



УДК 621.391:004.421

*В.С. Тутыгин, И.А. Пелконен, К.С. Кириленко*

## СПОСОБ И ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ПРЕЦИЗИОННОГО ИЗМЕРЕНИЯ ВРЕМЕНИ ЗАДЕРЖКИ РАДИОИМПУЛЬСА

*V.S. Tutygin, I.A. Pelkonen, K.S. Kirilenko*

### METHOD AND SOFTWARE FOR PRECISION MEASUREMENT OF TIME DELAY ECHO-SIGNALS OF RADARS

Рассмотрен новый способ и его программная реализация для прецизионного измерения времени задержки радиолокационного отраженного сигнала относительно зондирующего радиоимпульса, основанный на приблизительной оценке временного сдвига отраженного сигнала и итерационного алгоритма, включающего вычисление коэффициентов корреляции отраженного сигнала с несколькими эталонными сигналами, сплайн-интерполяцию, передискретизацию, обеспечивающего уточнение значения времени задержки.

РАДИОЛОКАЦИОННЫЙ ЭХО-СИГНАЛ. ЭТАЛОННЫЕ СИГНАЛЫ. КОРРЕЛЯЦИЯ. СПЛАЙН-ИНТЕРПОЛЯЦИЯ. ПЕРЕДИСКРЕТИЗАЦИЯ. ИТЕРАЦИОННЫЙ АЛГОРИТМ.

A new approach to the decision of a problem of delay definition noised radar echo-signals from an exciting radio impulse based on initial approach of delay received by means of autocorrelation procedure, and additional digital iterative approach of exact delay using nonconventional combination of normalized cross-correlation echo-signal with reference signals, spline-interpolation, oversampling are considered.

RADAR ECHO-SYGNAL. REFERENCE SIGNALS. CROSS-CORRELATION. SPLINE-INTERPOLATION. OVERSAMPLING. ITERATIVE ALGORITHM.

Известный способ измерения расстояния до объекта основан на измерении времени задержки отраженного радиолокационного сигнала относительно зондирующего. Такой способ применяется, например, в электромагнитно-акустических (ЭМА) толщиномерах [1], которые измеряют время прохождения ультразвукового импульса, порождаемого радиоимпульсом, через металлическое изделие.

Источник зондирующего радиоимпульса помещается у одной поверхности металлического изделия, сигнал, отраженный от другой поверхности, регистрируется. По времени задержки отраженного сигнала относительно зондирующего определяется толщина металла. При коррозии металлических изделий отраженный сигнал оказывается значительно зашумлен (см. рис. 1), что приводит к уменьшению точности определения временной задержки и, следовательно, к уменьшению точности определения толщины металла.

Для улучшения отношения сигнал/шум в отраженном сигнале могут применяться различные методы, такие, как оптимальная фильтрация (например, оптимальный

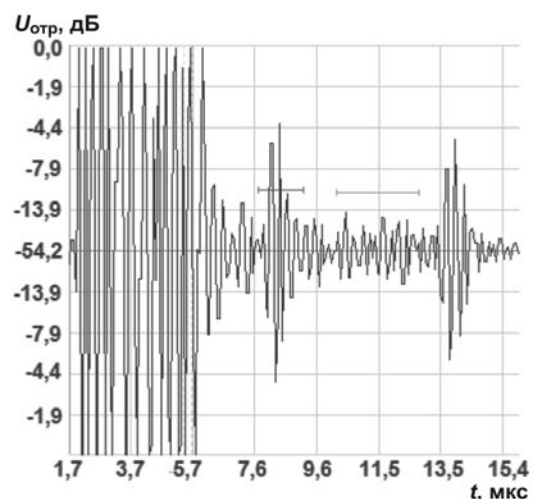


Рис. 1. Типичный отраженный сигнал ЭМА толщиномера

фильтр Колмогорова–Винера), прямое и обратное преобразование Фурье, автокорреляция.

Влияние шума в регистрируемом отраженном сигнале можно уменьшать и за счет многократного повторения эксперимента и синхронного накопления отраженных сигналов.

Однако при ограничении времени проведения измерения количество возможных накоплений сигнала должно быть ограничено или вообще должно отсутствовать. Поэтому задача повышения точности измерения временного сдвига зашумленного отраженного сигнала актуальна.

