that chosen fragmentations of platforms into unified modules outlined in the paper are optimal from functional differentiation between modules point of view. **Practical Relevance.** Advantages of the platform approach are demonstrated on personal experience of development of high-speed ellipsometric equipment and a universal nanosatellite platform of the CubeSat standard. It is shown that the obtained high rates of unification are achieved due to the modular principle implementation for design of electronic subsystems. Years of successful experience in effective design of new automated devices within the existing platform is consistent with qualitative calculations. The quantitative value of standardization and unification indicators can serve as a main factor for the adoption of engineering and management decisions on changes in the products being developed.

Keywords

platform approach, modular design principle, physical measurement automation, ellipsometric setup, nanosatellite, CubeSat standard, standardization, unification

Acknowledgements

The section of this work relative to nanosatellite platform design was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation: project identification number RFMEFI57517X0154.

Введение

Качественные инженерные разработки практически всегда — результат системного подхода в противовес реализации разовых проектных решений. В современных условиях, которые характеризуются растущей конкуренцией на рынке, системность стала необходимой составляющей работы инженерно-технической команды. Платформенные решения — широко применяемый способ ухода от разовых разрозненных разработок под каждую отдельную задачу и конкретного заказчика. Платформенные решения представлены сегодня в различных областях производства: автомобилестроении, IT (программное обеспечение, системы проектирования, системы автоматизации управления), приборостроении и многих других.

В каждой из областей платформа как таковая имеет свой вариант определения. В контексте инженерно-технических разработок под платформой понимают совокупность отработанных конструктивных элементов и инструментов, служащих основой для построения многочисленных вариаций конечных решений определенного продукта. Зачастую в основу создания платформы ложится модульный принцип, при котором продукт разделяется на ряд функциональных блоков — модулей. Самодостаточность (степень автономности) модулей, их разнообразие по функционалу и легкость интеграции в единую систему определяют качество проектирования платформенного решения.

Очевидно, что построение платформенного решения предполагает унификацию всех составных элементов: деталей и узлов, их полную конструктивную, электромеханическую и информационную совместимость, внедрение внутренних стандартов, сокращение номенклатуры применяемых составных частей, рационализацию всех этапов конструкторского и производственного процессов. Эти же самые процессы составляют основу мероприятий по стандартизации и унификации конструкторских решений.

Как правило, термины стандартизации и унификации появляются в контексте разговора о повышении экономической эффективности производства. Однако не менее актуально они звучат и в рамках тематики построения научно-технических разработок. По сути, деятельность, направленная на упорядочение, создание некоторых заданных алгоритмов, нормативов и требований, обязательных для выполнения, и есть стандартизация. В свою очередь унификация предполагает приведение к значительному единству (в форме, размерах, структуре, составе) всех элементов заданного продукта. Цель унификации — рационализировать количество этих составляющих элементов, а также типизировать их видовое многообразие путем введения в разработку типовых конструкций или технологических процессов.

Выделяют четыре основных принципа стандартизации: системность, повторяемость, вариантность и взаимозаменяемость. Под системностью понимают внедрение самосогласованных и не избыточных стандартов, описывающих стандартизуемые объекты. Повторяемость — есть очевидный принцип разработки и многократного применения однотипных составных частей и процессов. Вариантность требует уменьшения количества составных частей до рационального минимума. Принцип взаимозаменяемости обеспечивает совместимость деталей при разработке их новых версий.

Видно, что концепция платформенного решения, базирующаяся на модульном принципе проектирования изделий, полностью удовлетворяет всем перечисленным принципам. Таким образом, внедрение в конструкторском отделе платформенных решений или даже просто построение разработок на основе модульного принципа дает начало важным процессам стандартизации и унификации. Эта работа в конечном итоге приведет к ряду очевидных преимуществ как для разработчика, так и для заказчика. Разработчик за счет систематизации всех составляющих продукта, а также отработки каждого этапа сборки и испытаний, получает сокращение сроков производства, оптимизацию издержек, повышение надежности готового изделия. Упрощаются все стадии создания и сопровождения продукта: проектирование, конструирование, производство, транспортировка, ремонт и т. п. Пользователи же заинтересованы в комплексной эргономичности товаров: для широкого класса задач применяются продукты, схожие по принципам функционирования и управления; есть возможность использовать их раздельно, либо объединяя оборудование в более сложные системы. Наиболее четко это прослеживается на примерах измерительного оборудования и программного обеспечения.

Несмотря на распространенность и внешнюю очевидность подхода, его реализация всегда становится для исполнителей творческой задачей без универсальных алгоритмов и готовых однозначных решений. Поэтому опыт реализации подобных решений представляет определенный интерес для инженерно-технических команд. Оценка эффективности реализованного решения в каком-то численном эквиваленте — также задача неоднозначная. Пожалуй, единственные установленные количественные параметры, которыми сегодня можно оперировать, — это оценка уровней стандартизации и унификации изделия, методика расчета которых регламентируется требованиями ГОСТ^{1,2}.

Задача данной статьи — представить и обсудить проекты построения платформенных решений для линейки однотипных приборов и оценить их эффективность по заданным параметрам стандартизации и унификации. В работе рассмотрены 2 проекта:

- 1) семейство эллипсометров (как пример завершенной и апробированной работы);
- 2) платформа сверхмалых космических аппаратов, совместимая со стандартом CubeSat (в качестве текущей задачи команды).

