

Приборостроение, метрология и информационно-измерительные приборы и системы

УДК 621.317

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОГО РАЗДЕЛЕНИЯ МГНОВЕННЫХ ЗНАЧЕНИЙ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ГАРМОНИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ*

В.С. Мелентьев¹, Ю.М. Иванов¹, А.Е. Сеницын², А.С. Пескова¹

¹Самарский государственный технический университет
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

²ООО «Метрология и автоматизация»
Россия, 443013, г. Самара, ул. Киевская, 5А

E-mail: vs_mel@mail.ru

Рассматривается новый метод измерения параметров (среднеквадратических значений напряжения и тока, активной и реактивной мощности) по мгновенным значениям гармонических сигналов, предусматривающий их пространственно-временное разделение. В отличие от известных методов, основанных на формировании дополнительных сигналов напряжения и тока и выявлении моментов переходов сигналов через ноль, реализация метода предполагает формирование вспомогательных сигналов только в канале напряжения. Предлагается структурная схема измерительной системы, реализующей метод. Приводятся результаты анализа погрешности метода, обусловленной отклонением реальных сигналов от гармонической модели. Полученные результаты позволяют выбирать соответствующие аппаратные средства в зависимости от предъявляемых требований по точности измерения.

Ключевые слова: гармонические сигналы, мгновенные значения, вспомогательные сигналы, гармоническая модель, погрешность.

Для оперативного измерения параметров гармонических и близких к гармоническим сигналов (среднеквадратических значений напряжения (СКЗН) и тока (СКЗТ), активной (АМ) и реактивной (РМ) мощности) все чаще используется подход, основанный на определении данных параметров по мгновенным значениям напряжения (МЗН) и тока (МЗТ), не связанных с длительностью периода

* Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант 16-08-00252 А).

Владимир Сергеевич Мелентьев (д.т.н., проф.), заведующий кафедрой «Информационно-измерительная техника».

Юрий Михайлович Иванов (к.т.н.), старший научный сотрудник кафедры «Информационно-измерительная техника».

Антон Евгеньевич Сеницын, руководитель проектов.

Анастасия Сергеевна Пескова, аспирант.

контролируемого сигнала [1]. Это обеспечивает сокращение времени определения информативных параметров.

Такой подход предусматривает три основных метода его реализации: временное разделение МЗН и МЗТ, их пространственное разделение и пространственно-временное разделение [2]. Очевидно, что во втором и третьем случаях время измерения без использования временной избыточности уменьшается [3].

Для упрощения алгоритма измерения, а также сокращения аппаратных затрат в качестве дополнительных сигналов используют ортогональные составляющие входных [4].

Использование ортогональных составляющих входных сигналов может привести к достаточно большой частотной погрешности фазосдвигающих блоков, которые осуществляют сдвиг входного сигнала на 90° . Изменение частоты в достаточно широких пределах может привести к тому, что угол сдвига фазы фазосдвигающих блоков может отличаться от 90° [5]. Это обстоятельство может вызвать дополнительную погрешность измерения, которая достигает 3–5 % [6].

Для исключения частотной погрешности находят применение методы измерения параметров гармонических сигналов, основанные на формировании вспомогательных сигналов, которые сдвинуты по фазе относительно входных на угол $\Delta\alpha$, значение которого может быть выбрано произвольным образом, и определении информативных параметров с использованием мгновенных значений входных и дополнительных сигналов [7].

Получившие в настоящее время распространение методы, основанные только на пространственном разделении МЗН и МЗТ, имеют ряд недостатков, обусловленных необходимостью формирования вспомогательных сигналов как в каналах напряжения, так и в каналах тока [8].

В статье рассматривается новый метод, использующий пространственно-временное разделение мгновенных значений и предусматривающий формирование вспомогательных сигналов только в канале напряжения.

Сущность метода заключается в том, что для определения информативных параметров создают только два вспомогательных сигнала напряжения. При этом первый вспомогательный сигнал сдвинут относительно основного по фазе на угол $\Delta\alpha$, а второй – на $2\Delta\alpha$ в сторону опережения. В момент времени, когда основное напряжение переходит через ноль, производится измерение МЗН первого и второго вспомогательных сигналов и МЗТ. Через интервал времени Δt , значение которого может быть выбрано произвольным образом, осуществляется дополнительное измерение МЗН основного и первого вспомогательного сигналов и МЗТ.

