

Национальные эталоны единицы коэффициента гармоник Российской Федерации и Республики Беларусь: результаты сличений

Сергей Витальевич Безденежных^{1✉}, Олег Викторович Каминский², Ксения Андреевна Стальнова³, Александр Васильевич Галыго⁴, Надежда Андреевна Герасимова⁵

^{1, 2, 3} Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений, Менделеево, Московская обл., Россия

¹bsv@vniiftri.ru ✉, <https://orcid.org/0000-0003-3245-2389>

²kaminsky@vniiftri.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4160-4997>

³stalnova@vniiftri.ru

^{4, 5} Белорусский государственный институт метрологии, Минск, Республика Беларусь, ⁴galygo@belgim.by, ⁵gerasimova@belgim.by

Аннотация. Представлены результаты дополнительных сличений национальных эталонов единицы коэффициента гармоник Российской Федерации (Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений) и Республики Беларусь (Белорусский государственный институт метрологии). В качестве эталона-переносчика использовали серийный измеритель коэффициента гармоник. Отличия воспроизводимой национальными эталонами единицы коэффициента гармоник от опорных значений не превышают расширенной неопределённости для всех измеряемых значений коэффициента гармоник на всех частотах. Таким образом, подтверждены измерительные и калибровочные возможности участвующих в сличениях лабораторий.

Ключевые слова: эталон, коэффициент гармоник, сличения национальных эталонов

Для цитирования: Безденежных С. В., Каминский О. В., Стальнова К. А., Галыго А. В., Герасимова Н. А. Национальные эталоны единицы коэффициента гармоник Российской Федерации и Республики Беларусь: результаты сличений // Измерительная техника. 2021. № 9. С. 68–72. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2021-9-68-72>

National standards of the harmonic coefficient unit of the Russian Federation and the Republic of Belarus: results of comparisons

Sergey V. Bedenezhnykh^{1✉}, Oleg V. Kaminsky², Kseniia A. Stal'nova³, Alexander V. Galygo⁴, Nadezhda A. Gerasimova⁵

^{1, 2, 3} Russian Metrological Institute of Technical Physics and Radio Engineering, Mendeleevo, Moscow Region, Russia

¹bsv@vniiftri.ru ✉, <https://orcid.org/0000-0003-3245-2389>

²kaminsky@vniiftri.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4160-4997>

³stalnova@vniiftri.ru

^{4, 5} Belarusian State Institute of Metrology, Minsk, Republic of Belarus, ⁴galygo@belgim.by, ⁵gerasimova@belgim.by

Abstract. The results of additional comparisons of the national standards of the unit of the harmonic coefficient of Russia (VNIIFTRI) and the Republic of Belarus (BelGIM) are presented. A mass-produced harmonic coefficient meter was used as a reference carrier. The differences between the harmonic coefficient unit reproduced by national standards the reference values do not exceed the extended uncertainty for all measured values of the harmonic coefficient and at all frequencies. Thus, the measurement and calibration capabilities of the laboratories participating in the comparisons are confirmed.

Keywords: standard, harmonic coefficient, comparison of national standards

Введение. В 2016–2019 гг. под эгидой международной организации КООМЕТ проведены международные дополнительные сличения эталонов единицы коэффициента гармоник. В сличениях приняли участие национальные метрологические институты Российской Федерации (Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений (ВНИИФТРИ)) в качестве

пилот-лаборатории и Республики Беларусь (Белорусский государственный институт метрологии (БелГИМ)).

Цель сличений – проверка правильности оценки неопределённости измерений и подтверждение измерительных и калибровочных возможностей участвующих в сличениях лабораторий.

Эталон-переносчик. В качестве возимого эталона (эталона-переносчика) использовали калибратор-измеритель

Таблица 1

Источники неопределённости ГЭТ 188-2010

Источник неопределённости	Значение, %	Вероятное распределение
Нелинейность амплитудных характеристик усилителей входного тракта и АЦП b_1	$3,5 \cdot 10^{-5} - 2 \cdot 10^{-2}$	Равномерное
Неравномерность суммарной амплитудно-частотной характеристики усилителей входного тракта и АЦП b_2	$1,9 \cdot 10^{-5} - 1 \cdot 10^{-2}$	Равномерное
Погрешность, вызванная неточностью определения частоты первой гармоники b_3	$3 \cdot 10^{-6} - 1 \cdot 10^{-3}$	Равномерное
Тепловые шумы усилителей входного тракта и шумы квантования b_4	$2 \cdot 10^{-5} - 1 \cdot 10^{-2}$	Нормальное
Стандартная неопределённость	$5 \cdot 10^{-5} - 3 \cdot 10^{-2}$	Нормальное
Расширенная неопределённость ($k=2$, $P=0,95$)	$1 \cdot 10^{-4} - 6 \cdot 10^{-2}$	—