Платформенное решение для построения семейства эллипсометрического оборудования

Эллипсометрия — поляризационно-оптический метод, основанный на изучении изменения состояния поляризации света при отражении его от поверхности исследуемого объекта. Разработка эллипсометрического оборудования в Институте физики полупроводников Сибирского отделения Российской Академии наук ведется с 1967 г. Более чем за полвека были разработаны десятки моделей эллипсометров различного функционального назначения, изготовлено несколько сотен уникальных приборов. Они успешно используются для исследований в различных областях физики, химии, биологии, для контроля в оптических и полупроводниковых технологиях как в научных лабораториях, так и в производстве. Зачастую для решения частных задач (таких как температурные или магнитооптические измерения, контроль *in situ* электрохимических процессов или процессов эпитаксиального роста и т. п.) разрабатываются узкофункциональные эллипсометры. Несмотря на большое разнообразие решаемых задач и модификаций аппаратуры, в основе всех этих приборов лежат преимущественно одни и те же функциональные узлы.

Для приборов нового поколения, разрабатываемых на базе статической схемы^{3,4}, такими узлами являются: источник-формирователь зондирующего излучения, анализатор отраженного излучения, механический блок, обеспечивающий позиционирование образца, и регистрирующая часть измерительной аппаратуры. Остальной набор узлов зависит от типа и назначения эллипсометрического оборудования. Все узлы функционируют, как единое целое благодаря управляющей электронике, которая обеспечивает автоматизацию измерений. Комплект модулей управляющей электроники в данном случае и составляет основу платформенного решения.

Существуют два принципиально отличающихся подхода к проектированию системы автоматизации:

- 1) разработка специальной схемы под каждый прибор (проект);
- 2) создание единой платформы с возможностью модернизации и дополнения различными функциональными блоками в зависимости от поставленных задач.

¹ ГОСТ Р 15.207-2005. Аппаратура военного назначения. Общие требования по стандартизации и унификации. Введ. 01.01.2007. М.: Изд-во стандартов, 2007. 21 с.

² РД 50-33-80. Определение уровня унификации и стандартизации изделий. Методические указания. Введ. 01.01.1981. М.: Изд-во стандартов, 1982. 15 с.

³ Свидетельство на полезную модель №16314 РФ. Эллипсометр / Спесивцев Е.В., Рыхлицкий С.В. Приоритет от 13.11.98. Оpubл. 20.12.2000 // Бюллетень изобретений № 35.

⁴ Патент № 2302623 РФ. Эллипсометр / Спесивцев Е.В., Рыхлицкий С.В., Швец В.А. Приоритет от 28.09.2005. Оpubл. 10.07.2008 // Бюллетень изобретений № 19.

Каждый из подходов имеет свои плюсы и минусы. В первом случае при проектировании отдельной схемы для каждого типа оборудования удастся провести разовую разработку за более короткое время, но всякая новая версия предполагает чаще всего повторение проделанной работы, потребляя дополнительные ресурсы (время, средства на разработку и проектирование). При втором подходе требуется более глубокая первоначальная проработка, создание гибкой платформы с широкими возможностями модернизации. Но в таком случае разработка нового типа прибора требует в последующем малых вложений, появляется возможность усовершенствования имеющегося оборудования под более сложные задачи. Именно из этих соображений для системы автоматизации был выбран подход с использованием единой платформы, базирующейся на наборе функциональных блоков (электронных модулей).

Разбиение управляющей электроники эллипсометрического оборудования на функциональные блоки

Построение платформенного решения начинается с анализа спектра задач, потенциально решаемых с помощью разрабатываемых приборов, и формулировки перечня необходимых функций приборов. В данном случае речь идет об автоматизации эллипсометрического эксперимента. Соответственно часть функционала определяется принципами измерения, свойственными методу эллипсометрии, а вторая половина — базируется на потребительских свойствах прибора, т. е. обусловлена автоматизацией процессов. Показатель качества разработанной платформы для семейства приборов интуитивно можно сформулировать, как минимальное количество базовых электронных модулей, обеспечивающих максимум широты модельного ряда приборов.

В данном случае, с точки зрения унифицированности электронных модулей, разработка велась со следующими исходными данными:

1) **конструктивные (механические)** — не предъявлялись, так как габариты и конструкция приборов были собственной (коллектива) разработки. Для обеспечения «модульности» разрабатываемой платформы каждый электронный модуль должен быть конструктивно обособлен — выполнен на отдельной печатной плате с унифицированными соединителями для стыковки с остальными модулями прибора;

2) **функциональные** — каждый электронный модуль имеет уникальное функциональное назначение (или набор функций), не пересекающийся с остальными модулями;

3) **интерфейсные** — строго унифицированная реализация выбранного информационного интерфейса. Также унификации подлежат применяемые соединители и схема их распайки.

Ниже рассмотрена конкретная реализация набора модулей с указанием их функционала и в контексте решаемых прикладных задач. Для семейства эллипсометров, разработанных на сегодняшний день, варианты компоновки приборов из отдельных функциональных блоков схематично изображены на рис. 1.

Основной блок платформы — модуль обмена данными (МОД) между управляющим компьютером и электронной частью эллипсометра. Далее к нему добавляются в зависимости от типа эллипсометра различные измерительные модули, модули управления двигателями, посредством которых происходит вращение оптических элементов, и другие специальные модули.

Базовым эллипсометром в рассматриваемом семействе является быстродействующий лазерный эллипсометр с ручным переключением азимутальных положений оптических элементов (такие переключения необходимы для учета аппаратных ошибок). Роль электроники в данной версии заключается в измерении световых потоков, которое обеспечивает модуль регистрации (МР) оптических сигналов [1], и в передаче данных в компьютер, реализуемой модулем обмена данными. Усовершенствованная версия этого эллипсометра включает также автоматическое переключение положений оптических элементов за счет применения модуля управления двигателями (МУД) постоянного тока.