Использование традиционного подхода определения временного сдвига по максимуму отраженного сигнала или автокорреляционной функции для зашумленного сигнала не позволяет получить точное значение временного сдвига. Но, поскольку форма и начальная фаза отраженных сигналов известны, это дает возможность создать эталонные сигналы, соответствующие ожидаемому отраженному сигналу по форме и начальной фазе, и производить корреляционное сравнение отраженного сигнала с эталонными. Коэффициент корреляции отраженного сигнала с эталонным сигналом будет равен единице, если временной сдвиг отраженного и эталонного сигнала равен нулю и отраженный сигнал не зашумлен. Поэтому при отсутствии шумов найти временной сдвиг отраженного сигнала можно, производя корреляционное сравнение с эталонными сигналами, временной сдвиг эталонных сигналов подбирать до выполнения условия, когда коэффициент корреляции будет равен единице. Однако коэффициент корреляции уменьшается как при разнице времени сдвига отраженного и эталонного сигналов, так и при совпадении времени сдвига, но из-за наличия шума. Поэтому таким способом определить временную задержку зашумленного отраженного сигнала невозможно.

Предложенный нами в [2] способ определения времени сдвига отраженного сигнала основан на сочетании положительных качеств известного подхода и дополнительной цифровой обработки. Идея предлагае-

мого способа цифровой обработки заключается в том, что в небольшой окрестности от предполагаемого временного сдвига сигнала (приближенное значение временного сдвига сигнала может быть найдено с помощью автокорреляции или по максимуму амплитуды) вычисляются коэффициенты корреляции отраженного сигнала с несколькими эталонными сигналами в некоторой окрестности от приближенного значения временного сдвига, затем с помощью сплайн-интерполяции и передискретизации строится функция, выражающая зависимость коэффициента корреляции от временного сдвига эталонов, и находится максимум этой функции, по положению максимума определяется уточненное значение временного сдвига эталонного сигнала.

Теоретический анализ этого способа определения времени задержки отраженного радиоимпульса приведен в [3].

Коэффициент ковариации двух гармонических сигналов, имеющих одинаковую частоту и длительность, но отличающихся сдвигом во времени, определяется как

$$k_{\text{cov}} = \frac{1}{T} \int_0^T x(t)y(t - \Delta t) dt = \\ = \frac{1}{T} \int_0^T \sin\left(\frac{2\pi nt}{T}\right) \sin\left(\frac{2\pi n(t - \Delta t)}{T}\right) dt,$$

а коэффициент корреляции

$$k_{\text{cor}} = \frac{k_{\text{cov}}}{\sqrt{\sigma_x^2 \sigma_y^2}},$$

где

$$\sigma_x^2 = \frac{1}{T} \int_0^T \sin^2\left(\frac{2\pi nt}{T}\right) dt; \\ \sigma_y^2 = \frac{1}{T} \int_0^T \sin^2\left(\frac{2\pi n(t - \Delta t)}{T}\right) dt.$$

Функция  $k_{\text{cor}} = k_{\text{cor}}\left(\frac{\Delta t}{T}\right)$  может быть адекватно аппроксимирована параболой шестого порядка, обращенной вершиной вверх, и ее максимальное значение равно единице (рис. 2 а).

Если же второй сигнал зашумлен, вид функции коэффициентов взаимной корреляции сохранится (рис. 2 б), а коэффици-