Таблица 2

Источники неопределённости НЭ РБ 36-18

Источники неопределённости	Значение, %	Вероятное распределение
Неполная компенсация первой гармоники в сигнале высших гармоник b_1	0,01–0,02	Равномерное
Неточность уравнивания средних квадратических значений напряжения первой и напряжения высших гармоник в точке с коэффициентом гармоник 100 % b_2	0,005–0,100	Равномерное
Погрешность встроенного делителя напряжения b_3	0,005–0,150	Равномерное
Остаточные нелинейные искажения сигнала первой гармоники b_4	$5 \cdot 10^{-6} - 1 \cdot 10^{-4}$	Нормальное
Стандартная неопределённость по типу $A u_A$	$3 \cdot 10^{-6} - 3 \cdot 10^{-3}$	Нормальное
Суммарная стандартная неопределённость	0,01–0,20	Нормальное
Расширенная неопределённость ($k=2$, $P=0,95$)	0,02–0,40	—

нелинейных искажений СК6-20. Принцип его действия состоит в оцифровке входного сигнала с помощью высокоточного аналого-цифрового преобразователя (АЦП) и дальнейшей цифровой обработке с целью определения напряжений гармоник сигнала и вычисления коэффициента гармоник. Этот принцип действия обеспечивает стабильность метрологических характеристик эталона-переносчика, что подтверждено результатами исследований в пилот-лаборатории.

Источники неопределённости. Способы воспроизведения единицы коэффициента гармоник в национальных эталонах отличаются. Основой Государственного первичного эталона единицы коэффициента гармоник в диапазоне от 0,001 до 100 % для сигналов с основной гармоникой в диапазоне частот от 10 до 200000 Гц ГЭТ 188-2010 (ВНИИФТРИ) служит измеритель на основе прецизионного АЦП [1]. Исследуемый сигнал оцифровывается, коэффициент гармоник определяется в результате обработки цифрового эквивалента исследуемого сигнала [2–8].

Основа национального эталона коэффициента гармоник БелГИМ НЭ РБ 36-18 – калибратор установки поверочной для средств измерений коэффициента гармоник РЭКГ (НПП «Радио, приборы и связь», г. Н. Новгород). Принцип действия калибратора установки основан на формировании гармонического сигнала с минимальными искажениями (сигнала первой гармоники), формировании сигнала высших гармоник, суммировании сигнала гармоник с сигналом первой гармоники, уравниванием на выходе сумматора напряжений первой и высших гармоник (по результатам измерений напряжений милливольтметром) и точном делении напряжения гармоник делителем напряжения. Для формирования сигнала гармоник используются аналоговые перемножители.

В связи с этим источники неопределённости национальных эталонов коэффициента гармоник ВНИИФТРИ и БелГИМ разные (табл. 1, 2, где k – коэффициент охвата, P – доверительная вероятность).

Методики измерений. Поскольку способы воспроизведения единицы коэффициента гармоник в национальных эталонах отличаются (основа ГЭТ 188-2010 – измеритель, НЭ РБ 36-18 – калибратор), то во время сличений применяли разные методики измерений.

Методика измерений коэффициента гармоник на ГЭТ 188-2010 состояла в одновременных измерениях коэффициента гармоник эталонным измерителем коэффициента гармоник из состава эталона и эталонном-переносчиком при

их параллельном соединении с выходом калибратора коэффициента гармоник эталонного. Результаты измерений обоих измерителей усреднялись по 10 отсчётам, средние значения и среднеквадратические отклонения (СКО) фиксировались в протоколе в электронном виде.

Методика измерений на НЭ РБ 36-18 состояла в измерениях эталоном-переносчиком коэффициента гармоник сигнала, воспроизводимого национальным эталоном.

Методики измерений при сличениях совпадали с методиками калибровок данных лабораторий. При сличениях использовали значения коэффициента гармоник и значения частот, наиболее часто встречающиеся в поверочной и калибровочной практиках.