В спектральном эллипсометре [2], помимо автоматизации вращения оптических элементов, требуется обеспечить сканирование по длинам волн. С этой целью к электронному блоку автоматического эллипсометра добавляется:

1) модуль управления шаговым двигателем (МУШД) монохроматора, который обеспечивает перестройку длины волны в процессе измерения спектров эллипсометрических параметров;

2) модуль электроники монохроматора (МЭМ), отвечающий за управление электропитанием и обработку сигналов концевых переключателей механических узлов.

На базе автоматического лазерного эллипсометра разработан и создан сканирующий по площади эллипсометр [3]. Он предназначен для картирования оптических свойств по поверхности шайбы. Этот прибор содержит моторизованный двухкоординатный столик для перемещения образца. Для автоматизации столика в схеме используется разработанный ранее модуль управления шаговым двигателем в количестве 2 шт. (по одному на каждую координатную ось столика). Управляющая программа обеспечивает синхронное перемещение столика в двух координатах по заданной траектории и проведение оптических измерений.

На базе автоматического лазерного эллипсометра разработаны также узкофункциональные автоматизированные установки: высокотемпературный лазерный эллипсометрический комплекс [4], магнитоэллипсометрический комплекс [5, 6] и эллипсометрический комплекс для мониторинга электрохимических

процессов [7]. Для работы этих комплексов необходимы дополнительные каналы передачи данных, кроме тех, которые обеспечивают эллипсометрические измерения.

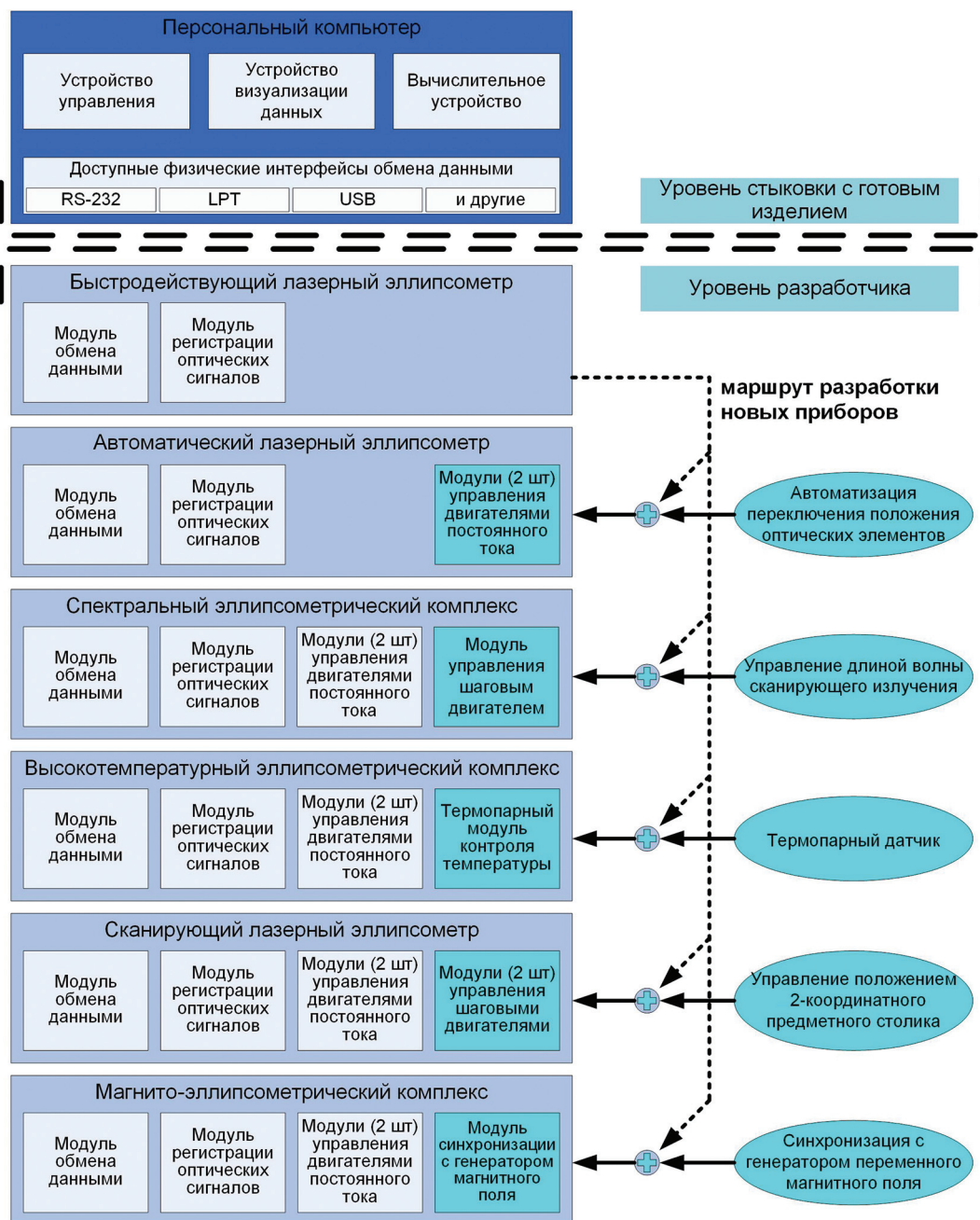


Рис. 1. Схема семейства быстродействующих эллипсометров

Для температурного комплекса — это канал регистрации аналогового сигнала термодатчика, получение данных которого осуществляется дополнительным модулем регистрации. Синхронизация оптических и температурных измерений обеспечивается управляющей программой. Такая синхронизация особенно актуальна при проведении быстрых нагревов исследуемых структур с длительностью температурного импульса порядка секунды.

