

УДК 629.3:621.38

Бокарев Дмитрий Рэмович, канд. техн. наук, доц.,
МАДИ, Россия, 125319, Москва, Ленинградский пр-т, 64, bokarevdr@mail.ru

Есаков Алексей Евгеньевич, канд. техн. наук,
ООО «Центр Эксперт», Россия, 113114, Москва, 3-й Павелецкий пр., д. 4, ravn@mail.ru

Красавин Павел Александрович, канд. техн. наук, доц.,
МАДИ, Россия, 125319, Москва, Ленинградский пр-т, 64, krasavin.madi@yandex.ru

Скворцова Ольга Михайловна, магистрант,
МИИГАиК, Россия, 105064, Москва, Гороховский пер., 4, olmsk2015@yandex.ru

ВВЕДЕНИЕ В ИСЧИСЛЕНИЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПОГРЕШНОСТЕЙ КОДИРУЮЩИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

Аннотация. Кодлирующие преобразователи являются одним из широко используемых в современной технике средств измерения характеристик механического движения. Как и прочие типы измерительных преобразователей, они обладают принципиально неустранимыми погрешностями измерений, которые, не будучи принятыми во внимание, обуславливают несоответствие ожидаемой и реальной эффективности содержащих их систем. В настоящей статье вводятся основополагающие для означенной проблемной области термины и определения, рассматриваются обобщённая конструкция и обобщённый принцип действия кодлирующих преобразователей, а также предпринимается попытка анализа причин возникновения их измерительных погрешностей. По результатам анализа было установлено, что наиболее значимым источником погрешностей следует считать характерное для кодлирующих преобразователей представление данных об измеряемых континуальных величинах дискретными сигналами. Кроме того, были выявлены основные параметры, влияющие на формирование погрешности дискретизации, что может быть использовано в дальнейших изысканиях, направленных на построение соответствующей математической модели.

Ключевые слова: датчик, первичный преобразователь, измерительный преобразователь, погрешность, методическая погрешность, точность, измерение, импульсы, энкодер, кодлирующий преобразователь, дискретизация, характеристики движения, перемещение, скорость, ускорение, рывок.

Bokarev Dmitriy R., Ph. D., associate professor,
MADI, 64, Leningradsky Prosp., Moscow, 125319, Russia, bokarevdr@mail.ru

Yesakov Alexey E., Ph. D.,
LLC «Center Expert», 4, 3rd Paveletsky Ave, Moscow, 113114, Russia, ravn@mail.ru

Krasavin Pavel A., Ph. D., associate professor,
MADI, 64, Leningradsky Prosp., Moscow, 125319, Russia, krasavin.madi@yandex.ru

Skvortsova Olga M., master student,
MIIGAiK, 4, Gorokhovskiy lane, Moscow, 105064, Russia, olmsk2015@yandex.ru

INTRODUCTION TO CALCULUS OF MEASURING ERRORS OF ENCODING TRANSDUCERS

Abstract. Encoding transducers are one of the widely used devices to measure the characteristics of mechanical motion in modern technics. They like other types of measuring transducers have measurement errors which are irremovable in principle and cause a discrepancy between the expected and real efficiency of the systems containing them if errors aren't being taken into account. In this paper the fundamental terms and the definitions for this problem area are introduced, the generalized design and the generalized operating principle of encoding transducers are considered and an attempt is made to analyze the causes of their measurement errors. Based on the results of this analysis it was found that the most significant source of errors is the representation of data about measured continuous values by discrete signals which is characteristic for coding transducers. Also the main parameters which influence on the formation of discretization error were identified. It can be used in further research on the formation of a corresponding mathematical model.

Key words: sensor, primary transducer, measuring transducer, error, methodological error, accuracy, measurement, impulses, encoder, encoding transducer, discretization, motion characteristics, movement, speed, acceleration, jerk.

Неотъемлемыми компонентами большинства использующих электронику систем, в том числе применяемых на автотракторной технике, являются измерительные преобразователи. Под измерительным преобразователем здесь понимается совокупность технических средств, назначением которых является измерение величин, и информация о которых необходима системе для её функционирования. Измерение же, согласно приведённой в [1] энциклопедической статье, есть совокупность операций, целью которых является определение количественного

соотношения одной величины, называемой измеряемой, с другой однородной величиной, принимаемой за единичную.

