

***В.Ф. ВАСИЛЬЧЕНКО, А.Н. ЛОМАКИН***

### **ИЗМЕРИТЕЛЬ СКОРОСТИ И ДЛИНЫ ЦЕЛЬНОТЯНУТЫХ ТРУБ ПО БОКОВОЙ ПОВЕРХНОСТИ**

Данная работа посвящена разработке бесконтактного измерения скорости и длины цельнотянутых труб, двигающихся неравномерно, на этапе вытяжки и прошивки заготовки, разогретой до температуры около 1200 °С. Для измерений скорости и длины применен радиоволновой метод, потому что из-за особенностей технологического процесса, большой загазованности цеховой атмосферы, большого количества металлической пыли, высоких температур, сильно ограничивается, а в некоторых случаях невозможно, применения контактных, оптических и ультразвуковых методов измерения скорости и длины. Использование передающего модуля частотой 60 ГГц ограничивает влияние приборов друг на друга и уменьшает аппаратную погрешность до уровня половины длины волны, а применение блока аналогового сигнала позволяет программное регулирование усиления и фильтрацию принимаемого сигнала с учетом уровня внешних помех и скорости движения труб. Метод измерения скорости и длины по боковой поверхности уменьшает уровень помех и улучшает точность измерения за счет постоянного расстояния до измеряемого объекта. Модуль согласования сигналов приводит уровни сигналов датчиков начала и конца трубы к уровню ТТЛ с которыми работает аналогово-цифровой преобразователь. Применение АЦП типа USB-6009 позволяет преобразовывать аналоговые сигналы в цифровые с частотой более 20 КГц, что вполне достаточно для измерения скоростей движения на редуцированных станах. Программный комплекс графического программирования LabVIEW автоматизирует процесс вычисления скорости и длины, облегчает визуализацию результатов измерений 10 труб, упрощает перенастройку измерителя на разные сортаменты труб и позволяет объединить измерители из нескольких станков в единую систему с базой данных изготавливаемой продукцией.

**Ключевые слова:** скорость, длина, эффект Доплера, LabView, аналоговый сигнал, погрешности измерений, датчики положения, боковая поверхность, обработка сигналов реального времени.

***В.Ф. ВАСИЛЬЧЕНКО, О.Н. ЛОМАКИН***

### **ВИМІРЮАЧ ШВИДКОСТІ ТА ДОВЖИИ ЦІЛЬНОТЯГНУТИХ ТРУБ ПО БОКОВІЙ ПОВЕРХНІ**

Дана робота присвячена розробці безконтактного вимірювання швидкості і довжини суцільнотягнутих труб, що рухаються нерівномірно, на етапі витяжки та прошивки заготовки, розігрітій до температури близько 1200 °С. Для вимірювань швидкості та довжини застосований радіохвильовий метод, тому що через особливості технологічного процесу, великої загазованності цехової атмосфери, великої кількості металевого пилу, високих температур, сильно обмежується, а в деяких випадках неможливо, застосування контактних, оптичних і ультразвукових методів вимірювання швидкості і довжини. Використання передавального модуля частотою 60 ГГц обмежує вплив приладів один на одного і зменшуються апаратну похибку до рівня половини довжини хвилі, а застосування блоку аналогового сигналу дозволяє програмне регулювання посилення і фільтрацію сигналу з урахуванням рівня зовнішніх перешкод і швидкості руху труб. Метод вимірювання швидкості і довжини по боковій поверхні зменшує рівень перешкод і покращує точність вимірювання за рахунок постійної відстані до вимірюваного об'єкта. Модуль узгодження сигналів призводить рівні сигналів датчиків початку і кінця труби до рівня ТТЛ з якими працює аналогово-цифровий перетворювач. Застосування АЦП типу USB-6009 дозволяє перетворювати аналогові сигнали в цифрові з частотою більше 20 кГц, що цілком достатньо для вимірювання швидкостей руху на редуційних станах. Програмний комплекс графічного програмування LabVIEW автоматизує процес обчислення швидкості і довжини, полегшує візуалізацію результатів вимірювань 10 труб, спрощує перенастроювання вимірювача на різний сортамент труб і дозволяє об'єднати вимірювачі з декількох станів в єдину систему з базою даних продукцією, що виготовляється.