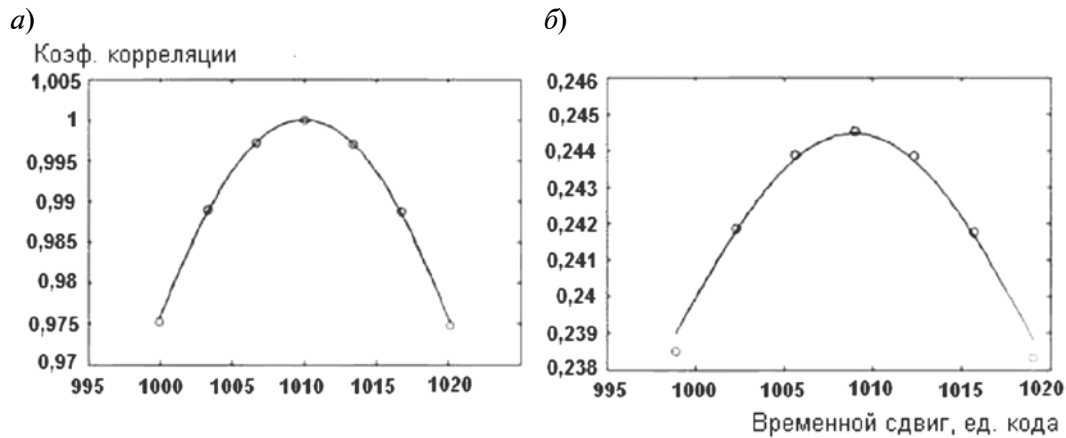


Рис. 2. Зависимость коэффициента корреляции от времени задержки при отсутствии шума (а) и при отношении сигнал/шум 1/3 (б). Точное значение времени задержки равно 1010. Аппроксимирующие кривые построены с помощью функции сплайн-аппроксимации `splaps` в MATLAB

ент взаимной ковариации может быть вычислен по формуле:

$$\begin{aligned}
 k_{cov2} &= \frac{1}{T} \int_0^T x(t)(y(t - \Delta t) + \xi(t)) dt = \\
 &= \frac{1}{T} \int_0^T \sin\left(\frac{2\pi n t}{T}\right) \left(\sin\left(\frac{2\pi n (t - \Delta t)}{T}\right) + \xi(t)\right) dt = \\
 &= k_{cov} + \frac{1}{T} \int_0^T \left(\sin\left(\frac{2\pi n t}{T}\right) \xi(t)\right) dt = \\
 &= k_{cov} + \xi(\theta) \frac{1}{T} \int_0^T \left(\sin\left(\frac{2\pi n t}{T}\right) dt\right),
 \end{aligned}$$

где  $0 < \theta < T$ , т. к. по теореме о среднем  $\int_a^b f(x)g(x)dx = f(\theta) \int_a^b g(x)dx, a < \theta < b$ .

Если  $n$  – целое число, то

$$\begin{aligned}
 \int_0^T \left(\sin\left(\frac{2\pi n t}{T}\right) dt\right) &= -\frac{T}{2\pi n} \cos\left(\frac{2\pi n t}{T}\right) \Big|_0^T = \\
 &= -\frac{T}{2\pi n} (1 - 1) = 0,
 \end{aligned}$$

отсюда  $k_{cov2} = k_{cov}$ .

Функция коэффициентов взаимной корреляции будет иметь вид:

$$k_{cor2} = \frac{k_{cov2}}{\sqrt{\sigma_{x2}^2 \sigma_{y2}^2}} = \frac{k_{cov}}{\sqrt{\sigma_x^2 \sigma_y^2}},$$

где

$$\sigma_{y2}^2 = \frac{1}{T} \int_0^T \left(\sin^2\left(\frac{2\pi n (t - \Delta t)}{T}\right) + \xi(t)\right) dt =$$

$$\begin{aligned}
 &= \frac{1}{T} \left\{ \int_0^T \left[\sin^2\left(\frac{2\pi n (t - \Delta t)}{T}\right) + \right. \right. \\
 &\quad \left. \left. + 2 \sin\left(\frac{2\pi n (t - \Delta t)}{T}\right) \xi(t) + \xi^2(t)\right] dt \right\} = \\
 &= \sigma_y^2 + \frac{2}{T} \int_0^T \sin\left(\frac{2\pi n (t - \Delta t)}{T}\right) \xi(t) dt + \frac{1}{T} \int_0^T \xi^2(t) dt.
 \end{aligned}$$

Применив теорему о среднем ко второму слагаемому, получим, что для случая, когда  $n$  – целое число, второе слагаемое равно нулю.

Определим  $\xi_1(t)$  как шум со средним квадратическим отклонением (СКО), равным единице, а  $\xi(t) = A\xi_1(t)$ , тогда получим  $\frac{1}{T} \int_0^T \xi^2(t) dt = A^2$ , где  $A$  – уровень шума, выраженный в долях СКО, т. е.  $A = \sigma_{noise}$ .