Магнитоэллипсометрический комплекс был разработан для измерения магнитооптического эффекта Керра. Дополнительный канал передачи данных используется здесь для синхронизации оптических измерений с модулированным магнитным полем. В этом случае модуль контроля температуры заменяется модулем синхронизации измерений с фазой генератора (МСГ), задающего ток в катушке электромагнита. С помощью этого модуля производится накопление полезного сигнала с целью подавления случайных шумов, при этом измеренные эллипсометрические параметры отображаются, как функция фазы модулированного магнитного поля. Магнитоэллипсометрические комплексы разработаны на базе как лазерного эллипсометра, так и на основе спектрального.

В эллипсометрическом комплексе для мониторинга электрохимических процессов дополнительный канал и аналогичный модуль управления используются для регистрации в реальном времени анодного тока и синхронизации этих измерений с эллипсометрическими данными.

Еще одна разработка, интересная для прикладного применения — отображающий эллипсометр [8], который позволяет мгновенно получать карту распределения оптических и структурных параметров по поверхности исследуемого образца без применения механического перемещения. Достигается это засветкой образца широким лучом лазерного излучения и последующей регистрацией отраженного луча компактной матрицей фотодетекторов, например, прибором с зарядовой связью (ПЗС). В этом случае в комплекте электроники вместо модуля регистрации применяется покупной модуль ПЗС-матрицы с управляющей электроникой.

Итак, «платформой» в данном случае служит набор из семи электронных модулей, различные комбинации которых позволяют получить широкий ряд эллипсометрической аппаратуры. Платформенное решение позволило во всех перечисленных приборах интегрировать управление новым узлом в уже имеющуюся архитектуру электроники базовой модели без какой-либо ее (архитектуры) перестройки. Любая новая разработка собирается, как конструктор путем добавления к базовой модели дополнительных модулей, осуществляющих взаимодействие с механическими или электрическими узлами, добавленными к базовой версии. Такой подход имеет ряд преимуществ. Для производителя аппаратуры — это возможность быстрой и легкой модификации оборудования путем встраивания в уже разработанную систему дополнительных модулей. Для пользователя при определенных условиях появляется возможность сопряжения эллипсометра с экспериментальной установкой на базе имеющегося протокола. При этом замена одной модели на другую не требует значительных изменений в интерфейсном узле.

Важное преимущество платформы состоит в том, что установленный алгоритм метрологической калибровки эллипсометра, определяющий его аппаратную функцию, не нуждается в принципиальных изменениях при последующих модификациях прибора. При этом любой апгрейд аппаратной функции распространяется на всю линейку эллипсометров и не требует разработки новых алгоритмов, учитывающих особенности управления в данной модифицированной версии. В конечном итоге это положительно сказывается на метрологических характеристиках приборов и точности проводимых измерений.

Итоговый комплект электронных модулей эллипсометрической аппаратуры и показатели унификации

Рассматриваемый здесь платформенный подход изначально подразумевает актуальность оценки показателя межпроектной унификации, поскольку сама платформа разрабатывается, исходя из намерения использовать ее в нескольких параллельных проектах.

Как говорилось выше, порядок выполнения и контроля требований по стандартизации и унификации определяются национальными нормативными документами. Ниже приводится порядок расчета ключевых показателей оценки унификации и стандартизации.

Коэффициент межпроектной унификации $K_{\text{му}}$ характеризует уровень взаимной унификации группы изделий, а также степень сокращения номенклатуры составных частей (СЧ) в изделиях группы и рассчитывается в процентах по формуле:

$$K_{\text{му}} = \frac{\sum_{j=1}^H n_j - Q}{\sum_{j=1}^H n_j - n_{\text{max}}} \cdot 100, \quad (1)$$

где H — общее количество рассматриваемых проектов (изделий); n_i — количество типоразмеров СЧ в i -м проекте (изделии); Q — общее количество неповторяющихся типоразмеров СЧ, применяемых в группе из H проектов (изделий); n_{max} — максимальное количество типоразмеров СЧ одного проекта (изделия).

Численное значение Q вычисляют по формуле:

$$Q = \sum_{j=1}^m q_j,$$

где m — общее количество наименований СЧ рассматриваемых проектов (изделий); q_j — количество неповторяющихся типоразмеров СЧ j -го наименования.

Согласно нормативным документам, показатели унификации задаются на начальном этапе проектирования изделий и требуют дальнейшего подтверждения (а, возможно, и корректировки) в ходе всего процесса разработки. Исходя из опыта выполнения опытно-конструкторских работ, типовым требованием к коэффициенту межпроектной унификации является количественный показатель $K_{\text{му}} \geq 60\%$.

В табл. 1 представлены различные функциональные блоки и типы приборов, в которых они используются. Символом «V» помечены проекты, в которых присутствует данный блок (число перед символом отражает количество применяемых идентичных модулей), а символом «x» — отсутствует.

Таблица 1. Используемые составные части (модули) в различных типах эллипсометров

Применяемые составные части (модули)		Типы эллипсометров									Количество типов-размеров составных частей одного наименования, q_j
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	
Номер, m	Наименование*	n_1	n_2	n_3	n_4	n_5	n_6	n_7	n_8	n_9	
		Ручной лазерный	Автоматический лазерный	Спектральный автоматический	Сканирующий	Высокотемпературный (термоэллипсометр)	Лазерный магнитоэллипсометр	Спектральный магнитоэллипсометр	Терагерцовый	Отображающий	
1	МОД	V	V	V	V	V	V	V	V	V	1
2	МР	V	V	V	V	2V	V	V	2V	×	1
3	МУД	×	2V	2V	2V	×	2V	2V	×	×	1
4	МЭМ	×	×	V	×	×	×	V	×	×	1
5	МУШД	×	×	V	2V	×	×	V	2V	2V	1
6	МСГ	×	×	×	×	×	V	V	V		1
7	ПЗС	×	×	×	×	×	×	×	×	V	1
Итого n_i :		2	3	5	4	2	4	6	4	3	$Q = 7$
Σn_i :		33									
n_{\max} :		6									
$K_{\text{мв}} (\%)$		96,3									

* МОД — модуль обмена данными, МР — модуль регистрации, МУД — модуль управления двигателями (постоянного тока), МЭМ — модуль электроники монохроматора, МУШД — модуль управления шаговым двигателем, МСГ — модуль синхронизации с генератором (магнитного поля), ПЗС — ПЗС-матрица с управляющей электроникой.