**Ключові слова:** швидкість, довжина, ефект Доплера, LabView, аналоговий сигнал, погрішність вимірювань, датчики положення, бокова поверхня, обробка сигналів реального часу.

***V.F. VASILCHENKO, A.N. LOMAKIN***

### **MEASURING THE VELOCITY AND LENGTH OF THE SEAMLESS PIPE AT THE SIDE SURFACES**

This work is devoted to the development of contactless measurement of the speed and length of seamless pipes, moving unevenly, at the stage of drawing and flashing the workpiece, heated to a temperature of about 1200 °C. The radio wave method is used to measure the speed and length, because due to the peculiarities of the technological process, the high gas content of the shop atmosphere, a large amount of metal dust, high temperatures, is severely limited, and in some cases it is impossible to use contact, optical and ultrasonic methods for measuring speed and length. The use of the transmitting module with a frequency of 60 GHz limits the influence of the devices on each other and reduces the hardware error to the level of half the wavelength, and the use of an analog signal block allows software gain control and filtering of the received signal, taking into account the level of external noise and the speed of the tubes. The method of measuring speed and length along the side surface reduces the noise level and improves the measurement accuracy due to the constant distance to the object being measured. The signal conditioning module leads the signal levels of the sensors of the beginning and end of the pipe to the level of the TTL with which the analog-to-digital converter operates. The use of the USB-6009 type A / D converter allows you to convert analog signals to digital signals with a frequency of more than 20 KHz, which is quite enough to measure the speeds of movement on reduction mills. The LabVIEW graphical programming software package auto-

mates the process of calculating speed and length, facilitates visualization of measurement results from 10 pipes, simplifies reconfiguration of the meter to a different pipe mix and allows you to combine meters from several mills into a single system with a database of manufactured products.

**Keywords:** speed, length, Doppler effect, LabView, analog signal, measurement errors, position sensors, side surface, real-time signal processing.

**Введение.** В основу измерения скорости и длины измерителя заложен эффект Доплера, который заключается в изменении частоты отраженного электромагнитного излучения, если источник излучения и отражатель движутся относительно друг друга. Измеренную доплеровскую частоту легко пересчитать в скорость движения трубы:

$$V = F_{\text{доп}} \frac{\lambda}{2 \cos \alpha},$$

где  $\lambda$  — длина волны Доплеровского измерителя,  $\alpha$  — угол между направлением излучения и скорости.

Рассмотрим метод измерения длины трубы. Если

вдоль пути следования трубы имеется фотодатчик, который срабатывает от трубы, то зная время перекрытия датчика  $t_{\text{фд}}$ , легко высчитать длину трубы

$$L_{\text{тр.}} = V t_{\text{фд}},$$

если труба движется равномерно (рис. 1). Если движение неравномерно, то необходимо знать закон изменения скорости трубы на измерительном интервале (когда перекрыт фотодатчик). В этом случае длина высчитывается интегрированием скорости:

$$L_{\text{ТР}} = \int_{t_n}^{t_k} V(t) dt.$$

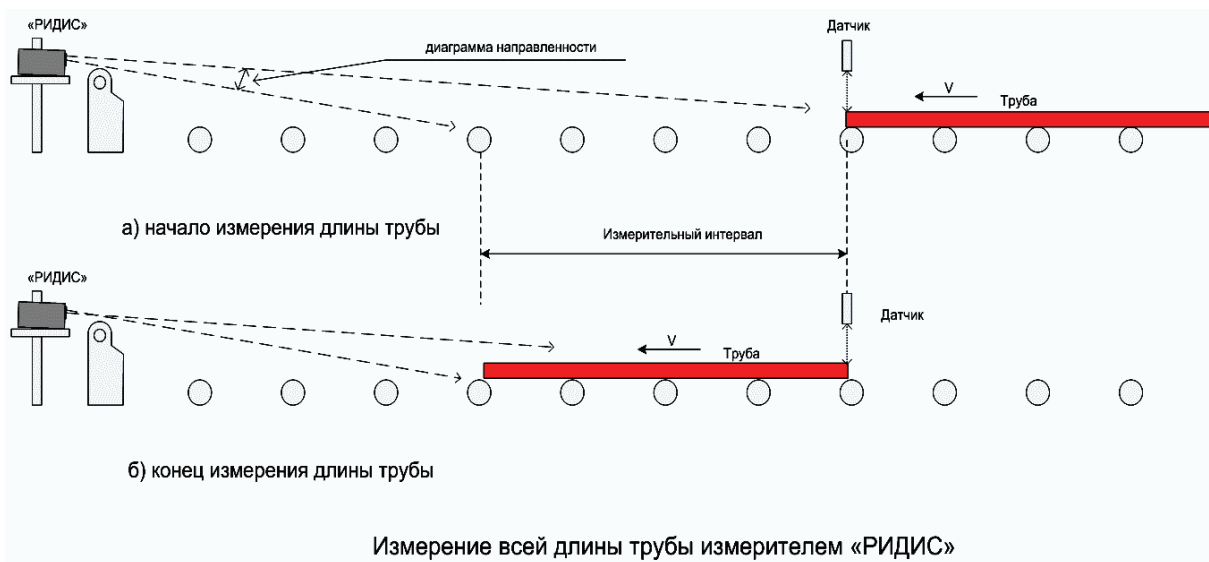


Рисунок 1 – Измерение всей длины трубы

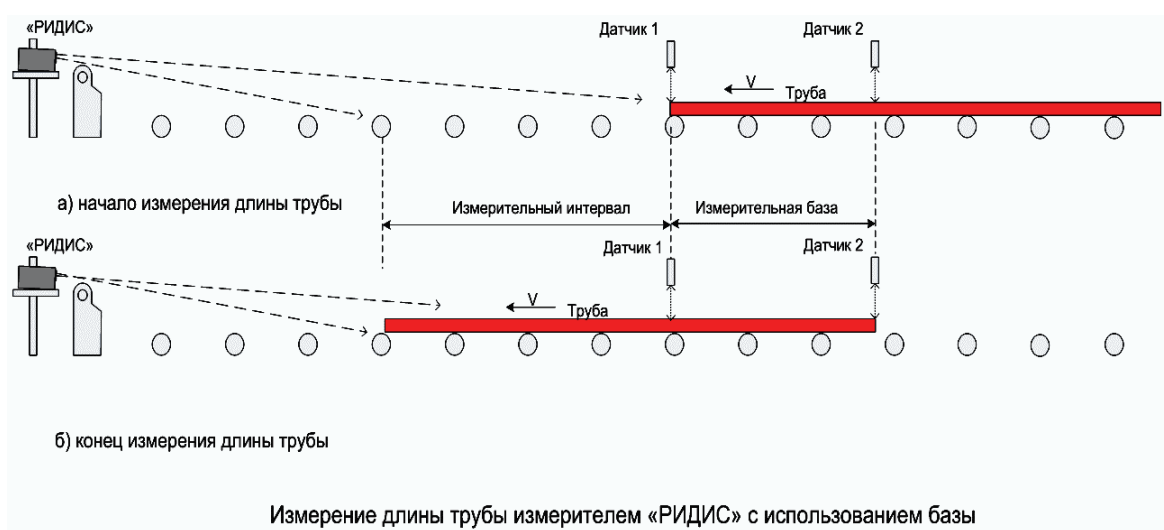


Рисунок 2 – Измерение трубы с использованием базы

Часто конструктивные особенности станов не позволяют производить прямое измерение длины всей трубы. Это когда труба должна пройти в диаграмме

измерителя расстояние равное своей длине. В целях устранения помех от других движущихся объектов (например, от грузов перемещаемых краном, людей и

т.п.), нельзя сильно расширять диаграмму направленности (она имеет форму конуса с углом раскрытия 4,5–6°). Оптимальный измерительный интервал составляет от 3 до 6 метров. А так как максимальная длина труб достигает 12-13 метров и даже больше, поэтому используются дополнительные измерительные базы, которые задаются установкой датчиков положения трубы. Ближний к измерителю датчик дает сигнал начала измерения (по переднему краю трубы), а дальний – конец измерения (по заднему краю).

Скорость движения трубы измеряется относительно измерительного блока (ИБ) и поэтому любая вибрация или дрожание ИБ приводит к погрешностям в измерении скорости движения и длины трубы. Конструкция места установки ИБ предусматривает возмож-

ность регулировки его положения относительно рольганга в горизонтальной и вертикальной плоскостях.