Также уместно ввести здесь понятия объекта измерений (того, к чему приложены измерительные операции) и предмета измерений, под которым подразумевается измеряемая величина. Данные понятия важны в дальнейшем развитии темы, поскольку одному объекту могут быть сопоставлены различные предметы измерений, характерный пример чего будет рассмотрен ниже.

Большая часть современных систем электроники основана на цифровых вычислительных устройствах. В связи с этим в перечень функций измерительных преобразователей входит не только получение данных о значениях измеряемых (как правило, неэлектрических и континуальных) величин, но и представление этих данных в форме, которая обеспечивает возможность их восприятия цифровым устройством.

На рис. 1 показана обобщённая функциональная схема измерительного преобразователя (ИП), архитектура которого сообразна изложенной концепции. В общем случае он состоит из первичных (ПП), промежуточных (ПрП) и вторичных (ВП) преобразователей. Непременным является наличие в его составе только первой из перечисленных групп компонентов, присутствие же остальных является вариативным и определяется назначением измерительного преобразователя и предъявляемыми к нему требованиями.

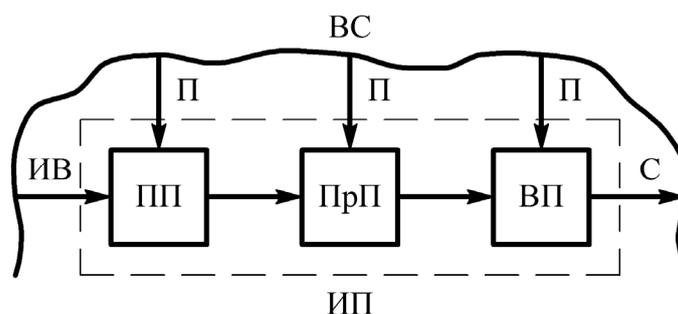


Рис. 1. Обобщённая функциональная схема измерительного преобразователя

В процессе функционирования измерительный преобразователь взаимодействует с внешней по отношению к нему средой (ВС), к которой относятся как прочие компоненты системы автоматизированного или автоматического управления, так и не входящие в её состав объекты. Внешняя среда оказывает на измерительный преобразователь воздействия, которые можно разделить на два типа. С одной стороны, имеют место воздействия, потенциально содержащие информацию о значении измеряемой величины (характеризующие её прямо или косвенно). Такие воздействия назовём информационными воздействиями (ИВ). С другой стороны, всегда наличествуют нежелательные воздействия, которые изменяют состояния и, как следствие, передаточные функции компонентов измерительного преобразователя. Будем именовать их возмущающими воздействиями или (относительно рассматриваемой проблемы) помехами (П).

Первичные преобразователи часто именуется датчиками или сенсорами (от англ. «*sensor*» – «чувствительный элемент»). Их назначением является восприятие со стороны внешней среды информационных воздействий и преобразование их в электрические величины. Стоит отметить, что в настоящее время термину «датчик» в литературе сопоставляется достаточно широкий класс устройств, начиная от простейших первичных преобразователей и заканчивая измерительными преобразователями в целом (такие датчики иногда именуют интеллектуальными [2]). Опуская ради краткости рассуждения о корректности подобной терминологии, в данной работе под датчиком будем подразумевать исключительно первичный преобразователь.

В промежуточных преобразователях осуществляется нормализация полученных электрических величин и подготовка их к использованию путём усиления, фильтрации, линеаризации и других операций. Наконец, вторичные преобразователи производят над подготовленными величинами необходимые математические преобразования.

Результатом функционирования исправного измерительного преобразователя является формируемый им и передающийся во внешнюю среду сигнал (С), который являет собой электрическое дискретное воздействие, однозначно характеризующее значение измеряемой величины. Идеальный измерительный преобразователь должен обеспечивать равенство истинного значения измеряемой величины и значения, полученного в измерении. В реальных же измерительных преобразователях несовершенство методик измерений и конструкций компонентов, а также их инерционность и возмущающие воздействия обуславливают наличие в сигнале погрешности, которую не всегда представляется возможным устранить или даже минимизировать.

