

ВОЗМОЖНОСТИ АВТОМАТИЗАЦИИ УПРАВЛЕНИЯ МЕХАНИЗАЦИЕЙ КРЫЛА АЭРОДИНАМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ САМОЛЕТА В ПРОЦЕССЕ ЭКСПЕРИМЕНТА В ТРАНСЗВУКОВОЙ АЭРОДИНАМИЧЕСКОЙ ТРУБЕ Т-128

В.Д. Вермель, И.Н. Качарава, А.В. Левицкий, С.Я. Севостьянов, А.О. Шардин (ФГУП «ЦАГИ» им. проф. Н.Е. Жуковского), В.В. Соломадин (ООО «ТЕХПРОМ – Авиакосмические Системы»)

Проанализированы возможности автоматизации управления механизацией крыла аэродинамической модели магистрального самолета в процессе эксперимента в трансзвуковой аэродинамической трубе Т-128 с использованием компактных сервоприводов. Определены требования к сервоприводам по развиваемым усилиям и габаритам, обеспечивающим размещение во внутренних объемах консоли крыла. Показано, что их удовлетворение возможно при применении специализированного гидравлического сервопривода.

Ключевые слова: аэродинамическая модель, автоматизация управления, трубный эксперимент, гидравлический сервопривод, прочность.

Введение

Актуальным направлением развития современного аэродинамического эксперимента является оснащение исследуемых моделей системой дистанционного отклонения управляющих поверхностей: рулей и механизации крыла. Применение такой системы позволит достичь существенного сокращения времени и стоимости испытаний [1].

В настоящее время для задания необходимых углов установки рулей и элементов механизации крыла на моделях традиционно используются кронштейны, фиксирующие конкретные угловые положения. Во время проведения типового эксперимента, перед каждым пуском аэродинамической трубы изменяется положение одного из элементов механизации, при неизменном положении всех остальных. Для установки элемента механизации в новое угловое положение испытания прерываются, проводится перестановка элементов механизации, и труба снова запускается. При введении автоматизации отклонения механизации, дистанционное изменение углового положения элемента может быть осуществлено непосредственно во время эксперимента, без необходимости остановки трубы. В этом случае продолжительность эксперимента будет складываться из длительности работы трубы и времени, затраченного на подготовку модели к испытаниям.

Наиболее актуально решение данной задачи для полумоделей, испытываемых в трансзвуковой аэродинамической трубе Т-128, широко используемых при отработке аэродинамической компоновки крыла магистральных самолетов (рис. 1). При характерном для полумоделей размахе консоли крыла ~ 2,2 м и наддуве рабочей части аэродинамической трубы давлением до 4...5 атм. удается получить подобие обтеканию натурного самолета по числам Рейнольдса. Необходимость наддува и последующего сброса давления в случае ручной перестановки эле-



Рис. 1. Крупномасштабная полумодель магистрального пассажирского самолета

ментов механизации крыла приводит к дополнительным затратам электроэнергии и времени оккупации трубы. Они составляют (в текущих ценах на электроэнергию) ~150 тыс. руб. и ~ 1,0 час для одного положения органа управления. Наряду с экономическим аспектом автоматизация отклонения может дать существенное повышение информативности эксперимента за счет подключения к модели полунатурной самолетной системы управления для отработки алгоритмов работы самолетной САУ.