**Разработка схемы измерений.** Реконструкции редуцирующего стана и существенные изменения характеристик редуцируемых труб позволяет проводить измерение скорости и длины трубы только по боковой поверхности.

Преимущества:

- стабильное расстояние до трубы;
- независимость результатов от толщины стенки;
- допускается колебания объекта измерения;
- универсальная схема построения измерителя;
- дистанционное управление параметрами;
- графическая среда программирования

LabVIEW.

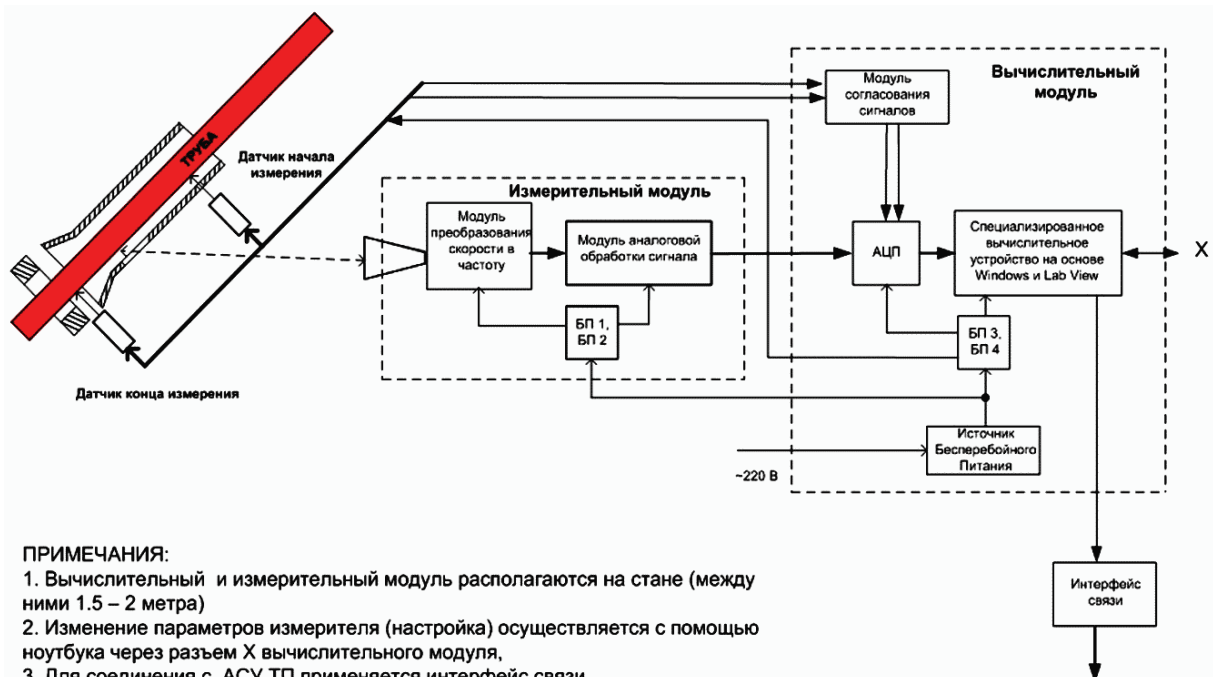


Рисунок 3 – Блок схема измерителя длины по боковой поверхности

В состав измерителя длины входят: измерительный модуль (ИМ), вычислительный модуль (АЦП, модуль согласования, программное обеспечение LabVIEW) и комплект датчиков положения трубы (ДПТ) (тип ВБО-М18-76У... и ФГ24М.2Р). Скорость движения трубы измеряется относительно ИМ и поэтому любая вибрация или дрожание ИМ приводит к погрешностям в измерении скорости движения и длины трубы. Конструкция места установки ИМ предусматривает возможность регулировки его положения относительно рольганга в горизонтальной и вертикальной плоскостях. Радиоволновой измеритель скорости и длины построен на основе приемопередающего модуля миллиметрового диапазона. В качестве несущего колебания выбрана длина волны 5мм (60 ГГц), которая является не чем иным как линией поглощения атмосферного кислорода. Характерной особенностью этой длины волны является повышенное затухание при распространении. Величина затухания