Характер и степень влияния этих факторов на результирующую погрешность разнообразны. В посвящённом рассмотрению данных вопросов разделе работы [3] в качестве одного из основных классификационных признаков погрешностей указывается их отношение к изменению измеряемых величин во времени. В рамках данного признака выделяются статические погрешности, не зависящие от скорости изменения измеряемой величины, и погрешности динамические, обусловленные таковой и представляющие собой запаздывание сигнала вследствие упомянутой инерционности компонентов измерительных преобразователей. В свою очередь статические погрешности по характеру влияния подразделяются на аддитивные и мультипликативные погрешности, погрешности нелинейности и гистерезиса. Отдельно рассматриваются прогрессирующие погрешности, появление которых связано с постепенным «старением» элементов преобразователя.

Если через x обозначить истинное значение измеряемой величины, а через $x_{\text{изм.}}$ – её измеренное значение, то второе практически всегда будет отличаться от первого некоторым значением абсолютной погрешности измерения Δx [3]:

$$x_{\text{изм.}} = x + \Delta x.$$

Сама по себе абсолютная погрешность безотносительно к диапазону, в котором происходит изменение измеряемой величины, не характеризует точность измерения, то есть степень близости результата измерения к истинному значению. В связи с этим вводят понятие относительной погрешности, которая является отношением погрешности абсолютной к модулю истинного значения измеряемой величины [4]:

$$\delta_x = \Delta x / |x|.$$

Точностью измерения при этом будет называться величина, обратная δ_x (без учёта знака) [1].

Когда скоро в процессе эксплуатации значение x доподлинно неизвестно, неизвестно и значение абсолютной погрешности. Как информационные, так и возмущающие воздействия могут быть подвержены различным изменениям, вследствие чего значение Δx зависит от множества разнородных факторов, что и обуславливает трудности, связанные с его минимизацией.

В большинстве случаев можно, исходя из технического задания, сформулировать требования насчёт допустимых значений $[\Delta x]_- < 0$ и $[\Delta x]_+ > 0$, за границы которых текущее значение Δx не должно выходить в сторону уменьшения значения x и в сторону его преувеличения соответственно [5]:

$$[\Delta x]_- \leq \Delta x \leq [\Delta x]_+. \quad (1)$$

В общем случае допустимые значения не равны по модулю. Способом их нормирования является выражение через соответствующие допустимые значения относительной погрешности $[\delta_x]_- < 0$ и $[\delta_x]_+ > 0$, а также допуск измерений, который в свою очередь определяется как разница между верхней и нижней границами измерений (то есть наибольшим x_{\max} и наименьшим x_{\min} значениями измеряемой величины):

$$[\Delta x]_- = [\delta_x]_- (x_{\max} - x_{\min});$$

$$[\Delta x]_+ = [\delta_x]_+ (x_{\max} - x_{\min}).$$

Когда условие (1) не выполняется, имеет место грубая погрешность, называемая также промахом [1]. Её возникновение позволяет констатировать, что измерительный преобразователь не удовлетворяет точностным требованиям и подлежит замене, или же он является неисправным и налицо нештатная ситуация, которая может привести к потере системой возможности корректно выполнять свои функции. Подобные ситуации выведем за рамки проводимого рассмотрения.

Но даже если значение абсолютной погрешности не выходит за допустимые границы, её влияние следует учитывать, обоснование чего приводится в работе [6], где показано, что наличие неучтённых погрешностей измерительных преобразователей может ухудшить качество функционирования системы. В то же время актуальные тенденции повышения безопасности и экономичности автомобилей, тракторов и прочих самоходных машин подразумевают предъявление всё более строгих требований к надёжности, устойчивости и качеству их электронных систем и к точности компонентов, входящих в их состав.

