

Сергій Сапон

кандидат технічних наук, доцент кафедри технологій машинобудування та деревообробки
Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)
E-mail: s.sapon@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1082-6431>
ResearcherID: G-7764-2014. Scopus Author ID: 56736964700

**КОНЦЕПЦІЯ СТВОРЕННЯ МОДЕЛІ ЦИФРОВОГО ДВІЙНИКА
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОГО ШПИНДЕЛЬНОГО ВУЗЛА**

Технологія цифрового двійника лежить в основі реалізації кіберфізичної технологічної системи і є базовою технологією Індустрії 4.0. Цифровим двійником шпиндельного вузла (ШВ) вважається динамічна віртуальна модель, яка в режимі реального часу двосторонніми інформаційними зв'язками пов'язує ШВ, як реальний фізичний об'єкт, з його цифровою моделлю та відображає всі особливості його конструкції і функціонування протягом життєвого циклу в режимі реального часу. Ключовим компонентом цифрового двійника ШВ є його модель, яка являє собою комплекс цифрових моделей, що описують його конструктивні, технологічні, експлуатаційні, параметри та фізико-механічні процеси, які відбуваються протягом експлуатації ШВ і відображають вплив цих параметрів на показники якості та ефективності його функціонування протягом життєвого циклу в режимі реального часу. Тому в роботі розглянуто концепцію створення моделі цифрового двійника ШВ.

Ключові слова: цифровий двійник; шпиндельний вузол; модель цифрового двійника.

Рис.: 5. Бібл.: 19.

Актуальність теми дослідження. Шпиндельний вузол (ШВ) є основним формуючим компонентом металорізальних верстатів. Динамічні характеристики ШВ безпосередньо впливають на точність, якість обробки та інші показники, що визначають ефективність функціонування технологічної оброблюючої системи. Отримання максимально достовірних динамічних характеристик ШВ у процесі експлуатації є надважливою фундаментальною основою для підвищення ефективності конструкторських рішень при проектуванні ШВ та реалізації ефективних систем керування параметрами ШВ у процесі експлуатації. Стабільна потреба в пошуку шляхів покращення функціональних показників ШВ зумовлює необхідність створення максимально точних і адекватних моделей, що описують роботу ШВ, як елемента технологічної оброблюючої системи нового покоління. Перспективним шляхом вирішення проблеми підвищення точності та ефективності експлуатації ШВ є створення їхніх цифрових двійників (ЦД). Власне це й зумовлює актуальність цієї роботи.

Постановка проблеми. Динамічні характеристики ШВ в процесі різання змінюються. Ці зміни зумовлені будь-якими змінами в елементах технологічної оброблюючої системи: зміна режимів різання, температурні деформації, спрацювання різального інструменту, анізотропія властивостей оброблюваних заготовок тощо. Традиційні методики не дають можливості оперативно, максимально адекватно і точно визначити динамічні характеристики ШВ в процесі різання в режимі реального часу. Це зумовлено тим, що традиційно використовуване апаратне і програмне забезпечення для моніторингу експлуатаційних параметрів та показників якості ШВ належною мірою не інтегровано в єдину систему. Це є суттєвим обмеженням для широкого впровадження парадигм Industry 4.0. Перспективним шляхом вирішення зазначеної проблеми є створення цифрових двійників ШВ [1-4].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Вперше концепцію цифрових двійників озвучив Майкл Гривс в 2002 році. У 2014 році він докладно описав ЦД у роботі [1]. В подальшому по мірі розвитку цифрових технологій концепція ЦД також еволюціонувала і на сьогодні цифровим двійником вважається динамічна віртуальна модель системи, яка являє собою поєднання фізичного об'єкта, як системи компонентів, його цифрової моделі, яка відображає всі особливості його конструкції і функціонування протягом життєвого циклу, та комунікаційних засобів, які забезпечують обмін даними між фізичним об'єктом та його цифровою моделлю в режимі реального часу [1-5]. Поняття, сутність і тенденції розвитку ЦД в сфері машинобудування більш-менш докладно висвітлено в ро-

ботах [3; 4]. Ідея створення і перспективність використання ЦД металорізальних верстатів висвітлена в роботах [3; 6; 7] та багатьох інших. У роботі [8] роз'яснено концепцію створення інтелектуальних шпинделів, яку в певній мірі можна реалізовувати для створення ЦД ШВ. Про перспективність створення ЦД ШВ, як окремих автономних інтелектуальних компонентів верстатів сказано в роботах [9; 10]. Автори роботи [10] відмічають, що застосування ЦД ШВ, як окремого інтелектуального компонента, дозволить спростити та підвищити ефективність системи інтелектуального моніторингу верстата в цілому. У зазначених роботах [9; 10] основну увагу зосереджено на архітектурі та функціональних можливостях інтегрованої системи локального збору, об'єднання, обробки, представлення і передачі даних до ЦД ШВ.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Треба зазначити, що попри достатню кількість праць, присвячених розробкам ЦД металорізальних верстатів, робіт, у яких було б акцентовано увагу на розробці ЦД ШВ як важливого компонента металорізальних верстатів, мало. У наявних у відкритому доступі закордонних працях переважно приділено увагу здебільшого проблемам та питанням перспективності створення ЦД технологічних систем загалом. В роботах [8-10] обґрунтовано перспективність та наведено авторські концепції інтелектуальних ШВ, як автономних інтелектуальних компонентів верстатів, проте в цих роботах не акцентується увага на конкретній послідовності етапів створення моделі ЦД ШВ. Робіт українських вчених, в яких би висвітлювалася концепція створення ЦД ШВ не виявлено. Тому розробка узагальненої концепції створення моделі ЦД інтелектуального ШВ є необхідним і важливим завданням, вирішення якого на цьому етапі дозволить надалі конкретизувати етапи та сформулювати чітку методологію його створення.