Сущность метода можно пояснить с помощью следующих временных диаграмм (рис. 1).

В предположении, что входное напряжение и ток являются гармоническими сигналами: $u_1(t) = U_m \sin \omega t$ и $i(t) = I_m \sin(\omega t + \varphi)$, вспомогательные напряжения принимают вид $u_2(t) = U_m \sin(\omega t + \Delta\alpha)$ и $u_3(t) = U_m \sin(\omega t + 2\Delta\alpha)$, где U_m – амплитуда напряжения; ω – угловая частота сигнала; φ – угол сдвига фаз между основным напряжением и током.

Когда основное напряжение $u_2(t)$ переходит через ноль из отрицательной полуволны в положительную или наоборот (момент времени t_1 на рис. 1), МЗН и МЗТ будут равны: $U_{21} = U_m \sin \Delta\alpha$; $U_{31} = U_m \sin 2\Delta\alpha$; $I_1 = I_m \sin \varphi$.

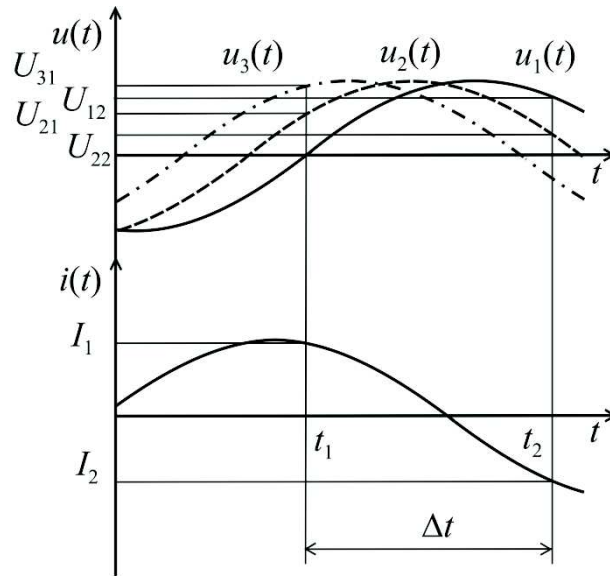


Рис. 1. Временные диаграммы, поясняющие метод

Через произвольный, в общем случае временной интервал Δt (момент времени t_2 на рис. 1) МЗН и МЗТ примут вид: $U_{12} = U_m \sin \omega \Delta t$; $U_{22} = U_m \sin(\Delta\alpha + \omega \Delta t)$; $I_2 = I_m \sin(\varphi + \omega \Delta t)$.

Произведя соответствующие преобразования с использованием МЗН и МЗТ, можно определить информативные параметры:

– СКЗН и СКЗТ

$$U_{СКЗ} = \frac{\sqrt{2}U_{21}^2}{\sqrt{4U_{21}^2 - U_{31}^2}}; \quad (1)$$

$$I_{СКЗ} = U_{21} \sqrt{\frac{2[U_{21}^2(I_1^2 + I_2^2) - I_1 I_2 |2U_{21}U_{22} - U_{12}U_{31}|]}{4U_{21}^4 - (2U_{21}U_{22} - U_{12}U_{31})^2}}; \quad (2)$$

– АМ и РМ

$$P = \frac{U_{21}^2 (2I_2 U_{21}^2 - I_1 |2U_{21}U_{22} - U_{12}U_{31}|)}{\sqrt{(4U_{21}^2 - U_{31}^2) [4U_{21}^4 - (2U_{21}U_{22} - U_{12}U_{31})^2]}}; \quad (3)$$

$$Q = \frac{I_1 U_{21}^2}{\sqrt{4U_{21}^2 - U_{31}^2}}. \quad (4)$$

На рис. 2 приводится вариант схемы измерительной системы (ИС), которая реализует рассматриваемый метод.

В ИС используются: преобразователи напряжения ПН и тока ПТ; блоки, осуществляющие сдвиг входного напряжения по фазе ФБН1 и ФБН2; аналого-цифровые преобразователи в каналах напряжения АЦП1 – АЦП3 и тока АЦП4; контроллер КНТ.