Измеряли следующие воспроизводимые эталонами значения коэффициента гармоник: 0,003; 0,01; 0,03; 0,1; 0,3; 1; 3; 10; 30; 100 % на каждой из частот: 10; 20; 200 Гц и 1; 20; 100; 200 кГц.

Результаты измерений эталона-переносчика усредняли по 10 отсчётам, средние значения и СКО фиксировали в протоколе

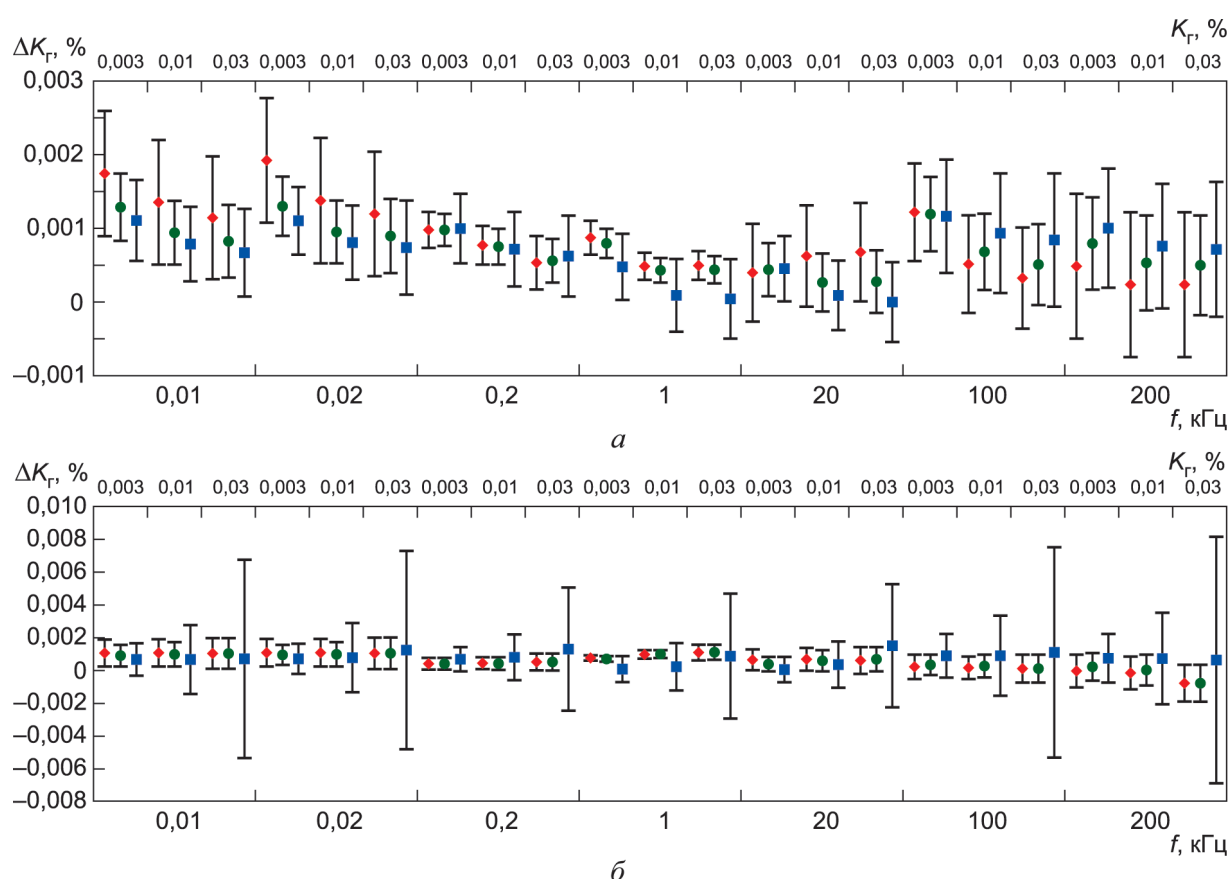


Рис. 1. Разности ΔK_r между значениями коэффициента гармоник, воспроизводимыми национальным эталоном и средними значениями результатов измерений эталоном-переносчиком для коэффициента гармоник $K_r = 0,003; 0,01; 0,03$ % (а) и $K_r = 0,1; 0,3; 1$ % (б) и расширенные неопределённости измерений:
 ◆ – ГЭТ 188-2010 (ВНИИФТРИ); ■ – БелГИМ; ● – опорные значения

Fig. 1. The difference between the values of the harmonic, reproducible national standards and average the traveling standard measurement results for the values of the harmonics 0.003; 0.01; 0.03; 0.1; 0.3; 1 % and expanded uncertainty of measurements:
 ◆ – GET 188-2010 (VNIIFTRI); ■ – BelGIM; ● – reference values

в электронном виде. Метрологическим результатом сличений стали разности между значениями коэффициента гармоник, воспроизводимыми национальным эталоном, и средними значениями результатов измерений эталоном-переносчиком.