Метою статті є розробка узагальненої концепції створення моделі цифрового двійника, як компонента інтелектуального ШВ, яка дозволить в подальшому конкретизувати зміст етапів створення ЦД ШВ та сформулювати методологію його створення.

Виклад основного матеріалу.

Для чіткого трактування і розмежування понять, на основі термінів і визначень, наведених у [1-7; 9; 10] з деякими авторськими уточненнями сформулюємо визначення ЦД виробу як фізичного об'єкта або системи та визначення моделі ЦД виробу.

Цифровий двійник виробу (системи) – це віртуальне представлення фізичного об'єкта (системи), яке складається з самого фізичного об'єкта (системи), його цифрової моделі та двосторонніх інформаційних зв'язків між фізичним об'єктом і цифровою моделлю об'єкта і (або) його складових частин, і використовується для моделювання, аналізу, оптимізації стану та поведінки фізичного об'єкта (системи) в реальних умовах функціонування, у режимі реального часу протягом всього життєвого циклу виробу (системи).

Модель цифрового двійника виробу являє собою детальне повноелементне представлення та оцифроване відображення в інформаційному просторі конструкції та робочого стану фізичного об'єкта у процесі виконання своїх функцій і є інтегрованою мультифізичною, мультимасштабною, мультидисциплінарною, гіперреалістичною, динамічною, імовірнісною імітаційною моделлю, яку можна використати для моделювання, моніторингу, діагностики, прогнозування та управління поведінкою виробу в реальних умовах його функціонування, у режимі реального часу протягом всього життєвого циклу виробу (системи), як фізичного об'єкта.

Можна сказати, що ЦД – це технології, процеси та методи, застосовані для його створення та забезпечення функціональності, а модель ЦД – це віртуальне відображення об'єкта, цифрові моделі та дані, які пов'язані між собою і з реальним фізичним об'єктом, і які описують особливості його функціонування в реальному середовищі, у режимі реального часу протягом усього життєвого циклу [11].

Відповідно до вищевикладеного, в контексті ШВ його цифровим двійником є система, яка в режимі реального часу двосторонніми інформаційними зв'язками пов'язує ШВ як реальний фізичний об'єкт з його цифровою моделлю (рис. 1).

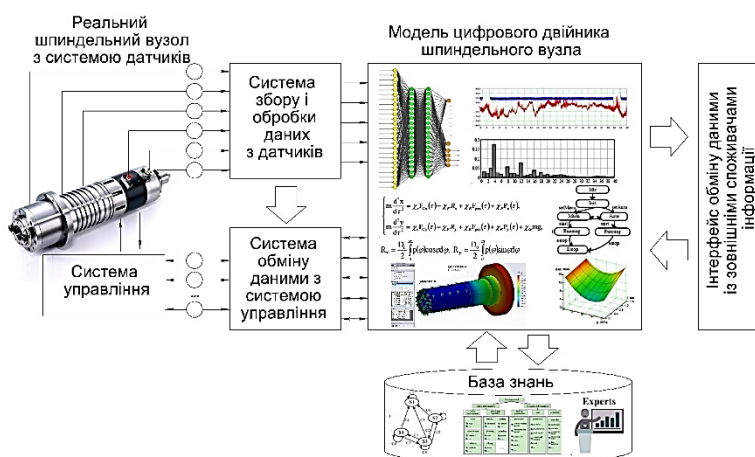


Рис. 1. Концептуальна структура цифрового двійника ШВ

Джерело: розроблено автором.

По суті, цифровий двійник ШВ поєднує в собі: інтеграцію сучасних цифрових технологій, інтеграцію інструментів моделювання з безперервним інформаційним обміном даними, інтеграцію моделі цифрового двійника з реальним ШВ на базі інформаційного обміну даними в максимально наближеному до реального часу режимі, інтеграцію моделювання на всіх стадіях життєвого циклу ШВ.

Концептуальні характеристики цифрового двійника ШВ:

- ЦД – це цифрова копія ШВ, яка відображає його структуру, особливості, технічний стан, а також характер та історію експлуатації реального ШВ (фізичного двійника).
- ЦД базується на мультифізичному, масштабованому і мультидисциплінарному математичному моделюванні компонентів та фізичних процесів, що визначають вихідні показники якості ШВ.
- ЦД – модель, яка накопичує інформацію про параметри й функціональні показники реального ШВ протягом його експлуатації у конкретних умовах. У двох конструктивно однакових ШВ ЦД будуть різні, оскільки вони працюють у неоднакових умовах.
- ЦД – модель ШВ, яка оновлюється і уточнюється протягом його експлуатації на основі даних з датчиків реального ШВ в режимі реального часу.
- ЦД інтегрує різномірну інформацію про функціональні показники і параметри реального ШВ.
- ЦД дозволяє розробникам ШВ віддалено спостерігати за параметрами віртуальної копії ШВ, щоб краще зрозуміти, як оптимізувати конструкцію реального ШВ.
- ЦД допомагає встановлювати і уточнювати на всіх етапах експлуатації закономірності формування функціональних показників конкретного ШВ в реальних умовах для оптимізації режимів експлуатації.
- ЦД дозволяє на основі даних про експлуатаційні параметри реального ШВ робити оцінку і прогнозування його ресурсного стану та віддалено планувати сервісне обслуговування.