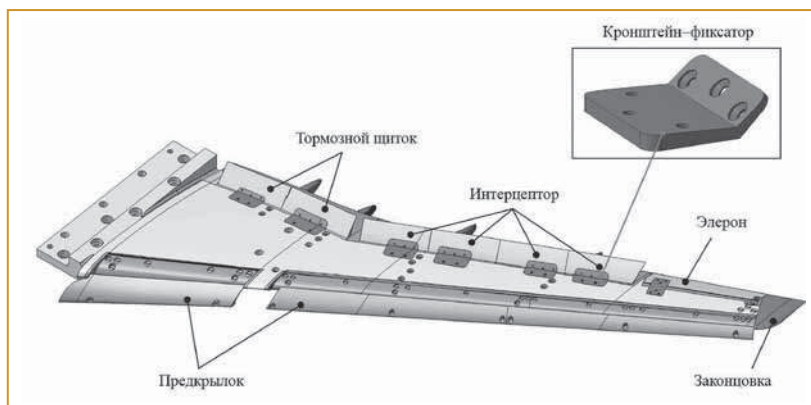


Рис. 2. Механизованная консоль крыла

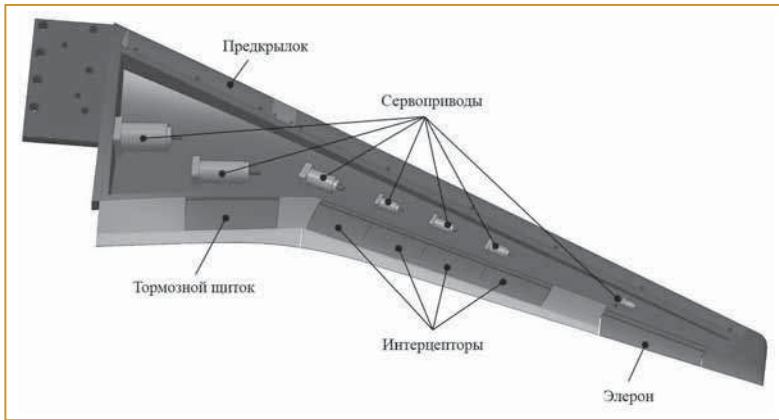


Рис. 3. Рациональная компоновка сервоприводов с нишей в консоли крыла для их размещения

Компоновка сервоприводов системы дистанционного управления

Исполнительными компонентами системы дистанционного управления (СДУ) являются сервоприводы, обеспечивающие отклонение элементов механизации крыла в заданные угловые положения [3]. При этом передача движения и размещение сервоприводов существенно осложняется малыми строительными высотами крыла, особенно в зоне элеронов — элементов, наиболее удаленных от корня консоли (рис. 2).

Предпочтительным является расположение приводов вблизи отклоняемых поверхностей с целью снижения длины трансмиссии, суммарного люфта и возможных упругих деформаций в цепочке элементов проводки управления.

В этой связи рассмотрим доступные для размещения сервоприводов внутренние объемы крыла типовой полумодели. На рис. 3 представлена математическая модель консоли крыла со стилизованной нишей для размещения сервоприводов. На рисунке показано их возможное положение по размаху.

Предполагается наиболее простое изготовление ниши фрезерованием на станке с ЧПУ. Размеры ниши в сечениях ограничиваются не только местными величинами хорды и толщины крыла, но и необходимостью восприятия крылом изгибающего момента от действующих аэродинамических сил.

Требования к механическим характеристикам сервоприводов

Основными функциональными требованиями, предъявляемыми к сервоприводам для системы дистанционного управления, являются: обеспечение (при допустимых габаритах) крутящих моментов, необходимых для вращения элементов механизации в рассматриваемом диапазоне углов отклонения, а также угловая точность и повторяемость позиционирования отклоняемых поверхностей. Допол-

нительным требованием может стать скорость их перекладки, определяемая в случае имитации управления самолетом в трубном эксперименте критерием подобия Фруда. Ориентировочные величины максимальных аэродинамических нагрузок (подъемная сила Y , осевой шарнирный момент M_z), действующих на элементы механизации крыла полумодели магистрального самолета, измеренные при испытаниях в Т-128, а также диапазоны углов отклонения приведены в таблице. В таблице приводятся геометрические размеры (хорда b и толщина c) сечений консоли крыла, соответствующих расположению элементов механизации (рис. 4).

Из таблицы видно, что наиболее высокие требования по усилию предъявляются к сервоприводу управления элероном, при малых габаритах сечения крыла для его размещения. В отличие от других элементов механизации, отклонение элеронов как органов управления по крену, выполняется на всех режимах полета самолета. В этой связи преобладающий объем испытаний проводится с вариацией угловой ориентации элерона. Полученное для него конструктивное решение дистанционного отклонения может быть применено и для других элементов механизации крыла.

Учет условий прочности для консоли крыла полумодели с нишей под размещение сервоприводов управления механизацией крыла

Характерные размеры ниши в крыле для размещения сервоприводов управления механизацией должны, в том числе удовлетворять требованиям прочности модели. Необходимо также учитывать целесообразное направление фрезерования выборок — со стороны верхней или нижней поверхности консоли крыла.