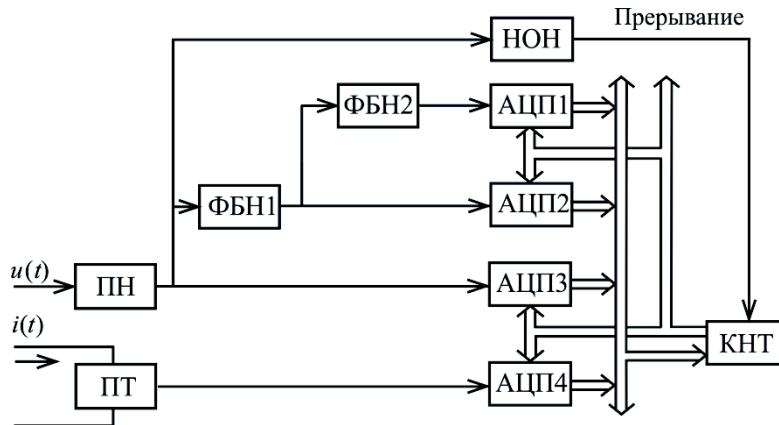


Рис. 2. Схема ИС, реализующей метод

Одной из проблем, возникающих при использовании данного метода, является возможность возникновения погрешности, обусловленной тем, что форма большинства реальных сигналов отличается от гармонической модели.

Для оценки такого вида погрешности чаще всего используют разработанную авторами методику [9], сущность которой основана на известном положении теории приближенных вычислений. В соответствии с данной методикой погрешность вычисления функции, аргументы которой заданы приближенно, может быть найдена с помощью дифференцирования данной функции. При этом для оценки предельного значения погрешности аргументам даются приращения, соответствующие наибольшему отклонению реального сигнала от гармонической модели [10].

В этом случае предельные значения абсолютных погрешностей определения информативных параметров в соответствии с (1) – (4) принимают вид:

$$\Delta U_{CK3} = \left(\left| \frac{\partial U_{CK3}}{\partial U_{21}} \right| + \left| \frac{\partial U_{CK3}}{\partial U_{31}} \right| \right) \Delta U_{\max}; \quad (5)$$

$$\Delta I_{CK3} = \left(\left| \frac{\partial I_{CK3}}{\partial U_{21}} \right| + \left| \frac{\partial I_{CK3}}{\partial U_{31}} \right| + \left| \frac{\partial I_{CK3}}{\partial U_{12}} \right| + \left| \frac{\partial I_{CK3}}{\partial U_{22}} \right| \right) \Delta U_{\max} + \left(\left| \frac{\partial I_{CK3}}{\partial I_1} \right| + \left| \frac{\partial I_{CK3}}{\partial I_2} \right| \right) \Delta I_{\max}; \quad (6)$$

$$\Delta P = \left(\left| \frac{\partial P}{\partial U_{21}} \right| + \left| \frac{\partial P}{\partial U_{31}} \right| + \left| \frac{\partial P}{\partial U_{12}} \right| + \left| \frac{\partial P}{\partial U_{22}} \right| \right) \Delta U_{\max} + \left(\left| \frac{\partial P}{\partial I_1} \right| + \left| \frac{\partial P}{\partial I_2} \right| \right) \Delta I_{\max}; \quad (7)$$

$$\Delta Q = \left(\left| \frac{\partial Q}{\partial U_{21}} \right| + \left| \frac{\partial Q}{\partial U_{31}} \right| \right) \Delta U_{\max} + \left| \frac{\partial Q}{\partial I_1} \right| \Delta I_{\max}. \quad (8)$$

В выражениях (5) – (8) ΔU_{\max} и ΔI_{\max} – абсолютные погрешности аргументов, которые в предельном случае соответствуют максимальным отклонениям МЗН и МЗТ реальных сигналов от соответствующих значений моделей.