В [6] также указывается на то, что в настоящее время, благодаря развитию электроники, составляющие результирующей погрешности, обусловленные промежуточными и вторичными преобразователями, сравнительно невелики, и наиболее значимый вклад в её формирование вносят первичные преобразователи. Исходя из этого, можно сделать вывод о том, что именно их следует считать приоритетными объектами исследования в рассматриваемой проблеме (тем более что прочие компоненты, как отмечалось ранее, могут попросту отсутствовать).

В задачах, связанных с созданием автотракторных электронных систем, может возникнуть потребность в измерении характеристик линейных или угловых движений машины в целом или её компонентов. К означенным характеристикам, прежде всего, относятся перемещения, скорости, ускорения и рывки объектов измерения [1].

Основой одной из методик измерения данных характеристик является счёт электрических импульсов, возникновение которой непосредственно связано с перемещением объекта измерений φ [2, 7, 8]. Генерирование электрической величины, являющейся основой для формирования импульсов, обеспечивает первичный преобразователь, где происходит контактное или бесконтактное взаимодействие чувствительного и задающего компонентов, один из которых является неподвижным, а другой связан с объектом измерения (иногда называемым задатчиком [9]). В связи с тем, что задатчик и задающий компонент жёстко связаны, в дальнейшем, рассуждая о характеристиках движения, будем без дополнительных оговорок подразумевать, что для данных объектов они идентичны.

Конструкция задающего компонента подразумевает наличие равномерно расположенных и идентичных друг другу задающих элементов (зубьев, магнитных полюсов и т.п.), каждый из которых образован двумя частями. Одна из них отвечает высокому уровню импульсного сигнала $U_{и\ max}$, а другая – низкому $U_{и\ min}$.

В зависимости от специфики конструкции и принципа действия датчика электрическая величина на его выходе U_d может изменяться различным образом. Для обеспечения возможности обработки цифровыми устройствами её преобразуют в импульсы, сколь возможно близкие к прямоугольной форме.

Преобразование осуществляется посредством программных или схемотехнических решений, в которых общей чертой является наличие в характеристике петли гистерезиса, обусловленной различными уставками выходной электрической величины датчика для передних $U_{д\uparrow}$ и задних $U_{д\downarrow}$ фронтов импульсов [10]. Передним фронтом, или просто фронтом импульса, принято называть изменение уровня сигнала с низкого на высокий, а его задним фронтом или срезом – обратное изменение.

Область неоднозначности, задаваемая гистерезисной петлёй, позволяет устранить негативное влияние помех в электрической величине на выходе датчика.

Наглядным примером изложенного могут послужить изображённые на рис. 2 диаграммы. На верхней из них схематически представлен график изменения перемещения задатчика во времени t , на средней – график изменения выходной электрической величины датчика с областью неоднозначности преобразователя её формы, а на нижней – график результирующего сигнала.

Измерения по описанному принципу могут быть реализованы посредством измерительных преобразователей на базе гальваномагнитных, индукционных, оптоэлектронных и некоторых других типов датчиков [2, 5, 8, 9, 11]. В совокупности такие преобразователи именуется кодирующими преобразователями [9], или энкодерами [11] (от англ. «*encode*» – «кодировать»). Область их применения на современной автотракторной технике чрезвычайно широка. Они используются для автоматического и автоматизированного управления двигателем внутреннего сгорания и агрегатами трансмиссии, в антиблокировочных, противобуксовочных, телематических и других системах [2, 6, 7, 8].

Одним из преимуществ энкодеров по сравнению с измерительными преобразователями иных принципов действия является бóльшая помехоустойчивость. Существенное влияние на результирующие погрешности измерений корректно сконструированных кодирующих преобразователей помехи оказывают только в том случае, если они вызваны экстраординарными причинами (например, сильными магнитными полями). При отсутствии таких причин это влияние можно не учитывать. Однако вне зависимости от типа и конструктивных особенностей кодирующие преобразователи обладают принципиально

неустранимой методической погрешностью. Под методической погрешностью подразумевается погрешность, которая возникает из-за недостатков, свойственных методике измерений.

В рассматриваемых случаях она обусловлена представлением континуальных величин дискретными сигналами.

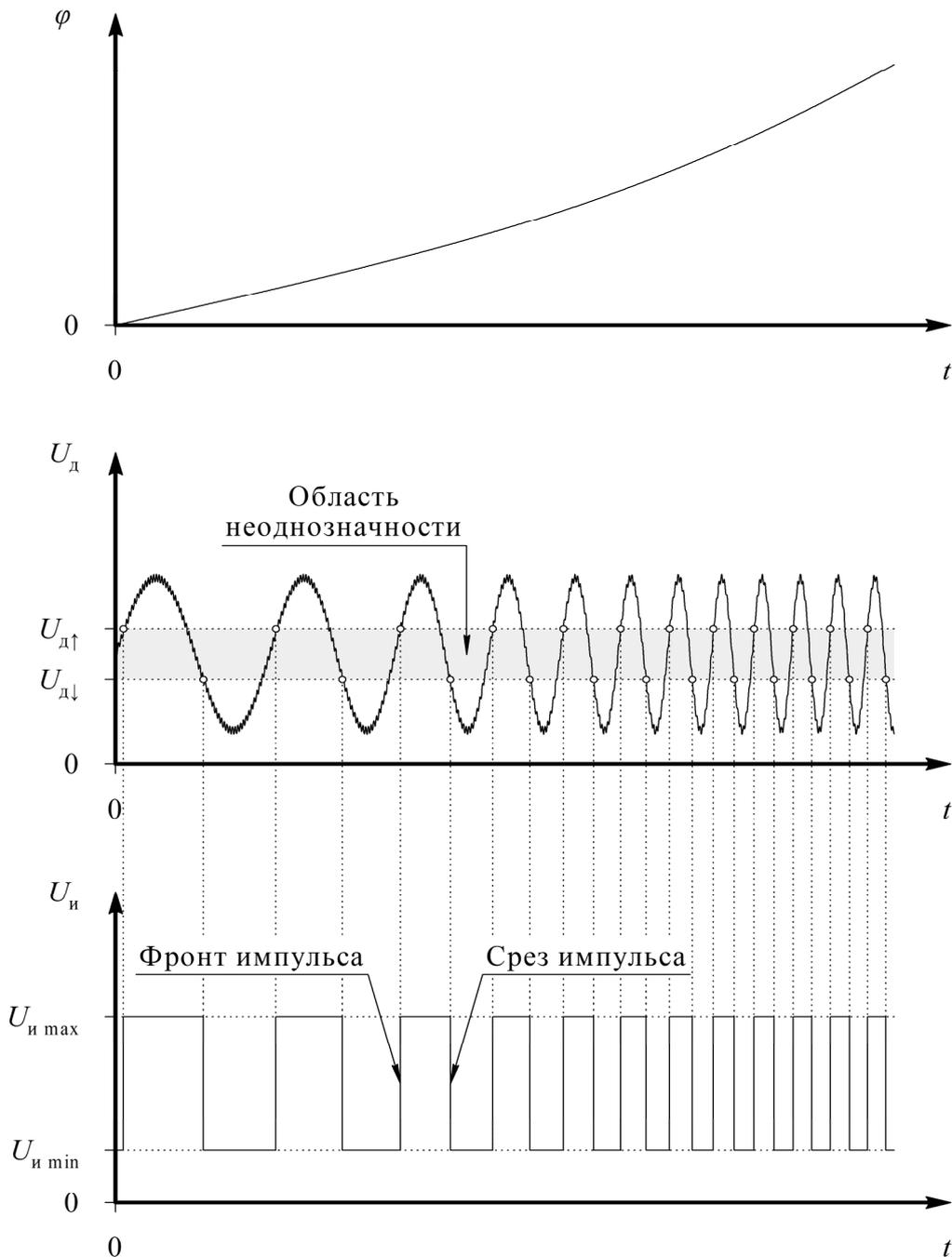


Рис. 2. Графическая интерпретация преобразования перемещения задатчика в изменение электрической величины на выходе первичного преобразователя и в результирующий импульсный сигнал

При использовании в системе цифровых вычислительных устройств это представление неизбежно. Если оно реализуется посредством аналого-цифрового преобразователя, характеризуемого значительной глубиной квантования по уровню (разрядностью), то значение соответствующей погрешности с учётом приведённого выше положения об успехах современного приборостроения допустимо считать пренебрежимо малым. Первичные же преобразователи в энкодерах обуславливают появление многократно бóльших значений погрешностей.

Пусть имеется некоторый движущийся объект измерений, предметами измерений по отношению к которому являются перечисленные ранее характеристики движения. Через m_3 обозначим общее число задающих элементов, определяющее число электрических импульсов, возникающих за один полный цикл движения задатчика. Понятно, что значениями данной величины могут быть только отличные от нуля натуральные числа ($m_3 \in \mathbf{N}_+$).

Заметим, что в современной математике наличествуют два подхода к определению множества натуральных чисел. В рамках одного из них ноль относится к таковым, в рамках другого – не относится [4]. Для удобства изложения мы будем придерживаться первого подхода. При необходимости же исключить ноль из множества натуральных чисел будем применять обозначение, приведённое выше.

При различных параметрах сигнала за одни и те же по длительности T_0 промежутки времени (которые в дальнейшем мы будем называть отсчётами) для одного и того же движения задатчика могут быть получены различные числа зарегистрированных импульсов $m_{и}$, причина чего понятна из анализа рис. 3.

Помимо того, что величина $m_{и}$ не является континуальной и может принимать лишь натуральные значения ($m_{и} \in \mathbf{N}$), она зависит от скважности сигнала s и выраженного в радианах его начального смещения φ .

Скважность сигнала есть безразмерная величина, являющая собой отношение периода импульсов $T_{и}$ к их продолжительности $t_{и}$ при любом постоянном значении скорости движения задатчика [1]:

$$s = T_{и}/t_{и}.$$

Графическая интерпретация величин $T_{и}$ и $t_{и}$ дана среди прочего на рис. 3. Там же введена величина t_{ϕ} , пропорциональная ϕ .

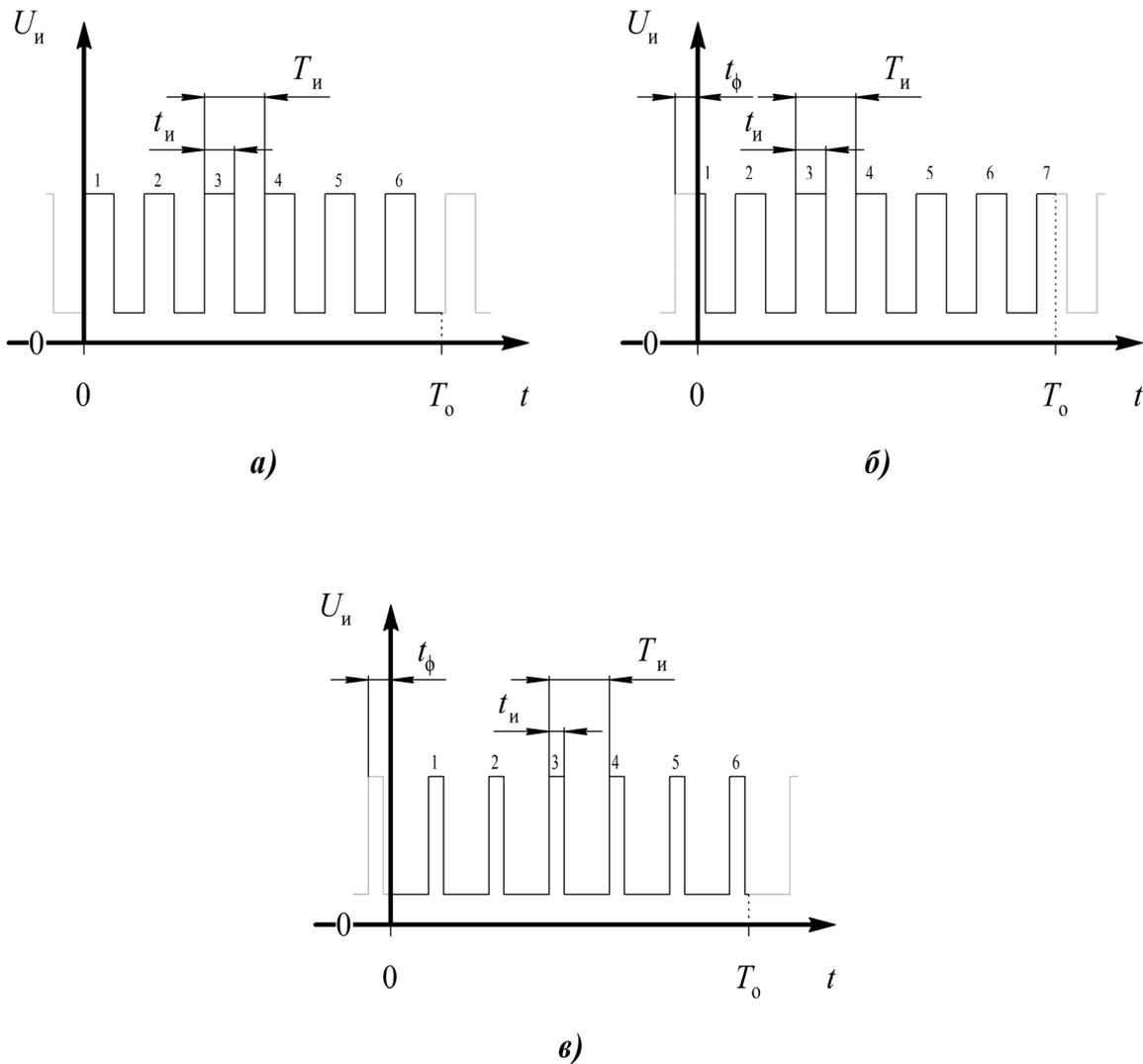


Рис. 3. Результаты счёта импульсов для сигналов с различными параметрами

Сравнивая диаграммы на рис. 3, а и б, можно видеть, что наличие во втором случае ненулевого начального смещения сигнала той же частоты приводит к регистрации дополнительного седьмого импульса. С другой стороны, даже в случае идентичных значений начального смещения,

длительностей отсчётов и частоты сигналов число зарегистрированных импульсов может различаться, если эти сигналы обладают разными значениями скважности, что видно из сопоставления диаграмм на рис. 3, б и в.

Некоторые аспекты проблемы наличия у кодирующих преобразователей погрешности дискретизации затрагиваются авторами [7], но механизм её формирования ими не рассматривается, как не рассматривается он и в прочих проанализированных работах по теме.

Совокупность перечисленных обстоятельств обуславливает целесообразность учёта названных погрешностей уже на стадии проектирования системы для их дальнейшей конструктивной или методической компенсации и предполагает потребность в построении математической модели их формирования.

Список литературы

1. Большая Советская энциклопедия [Электрон. ресурс]: Электрон. версия энциклопедии. – М.: Большая Рос. энцикл.; Гласнет, 2003. – 3 опт. диска (PC CD-ROM).
2. Асмолов, Г.И. Виды информации и датчики в системах транспортной телематики: учеб. пособие / Г.И. Асмолов, В.М. Рожков, В.Г. Соколов. – М.: МАДИ, 2008. – 74 с.
3. Проектирование датчиков для измерения механических величин / Е.П. Осадчий, А.И. Тихонов, В.И. Карпов [и др.]; под ред. Е.П. Осадчего. – М.: Машиностроение, 1979. – 480 с.
4. Зорич, В.А. Математический анализ. В 2 ч. Ч. 1 / В.А. Зорич. – М.: МЦНМО, 2012. – XVIII + 702 с.
5. Фрайден, Дж. Современные датчики : справочник / Дж. Фрайден. – М.: Техносфера, 2005. – 592 с.

6. Есаков, А.Е. Методика создания алгоритмов для систем управления фрикционными сцеплениями автомобильных автоматических трансмиссий: дис. ... канд. техн. наук / А.Е. Есаков; МАМИ. – М., 2010. – 161 с.

7. Гируцкий, О.И. Электронные системы управления агрегатами автомобиля / О.И. Гируцкий, Ю.К. Есеновский-Лашков, Д.Г. Поляк. – М.: Транспорт, 2000. – 213 с.

8. Соснин, Д.А. Электрическое, электронное и автотронное оборудование легковых автомобилей (Автотроника-4): учеб. для вузов / Д.А. Соснин. – М.: СОЛОН-ПРЕСС, 2015. – 416 с.

9. Вульвет, Дж. Датчики в цифровых системах / Дж. Вульвет. – М.: Энергоиздат, 1981. – 200 с.

10. Хоровиц, П. Искусство схемотехники / П. Хоровиц, У. Хилл. – М.: Бином, 2014. – 704 с.

11. Платт, Ч. Энциклопедия электронных компонентов. В 3 т. Т. 3. Датчики местоположения, присутствия, ориентации, вибрации, жидкости, газа, света, тепла, звука, электричества / Ч. Платт, Ф. Яннссон. – СПб.: БХВ-Петербург, 2017. – 288 с.

References

1. *Bol'shaya Sovetskaya ehnciklopediya, ehlektronnaya versiya* (The Great Soviet Encyclopedia, electronic version), Moscow, Bol'shaya rossijskaya ehnciklopediya, Glasnet, 2003, 3 PC CD-ROM.

2. Asmolov G.I., Rozhkov V.M, Sokolov V.G. *Vidy informacii i datchiki v sistemah transportnoj telematiki* (Types of information and sensors in transport telematics systems), Moscow, MADI, 2008, 74 p.

3. Osadchiy E.P., Tikhonov A.I., Karpov V.I., Zhuchkov A.I., Volkov V.A., Novitsky P.V., Timoshenko N.N., Ryzhakov V.V., Parchment A.I., Shmakov E.M., Butko A.M., Chernetsov K.N., Lebedev V.N.,

Nikolaev A.N., Kulagina L.I. *Proektirovanie datchikov dlya izmereniya mekhanicheskikh velichin* (Designing sensors for mechanical value measuring), Moscow, Mashinostroenie, 1979, 480 p.

4. Zorich V.A. *Matematicheskij analiz. V 2 chastyah. Chast' 1* (Calculus. In 2 parts. Part 1), Moscow, MCNMO, 2012, XVIII + 702 p.

5. Fraden J. *Sovremennye datchiki* (Modern sensors), Moscow, Tekhnosfera, 2005, 592 p.

6. Yesakov A.E. *Metodika sozdaniya algoritmov dlya sistem upravleniya frikcionnymi scephleniyami avtomobil'nyh avtomaticheskikh transmissij* (Methods of algorithms synthesis for friction clutch control systems to automotive automatic transmissions), Candidate sthesis, Moscow, MAMI, 2010, 161 p.

7. Girutskii O.I., Yesenovskiy-Lashkov Yu.K., Polyak D.G. *Ehlektronnye sistemy upravleniya agregatami avtomobilya* (Electronic control systems for car aggregates), Moscow, Transport, 2000, 213 p.

8. Sosnin D.A. *Ehlekticheskoe, ehlektronnoe i avtotronnoe oborudovanie legkovykh avtomobilej (Avtotronika-4)* (Electrical, electronic and autotronic equipment for cars (Autotronics-4)), Moscow, SOLON-PRESS, 2015, 416 p.

9. Woolvet G. *Datchiki v cifrovyyh sistemah* (Sensors in digital systems), Moscow, Energoizdat, 1981, 200 p.

10. Horowitz P., Hill W. *Iskusstvo skhemotekhniki* (The art of electronics), Moscow, Binom, 2014, 704 p.

11. Platt C., Jansson F. *Ehnciklopediya ehlektronnykh komponentov. V 3 tomah. Tom 3. Datchiki mestopolozheniya, prisutstviya, orientacii, vibracii, zhidkosti, gaza, sveta, tepla, zvuka, ehlektrichestva* (Encyclopedia of electronic components. In 3 vol. Vol. 3. Sensors for location, presence, orientation, vibration, liquid, gas, light, heat, sound, electricity), Saint-Petersburg, BHV-Peterburg, 2017, 288 p.