составляет порядка 12dB/км, что примерно на порядок выше аналогичных характеристик для других частот. Такая повышенная характеристика затухания позволяет существенно уменьшить взаимное влияние приборов как друг на друга, так и не создавать помехи для работы других электронных устройств. Модуль аналоговой обработки сигнала служит для фильтрации и усиления принимаемого сигнала, улучшения соотношения сигнал/шум. Он позволяет программно устанавливать коэффициент усиления сигнала. Вычислительный модуль включает модуль согласования уровней напряжений, поступающих с датчиков начала и конца измерений с TTL уровнями АЦП usb-6009. В измерителях применяются датчики ВБО-М18-76У-9123-С, работающие на «просвет» и размещаются с двух сторон относительно движущейся трубы, или ФГ24М, реагирующие на горячий металл. Датчики ВБО имеют относительно небольшую ширину луча 10-15 мм, но это тоже вклад в общую ошибку измере-

ний. Применение датчиков ФГ24М также не исключает ошибки измерения. Это связано с тем, что такие датчики срабатывают тогда, когда интегральное значение температуры в поле зрения ( $2^{\circ}30''$  это  $\approx 45$  мм/м) превысит порог чувствительности. Интегральное значение зависит от температуры самой трубы и поэтому датчик может срабатывать в различные моменты времени, в зависимости от температуры трубы, что приводит к ошибке порядка нескольких сантиметров. Устранение такой ошибки полностью невозможно, но ее можно существенно уменьшить за счет применения более чувствительных датчиков ( $300^{\circ}\text{C}$ ) совместно со щелевым экраном. В качестве

интерфейса связи используется промышленный стандарт, применяемый в условиях высокого уровня индустриальных помех RS-485.

**Результаты эксперимента.** Для обработки аналогового сигнала использовались методы компьютерной обработки на основе программ LabVIEW.

Внешний вид экрана монитора представлен на рис. 4. Программа позволяет измерять длину трубы при различной скорости движения трубы, с разными базами и максимальной длиной. Информация о трубах хранится в файле.