Расчет коэффициента межпроектной унификации для эллипсометров всех модификаций, по данным, представленным в таблице, дает значение 96,3 %, что говорит об очень высокой степени унификации.

Стоит обратить внимание, что в случае разработки отдельных решений под каждый новый проект (без применения платформенного подхода) формула (1) заведомо даст значение, близкое к нулю, даже при сохранении предложенного функционального разбиения по модулям. Например, разработка уникального модуля регистрации для каждого нового проекта приведет к росту соответствующего значения q_i и соответственно росту значения Q . В пределе по всем модулям мы получаем, что значение Q сравнивается с суммой всех n_i , что приводит к нулевому значению показателя $K_{\text{мв}}$. В то же время очевидно, что разработка новых модулей под каждый проект — задача трудоемкая.

Из табл. 1 видно, что не существует таких двух модулей, которые бы одинаково входили в состав линейки приборов, т. е. уменьшить количество модулей за счет объединения функционала двух модулей в едином устройстве невозможно. В то же время большего количества модулей, очевидно, не требуется, так как все научные и технологические задачи удалось выполнить, комбинируя в приборах имеющиеся модули. Таким образом, можно утверждать, что полученное платформенное решение является оптимальным с точки зрения предложенного разбиения по функционалу электронных модулей.

На практике же полученный высокий показатель степени унификации рассмотренного платформенного решения подтверждается следующими фактами:

- 1) за прошедшие 15 лет на указанной платформе разработано более 10 разновидностей эллипсометров (некоторые модели не приведены в настоящей статье);
- 2) совокупно изготовлено и внедрено более 100 эллипсометров;
- 3) за 15 лет работы данным набором модулей без каких-либо доработок удалось решить широкий спектр задач для научных, технологических и производственных областей.

Платформа сверхмалых космических аппаратов, совместимая со стандартом CubeSat

Другой пример реализации платформенного решения на основе модульного принципа — построенная универсальная платформа сверхмалых космических аппаратов (СмКА). Проект реализуется в Отделе атмосферных исследований Новосибирского государственного университета.

За последние годы СмКА получили широкое применение в различных областях науки, и потенциал возможностей их использования только растет. Применение новых технологий в отрасли космического

приборостроения позволило добиться значительной миниатюризации космических аппаратов, и, как следствие, уменьшения стоимости и сроков изготовления микро- и наноспутников. Эти тенденции значительно изменили стандарты беспилотной космонавтики и сделали возможным запуск собственного спутника и проведение различного рода экспериментов на орбите не только крупными государственными предприятиями, но и частными компаниями, небольшими научным коллективам, студентами и даже школьниками. Все это породило спрос на нано-спутники. А инженеры космического приборостроения столкнулись с растущей конкуренцией на рынке.

Особенно большую роль сыграло появление в США в 1999 г. размерного стандарта спутников — CubeSat. Особенность CubeSat — фиксированные габариты, которые меняются кратно 1U (unit) — это космический кубик $10 \times 10 \times 10 \text{ см}^3$, 2U — в 2 раза больший, т. е. $10 \times 10 \times 20 \text{ см}^3$, 3U — $10 \times 10 \times 30 \text{ см}^3$ и т. д. Формат получил широкое распространение. Ежегодно в мире создаются сотни СмКА непосредственно в указанном форм-факторе. Кроме того, для спутников, спроектированных по стандарту CubeSat, были разработаны транспортно-пусковые контейнеры для размещения и запуска СмКА именно таких геометрических параметров [9]. На данный момент большое количество российских ракетносителей по умолчанию оснащено пусковыми контейнерами, подходящими под запуск спутников формата CubeSat. Россия как лидер по космическим запускам ежегодно выводит на орбиту сотни зарубежных КА стандарта CubeSat, российских спутников среди них единицы. Одна из главных причин такого отставания — отсутствие инфраструктуры и сервисов, обеспечивающих быструю и относительно дешевую разработку специализированных СмКА.

Задача команды заключается в разработке российской универсальной платформы СмКА, совместимой со стандартом CubeSat¹, которая бы позволила проектировать относительно недорогие спутники в короткие сроки под конкретные задачи заказчика.

Любой космический аппарат можно разделить на две основные части: это системы, обеспечивающие его функционирование и выживание в условиях космического пространства, и полезная нагрузка, выполняющая конкретные задачи (научные, исследовательские, утилитарные). Так как системы, обеспечивающие работу спутника, занимаются общими от миссии к миссии задачами, их структурно выделили в платформу КА. Разработанная однажды, в дальнейшем она будет использоваться для проектирования спутников с различными полезными нагрузками.

Платформа построена по модульному принципу, включает в себя набор всех необходимых базовых модулей, в том числе шасси и набор исполнительных систем. Платформа рассчитана на проектирование СмКА весом до 20 кг, функционирующих на орбитах до 2000 км. Таким образом, в техническом задании команды — «конструктор» модели спутника. Совместимость унифицированных модулей с габаритным стандартом CubeSat позволяет предлагать заказчику не только СмКА как таковые, но и вывести на рынок, в том числе и мировой, отдельные конструктивные модули собственной разработки.