Предельные абсолютные погрешности аргументов при условии, что параметры первых гармоник реальных напряжений и токов совпадают с их гармоническими моделями, равны

$$\Delta U_{\max} = U_{1m} \sum_{k=2}^{\infty} h_{uk} \quad \text{и} \quad \Delta I_{\max} = I_{1m} \sum_{k=2}^{\infty} h_{ik} ,$$

где $h_{uk} = \frac{U_{km}}{U_{1m}}$ и $h_{ik} = \frac{I_{km}}{I_{1m}}$ – коэффициенты соответствующих высших гармоник напряжения и тока;

U_{1m} и I_{1m} – амплитуды первых гармоник сигналов;

U_{km} и I_{km} – амплитуды соответствующих высших гармоник напряжения и тока.

Используя выражения (1) – (8), после преобразований можно найти относительные погрешности измерения СКЗН и СКЗТ и приведенные погрешности определения АМ и РМ:

$$\delta_{U_{СКЗ}} = \frac{\sum_{k=2}^{\infty} h_{uk} (2 \cos 2\Delta\alpha + |\cos \Delta\alpha|)}{2 |\sin^3 \Delta\alpha| \sqrt{1 + \sum_{k=2}^{\infty} h_{uk}^2}} ; \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \delta_{I_{СКЗ}} = & \frac{\sum_{k=2}^{\infty} h_{ik} [|\cos(\varphi + \omega\Delta t)| + |\cos \varphi|]}{|\sin \omega\Delta t| \sqrt{1 + \sum_{k=2}^{\infty} h_{ik}^2}} + \frac{\sum_{k=2}^{\infty} h_{uk}}{2 \sin^2 \omega\Delta t \sin^2 \Delta\alpha \sqrt{1 + \sum_{k=2}^{\infty} h_{ik}^2}} \times \\ & \times \left[2 |\sin \Delta\alpha| (\sin^2 \omega\Delta t + \sin^2 \varphi + 2 \cos \Delta\alpha \cos \omega\Delta t - 2) + \sin \omega\Delta t \sin(\Delta\alpha - \varphi) \times \right. \\ & \left. \times \sin(\omega\Delta t + \varphi) + |\cos(\omega\Delta t + \varphi) \cos \varphi| (|\sin 2\Delta\alpha| + 2 |\sin \Delta\alpha| + |\sin \omega\Delta t|) \right]; \quad (10) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \gamma_P = & \frac{\sum_{k=2}^{\infty} h_{ik} (|\cos \omega\Delta t| + 1)}{|\sin \omega\Delta t| \sqrt{1 + \sum_{k=2}^{\infty} h_{uk}^2} \sqrt{1 + \sum_{k=2}^{\infty} h_{ik}^2}} + \frac{\sum_{k=2}^{\infty} h_{uk}}{2 |\sin^3 \Delta\alpha| \sin^2 \omega\Delta t \sqrt{1 + \sum_{k=2}^{\infty} h_{uk}^2} \sqrt{1 + \sum_{k=2}^{\infty} h_{ik}^2}} \times \\ & \times \left\{ \sin \Delta\alpha [\sin \omega\Delta t \cos(\varphi + \omega\Delta t - \Delta\alpha) - \cos \varphi \cos \omega\Delta t \sin(\Delta\alpha + \omega\Delta t)] - 2 \cos 2\Delta\alpha \cos \varphi \times \right. \\ & \left. \times \sin^2 \omega\Delta t + 2 |\cos(\varphi + \omega\Delta t)| \sin^2 \Delta\alpha (1 + |\cos \Delta\alpha|) + |2 \cos \Delta\alpha \cos \varphi \sin^2 \omega\Delta t - \right. \\ & \left. - \cos(\varphi + \omega\Delta t) \sin \Delta\alpha \right\}; \quad (11) \end{aligned}$$

$$\gamma_Q = \frac{\sum_{k=2}^{\infty} h_{ik}}{\sqrt{1 + \sum_{k=2}^{\infty} h_{uk}^2} \sqrt{1 + \sum_{k=2}^{\infty} h_{ik}^2}} + \frac{\sum_{k=2}^{\infty} h_{uk} |\sin \varphi| (2 |\cos 2\Delta\alpha| + |\cos \Delta\alpha|)}{2 |\sin^3 \Delta\alpha| \sqrt{1 + \sum_{k=2}^{\infty} h_{uk}^2} \sqrt{1 + \sum_{k=2}^{\infty} h_{ik}^2}} . \quad (12)$$

Из выражения (9) следует, что погрешность измерения СКЗН определяется гармоническим составом напряжения и зависит от угла сдвига фазы $\Delta\alpha$.