Требованием прочности для консолей крыла аэродинамической модели, учитывающего возможности возникновения срывного обтекания, определенную нестабильность характеристик конструкционного материала, наличие концентраторов напряжений

Таблица. Нагрузки на элементы механизации и габариты сечений консоли крыла

Отклоняемый элемент	Y , кгс	M_z , кгс·м	Диапазон углов отклонения, град	Габариты сечения	
				b , мм	c , мм
Тормозной щиток (секция 1)	50	1,5	0...60	700	100
Тормозной щиток (секция 2)	50	1,5	0...60	500	65
Интерцептор (секция 1)	40	1,1	0...45	400	50
Интерцептор (секция 2)	40	1,1	0...45	350	40
Интерцептор (секция 3)	35	1	0...45	300	35
Интерцептор (секция 4)	35	1	0...45	250	30
Элерон	60	1	-25...25	200	25

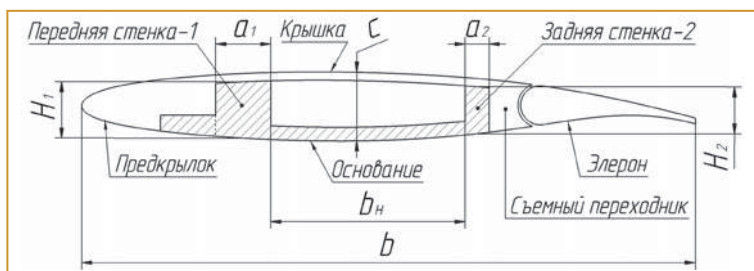


Рис. 4. Параметры текущего сечения консоли крыла с выборкой в зоне элерона

и т.д., является обеспечение запаса по прочности к ожидаемой в эксперименте аэродинамической нагрузке, равного 4 [2].

Наиболее сложным является размещение сервопривода в концевой части крыла вблизи элерона, в области минимальных строительных высот, при обеспечении высоких значений крутящего момента (таблица).

Из условия обеспечения прочности консоли крыла на изгиб можно определить максимально возможные габариты ниши. Действующая на консоль крыла аэродинамическая нагрузка в Т-128 в условиях, соответствующих крейсерскому полету магистрального самолета, составляет $Y^y \approx 5000$ кгс, а соответствующая расчетная нагрузка (с учетом запаса прочности $n = 4$) $Y = Y^y \cdot n \approx 20\ 000$ кгс.

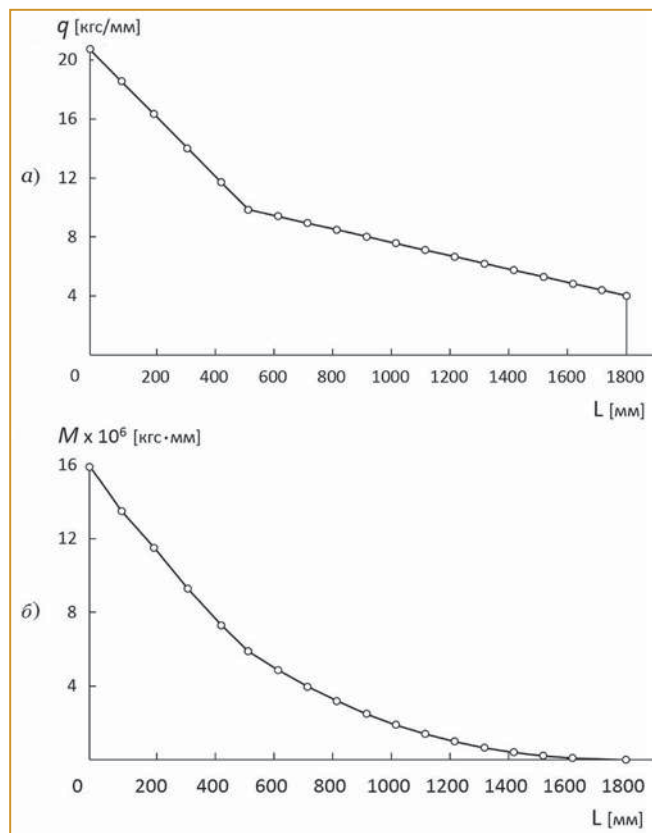


Рис. 5. Эпюры распределенных аэродинамических сил по размаху консоли, где а) эпюра погонных аэродинамических нагрузок, б) эпюра изгибающих моментов

Поскольку от действия аэродинамических сил в наибольшей степени нагружена растягивающимися напряжениями нижняя поверхность крыла, рациональной представляется выборка материала при изготовлении ниши со стороны верхней поверхности. Изготовленная ниша закрывается профилированной крышкой. Крышку и нижнее основание ниши при определении действующих напряжений в сечении от изгиба учитывать не будем. Основные геометрические параметры ниши в текущем сечении крыла обозначены на рис. 4.