Для описания состава космического аппарата в космической отрасли принято понятие «схемы деления», в которой указывается разбивка на подсистемы. Схема деления для рассматриваемой платформы СмКА в упрощенном и наглядном виде приведена на рис. 2. Именно схема деления и определяет первичное разбиение платформы на функциональные модули. В рамках данной работы полезная нагрузка выделяется в отдельный единый элемент и не входит в рассмотрение параметров унификации.

Составные части платформы следующие:

1) **шасси** — конструктивные элементы СмКА, обеспечивающие его механическую прочность (каркас), любые раскрывающиеся элементы (при их наличии), кабельная сеть и пассивные средства обеспечения теплового режима [10]. Здесь состав сильно неоднороден, т. е. имеются узлы, которые могут использоваться в разных форм-факторах, и достаточно много уникальных деталей;

2) **система электроснабжения**, содержащая три основных узла: узел генерации электроэнергии (солнечные батареи), узел хранения энергии (аккумуляторные батареи) и узел распределения электроэнергии (контроллер питания). В зависимости от требуемого энергобаланса СмКА в различных случаях может меняться количество аккумуляторных модулей и солнечных батарей;

3) **система ориентации и позиционирования**, имеющая в своем составе датчики (солнечные датчики, датчики горизонта, гироскопический измеритель вектора угловой скорости, магнитометры, датчик GPS/ГЛОНАСС) и исполнительные органы (магнитные катушки);

4) **бортовой радиокomплекс (БРК)**, включающий в себя средства передачи и приема информации для получения телеметрии и управления КА [11, 12]. Также структурно в радиокomплекс включаются антенно-фидерные системы: антенны, высокочастотные кабели, волноводы и прочее. В данном случае модуль бортового радиокomплекса дополнительно выполняет функции центрального бортового вычислителя (бортовой машины).

Основываясь на этих исходных параметрах, в табл. 2 представлены и декомпозированы различные составные части платформы СмКА. В качестве гипотетических проектов рассмотрены наиболее часто

¹ Стандарт ISO 17770:2017. Системы космические. Малые спутники в виде куба (кубсаты). Введ. 26.06.2017. М.: Изд-во стандартов, 2017. 16 с.

встречающиеся конфигурации 1U, 2U, 3U и 6U. По аналогии с табл. 1, символом «V» помечены проекты, в которых присутствует данный блок (число перед символом отражает количество применяемых идентичных модулей), а символом «×» — отсутствует.

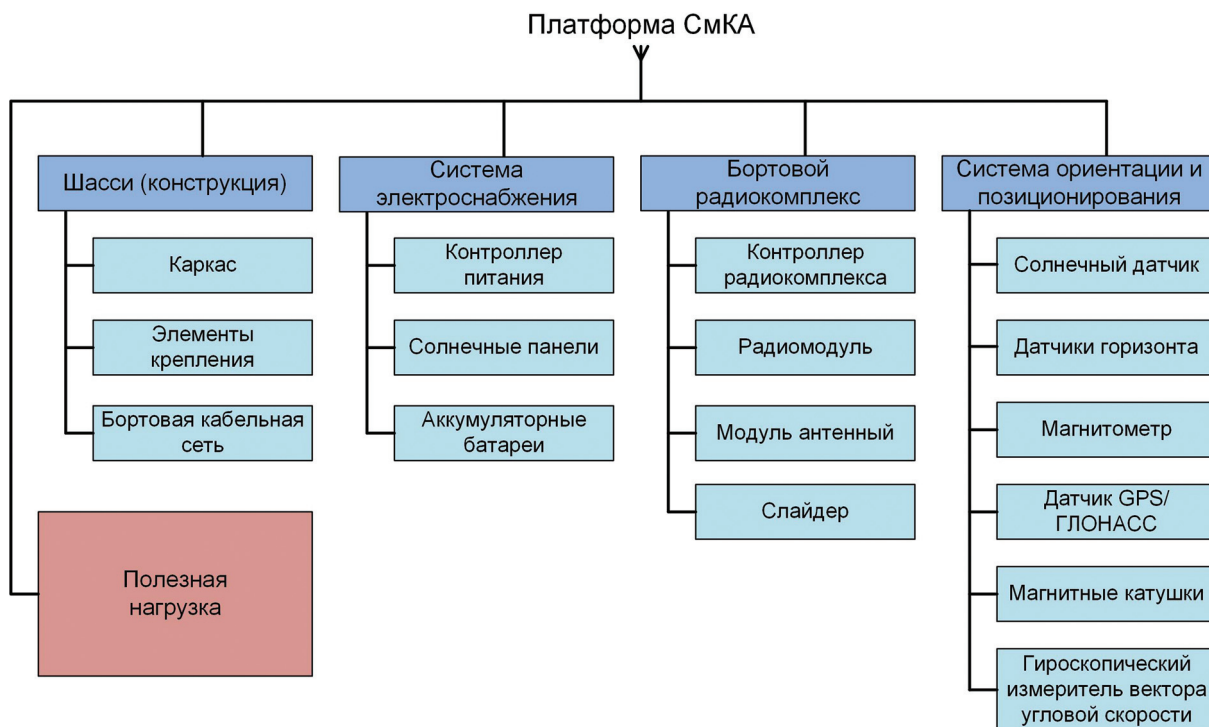


Рис. 2. Схема деления платформы малого космического аппарата, совместимого со стандартом CubeSat

Таблица 2. Используемые узлы в различных форм-факторах платформы малого космического аппарата, совместимого со стандартом CubeSat