Погрешности определения других информативных параметров согласно (10) – (12) находятся в зависимости еще и от угла сдвига фазы между напряжением и током φ .

Кроме того, на погрешности измерения СКЗТ и АМ оказывает влияние длительность интервала $\omega\Delta t$.

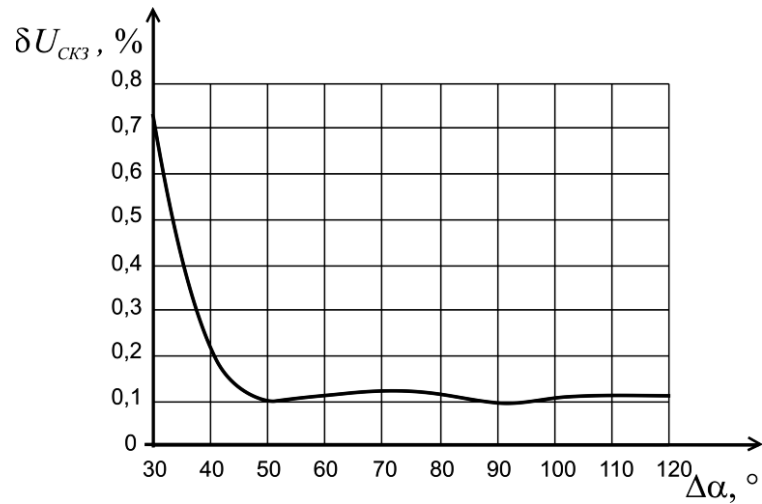


Рис. 3. График зависимости $\delta U_{СКЗ}$ от $\Delta\alpha$

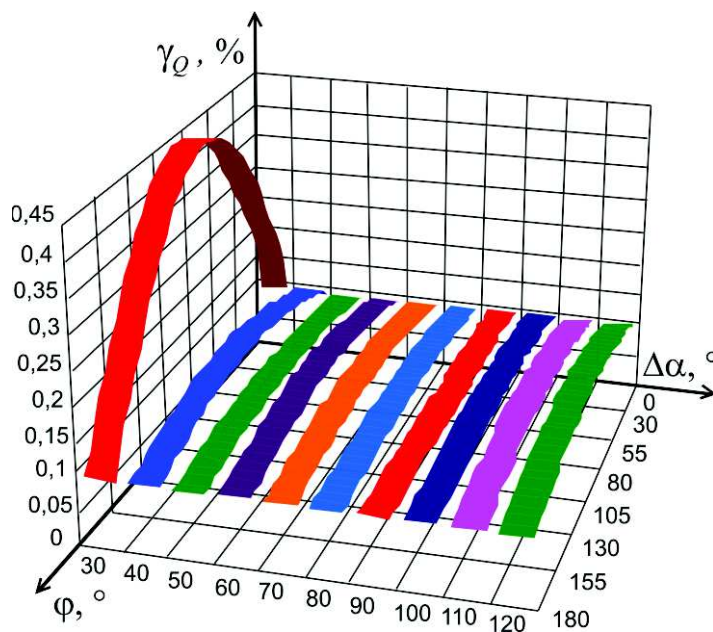


Рис. 4. Графики зависимости γ_Q от $\Delta\alpha$ и φ

Зависимость относительной погрешности измерения СКЗН от $\Delta\alpha$ в соответствии с (9) при наличии в сигнале 1-й и 3-й гармоник с $h_{i3} = 0,1\%$ приведена на рис. 3.

На рис. 4 представлены графики погрешности измерения РМ в зависимости от $\Delta\alpha$ и φ согласно (12) при наличии в сигналах 1-й и 3-й гармоник с $h_{i3} = h_{i3} = 0,1\%$.

Анализ рис. 3 и 4 показывает существенную зависимость погрешностей определения СКЗН и РМ от $\Delta\alpha$. Однако при $\Delta\alpha > 40^\circ$ погрешности практически не изменяются.