На нем $(a_1 \times H_1)$ и $(a_2 \times H_2)$ – ограничивающие нишу передняя и задняя силовые стенки, воспринимающие действующие изгибные напряжения. Прилежащие к передней и задней кромкам части крыла (для размещения предкрылков, закрылков и элерона) ограничивают хорду b_H силовой части консоли.

На рис. 5 представлены эпюры, распределения по размаху погонной аэродинамической силы $q(L)$ и изгибающего момента M . Воспринимаемый передней и задней стенкой суммарный изгибающий момент в сечении крыла: $M = M_1 + M_2$. Момент распределяется пропорционально жесткостям (EI) стенок:

$$M_1 = M \frac{EI_1}{EI_1 + EI_2} = M \frac{I_1}{I_1 + I_2} \quad (1)$$

Соответственно:

$$M_2 = M \frac{I_2}{I_1 + I_2}, \quad (2)$$

здесь M_1, M_2 – доли общего изгибающего момента, а I_1, I_2 – моменты инерции для передней и задней стенок соответственно.

Значения максимальных напряжений растяжения-сжатия в стенках:

$$\sigma = \frac{M}{W}, \quad (3)$$

где W – момент сопротивления изгибу, определяемый геометрическими характеристиками стенок.

По условию максимального увеличения внутренних объемов ниши в крыле под размещение элементов СДУ, размеры a_1 и a_2 и должны быть минимальными. Используем соотношения для момента сопротивления изгибу $W_k = \frac{2I_k}{H_k}$ и момента инерции

$$I_k = \frac{a_k H_k^3}{12} \text{ для стенок (где } k = 1 \text{ или } 2 \text{ для передней или задней стенки). Тогда, выполнив преобразования, получим соотношения для определения напряжений в них:}$$

$$\sigma_1 = \frac{6 M H_1}{a_1 H_1^3 + a_2 H_2^3}$$

$$\sigma_2 = \frac{6 M H_2}{a_1 H_1^3 + a_2 H_2^3} \quad (4)$$



Рис. 6. Ниша центральной части консоли крыла магистрального самолета: под размещение сервоприводов системы управления механизацией крыла (а) с усиливающими перегородками (б)

Для аэродинамических профилей крыла магистральных пассажирских самолетов обычно $H_1 > H_2$. Следовательно, из (4) для обеспечения прочности консоли на изгиб необходимо выполнение условия: $\sigma_1 \leq \sigma_B$, где σ_B – предел прочности конструкционного материала консоли крыла. Касательными напряжениями, обусловленными отклонением погонных аэродинамических сил $q(L)$ от оси жесткости по размаху консоли крыла вследствие их малости можно пренебречь.

Задание геометрических параметров задней стенки ниши из конструктивных соображений (в частности, обеспечения достаточной высоты) сводит задачу оценки толщины передней стенки ниши к рассмотрению первого уравнения из (4).

Выполнив преобразования, получаем оценку:

$$a_1 = \frac{6M}{\sigma_B H_1^2} - a_2 \left(\frac{H_2}{H_1} \right)^3. \quad (5)$$

В соответствии с полученной оценкой, на рис. 6 а построена максимальная возможная ниша для размещения сервоприводов СДУ отклонением

механизации крыла аэродинамической полумодели магистрального самолета для испытаний в аэродинамической трубе Т-128 при трансзвуковых скоростях.

Спроектированная ниша при обеспечении необходимой прочности может существенно снизить жесткость консоли. Для ее увеличения достаточно введения подкрепляющей структуры в виде поперечных перегородок (рис. 6 б), ограничивающих отсеки для установки сервоприводов.

Выбор типа сервоприводов для системы дистанционного отклонения механизацией крыла

Проведенный анализ силовых приводов, которые могут быть использованы для дистанционного управления механизацией крыла, показал, что требованиям по развиваемым усилиям в ограниченных габаритах электрические приводы не удовлетворяют.