Номер, t	Подсистема	Применяемые составные части (узлы) Наименование	Проект (форм-фактор платформы)				Количество типоразмеров составных частей одного наименования, q_j
			1	2	3	4	
			n_1	n_2	n_3	n_4	
			1U	2U	3U	6U	
1	Шасси	Рамка	4V	6V	8V	12V	1
2		Стойка 1	16V	24V	32V	48V	1
3		Стойка 2	×	24V	32V	48V	1
4		Вставка 15,24 мм	V	V	V	V	1
5		Вставка 5,65 мм	V	V	V	V	1
6		Втулка 3 мм	V	V	V	V	1
7		Солнечная панель	6V	10V	14V	22V	4
8		Рама несущая	V	V	V	V	4
9		Солнечная панель откидная 1U	2V	×	×	×	1
10		Солнечная панель откидная 3U	×	×	2V	×	1
11	Система электропитания	Узел генерации электроэнергии	V	V	2V	2V	2
12		Узел хранения энергии	V	V	2V	4V	1
13		Контроллер питания	V	V	V	V	1

Таблица 2. Продолжение

Применяемые составные части (узлы)			Проект (форм-фактор платформы)				Количество типоразмеров составных частей одного наименования, q_j
Номер, m	Подсистема	Наименование	1	2	3	4	
			n_1	n_2	n_3	n_4	
			1U	2U	3U	6U	
14	Система ориентации и позиционирования	Солнечный датчик	V	V	V	V	2
15		Датчики горизонта	V	V	V	V	1
16		Гироскопический измеритель вектора угловой скорости	V	V	V	V	1
17		Магнитометр	V	V	V	V	1
18		Датчик GPS/ГЛОНАСС	V	V	V	V	1
19		Магнитные катушки	V	V	V	V	1
20		Бортовой радио-комплекс	Контроллер БРК	V	V	V	V
21	Радиомодуль 1		V	V	V	V	1
22	Радиомодуль 2		×	V	V	V	1
22	Модуль антенный 1		2V	×	2V	2V	1
24	Модуль антенный 2		×	×	2V	2V	1
25	Слайдер		×	V	×	×	1
Итого n_j :			20	21	23	22	$Q = 33$
Всего:			86				
n_{\max}			23				
$K_{\text{МУ}} (\%)$			84,1				

Расчет коэффициента межпроектной унификации по данным, представленным в табл. 2, дает значение более 84 %.

Интересной особенностью рассмотрения платформы СмКА (в отличие от рассмотренной ранее платформы эллипсометрического оборудования) является тот факт, что одни и те же составные части могут отличаться (например, типоразмерами) при использовании в разных проектах. Такая ситуация наиболее естественна для механических элементов шасси. Наличие размерного ряда отдельных составных частей платформы приводит к уменьшению предельного значения $K_{\text{МУ}}$. В этом смысле понятно, почему значение $K_{\text{МУ}}$ для платформы СмКА оказался ниже, чем для случая с эллипсометрическим оборудованием (хотя прямое сравнение значений для разных платформ не всегда корректно). Более того, для платформы СмКА рассмотрен полный перечень составных частей, а не только управляющая электроника.

Заключение

В статье рассмотрено применение платформенного подхода к проектированию широкой линейки автоматизированных устройств. Изложен собственный опыт и практика подхода на примерах разработки эллипсометрического оборудования и платформы для сверхмалых космических аппаратов. В обоих случаях дано определение понятию платформенного решения, подробно описаны составные части платформ.

Сделана оценка эффективности платформенного решения в количественных показателях стандартизации и унификации. Значение коэффициента межпроектной унификации составило:

- 1) для платформы эллипсометрического оборудования — 96 %;
- 2) для платформы сверхмалых космических аппаратов — 84 %.

Абсолютные значения коэффициента межпроектной унификации для разных проектов сравнивать между собой можно лишь условно, но каждое из значений по отдельности служит относительным показателем для будущего развития соответствующих платформ. Так, изменения в проекте, приводящие к повышению уровня стандартизации и унификации, свидетельствуют об увеличении эффективности работы команды разработчиков. Таким образом, количественное значение показателей стандартизации и унификации служит хорошим индикатором для принятия решений (инженерных и управленческих) о внесении изменений в разрабатываемые изделия.

На основе полученных высоких значений показателей унификации продемонстрирована эффективность модульного принципа построения электронной аппаратуры как фундамента концепции платформенного подхода.