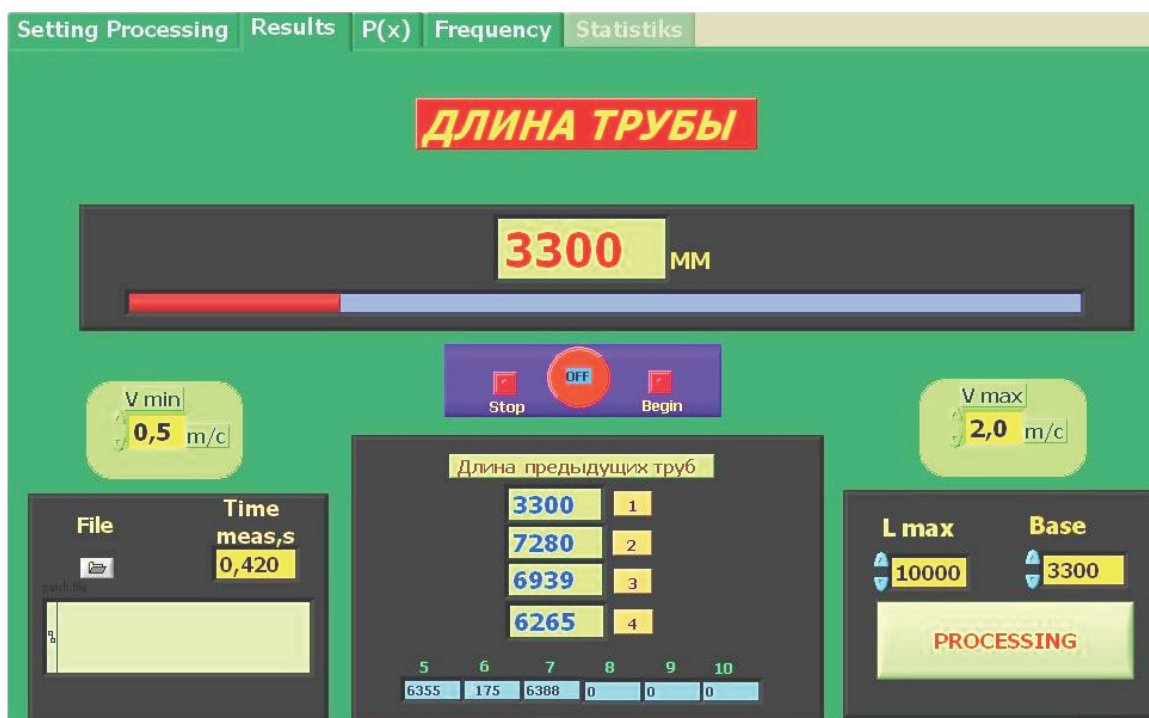


Рисунок 4 – Экран монитора программы на LabVIEW для измерения длины

**Анализ ошибок измерений.** В ошибку измерения длины трубы входит несколько составляющих, зависящих от метода измерения, характеристик объекта измерения, датчиков фиксации моментов «начало-конец» измерения, метода метрологии. Рассмотрим величины этих ошибок.

1. Ошибка метода измерения, основанного на радиоволновом доплеровском методе, будет составлять 0,1-0,2%. Например, при длине трубы 5000 мм ошибка составляет 5-10 мм (несколько лет эксплуатировался измеритель в ТВЦ-3 с погрешностью 10-20 мм).

2. Ошибки, связанные с объектом измерения. Торцы трубы после редукции, передний торец трубы в меньшей степени, имеют различную форму типа ласточкиного хвоста, размер которого может достигать 100 мм в зависимости от диаметра. Фотодатчики распознать тип хвоста, понятно, не могут, они срабатывают по интегральной характеристике засветки.

3. Фотодатчики имеют конечное время реагирования, и при максимальной скорости редукции трубы может привести к ошибке до 20-30 мм. Кроме того,

факелы, тянущиеся за трубой, вносят свою лепту в ошибку фиксации времени измерения. Таким образом суммарная ошибка фотодатчиков фиксации моментов «начало-конец» измерения, пересчитанная в длину может достигать величины 30-60 мм.

4. Большую роль в оценке точности измерения длины трубы играет метод метрологической поверки. Стандартная методика поверки измерителя длины предполагает наличие поверенных образцов, с помощью которых и проводится поверка. В данном случае, при измерении длины горячей и длинной трубы, может применяться весьма упрощенный метод контроля: собрать все холодные отрезки трубы и провести соответствующие замеры с учетом коэффициентов линейного расширения материала. Это означает, что необходимо регистрировать и температуру в моменты редукции по всей длине трубы. Ошибки, не учитывающий температурный фактор, как показали совместные цеховые эксперименты весьма значительные. Они находятся в линейной зависимости от коэффициента линейного расширения материала, который необхо-

димо с точностью не хуже 0,1%, что для абсолютных измерений весьма существенно. Так для длины трубы 50000 мм величина ошибки определения коэффициента линейного расширения материала составит уже 50 мм.

Подводя итог оценки величины ошибок можно сказать, что ошибки носят случайный характер и правильно их оценивать статистическими величинами, например, среднеквадратическая величина, стандартное отклонение, дисперсия и т.д., которые дают оценку точности для всего диапазона сортамента труб.

Выражение величины ошибки в процентном отношении, характеризует практически абсолютный разброс. Например погрешность измерения 0,1%: так для длины трубы 5000 мм составит величину отклонения 5 мм, для трубы 60 000 мм - 60 мм. А у нас труба сама имеет неопределенность размера +/-50 мм. Сюда добавить ошибки метода измерения, фотодатчиков и получится величина абсолютной ошибки +/- 150 мм, что составит около 6% от 5 000мм. Для длины трубы 60 000 мм эта же абсолютная ошибка будет выражаться величиной 0,5%.

Поэтому мы предложили формулу вычисления ошибки, которая учитывает «постоянную» составляющую ошибок (метод, фотодатчики, неопределенность размера объекта измерения) +/- 150 мм, плюс зависимость результата от длины с коэффициентом 0,005 (0,5%).

Еще раз проанализировав источники ошибок, мы можем снизить «постоянную» ошибку и дополнительный коэффициент, учитывающий длину трубы, с 0,5% до 0,2%. Тогда ошибка для трубы 60 000 мм составит: +/-120 + 120 мм – 0,6%.