По сравнению с электрическими, гидравлические приводы обладают существенно большим показателем удельной мощности и при одних и тех же габаритах могут развивать значительно большие рабочие усилия. Среди готовой продукции, представленной на рынке, гидравлические приводы требуемых размеров отсутствуют. В следствие чего, была выполнена разработка компактного гидравлического привода со следующими характеристиками: габариты 27x75x13 мм, развиваемое усилие ~100 кгс, ход штока 15 мм, скорость движения штока 1 мм/с при номинальном давлении гидравлической системы 20 МПа (рис. 7). Разработанный привод удовлетворяет условиям управления элероном аэродинамической полумодели магистрального самолета для проведения трубных испытаний в Т-128. На основе разработанного гидропривода спроектирован и изготовлен макет системы управления элероном крупноразмерной аэродинамической полумодели современного магистрального самолета [4] с имитацией аэродинамической загрузки (рис. 7).

Гидравлическая система отклонения элерона в разработанном макете выполнена как следящая, с обратной связью по положению штока гидроцилиндра. Драйвер управления считывает сигнал датчика положения, выполняя его сопоставление с управляющим сигналом. Автоматизация управления, с одной стороны, обеспечивает необходимое перемещение элерона, а с другой — позволяет сохранять заданный угол отклонения во время проведения испытаний и корректировать его в случае образования скачков давления набегающего аэродинамического потока в трубе.

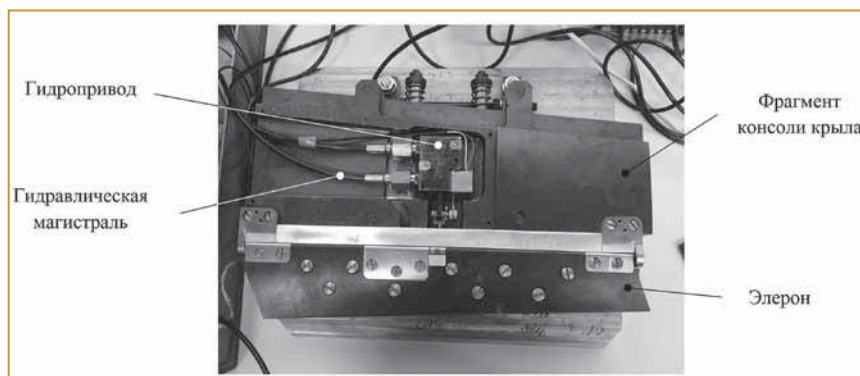


Рис. 7. Макет системы дистанционного управления на основе гидропривода

Я горжусь своими крыльями хотя бы потому, что они позволяют мне вернуть способность летать другим.

В. Белинский

Проведенные стендовые испытания макета системы дистанционного отклонения элерона показали принципиальную возможность практической реализации СДУ в аэродинамической трубе Т-128.

Заключение

Показана целесообразность введения автоматизации управления механизацией крыла для полумоделей, используемых при экспериментальной отработке аэродинамической компоновки магистральных самолетов в трансзвуковой трубе Т-128 ФГУП ЦАГИ. Применительно к действующим аэродинамическим силам, исходя из условий прочности определены максимальные размеры ниши под размещение сервоприводов управления отклонением механизацией крыла. Для наиболее нагруженного компонента механизации — элерона, обеспечивающего управление самолетом по крену, установлены требования к сервоприводу, выполнение которых может быть обеспечено специализированным гидравлическим сервомотором. Его разработка позволила изготовить действующий макет отсека крыла с управлением элероном и подтвердила

принципиальную возможность реализации системы автоматического управления (САУ) механизацией крыла в трансзвуковой трубе Т-128.