Литература

1. Прокопьев В.Ю. Проектирование четырехканального контроллера АЦП для регистрации оптического излучения // Сборник научных трудов новосибирского государственного технического университета. 2014. № 3(77). С. 25–36.
2. Рыхлицкий С.В., Спесивцев Е.В., Швеце В.А., Прокопьев В.Ю. Спектральный эллипсометрический комплекс ЭЛЛИПС-1891-САГ // Приборы и техника эксперимента. 2012. № 2. С. 161–162.
3. Рыхлицкий С.В., Спесивцев Е.В., Швеце В.А., Прокопьев В.Ю. Сканирующий эллипсометрический комплекс МИКРОСКАН-3М // Приборы и техника эксперимента. 2009. № 3. С. 155–156.
4. Швеце В.А., Чикичев С.И., Прокопьев В.Ю., Рыхлицкий С.В., Спесивцев Е.В. Эллипсометрический комплекс для исследования быстропротекающих высокотемпературных процессов // Автометрия. 2004. Т. 40. № 6. С. 61–69.
5. Рыхлицкий С.В., Швеце В.А., Спесивцев Е.В., Прокопьев В.Ю. Лазерный магнитоэллипсометр // Приборы и техника эксперимента. 2009. № 4. С. 181–182.
6. Рыхлицкий С.В., Швеце В.А., Спесивцев Е.В., Прокопьев В.Ю. Спектральный магнитоэллипсометр // Приборы и техника эксперимента. 2009. № 5. С. 166–167.
7. Швеце В.А., Кручинин В.Н., Рыхлицкий С.В., Прокопьев В.Ю., Уваров Н.Ф. Эллипсометрическая in situ диагностика роста анодных пористых оксидных пленок на алюминии // Оптика и спектроскопия. 2015. Т. 118. № 2. С. 292–299. doi: 10.7868/S0030403415020166
8. Спесивцев Е.В., Рыхлицкий С.В., Аульченко Н.А., Прокопьев В.Ю. Матричный эллипсометрический комплекс МЭК-2 // Приборы и техника эксперимента. 2011. № 6. С. 137–138.
9. Прокопьев В.Ю., Кусь О.Н., Оссовский А.В. Малые космические аппараты стандарта CubeSat. Современные средства выведения // Вестник науки Сибири. 2014. № 2(12). С. 71–80.
10. Gorev V., Prokopyev V., Prokopyev Y., Sidorchuk A. Time-saving method of orbital thermal regime calculations of nanosatellites as exemplified by a 3U CubeSat // MATEC Web of Conferences. 2018. V. 158. P. 01012. doi: 10.1051/mateconf/201815801012
11. Doroshkin A., Zadorozhny A., Kus O., Prokopyev V., Prokopyev Y. Laboratory testing of LoRa modulation for CubeSat radio communications // MATEC Web of Conferences. 2018. V. 158. P. 01008. doi: 10.1051/mateconf/201815801008
12. Doroshkin A.A., Zadorozhny A.M., Kus O.N., Prokopyev V.Y., Prokopyev Y.M. Experimental Study of LoRa Modulation Immunity to Doppler Effect in CubeSat Radio Communications // IEEE Access. 2019. V. 7. P. 75721–75731. doi: 10.1109/ACCESS.2019.2919274

Авторы

Прокопьев Виталий Юрьевич — научный сотрудник, заведующий лабораторией, Новосибирский государственный университет, Новосибирск, 630090, Российская Федерация, Scopus ID: 36070784100, 57192945475, ORCID ID: 0000-0001-9314-5492, vprok1981@mail.ru

References

1. Prokopyev V.Yu. Designing of the four channel ADC controller for optical radiation measurements. *Transaction of scientific papers of the Novosibirsk state technical university*, 2014, no. 3(77), pp. 25–36. (in Russian)
2. Rykhlytski S.V., Spesivtsev E.V., Shvets V.A., Prokop'ev V.Y. Spectral ellipsometric complex ELLIPS-1891 SAG. *Pribery i tekhnika eksperimenta*, 2012, no. 2. pp. 161–162. (in Russian)
3. Rykhlytski S.V., Spesivtsev E.V., Shvets V.A., Prokop'ev V.Y. Scanning ellipsometric setup MICROSCAN-3M. *Pribery i tekhnika eksperimenta*, 2009, no. 3, pp. 155–156. (in Russian)
4. Shvets V.A., Chikichev S.I., Prokop'ev V.Yu., Rykhlytski S.V., Spesivtsev E.V. Ellipsometric complex for studying rapidly-running high-temperature processes. *Avtometriya*, 2004, vol. 40, no. 6, pp. 61–69. (in Russian)
5. Rykhlytski S.V., Shvets V.A., Spesivtsev E.V. Laser magnetoellipsometer. *Pribery i tekhnika eksperimenta*, 2009, no. 4, pp. 181–182. (in Russian)
6. Rykhlytski S.V., Shvets V.A., Spesivtsev E.V. Spectral magnetoellipsometer. *Pribery i tekhnika eksperimenta*, 2009, no. 5, pp. 166–167. (in Russian)
7. Shvets V.A., Kruchinin V.N., Rykhlytski S.V., Prokop'ev V.Y., Uvarov N.F. Ellipsometric in situ diagnostics of the growth of porous anodic oxide films on aluminum. *Optics and Spectroscopy*, 2015, vol. 118, no. 2, pp. 277–283. doi: 10.1134/S0030400X15020162
8. Spesivtsev E.V., Rykhlytski S.V., Aul'chenko N.A., Prokop'ev V.Y. Matrix ellipsometric complex IEC-2. *Pribery i tekhnika eksperimenta*, 2011, no. 6, pp. 137–138. (in Russian)
9. Prokop'ev V.Yu., Kus O.N., Ossovskii A.V. Small spacecraft standard CubeSat. Modern means of elimination. *Siberian Journal of Science*, 2014, no. 2(12), pp. 71–80. (in Russian)
10. Gorev V., Prokopyev V., Prokopyev Y., Sidorchuk A. Time-saving method of orbital thermal regime calculations of nanosatellites as exemplified by a 3U CubeSat. *MATEC Web of Conference*, 2018, vol. 158, pp. 01012. doi: 10.1051/mateconf/201815801012
11. Doroshkin A., Zadorozhny A., Kus O., Prokopyev V., Prokopyev Y. Laboratory testing of LoRa modulation for CubeSat radio communications. *MATEC Web of Conferences*, 2018, vol. 158, pp. 01008. doi: 10.1051/mateconf/201815801008
12. Doroshkin A., Zadorozhny A., Kus O., Prokopyev V., Prokopyev Y. Experimental Study of LoRa Modulation Immunity to Doppler Effect in CubeSat Radio Communications. *IEEE Access*, 2019, vol. 7, pp. 75721–75731. doi: 10.1109/ACCESS.2019.2919274

Authors

Vitaly Yu. Prokopyev — Scientific researcher, Laboratory head, Novosibirsk State University, Novosibirsk, 630090, Russian Federation, Scopus ID: 36070784100, 57192945475, ORCID ID: 0000-0001-9314-5492, vprok1981@mail.ru