Результаты сличений. Всего выполнено три цикла измерений: первый и последний циклы проведены во ВНИИФТРИ, второй – в БелГИМ. Для каждой пары параметров (частота и коэффициент гармоник) вычисляли разности между значениями коэффициента гармоник, воспроизводимыми национальными эталонами, и результатами измерений эталоном-переносчиком. Неопределённости результатов измерений вычисляли на основе неисключённой систематической погрешности воспроизведения единицы коэффициента гармоник национальными эталонами и СКО результатов измерений эталонным измерителем (ГЭТ 188-2010) и эталоном-переносчиком. Неисключённая систематическая погрешность представлена участниками сличений, СКО вычисляли по результатам 10 независимых измерений. Кроме того, оценивали значения критерия χ^2 (в соответствии

с рекомендациями COOMET R/GM/19:2016 “Recommendation COOMET. Guideline on COOMET supplementary comparison evaluation”) для числа степеней свободы при двусторонних сличениях $n-1=1$ (n – количество участников сличений). Для всех измеряемых значений коэффициента гармоник на всех частотах значения χ^2 меньше критического значения $\chi^2_{0,95}(1)=3,84$, следовательно, результаты сличений можно считать согласованными.

Основные результаты сличений представлены на рис. 1, 2, где показаны разности между значениями коэффициента гармоник, воспроизводимыми национальными эталонами, и результатами измерений эталоном-переносчиком ΔK_r , а также границы расширенной неопределённости измерений ($k=2$) в зависимости от значений коэффициента гармоник K_r и частоты f .

Заключение. Результаты измерений показывают, что отличия воспроизводимой национальными эталонами единицы коэффициента гармоник от опорных значений не превышают расширенной неопределённости для всех измеренных значений коэффициента гармоник на всех частотах.