Более точно интеграл от квадрата шума или, другими словами, функция автоковариации шума, является случайной величиной и характеризуется математическим ожиданием, средним квадратическим отклонением и доверительным интервалом при заданном уровне доверительной вероятности.

Приведенные выше аналитические выражения позволяют количественно оценивать ожидаемую погрешность определения времени задержки отраженного радиолокационного сигнала предложенным способом.

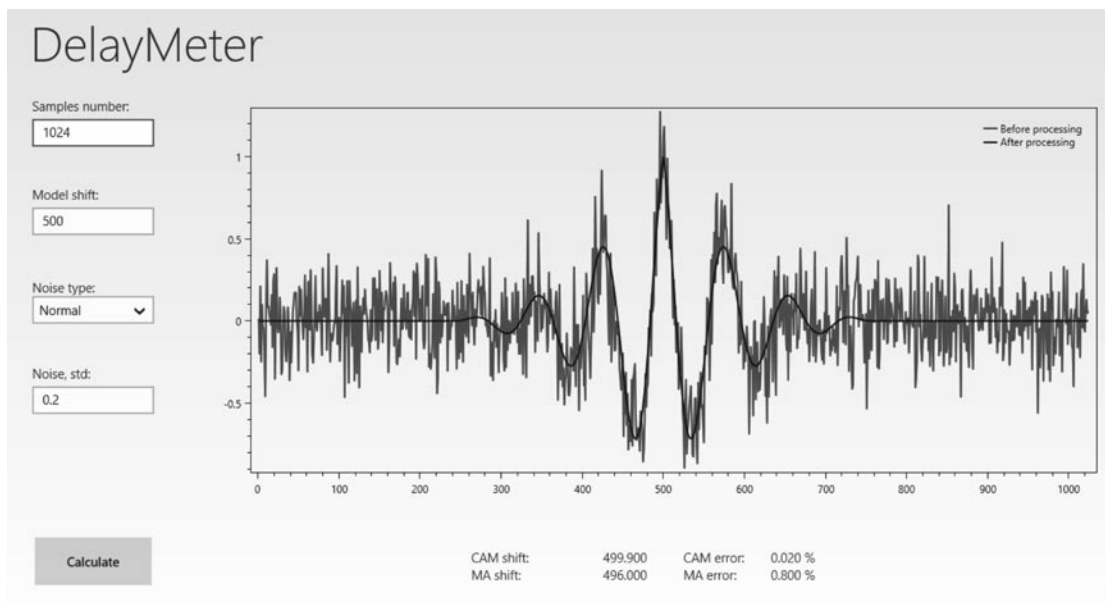


Рис. 3. Модельный сигнал (1024 отсчета, точное значение сдвига 500, нормальный шум с СКО 0,2)  
 Результат измерения задержки по максимуму амплитуды (МА): 496,0 (погрешность 0,8 %);  
 результат предложенного способа (САМ): 499,9 (погрешность 0,02 %)

В [4] приведена программа, реализующая предложенный способ в среде MATLAB. Для широкого практического применения нового способа нами разработана программа на языке С++, описанная в [5]. Реализация на языке С++ дает возможность переноса программы на микроконтроллер или цифровой сигнальный процессор, что позволяет создавать портативные цифровые ЭМА толщинометры высокой точности.

Функции коэффициентов корреляции и сплайн-интерполяции, необходимые при программной реализации способа измере-

ния времени задержки радиопульса, в стандартных библиотеках С++ отсутствуют, поэтому коэффициенты корреляции вычисляются в программе по приведенным выше формулам, а сплайн-интерполяция реализована согласно [6].