Список литературы

1. Шардин А.О., Копылов А.А., Севостьянов С.Я., Громыш-ков А.Д. и др. Проектирование и изготовление крупномасштабных моделей самолётов для исследования аэродинамических характеристик в аэродинамической трубе на примере типовой модели пассажирского самолёта. // Известия Самарского научного центра РАН. Т. 18. № 1 (2). Самара: СНЦ РАН. 2016. С. 378-381.
2. Руководство для конструкторов (РДК-43). Том 1. Аэродинамика, гидродинамика, прочность. М: БНТИ НКАП ЦАГИ, 1943. 1053 С.
3. Левицкий А.В., Севостьянов С.Я. Система дистанционного управления отклоняемыми поверхностями аэродинамической модели самолета для трубных испытаний // Разработка аэродинамических моделей со средствами дистанционного управления в трубном эксперименте и совершенствование технологии изготовления модельных конструктивных элементов с малой жесткостью в режиме высокоскоростного фрезерования с применением динамических опор и средств гашения вибраций. Тр. ЦАГИ. Выпуск 2719. М: ЦАГИ, 2013. С. 11-18.
4. Левицкий А.В., Севостьянов С.Я. Разработка системы управления рулевыми поверхностями аэродинамической модели самолета на основе гидравлического силового привода // Проблемы разработки и производства аэродинамических моделей летательных аппаратов. Тр. ЦАГИ. Вып. 2768. М: ЦАГИ, 2018. С. 26-32.

Вермель Владимир Дмитриевич — д-р техн. наук, начальник отделения;

Качарова Ираклий Нугзарович — начальник сектора,

Левицкий Александр Вячеславович — инженер-конструктор I кат.,

Севостьянов Сергей Яковлевич — ведущий инженер-конструктор,

Шардин Антон Олегович — начальник отдела

ФГУП «ЦАГИ» им. профессора Н.Е. Жуковского,

Соломадин Владимир Валерьевич — ведущий инженер-конструктор

ООО «ТЕХПРОМ — Авиакосмические Системы».

E-mail: npk@tsagi.ru solomadin.v@techprom.net

Промышленный хакатон ProHack 4.0 в КРОК

16–17 ноября 2019 г. в офисе КРОК (Москва) прошел промышленный хакатон ProHack 4.0. Участники решали 10 задач от девяти компаний, среди которых «Газпром нефть», Норникель, УралХим, ФосАгро, MARS и др. С помощью компьютерного зрения, IoT, блокчейн, машинного обучения и других технологий Industry 4.0 участники соревнования разрабатывали прототипы решений и представили их авторам задач и экспертному жюри.

Всего организаторы хакатона — КРОК и Сибур — получили около 30 заданий от металлургических, нефтегазовых, химических, горнодобывающих, энергетических и продовольственных предприятий. В итоговый список вошли задачи, которые можно решить за 36 часов с эффективным применением технологий Industry 4.0. Авторы этих задач смогли протестировать инновационные подходы для повышения эффективности производственных процессов, безопасности труда и оптимизации трудозатрат.

В хакатоне принимали участие разработчики, Web-дизайнеры, аналитики, инженеры и другие специалисты. Участие в хакатоне помогло участникам развить навыки работы с востребованными технологиями и расширить профессиональные связи.

Среди задач хакатона — определение наличия средств индивидуальной защиты на персонале, контроль качества шоколадных батончиков, предиктивная диагностика оборудования, оптимизация взаиморасчетов между участниками производственного процесса, поиск решения для экономии электроэнергии в шахтах.

Половина задач предполагает применение видеоаналитики/компьютерного зрения. Так, одно нефтехимическое предприятие планирует устранить случаи забивки оборудования при производстве синтетических каучуков, что приводит к остановке линии и простоям. А крупный агрохолдинг пришел на хакатон с задачей спасения молочных поросят, получающих травмы при кормлении свиноматкой.

На очном этапе Prohack 4.0 команды получили доступ к высокоскоростному блокчейн-фреймворку Echronum (Bitfury), блокчейн-платформе Мастерчейн, набору промышленных решений от Cisco: инструменты для промышленного Wi-Fi, построения сети LoRaWAN, IoT-платформу Cisco Kinetic, видеонаблюдение Cisco VSM. Производитель систем контроля и диагностики для промышленных и охранных предприятий Пергам предоставил участникам наработками в области детектирования газов на промышленных объектах. BellSoft предоставил программно-аппаратные решения для сбора, анализа и управления данными на базе Nvidia Jetson Nano и Raspberry Pi 4. На аппаратных платформах была предустановлена безопасная среда разработки и запуска Java-приложений — Liberica JDK. Участники создавали и тестировали прототипы решений с помощью гибкой и масштабируемой "песочницы" на основе платформы КРОК Облачные сервисы.

Журнал «Автоматизация в промышленности» предоставил командам победителям и авторам задач специальные призы.

[Http://www.prohack.croc.ru](http://www.prohack.croc.ru)