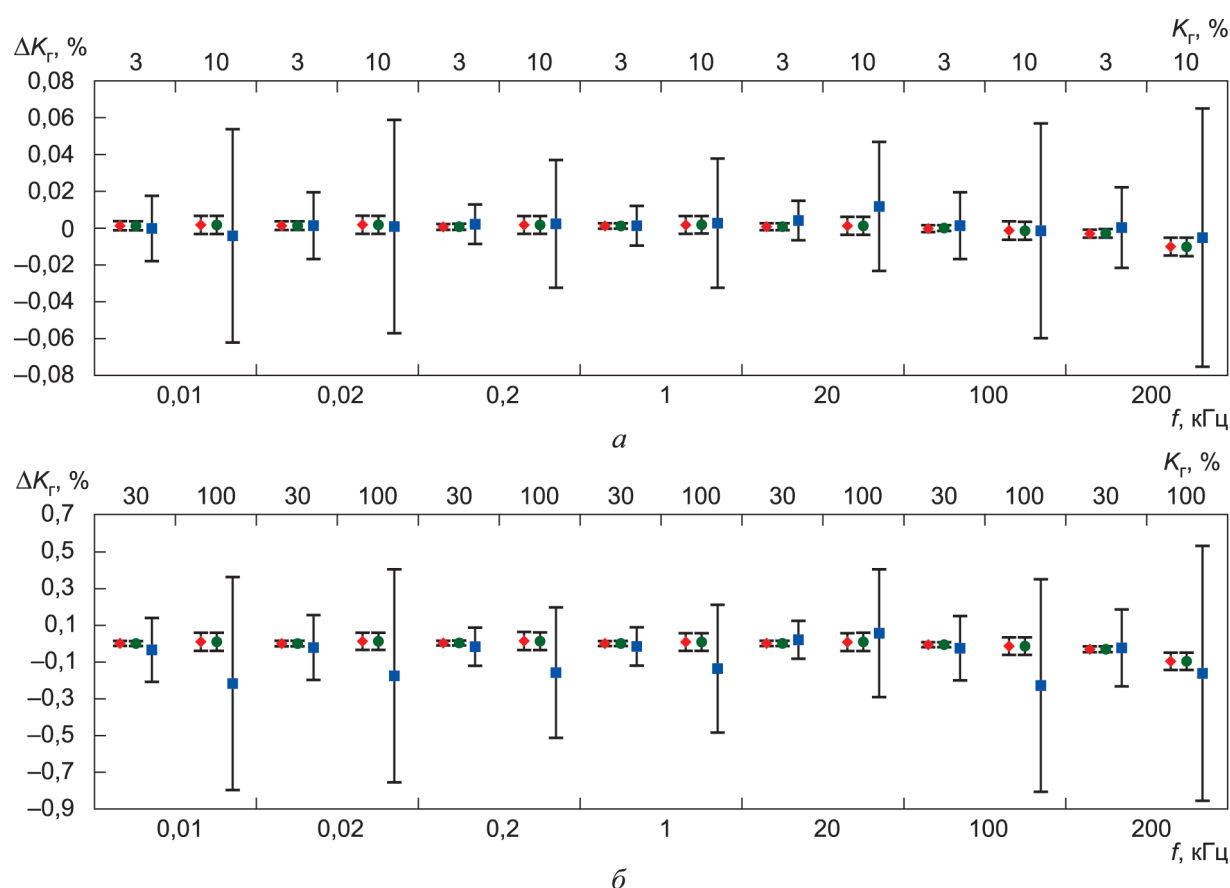


Рис. 2. Разности ΔK_r между значениями коэффициента гармоник, воспроизводимыми национальными эталонами и средними значениями результатов измерений эталоном-переносчиком для $K_r = 3; 10\%$ (а) $K_r = 30; 100\%$ (б) и расширенные неопределённости измерений:

♦ – ГЭТ 188-2010 (ВНИИФТРИ); ■ – БелГИМ; ● – опорные значения

Fig. 2. The difference between the values of the harmonic, reproducible national standards and the average traveling standard measurement results for the values of the harmonics 3; 10; 30; 100 % and expanded uncertainty of measurements:

♦ – GET 188-2010 (VNIIFTRI); ■ – BelGIM; ● – reference values

Таким образом, подтверждены измерительные и калибровочные возможности участвующих в сличениях лабораторий.

Список литературы

1. Платонов Ф. А., Ахромеева Е. О., Бабарыкин В. А., Пругло А. В., Безденежных С. В., Каминский О. В., Стальнова К. А. Государственный первичный эталон единицы коэффициента гармоник в диапазоне (0,001...100) % для сигналов с основной гармоникой в диапазоне частот (10...200000) Гц ГЭТ 188-2010 // Измерительная техника. 2016. № 3. С. 3–6.
2. Петров Н. Б. Некоторые погрешности аналого-цифрового измерения нелинейных искажений // Измерительная техника. 1979. № 5. С. 51.
3. Горлач А. А., Минц М. Я., Чинков В. Н. Цифровая обработка сигналов в измерительной технике. Киев: Техніка, 1985.
4. Минц М. Я., Чинков В. Н. Оценка погрешности дискретизации цифровых измерительных приборов, основанных на цифровой обработке мгновенных значений сигналов // Метрология. 1987. № 11. С. 43–49.

5. Минц М. Я., Чинков В. Н. Микропроцессорные измерители нелинейных искажений: алгоритмы цифровой обработки измерительного сигнала и оценка погрешностей // Измерительная техника. 1995. № 4. С. 56–59.

6. Брюханов Ю. А., Лукашевич Ю. А. Нелинейные искажения гармонических сигналов при квантовании // Радиотехника. 2009. № 10. С. 57–60.

7. Брюханов Ю. А., Лукашевич Ю. А. Нелинейные искажения сигналов в сигма-дельта преобразователях // Радиотехника. 2015. № 6. С. 89–94.

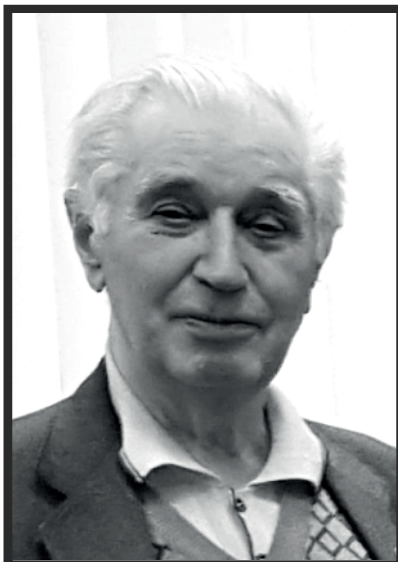
8. Harris F. J., *Proceedings of the IEEE*, Jan. 1978, vol. 66, no. 1, pp. 51–83.
<https://doi.org/10.1109/PROC.1978.10837>