Работа программы проверена с использованием нормированного по максимуму амплитуды модельного сигнала, близкого к реальному сигналу ЭМА толщинометра, приведенному на рис. 1. Для моделирования нормально распределенного шума использован Mersenne Twister [7] – генератор

**Оценки погрешностей определения времени задержки отраженного радиолокационного сигнала традиционным и предложенным способами**

| СКО шума | Выборочное среднее относительной погрешности, % |                     | Выборочная дисперсия относительной погрешности, % |                     |
|----------|---|---------------------|---|---------------------|
|          | Традиционный способ                             | Предложенный способ | Традиционный способ                               | Предложенный способ |
| 0,00     | 0,000   | 0,000               | 0,000   | 0,000               |
| 0,04     | 0,094   | 0,019               | 0,062   | 0,004               |
| 0,08     | 0,186   | 0,024               | 0,175   | 0,005               |
| 0,12     | 0,276   | 0,041               | 0,274   | 0,013               |
| 0,16     | 0,312   | 0,054               | 0,389   | 0,016               |
| 0,20     | 0,326   | 0,060               | 0,500   | 0,019               |

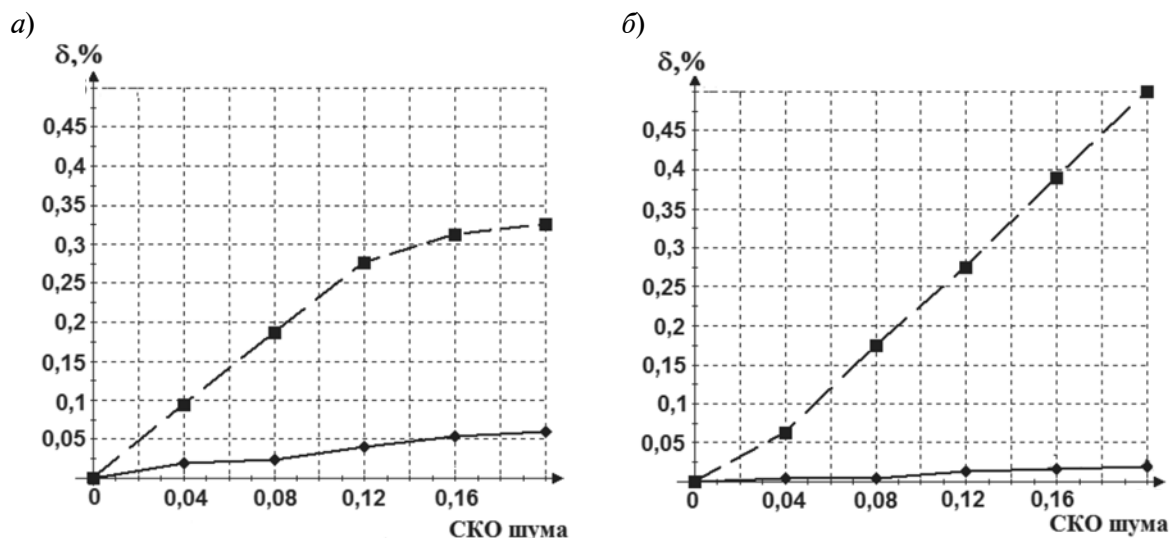


Рис. 4. Выборочное среднее относительной погрешности (а) и выборочная дисперсия относительной погрешности (б) измерения временной задержки радиоимпульса (◆◆◆◆) предложенный способ; (■■ ■■) традиционный способ

псевдослучайных чисел, из библиотеки random стандарта C++11, поддерживаемого компилятором Microsoft Visual C++ 11.0.

Предложенный способ реализован нами в среде Visual Studio 2012 в виде динамической библиотеки на языке C++. Для реализации графического интерфейса выбран тип приложения Windows Store Application, доступный в операционной системе Windows 8, и язык C#. Это позволяет использовать разработанное приложение для разных типов устройств (настольный компьютер, ноутбук, планшет и т. д.) и для разных архитектур процессоров (x86, x64, ARM) без изменения исходного кода. Графический интерфейс приложения приведен на рис. 3.

Для оценки погрешности измерения за-

держки предложенным и традиционным способами проведено сто опытов для каждого СКО шума от 0,0 до 0,2 с шагом 0,04. Результаты оценки относительной погрешности приведены в таблице и на рис. 4.