**Выводы.** Эксперименты показали, что, несмотря на достаточно гладкую поверхность реальной трубы, у которой шероховатость меньше  $\lambda/8$ , отраженный сигнал от поверхности был достаточен для устойчивой работы измерителя в новой конфигурации. Результаты измерений, на наш взгляд, имели несколько великоватый разброс ошибок измерения, что объясняется, во-первых, нехваткой времени на отработку схемы проведения измерений (например, хотелось бы включить два двигателя в зоне измерения, без которых труба на этом участке резко тормозилась, попробовать установку измерителя под разными углами, для определения оптимальной работы с данным измерителем), во-вторых, труба с толщиной стенки 4,5 мм имела по форме концы весьма далекие от идеала. Для постоянной работы по боковой поверхности все эти моменты в дальнейшем будут предусмотрены и ошибка измерения будет сведена к минимуму.

#### *Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors*

**Васильченко Віктор Федорович (Vasilchenko Viktor Fedorovich)** – кандидат технічних наук, доцент, Кафедра прикладної математики, НТУ «ХПІ»; тел.: (057) 707-60-32, e-mail: viktor\_vasilchenko@i.ua

**Ломакін Олександр Миколайович (Lomakin Aleksandr Nikolaevich)** – кандидат технічних наук, доцент, кафедра «Динаміка і міцність машин», НТУ «ХПІ»; тел.: (057) 707-68-79, e-mail: anlomakin@i.ua

На наш взгляд, предпочтительно работать по боковой поверхности трубы на выходе редуцированного стана, при этом существует возможность измерять отрезанные куски, заведя в измеритель сигнал, подаваемый на рубку, или начала движения ножниц. В этом случае мы можем определить длины отрубленных концов и одновременно вычислять длину всей трубы после проката без дополнительных ошибок при суммировании отдельных результатов измерения. Кроме того, существует реальная возможность, при условии использования современной аппаратуры для обработки сигналов, работающей в реальном масштабе времени, измерять текущую длину трубы и осуществлять управление рубкой. Эффективный способ улучшения точности – это уменьшение длины волны СВЧ модуля до 2 мм.

#### **Список литературы**

1. Коростылев А.А. Теоретические основы радиолокации / А.А. Коростылев, А.Ф. Клюев, Ю.А. Мельник и др. Под ред. В.Е. Дулевича. – М.: Советское радио, 1978.
2. Филькеништейн М.И. Основы радиолокации / М.И. Филькеништейн. – М.: Радио и связь, 1983.
3. Грудев А.П. Технология прокатного производства / А.П. Грудев, Л.Ф. Машкин, М.И. Ханин. – М.: Металлургия, 1994. – 656 с.
4. Данченко В.Н. Технология трубного производства / В.Н. Данченко, А.П. Коликов, Б.А. Романцев, С.В. Самусев. – М., Интернет Инжиниринг, 2002. – 640 с.
5. Трэвис Д. LabVIEW для всех / Д. Трэвис. – М.: ДМК Пресс, 2004. – 544 с.
6. Евдокимов Ю.К. LabVIEW для инженера: от виртуальной модели до реального прибора. Практическое руководство для работы в программной среде LabVIEW / Ю.К. Евдокимов, В.Р. Линдваль, Г.И. Щербаков. – М.: ДМК Пресс, 2007. – 400 с.

#### **References (transliterated)**

1. Korostylev A.A., Klyuev A.F., Mel'nik Yu.A. i dr. Pod red. Dulevicha V.E. Teoreticheskie osnovy radiolokacii. Moscow: Sovetskoe radio, 1978.
2. Fil'kenshtejn M.I. Osnovy radiolokacii. Moscow: Radio i svyaz', 1983.
3. Grudev A.P., Mashkin L.F., Hanin M.I. Tehnologiya prokatnogo proizvodstva. Moscow: Metallurgiya, 1994. 656 p.
4. Danchenko V.N., Kolikov A.P., Romancev B.A., Samusev S.V. Tehnologiya trubnogo proizvodstva. Moscow: Internet Inzhiniring, 2002. 640 p.
5. Trevis D. LabVIEW dlya vseh. Moscow: DMK Press, 2004. 544 p.
6. Evdokimov Yu.K., Lindval' V.R., Scherbakov G.I. LabVIEW dlya inzhenera: ot virtual'noj modeli do real'nogo pribora. Prakticheskoe rukovodstvo dlya raboty v programnoj srede LabVIEW. Moscow: DMK Press, 2007. 400 p.

*Надійшла (received) 30.08.2018*