References

1. Platonov F. A., Akhrameeva E. O., Babarykin V. A., Pruglo A. V., Bezdenzhnykh S. V., Kaminskii O. V., Stal'nova K. A., *Measurement Techniques*, 2016, vol. 59, pp. 203–208.
<https://doi.org/10.1007/s11018-016-0943-z>

2. Petrov B. N., *Measurement Techniques*, 1979, vol. 22, pp. 538–540. <https://doi.org/10.1007/BF00829218>
3. Gorlach A. A., Mints M. Ya., Chinkov V. N., *Digital signal processing in measuring equipment*, Kiev, Technika Publ., 1985. (In Russ.)
4. Mints M. Ya., Chinkov V. N., Estimation of sampling error of digital measuring devices based on digital processing of instantaneous signal values, *Metrologiya*, 1987, no. 11, pp. 43–49. (In Russ.)
5. Mints M. Y., Chinkov V. N., *Measurement Techniques*, 1995, vol. 38, pp. 459–466. <https://doi.org/10.1007/BF00976447>
6. Bryuhanov Ju. A., Lukashevich Ju. A., Nonlinear distortion of harmonic signals in quantization, *Radiotekhnika*, 2009, no. 10, pp. 57–60. (In Russ.)
7. Bryuhanov Ju. A., Lukashevich Ju. A., Nonlinear distortion of signals in sigma-delta converters, *Radiotekhnika*, 2015, no. 6, pp. 89–94. (In Russ.)
8. Harris F. J., *Proceedings of the IEEE*, Jan. 1978, vol. 66, no. 1, pp. 51–83. <https://doi.org/10.1109/PROC.1978.10837>

Статья поступила в редакцию 24.05.2021; принята к публикации 06.07.2021.



МЕХАНИКОВ АНАТОЛИЙ ИВАНОВИЧ 15.09.1937–09.07.2021

9 июля 2021 года ушёл из жизни старейший сотрудник Всероссийского научно-исследовательского института физико-технических и радиотехнических измерений (ВНИИФТРИ), кандидат технических наук Механиков Анатолий Иванович.

Механиков А. И. родился в 1937 г. в Красноярске, в 1959 г. окончил Киевское высшее инженерное радиотехническое училище войск ПВО. Практически вся трудовая деятельность Механикова А. И. была связана с ВНИИФТРИ, куда он пришёл в 1965 г. на должность ведущего инженера, затем стал начальником лаборатории измерений мощности СВЧ, руководителем научно-исследовательского отделения НИО-1. Руководил научным направлением «Метрология в радиоэлектронике». С 1981 по 1986 гг. Механиков А. И. – заместитель директора ВНИИФТРИ по научной работе. С 1986 по 1989 г. занимал пост заместителя Председателя Госстандарта СССР и был членом Международного Комитета мер и весов. С 1989 по 2018 гг. – ведущий научный сотрудник НИО-1.

В 1972 г. Механиков А. И. успешно защитил кандидатскую диссертацию.

Основными направлениями научной деятельности Механикова А. И. были разработка методов синтеза прецизионных устройств СВЧ, метрология в радиоизмерениях, статистическая обработка результатов измерений, управление научными разработками в области метрологии и метрологического обеспечения.

Анатолий Иванович вёл активную научно-педагогическую работу, он автор учебного пособия «Метрология в радиоэлектронике», был научным руководителем по защите кандидатских диссертаций в области радиоизмерений.

В период 1986–1989 гг. Анатолий Иванович возглавлял журналы «Измерительная техника» и «Метрология» в качестве главного редактора, с 1989 г. и до последних дней был членом редакционной коллегии, рецензентом, автором наших изданий. Он внёс неоценимый вклад в развитие изданий.

Механиков А. И. – автор более 100 научных работ, четырёх монографий, награждён нагрудным знаком «За заслуги в стандартизации», медалью «В память 850-летия Москвы».

Механиков Анатолий Иванович – прекрасный специалист, учёный, доброжелательный человек – навсегда останется в нашей памяти.

Коллективы редакции и редколлегии журналов «Измерительная техника» и «Метрология» выражают глубокие соболезнования родным и близким Механикова Анатолия Ивановича.