Ключові компоненти для створення цифрового двійника ШВ наведено на рис. 2.

Надалі в цій роботі увагу сконцентровано виключно на розробці структури моделі ЦД інтелектуального ШВ.

Основою концепції створення моделі ЦД ШВ пропонується застосувати інструменти модельно-орієнтованого системного інжинірингу (Model-Based Systems Engineering (MBSE)) [12; 13]. Однією із частин MBSE є описання будь-якого об'єкту, як технічної системи за допомогою комплексу математичних моделей, які відображають взаємозв'язки між параметрами системи та показниками, що визначають якість її функціонування. Відповідно моделлю ЦД ШВ будемо вважати впорядковану архітектуру цифрових моделей, які описують констру-

ктивні, технологічні, експлуатаційні, параметри ШВ та фізико-механічні процеси, які відбуваються протягом експлуатації ШВ і відображають вплив цих параметрів на показники якості та ефективності функціонування ШВ в режимі реального часу. В моделі ЦД ШВ також враховуються дані про попередні періоди експлуатації та інформація, яка відображає індивідуальні конструкторсько-технологічні особливості ШВ, сформовані на етапі його виготовлення.



Рис. 2. Ключові компоненти для створення цифрового двійника ШВ

Джерело: розроблено автором

Для максимально адекватного описання особливостей функціонування ШВ, як і будь-якого фізичного об'єкта, його модель ЦД повинна бути: унікальною, мультифізичною, мультимасштабною, ієрархічною, інтегрованою, динамічною, ймовірнісною, гіперреалістичною, мультидисциплінарною з необхідними обчислювальними спроможностями та функціональністю (рис. 3).

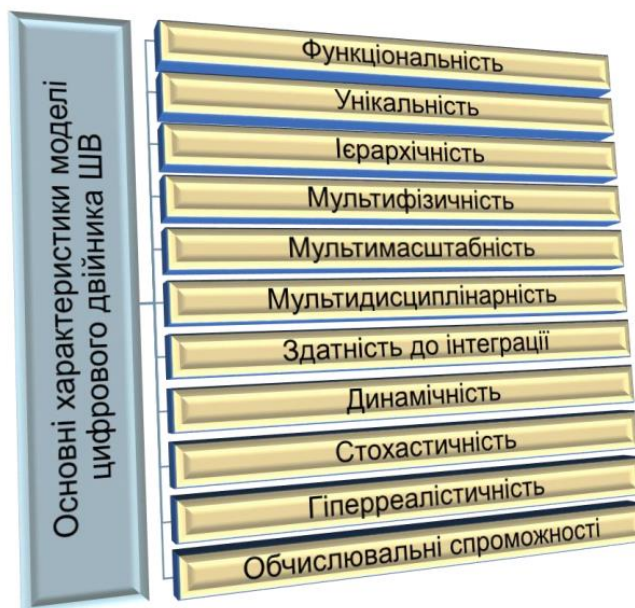


Рис. 3. Характеристики моделі цифрового двійника ШВ

Джерело: розроблено автором

Функціональність моделі цифрового двійника ШВ полягає в тому, що вона повинна відображати необхідні й достатні функції конкретного ШВ відповідно до його функціонального призначення. Модель повинна відображати механізми формування критеріїв, за якими визначається виконання ШВ своїх функцій.

Унікальність моделі ЦД ШВ полягає в тому, що ця модель будується тільки у відповідності до індивідуальних параметрів, особливостей конструкції та умов функціонування конкретного ШВ. Абсолютно однакових ШВ і умов, в яких вони експлуатуються не існує. Тому будь-який інший візуально конструктивно-однаковий ШВ буде мати власну унікальну модель цифрового двійника.

Ієрархічність моделі ЦД ШВ зумовлена тим, що ШВ є складною технічною системою, яка містить в собі різні компоненти, частини, які мають відповідні цифрові моделі-двійники. Зокрема, модель ЦД ШВ містить моделі корпусу, шпиндельного вала, шпиндельних опор, приводу, модель ЦД системи мащення, охолодження, модель ЦД технологічного оснащення для закріплення оброблюваної заготовки або різального інструменту, цифрову модель системи управління робочими параметрами ШВ тощо. Моделі компонентів ШВ, які складають модель його ЦД взаємопов'язані і в комплексі мають створювати впорядковану ієрархічну архітектуру.

Мультифізичність моделі ЦД ШВ обумовлена тим, що сучасний ШВ є складною мехатронною системою, яка містить механічні, електричні, гідравлічні (пневматичні) та інші компоненти. Відповідно для повноцінного описання закономірностей формування показників якості та ефективності функціонування ШВ необхідне врахування всіх процесів, що протікають у ШВ протягом його експлуатації. Тобто необхідно не тільки описати геометричні властивості ШВ (конструкція, розміри, фактичні відхилення форми і розташування виконавчих поверхонь, основних і допоміжних баз), а й описати різні фізико-механічні властивості компонентів ШВ, включно з динамічними моделями процесів, термо-динамічними моделями, моделями аналізу напружень, моделями властивостей конструкційних матеріалів (жорсткість, міцність, твердість і втомна міцність) тощо. При мультифізичному моделюванні необхідно враховувати не тільки різні фізичні процеси у ШВ, а й їх взаємний вплив. Так, наприклад, на формування показників точності ШВ з гідростатичними опорами впливають його індивідуальні динамічні характеристики, температурні деформації, властивості робочої рідини системи живлення шпиндельних опор, геометричні відхилення форми опорних поверхонь шпиндельних підшипників, характер технологічного навантаження тощо [14; 15; 16].

Мультимасштабність моделі ЦД ШВ означає, що для описання закономірностей формування показників якості та ефективності функціонування ШВ необхідно застосовувати моделі на макро- мезо- та мікрорівні [17; 18; 19]. Наприклад, при створенні моделі ЦД ШВ макроскопічні моделі використовуються для виявлення взаємозв'язків між конструктивними, експлуатаційними параметрами ШВ та його кінематичними, динамічними або механічними характеристиками. Вплив геометричних відхилень спряжених поверхонь компонентів ШВ описується моделями мезорівня. Наприклад, у роботах [14; 15] систематизовано і досліджено деякі фактори, що впливають на геометрію радіального зазору в гідростатичній опорі прецизійного ШВ. Показано, що геометричні відхилення опорних поверхонь гідростатичного підшипника впливають на режим тертя в підшипнику та реакцію його масляного шару, що істотно впливає на його навантажувальну здатність та динамічні характеристики. Моделі на мікрорівні орієнтовані на дослідження у мікромасштабі впливу на функціональні показники ШВ параметрів робочої рідини в гідростатичних опорах шпинделя, властивостей мікроструктури матеріалів, шорсткості поверхонь компонентів ШВ тощо.

Слід відзначити, що мезорівень і мікрорівень є доволі складними для прямого математичного моделювання внаслідок численних нелінійних, стохастичних, еволюційних та дисипативних процесів, які необхідно максимально точно описати. Водночас, оскільки вимоги до продуктивності й точності верстатів постійно зростають, не можна

нехтувати процесами, що протікають на мікрорівні. Саме тому при розробці високоточних ШВ для обробки поверхонь з точністю у нанометричному діапазоні важливо застосовувати підхід, заснований на мультимасштабному моделюванні та аналізі конструкції ШВ та фізико-механічних процесів, що відбуваються в процесі виконання ним свого функціонального призначення.

Мультидисциплінарність моделі цифрового двійника ШВ передбачає перетин та об'єднання кількох дисциплін, таких як теоретична механіка, опір матеріалів і матеріалознавство, теорія різання, теоретичні основи технології машинобудування, математичний аналіз, інформатика, електроніка, електромеханіка, гідродинаміка тощо.

Модель ЦД ШВ являє собою мультимасштабну, мультифізичну і багаторівневу інтегровану модель, яка повинна мати здатність інтегрувати весь цей комплекс моделей, забезпечуючи при цьому їх взаємопов'язаність для оперативного обміну даними.

Динамічність моделі ЦД ШВ полягає в тому, процеси, які відбуваються зовні та в середині ШВ не є інваріантними в часі, тому модель постійно оновлюється та вдосконалюватиметься завдяки безперервній взаємодії з реальним ШВ на різних етапах всього життєвого циклу. Таким чином, оперативні дані про функціональні показники і ресурсний стан ШВ будуть відображатися в моделі ЦД ШВ у віртуальному просторі. Водночас ґрунтуючись на моделі ЦД, можна здійснювати моніторинг стану ШВ у режимі реального часу.

Стохастичність моделі ЦД ШВ означає те, що практично всі процеси і ШВ та в оточуючому середовищі мають стохастичний характер. Відповідно модель ЦД ШВ повинна мати обчислювальні можливості здійснювати відповідну статистичну обробку даних з моделей і датчиків реального ШВ в режимі онлайн.

Гіперреалістичність полягає в тому, що модель цифрового двійника ШВ має максимально ідентично з високим рівнем реалістичності відображати реальний стан ШВ, як фізичного об'єкта. Гіперреалістичність моделі ЦД ШВ забезпечується досконалістю засобів, які застосовують для створення моделі ЦД ШВ та максимальним врахуванням в режимі реального часу протягом всього періоду експлуатації ШВ інформації про параметри і показники, які визначають якість його функціонування.

Обчислювальні спроможності моделі ЦД ШВ полягають в наявності достатніх обчислювальних потужностей для зберігання, накопичення і обробки багатопоточних даних, здійснення моделювання, відображення стану та необхідних функціональних показників і параметрів ШВ в режимі реального часу.

Відповідно до концепції MBSE етапи створення моделі ЦД ШВ наведено на рис.4.



Рис. 4. Етапи створення моделі цифрового двійника інтелектуального ШВ
Джерело: розроблено автором.

У спрощеному вигляді компоненти моделі ЦД ШВ наведено на рис. 5.

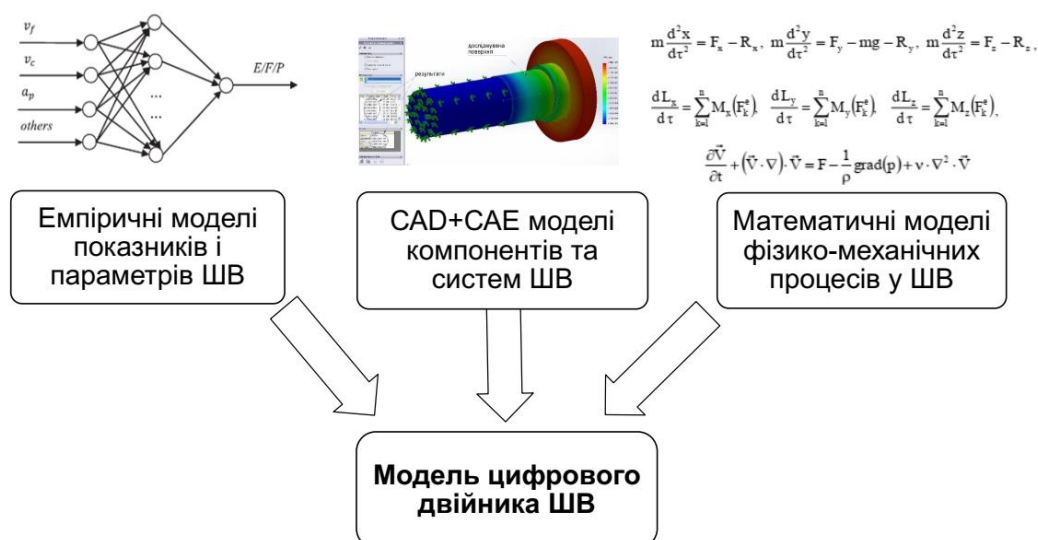


Рис. 5. Компоненти моделі цифрового двійника інтелектуального ШВ

Джерело: розроблено автором.

На найпершому етапі будуються тривимірні геометричні CAD-моделі, що описують форми, розміри, положення і складальні зв'язки компонентів ШВ. На цьому ж етапі в першому наближенні в САЕ-системах здійснюється моделювання впливу робочих процесів і навантажень, що діють на ШВ і його компоненти в процесі експлуатації, на його статичні та динамічні характеристики. На цьому етапі конструкція ШВ може бути ще не до кінця визначеною, тому цей етап передбачає здійснення швидкого мультифізичного, мультимасштабного міждисциплінарного моделювання для швидкого аналізу конструкції ШВ без стремління до високої точності моделювання.

Завданням другого етапу є цифровізація та побудова впорядкованої архітектури мультифізичних (фізико-механічних, електро-механічних, гідравлічних тощо) математичних моделей, якими описується функціонування ШВ. Архітектура математичних моделей – це комплекс математичних залежностей, які кількісно описують взаємозв'язки між конструкторсько-технологічними та експлуатаційними параметрами ШВ та його показниками якості та ефективності. Зрозуміло, що чим більше висувається функціональних вимог до ШВ, тим більшою має бути кількість параметрів і показників, які його характеризують. Тільки в такому випадку описання функціонування ШВ буде максимально адекватним до реальних умов. Відповідно кількість і складність математичних моделей та трудомісткість моделювання також буде зростати, оскільки збільшення кількості моделей зумовить виключно нелінійне зростання інформаційних потоків та обсягів обчислень. Спрощення і зменшення кількості математичних моделей знизить адекватність моделі ЦД ШВ. Тому конкретний перелік математичних моделей визначається функціональними вимогами до ШВ у вигляді набору необхідних і доступних показників, які є потреба і можливість контролювати у реального ШВ. Тут слід відзначити, що на етапі моделювання окремі загальноприйняті фізико-механічні моделі процесів, компонентів та систем ШВ дозволяють визначити показники якості та ефективності функціонування конкретного ШВ лише з певною ймовірністю та рівнем адекватності. Об'єднання цих моделей в єдину систему обміну даними та з'єднання з сенсорною системою реального ШВ у режимі онлайн дозволить підвищити адекватність окремих моделей та всієї архітектури моделі ЦД ШВ загалом. Тому на цьому етапі створюється структурована система обміну даними між моделями, що описують функціонування ШВ. Тут треба зазначити, що на сьогодні немає більш ефективного інструменту для поєднання різномірних моделей в єдину систему, ніж технології штучного інтелекту.

На наступному етапі здійснюється попередня перевірка адекватності побудованої архітектури цифрових моделей ШВ. Оцінювання здійснюється завдяки наявності апріорної інформації та експертних знань про фізику і механіку процесів, які відбуваються протягом експлуатації ШВ. Для цього замість підключення до датчиків, що фіксують стан реального ШВ здійснюється підключення створеної моделі ЦД ШВ до комплексу віртуальних датчиків, які генерують сигнали подібно реальним процесам.

4-й етап передбачає підключення створеної моделі ЦД ШВ до реального ШВ, адаптацію моделі на основі експериментальних випробувань ШВ. Наявність достатньої кількості статистично оброблених показань датчиків створює можливість для побудови і додавання до архітектури моделі ЦД ШВ емпіричних, регресійних, нейромережових моделей, необхідних для визначення певних функціональних показників і ресурсного стану ШВ. Кількість емпіричних моделей, що додаються визначається функціональністю моделі ЦД ШВ. Також за даними з датчиків уточнюються фізико-математичні моделі у вигляді диференціальних рівнянь, що описують робочі процеси і взаємозв'язки між конструкторсько-технологічними, експлуатаційними параметрами ШВ та його показниками якості й ефективності.

Заключний етап побудови моделі ЦД ШВ передбачає адаптацію моделі ЦД ШВ до конструкторсько-технологічних та експлуатаційних особливостей конкретного ШВ протягом всього періоду його експлуатації. Модель ЦД ШВ з'єднується з системою збору, обробки і передачі даних (див. рис.1), яка комутує дані з датчиків реального ШВ. Далі в режимі онлайн статистично оброблені дані з датчиків реального ШВ передаються в моделі ЦД, які завдяки цьому оновлюються та уточнюються протягом всього життєвого циклу.

Таким чином, побудова моделі ЦД ШВ має двонаправлений характер: від загального до часткового і від часткового до загального. Саме поєднання цих двох напрямів дозволяє стверджувати, що побудова моделі ЦД ШВ не може вважатися повністю завершеним процесом, оскільки модель ЦД ШВ буде постійно уточнюватися і оновлюватися до тих пір, поки експлуатація ШВ не припиниться.

Отже при створенні моделі ЦД ШВ необхідно докладно розглянути наступні ключові питання: високоточне моделювання, інтеграція моделей, верифікація моделей, аналіз взаємоузгодженості моделей, механізми функціонування та еволюції моделей.

Модель ЦД ШВ імітує всі можливі режими роботи ШВ протягом його експлуатації, враховує вплив зовнішніх факторів та процесів управління, дозволяє передбачати ресурсний стан, показники якості та ефективності функціонування ШВ. Цифровий двійник базується на інтеграції математичного, імітаційного моделювання, технологій штучного інтелекту, машинного навчання та аналітичного програмування. Протягом експлуатації конкретного ШВ його ЦД безперервно навчається та оновлює свої параметри, отримуючи інформацію від множини датчиків, максимально адекватно відображаючи стан реального ШВ. Під час навчання модель ЦД ШВ оновлюється, використовуючи поточні дані від датчиків реального ШВ, системи ЧПК верстата, поєднуючи фактичні дані з базою знань експертів та даними попередніх етапів експлуатації.

В останні роки технологія ЦД стрімко розвивається як на теоретичному, так і на прикладному рівнях. У той же час сфера застосування поступово зміщується від етапу проектування продукту до етапу його виробництва, експлуатації та обслуговування, що привертає широку увагу і вчених і виробництва. Основними причинами цього є такі аспекти [11]:

1. Зростання та широке застосування технологій цифрового моделювання робить можливим більш точне математичного описання фізико-механічних, хімічних, електро-механічних та інших процесів на різних етапах життєвого циклу продукту.

2. Швидка популяризація та застосування нового покоління інформаційних та комунікаційних технологій, таких як Big data, інтернет речей, мобільний Інтернет, хмарний комп'ютер, швидкий розвиток комп'ютерних наук та технологій, таких як великомасштабні, високопродуктивні, розподілені обчислення, а також поява інтелектуальних алгоритмів оптимізації, таких як машинне навчання та глибоке навчання, роблять надійнішими

продукти з динамічним збором даних у реальному часі. Прогнозування, швидка передача, зберігання, аналіз даних і прийняття рішень забезпечують важливу технічну підтримку для засобів кореляції та взаємодії віртуального і фізичного простору в реальному часі.

Висновки. У роботі представлено узагальнену концепцію створення моделі ЦД як компонента інтелектуального ШВ, яка дозволить в подальшому конкретизувати зміст етапів створення ЦД ШВ та сформуванню методологію його створення. Запропоновано формулювання визначення ЦД ШВ та його моделі, як ключового компонента ЦД. Наведено етапи створення моделі ЦД ШВ та сформульовано завдання, які підлягають вирішенню на цих етапах.

Показано, що побудова моделі ЦД ШВ має двонаправлений характер і не може вважатися повністю завершеним процесом, оскільки модель ЦД ШВ буде постійно уточнюватися та оновлюватися до моменту припинення експлуатації ШВ. Зауважено, що при створенні моделі ЦД ШВ необхідно докладно розглянути наступні ключові питання: високоточне моделювання, інтеграція моделей, верифікація моделей, взаємоузгодженість моделей, механізми функціонування та еволюції моделей.

Слід також відзначити, що наразі впровадження моделі ЦД ШВ має багато невирішених проблемних моментів. По-перше, у зв'язку зі стохастичністю, змінністю в часі, нелінійністю та певною невизначеністю зовнішніх та внутрішніх процесів у ШВ, побудова з високою точністю моделей, які формують архітектуру моделі ЦД ШВ у віртуальному просторі є фундаментальною проблемою. Крім того виникнення невідповідностей між моделями та реальними об'єктами і процесами важко оперативно відстежувати і, як наслідок, ефект від використання моделей знижується. По-друге, оскільки безперервний фізичний простір і дискретний віртуальний простір перебувають у різних масштабах, виникає проблема подолання розбіжності, щоб реалізувати безшовну інтеграцію реального ШВ та його цифрової моделі. Оскільки модель ЦД ШВ оновлюються протягом усього життєвого циклу ШВ, дані від датчиків ШВ і моделей генеруються безперервно. Тут постає питання як інтегрувати й об'єднати неперервно зростаючі обсяги даних. Пошук шляхів подолання зазначених проблем є завданням подальших досліджень.

Список використаних джерел

1. Grieves M. Digital twin: manufacturing excellence through virtual factory replication / M. Grieves // White paper. – 2014. – № 1. – Pp. 1-7.
2. Uhlemann T.H.-J. The Digital Twin: Realizing the Cyber-Physical Production System for Industry 4.0 / Uhlemann T.H.-J., Steinhilper C.L.R., Steinhilper R. // Procedia CIRP. – 2017. – Vol. 61. Part of special issue: The 24th CIRP Conference on Life Cycle Engineering. Ed. by S. Takata, Y. Umeda, S. Kondoh. – Pp. 335-340. – DOI: 10.1016/j.procir.2016.11.152.
3. Fei Tao. Digital Twin Driven Smart Manufacturing / Fei Tao, Meng Zhang and A.Y.C. Nee. – Academic Press, London, United Kingdom, 2019. – 269 p.
4. Digital twins-based smart manufacturing system design in Industry 4.0: A review / Leng, Jiewu & Wang, Dewen & Shen, Weiming & Li, Xinyu & Liu, Qiang & Chen, Xin // Journal of Manufacturing Systems. – Vol. 60. – Pp.119-137.
5. Segovia M. Design, modeling and implementation of digital twins. / Segovia M., Garcia-Alfaro J. // Sensors. – 2022. – No. 22. – 5396. – DOI: <https://doi.org/10.3390/s22145396>.
6. Lai X. A Review: Machine Tools Digital Twin Modeling And Application / X. Lai, Y. Zhou, L. Jiang and G. Ding // 26th International Conference on Automation and Computing (ICAC), Portsmouth, United Kingdom, 2021. – Pp. 1-6. – DOI: 10.23919/ICAC50006.2021.9594151.
7. Armendia Mikel. Twin-Control: A Digital Twin Approach to Improve Machine Tools Lifecycle / Armendia Mikel, Ghassempouri Mani, Ozturk Erdem, Peysson, Flavien. – Springer Cham, 2019. – 298 p. – DOI:10.1007/978-3-030-02203-7.
8. Cao H. The concept and progress of intelligent spindles: a review/ Cao H., Zhang X., Chen X. // International Journal of Machine Tools & Manufacture. – 2017. – No. 112. – Pp. 21–52. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2016.10.005>.

9. Wójcicki J. Potential for smart spindles adoption as edge computing nodes in Industry 4.0 / J. Wójcicki, M. P. Leonesio, G. Bianchi // *Procedia CIRP*. – 2021. – No. 99. – Pp.86-91.
10. Wójcicki J. A smart spindle component concept as a standalone measurement system for Industry 4.0 machine tools. / J. Wójcicki, G. Bianchi // 2020 IEEE International Workshop on Metrology for Industry 4.0 & IoT, 2020. – Pp. 278-282.
11. Wang Z. Digital Twin Technology in Industry 4.0 / Z. Wang // *Impact on Intelligent Logistics and Manufacturing*. – Intech Open, 2020. – Pp. 95-114. – DOI: 10.5772/intechopen.80974.
12. Micouin P. Model-based systems engineering: Fundamentals and methods / Patrice Micouin. – London : ISTE Ltd, 2014. – 272 p.
13. Wang, Yübo. Integration of model based system engineering into the digital twin concept / Wang Yübo, Steinbach Tanja, Klein Jonathan, Anderl Reiner // *Procedia CIRP*. – 2021. – Vol. 100. – Pp. 19-24. – DOI 10.1016/j.procir.2021.05.003.
14. Федориненко Д. Ю. Шпиндельні гідростатичні підшипники : монографія / Д. Ю. Федориненко, С. П. Сапон. – Чернігів : ЧНТУ, 2016. – 405 с.
15. Струтинський В. Б. Статистична динаміка шпиндельних вузлів на гідростатичних опорах : монографія / В. Б. Струтинський, Д. Ю. Федориненко. – Ніжин : ТОВ „Видавництво „Аспект-Поліграф”, 2011. – 464 с.
16. Fedorynenko D. Accuracy of spindle units with hydrostatic bearings / Dmytro Fedorynenko, Serhii Sapon, Sergiy Boyko // *Acta Mechanica et Automatica*. – 2016. – Vol. 10, no. 2(36) – Pp. 117-124. – DOI: 10.1515/ama-2016-0019.
17. Shao Y. Development of multiscale multiphysics-based modelling and simulations with the application to precision machining of aerofoil structures / Shao Y., Adetoro O.B., Cheng K. // *Engineering Computations*. – 2021. – Vol. 38, no. 3. – Pp. 1330-1349. – DOI 10.1108/EC-10-2019-0473.
18. Weinan E. Principles of Multiscale Modelling / E. Weinan. – Cambridge: Cambridge University Press, 2011. – 510 p.
19. Gou N. Multiscale modelling and analysis for design and development of a high-precision aerostatic bearing slideway and its digital twin / Gou N., Cheng K., Huo D. // *Machines*. – 2021. – No. 9, Vol. 85. – DOI 10.3390/machines9050085.

References

1. Grieves, M. (2014). Digital twin: manufacturing excellence through virtual factory replication. *White paper*; (1), 1-7.
2. Uhlemann T.H.-J., Steinhilper C.L.R., Steinhilper R. (2017). The Digital Twin: Realizing the Cyber-Physical Production System for Industry 4.0. *Procedia CIRP*. (61). Part of special issue: The 24th CIRP Conference on Life Cycle Engineering (pp. 335-340).
3. Fei Tao, Meng Zhang and A.Y.C. Nee. (2019). *Digital Twin Driven Smart Manufacturing*. Academic Press.
4. Leng, Jiewu & Wang, Dewen & Shen, Weiming & Li, Xinyu & Liu, Qiang & Chen, Xin. (2021). Digital twins-based smart manufacturing system design in Industry 4.0: A review. *Journal of Manufacturing Systems*, (60),119-137. doi:10.1016/j.jmsy.2021.05.011.
5. Segovia, M., Garcia-Alfaro, J. Design. (2022) Modeling and Implementation of Digital Twins. *Sensors*, (2)(5396)). <https://doi.org/10.3390/s22145396>
6. Lai, X., Zhou, Y., Jiang, L., & Ding, G. (2021) A Review: Machine Tools Digital Twin Modeling And Application. *26th International Conference on Automation and Computing (ICAC)* (pp. 1-6).
7. Armendia Mikel, Ghassempouri Mani, Ozturk Erdem, Peysson, Flavien. (2019). *Twin-Control: A Digital Twin Approach to Improve Machine Tools Lifecycle*. Springer Cham.
8. Cao, H., Zhang, X., Chen, X. (2017) The concept and progress of intelligent spindles: a review. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, (112), 21–52.
9. Wójcicki, J., Leonesio, M.P., & Bianchi, G. (2021). Potential for smart spindles adoption as edge computing nodes in Industry 4.0. *Procedia CIRP*, (99), 86-91.
10. Wójcicki, J., & Bianchi, G. (2020). A smart spindle component concept as a standalone measurement system for Industry 4.0 machine tools. *2020 IEEE International Workshop on Metrology for Industry 4.0 & IoT* (pp. 278-282).
11. Wang, Z. (2020). Digital twin technology in Industry 4.0. *Impact on Intelligent Logistics and Manufacturing* (pp. 95-114). doi: 10.5772/intechopen.80974

12. Micouin P. (2014). *Model-based systems engineering: Fundamentals and methods*. ISTE Ltd.
13. Wang Yübo, Steinbach Tanja, Klein Jonathan, Anderl Reiner. (2021) Integration of model based system engineering into the digital twin concept. *Procedia CIRP*, (100), 19-24.
14. Fedorynenko D., & Sapon S. (2016). *Spindle Hydrostatic Bearings (in Ukrainian)*. ChNUT.
15. Strutynsky V., & Fedorynenko D. (2011). *Statistical dynamics of spindle units for hydrostatic bearings (in Ukrainian)*. Aspect-Polygraph.
16. Fedorynenko, D., Sapon, S., & Boyko, S. (2016) Accuracy of spindle units with hydrostatic bearings. *Acta Mechanica et Automatica*, 10(2(36)), 117-124.
17. Shao, Y., Adetoro, O.B., & Cheng, K. (2021). Development of multiscale multiphysics-based modelling and simulations with the application to precision machining of aerofoil structures. *Engineering Computations*, 38(3), 1330-1349. <https://doi.org/10.1108/EC-10-2019-0473>.
18. Weinan, E. (2011). *Principles of Multiscale Modelling*. Cambridge University Press.
19. Gou, N., Cheng, K., & Huo, D. (2021) Multiscale Modelling and Analysis for Design and Development of a High-Precision Aerostatic Bearing Slideway and Its Digital Twin. *Machines*, 9(85). doi:10.3390/machines9050085.

Отримано 11.10.2022

UDC 621.923.42

Serhii Sapon

¹PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Mechanical Engineering and Wood Technology
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)
E-mail: s.sapon@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1082-6431>.
ResearcherID: G-7764-2014. Scopus Author ID: 56736964700

THE CONCEPT OF CREATING OF A DIGITAL TWIN MODEL OF AN INTELLIGENT SPINDLE UNIT

The digital twin technology is the basis for the implementation of a cyber-physical technological system and is the core technology of Industry 4.0. A digital twin of a spindle unit is a dynamic virtual model that connects the spindle unit as a real physical object with its digital model in real time via two-way information links and reflects all the features of its design and functioning during its life cycle in real time. The key component of the digital twin of the spindle unit is its model, which is a set of digital models that describe its design, technological, operational, parameters and physical and mechanical processes that occur during the operation of the spindle unit and reflect the impact of these parameters on the quality and efficiency of its functioning during the life cycle in real time. Therefore, the paper considers the concept of creating a model of a digital twin of a spindle unit.

The introductory part of the article formulates the issues and relevance and analyzes the works that propose approaches to the creation of digital twins, in particular, their models. In the main part of the paper, we first propose definitions of the terms digital twin of a spindle unit and its model. The conceptual structure of the digital twin of the spindle unit is presented. A list of characteristics of the model of the digital twin of the spindle unit is defined. The structure of the model of the digital twin of the intelligent spindle unit is determined and the stages of its model creation are given, the tasks to be solved at these stages are specified.

It is shown that building a model of a digital twin of a spindle unit has a two-directional character and cannot be considered a fully completed process, since the model of a digital twin of a spindle unit will be constantly refined and updated until the spindle unit is out of service. It is noted that when creating a model of a digital twin of a spindle unit, it is necessary to consider in detail the following key issues: high-precision modeling, model integration, model verification, model consistency, mechanisms of functioning and evolution of models.

In the conclusions, attention is paid to the unresolved problematic issues that currently exist in the implementation of the model of a digital twin of a spindle unit.

The generalized concept of creating a model of a digital twin of an intelligent spindle unit presented in this paper will allow further specifying the content of the stages of creating a digital twin of a spindle unit and forming a methodology for its creation.

Keywords: digital twin; intelligent spindle unit; model of a digital twin; spindle.

Fig.:5. References: 19.