Таким образом, полученные результаты являются предпосылкой для оптимального выбора угла сдвига фазы ФБН.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Мелентьев В.С., Батищев В.И. Аппроксимационные методы и системы измерения и контроля параметров периодических сигналов. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2011. – 240 с.
2. Мелентьев В.С., Иванов Ю.М., Муратова В.В. Исследование метода измерения интегральных характеристик по мгновенным значениям сигналов, разделенным в пространстве // Известия Волгоградского государственного технического университета. Сер. Электроника, измерительная техника, радиотехника и связь. – 2014. – Т. 9, № 10 (137). – С. 52-55.
3. Melent'ev V.S., Ivanov Yu.M., Lychev A.O. A method of measuring integral characteristics from the instantaneous values of signals separated in time and space // Measurement Techniques: Volume 57, No. 9, October, 2014. Page 979-984.
4. Мелентьев В.С., Иванов Ю.М., Сеницын А.Е. Синтез методов измерения интегральных характеристик по мгновенным значениям ортогональных составляющих гармонических сигналов // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2012. – № 3 (35). – С. 84-89.
5. Мелентьев В.С., Ярославкина Е.Е., Павленко Е.В. Исследование влияния погрешности формирования ортогональных составляющих на результат измерения параметров гармонических сигналов / Теоретические и прикладные аспекты современной науки: Сб. науч. тр. по матер. VII Междунар. науч.-практ. конф. – Белгород: АПНИ, 2015. – Ч. 3. – С. 80-82.
6. Мелентьев В.С., Иванов Ю.М., Симонов А.В. Метод измерения интегральных характеристик на основе сравнения ортогональных составляющих гармонических сигналов // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2013. – № 2(4). – С. 58-62.
7. Мелентьев В.С., Иванов Ю.М., Муратова В.В. Синтез и анализ методов оперативного измерения параметров периодических процессов на основе формирования дополнительных сигналов / Проблемы управления и моделирования в сложных системах: Тр. XVI междунар. конф. – Самара: Самарский научный центр РАН, 2014. – С. 717-722.
8. Мелентьев В.С., Муратова В.В., Таштабанов Б.Н. Новый подход к повышению точности измерения параметров периодических сигналов / Теория и практика современной науки: Матер. XVII науч.-практ. конф. – М.: Институт стратегических исследований, 2015. – С. 127-134.
9. Мелентьев В.С., Цапаев А.В., Болотнова А.Н. Методы оценки погрешности аппроксимационных методов измерения параметров сигналов / Современные информационные технологии: Тр. междунар. науч.-техн. конф. Вып. 4. – Пенза: ПГТА, 2006. – С. 46-48.
10. Мелентьев В.С. Оценка влияния погрешности формирования дополнительного напряжения на точность измерения параметров гармонических сигналов // Современные материалы, техника и технологии: Науч.-практ. журнал. – 2015. – № 1(1). – С. 146-151.

Статья поступила в редакцию 2 февраля 2016 г.

USING SPATIAL-TIME DIVISION OF INSTANTANEOUS VALUES FOR DETERMINING HARMONIC-SIGNALS PARAMETERS

V.S. Melent'ev¹, JU.M. Ivanov¹, A.E. Sinitsyn², A.S. Peskova¹

¹ Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation

² LLC «Metrology and Automation»
5A, Kievskaya st., Samara, 443013, Russian Federation

We discuss a new method of measuring the parameters (RMS of voltage and current, active and reactive power) by the instantaneous values of harmonic signals which provides their spatial-time division. In contrast to the known methods based on the formation of additional voltage and current signals and identifying the moments of signal zero crossing, the implementation of the method involves the auxiliary signals formation only in the voltage channel. A block diagram of the measuring system realizing the method is proposed. The analysis results of the method error caused by the deviation of the real signals from the harmonic model. The results obtained enable the selection of the appropriate hardware depending on the measurement-accuracy requirements.

Keywords: *harmonic signals, instant values, auxiliary signals, harmonic model, an error.*

*Vladimir S. Melent'ev (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.
Anton E. Sinitsyn, Project Manager.
Yurie M. Ivanov (Ph. D. (Techn.)), Senior Researcher.
Anastasia S. Peskova, Postgraduate Student.*