

УДК 519.876.5

МЕТОДОЛОГИЯ РАЗРАБОТКИ ПРЕДИКТИВНЫХ ЦИФРОВЫХ
ДВОЙНИКОВ ЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ

С. В. БОРИСЁНОК, О. К. ГУСЕВ, А. К. ТЯВЛОВСКИЙ

Белорусский национальный технический университет

Минск, Беларусь

Недавно введенный в действие ГОСТ Р 57700.37–2021, являющийся первым нормативным документом такого рода в мировой практике, определяет цифровой двойник как «систему, состоящую из цифровой модели изделия и двусторонних информационных связей с изделием (при наличии изделия) и (или) его составными частями» [1]. Данное определение неявно ограничивает понятие цифровых двойников информационными двойниками, непрерывно синхронизируемыми со своими прототипами посредством IoT-датчиков. На сегодняшний день использование таких двойников оправданно, когда количество параметров цифровой модели невелико и (или) изделие изначально имеет высокую сложность и большие габариты, позволяющие дополнить конструкцию необходимыми датчиками без значительного увеличения размеров и стоимости изделия. В то же время современные средства измерений характеризуются высокой технической сложностью и высокой удельной себестоимостью, что делает экономически оправданным продление их ресурса и снижение затрат на эксплуатацию за счет использования цифровых двойников, однако плотная компоновка средств измерений препятствует оснащению их IoT-датчиками. Также оснащение электронных средств измерений дополнительными датчиками, использующими собственные беспроводные каналы связи, создает трудноразрешимую проблему электромагнитной совместимости из-за взаимных наводок.

С учетом этого, в качестве метода цифровизации метрологического обеспечения измерений предлагается использование предиктивных цифровых двойников средств измерений [2]. В отличие от информационных, предиктивные двойники позволяют предсказывать состояние объекта, используя его цифровую модель и данные о влияющих факторах, получаемые от независимых источников, а не данные о состоянии элементов и узлов самого объекта. Использованию предиктивных цифровых двойников способствуют такие характерные для средств измерений особенности, как их эксплуатация в режимах, далеких от предельных для любого из составляющих прибор компонентов. В связи с этим для цифровых двойников средств измерений значимым является не понятие технического отказа (поломки), а метрологического отказа, т. е. выхода метрологических характеристик средства измерений за установленные допустимые пределы [3].

Для создания предиктивных цифровых двойников, с учетом указанных особенностей, предлагается использовать следующую методологию.

1. Построить математическую компьютерную модель средства измерений, включающую все метрологически значащие компоненты, а также компо-

ненты и элементы конструкции, которые тем или иным образом могут оказать на них влияние. К примеру, для электронных средств измерений такая модель в обязательном порядке должна включать модель принципиальной электрической схемы со всеми компонентами, для каждого из которых определены номинальные параметры и их допуски, температурные и частотные зависимости этих параметров, чувствительность к электромагнитным наводкам; 3D-модель печатной платы, отображающая реальное взаимное расположение компонентов и позволяющая численно промоделировать взаимные электромагнитные наводки и взаимное тепловое воздействие; 3D-модель корпуса, учитывающая электрофизические и теплотехнические характеристики его материала для математического моделирования электромагнитных и тепловых потоков внутри и вовне. В зависимости от назначения и конструкции прибора в модели могут быть учтены дополнительные, например механические, характеристики материалов и элементов или, напротив, исключены заведомо несущественные параметры. При этом, с учетом основной задачи моделирования (прогнозирование метрологического отказа), предельные значения параметров компонентов для модели задавать не требуется, поскольку метрологический отказ наступает раньше технического.

В большинстве случаев такие модели могут быть построены с использованием уже существующих программных средств, например, САД-системы Altium Designer, обеспечивающей полное моделирование электронных схем, включая тепловой режим и взаимные наводки компонентов с учетом их реального размещения на печатной плате.

2. В качестве входных параметров для математической модели цифрового двойника определить значения влияющих факторов (в приведенном примере – температуры окружающей среды, напряжения питания, мощности и частоты внешней электромагнитной наводки). Величина входного измерительного сигнала также должна рассматриваться как влияющий параметр, поскольку в подавляющем большинстве случаев она влияет на режимы компонентов схемы прибора. Если модель позволяет учесть старение компонентов, то в число входных параметров должны быть внесены время с момента включения и полная наработка прибора. Выходным параметром модели при этом должны являться не показания, а передаточная характеристика прибора и её отклонение от номинальной, характеризующее погрешность измерения.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Компьютерные модели и моделирование. Цифровые двойники изделий. Общие положения: ГОСТ Р 57700.37–2021.
2. **Борисёнок, С. В.** Информационные и предиктивные цифровые двойники в виртуальных измерениях / С. В. Борисёнок, А. К. Тявловский // Приборостроение : материалы 16 Международ. науч.-техн. конф., Минск, 17–19 нояб. 2023 г. – Минск, 2023. – С. 21–23.
3. Метрология. Основные термины и определения: РМГ 29–2013 ГСИ.