Использование данной программы в ЭМА толщиномерах позволяет значительно повысить точность измерения толщины металла, а использование операционной системы Windows 8 при создании графического интерфейса позволяет создать компактные недорогие системы для измерения толщины металла на базе планшетных компьютеров и USB-устройств сбора данных, пригодных для работы в полевых условиях.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Себко, В.П. Оптимизация параметров ЭМА толщиномеров для контроля тонкостенных изделий [Текст] / В.П. Себко, Г.М. Сучков, Е.А. Алексеев // Дефектоскопия. –2002. –№ 12. –С. 21–28.
2. Тутыгин, В.С. Способ измерения временных интервалов между радиоимпульсами [Текст] / В.С. Тутыгин // Патент РФ на изобретение № 2456632. –Приоритет от 21.03.2011. –Зарег. 20.07.2012.
3. Тутыгин, В.С. Цифровая обработка коротких сигналов [Текст] / В.С. Тутыгин. –СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2012. –164 с.
4. Тутыгин, В.С. Программа точного определения времени задержки радиолокационного отраженного сигнала [Текст] / В.С. Тутыгин // Свид. № 2011612678 о гос. рег. от 01.04.2011.
5. Пелконен, И.А. Программа определения времени задержки радиолокационного сигнала [Текст] / И.А. Пелконен, К.С. Кириленко, В.С. Тутыгин // В сб. Технологии Microsoft в теории и практике программирования. Матер. межвуз. конкурса-конф. студентов, аспирантов и молодых ученых Северо-Запада. –СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2013. –С. 43–45.
6. Форсайт, Дж. Машинные методы матема-

тических вычислений [Текст] / Дж. Форсайт, М. Малькольм, К. Мулер. — М.: Мир, 1980. — 276 с.  
7. Mersenne Twister Engine — C++ Reference

[Электронный ресурс] / Режим доступа [http://www.cplusplus.com/reference/random/mersenne\\_twister\\_engine/](http://www.cplusplus.com/reference/random/mersenne_twister_engine/)

#### REFERENCES

1. **Sebko V.P., Suchkov G.M., Alekseev E.A.** Optimizatsiia parametrov EMA-tolshchinomerov dlia kontroliia tonkostennykh izdelii / Defektoskopiia. — 2002. — № 12. — S. 21–28. (rus)

2. **Tutygin V.S.** Sposob izmereniia vremennykh intervalov mezhdu radioimpul'sami; Patent RF № 2456632; Prioritet 21.03.2011; Zareg. 20.07.2012. (rus)

3. **Tutygin V.S.** Tsifrovaia obrabotka korotkikh signalov. — St. Petersburg: Izd-vo Politekh. un-ta, 2012. — 164 s. (rus)

4. **Tutygin V.S.** Programma tochnogo opredeleniia vremeni zaderzhki radiolokatsionnogo otrazhennogo signala; Svid. № 2011612678 o gos.

reg. ot 01.04.2011. (rus)

5. **Pelkonen I.A.** Programma opredeleniia vremeni zaderzhki radiolokatsionnogo signala /V sb. Tekhnologii Microsoft v teorii i praktike programmirovaniia. Mater. mezhvuz. konkursa-konf. studentov, aspirantov i molodykh uchenykh Severo-Zapada. — St. Petersburg: Izd-vo Politekh. un-ta, 2013. — S. 43–45. (rus)

6. **Forsait Dzh., Mal'kol'm M., Mouler K.** Mashinnye metody matematicheskikh vychislenii. — Moscow: Mir, 1980. — 276 s. (rus)

7. Mersenne Twister Engine — C++ Reference. Available [http://www.cplusplus.com/reference/random/mersenne\\_twister\\_engine/](http://www.cplusplus.com/reference/random/mersenne_twister_engine/)

---

**ТУТЫГИН Владимир Семенович** — доцент кафедры информационных и управляющих систем Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, кандидат технических наук.

195251, Россия, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29.

E-mail: vs4141@mail.ru

**TUTYGIN, Vladimir S.** *St. Petersburg State Polytechnical University.*

195251, Politekhnikeskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia.

E-mail: vs4141@mail.ru

**ПЕЛКОНЕН Игнатий Андреевич** — студент кафедры информационных и управляющих систем Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Россия, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29.

**PELKONEN, Ignatiy A.** *St. Petersburg State Polytechnical University.*

195251, Politekhnikeskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia.

**КИРИЛЕНКО Кирилл Сергеевич** — студент кафедры информационных и управляющих систем Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Россия, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29.

**KIRILENKO, Kirill S.** *St. Petersburg State Polytechnical University.*

195251, Politekhnikeskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia.