Wacław Kasprzak

Metodologia badań w naukach technicznych

marzec 2019

Spis treści

Od autora

Tekst niniejszy został pomyślany, jako referat dla uczestników seminarium, z którym autor jest związany od ponad 55 lat. Seminarium jest poświęcone Mechanice Technicznej, ale zawsze interesowało się też poboczami tej dyscypliny, dopraszając do współpracy dostępnych w kraju specjalistów. I tak uczestniczyli w nim matematycy tej miary, co Czesław Ryll Nardzewski i Adam Rybarski, jak również grupa filozofów prowadzona przez Wacława Mejbauma. Pierwsza część niniejszego opracowania poświęcona jest szkicowemu omówieniu spuścizny XX wieku. Następna zaś metodologii nauk empirycznych w oparciu o książkę J. M. Bocheńskiego „Metody Współczesnego Myślenia”. Autorowi tych słów wydawało się, że książka ta jest najbliższa potrzebom metodologicznym słuchaczy.

Część I

Spuścizna XX wieku

Tekst prezentowany niżej zgodnie z zamysłem autora ma stanowić specyficzne uzupełnienie podręczników poświęconych metodologii nauk empirycznych, które może interesować uprawiających nauki techniczne. Z tego względu we wstępie podano informacje o poglądach i przemianach, jakie zaszły w nauce w XX wieku i o specjalnościach naukowych, które się narodziły w XX wieku, badając naukę, jako wytwór społeczności uczonych, stosunki w tej społeczności, a także nowe podejście do planowania badań i organizacji badań. Informacje te traktować należy, jako przewodnik po literaturze przedmiotu, równie ważnego dla wagi i skuteczności wysiłku uczonych jak i samo przygotowanie warsztatowe. Wiadomości te podajemy we wstępie, w dalszych zaś częściach niniejszego opracowania podamy uzupełnienia głównie oparte na dorobku grupy pracowników nauki, z którymi był związany autor opracowania. Czytelnikowi poleca się zapoznanie z wydanymi w Polsce Podstawami Nauk Przyrodniczych Carla G. Hempla [2] oraz Metod Współczesnego Myślenia Józefa Marii Bocheńskiego [1].

W powszechnych poglądach panujących jeszcze w końcu XIX i początkach XX wieku nauka rozwijała się w sposób kumulatywny dzięki genialnym uczonym, z których każdy dodawał cegiełka po cegiełce do wielkiego gmachu nauki. Giganci spośród nich tworzyli wielkie teorie otwierające nowe obszary poznania. Właściwie dopiero Derek de Solla Price w połowie XX wieku uświadomił nam, badając statystyki zatrudnienia uczonych i „produkcję naukową" w postaci publikacji, że współcześnie naukę rozwijają całe armie uczonych. Mało tego tempo przyrostu zatrudnienia w nauce jest wykładnicze, dotyczy to też tempa przyrostu wiedzy. Price szacował wtedy, że okres podwojenia wiedzy to około 15 lat. Liczba publikowanych prac już w jego czasach przekraczała możliwość śledzenia opracowań, nawet w obrębie jednej dyscypliny. Liczba podawanych nowych twierdzeń matematycznych dochodziła wtedy do około 300 tysięcy rocznie. Przed wprowadzeniem informacji komputerowej remedium na zalew informacji miały być czasopisma abstraktowe, te też już w latach 50. podawały w comiesięcznie wydawanym numerze dotyczącym jednej dyscypliny nauki kilkadziesiąt tysięcy abstraktów.

W połowie ubiegłego wieku społeczność uczonych miała pełną świadomość swojej wartości dla społeczeństwa i światowej gospodarki. To kierujący naukowym i innowacyjnym wysiłkiem militarnym Stanów Zjednoczonych Vannevar Bush obok innych innowacyjnych rozwiązań związanych ze sterowaniem badaniami, po sukcesach programu Manhattan zaproponował prowadzenie programów badawczych dla gospodarki w takim samym trybie jak dla armii. Wymagało to przewidywania, jakie innowacje są możliwe. Na początku lat 50. Rand Corporation rozwija pionierskie prace zmierzające do opracowania metod prognozowania rozwoju nauki i technologii (były one oparte o nowe odkrycia procesów, co pozwalało przewidzieć, jakie nowe technologie mogą być o te procesy oparte, następnie należało przewidzieć czas, w którym to nastąpi). Od lat 50. rozeznanie prognostyczne prowadzi się Metodą Delficką, zgodnie z opublikowanymi już metodami pracowników Rand Corporation, polegającymi na ustalaniu momentu wprowadzenia nowej technologii przez podanie mediany przewidywanych dat, typowanych przez odpowiednio dobrany zespół ekspertów. W rezultacie ukształtował się system planowania badań oparty między innymi na prognozach, w latach 50. to podejście do planowania badań i prowadzenia procesów innowacyjnych zaczęto stosować na szeroką skalę w gospodarce Stanów Zjednoczonych. Sterowanie procesów innowacyjnych w gospodarce zintegrowano z rozwojem badań naukowych. Programy badań naukowych obejmowały pełny cykl od badań podstawowych, poprzez stosowane, aż do wdrożeniowych. W kraju takie podejście zaczęto stosować z różnym powodzeniem dopiero w latach 70.

W latach 20 i 30 ubiegłego wieku rozwinięto intensywnie prace nad metodologią badań naukowych, ich centrum mieści się w Wiedniu, a reprezentują je uczeni związani z tak zwanym Kołem Wiedeńskim. Prezentują krytyczną analizę każdego kroku w badaniach. Również wiedeńczyk, ale nieprzyznający się do przynależności do Koła, Karl R. Popper publikuje „Logikę odkrycia naukowego" [3], w której precyzuje słynne kryterium falsyfikacji, pozwalające wyróżniać zdania należące do nauki i to z pewnością rozumowania dedukcyjnego. Podsumowanie dorobku Koła Wiedeńskiego prezentuje Carl G. Hempel w książce „Podstawy Nauk Przyrodniczych" [2], (polskie wydanie w 1968 roku). W połowie wieku Thomas Kuhn pisze „Strukturę Rewolucji Naukowych” [4], twierdząc, że kumulatywny rozwój nauki odbywa się tylko między rewolucjami naukowymi, które zmieniają całkowicie pogląd na świat i język nauki. Poglądy na metody badań zostają uzupełnione jeszcze w XX wieku przez Imre Latakosa o pojęcie programów badawczych, które zastępują Kuhn’owski paradygmat i przez Michaela Polanyi o ukrytą wiedzę. Dzięki niej „wiemy więcej niż potrafimy wysłowić”. Obok umiejętności i wiedzy ujawnionej, wiedza ukryta jest czynnikiem przybliżającym odkrycie. Według Kuhn’a [4] rewolucja naukowa przynosi nowy język i wraz z nim nowy pogląd na świat. Przynoszące te zmiany prace mają fundamentalny dla nauki charakter, pozwalają też sformułować cały program badań, którego realizacja stanowi dorobek przemian. Nauka „normalna” po okresie przemian przynosi już tylko uzupełnienia. Sytuacja taka trwa, aż do czasu dojrzewania nowej rewolucji.

Społecznościami uczonych zajmuje się też socjologia i psychologia. Socjolodzy badają przypadki funkcjonalnych i dysfunkcjonalnych struktur. J. Ziman [5] podaje przy okazji tych badań definicje uczonego, jako osoby wymieniającej informację ze społecznością ludzi nauki. Na tym między innymi oparte są ilościowe oceny na podstawie analizy cytowań. Ważne rezultaty uzyskano też badając wiek uczonych w okresie ich maksymalnej wydajności. Wyniki tych badań na próbie ponad 100 tysięcy uczonych publikują w 1966 roku D.C. Pelz i F.M. Andrews [6], podając przedział wieku optymalnego dla twórczości naukowej w zależności od uprawianej dyscypliny. Wyniki te pozwalają racjonalnie kształtować systemy kształcenia przyszłych uczonych.

W latach 30 ubiegłego wieku przebudowano też system uniwersyteckiej edukacji, ugruntowała się czołowa pozycja anglosaskich uniwersytetów, kładących nacisk na rozbudowę udziału nauk podstawowych w procesie kształcenia. To Karl T. Compton prezydent MIT w latach 1930–1949 przeprowadził te zmiany, doprowadzając pozycję MIT do czoła w światowych rankingach. Twierdził, że kształcenie technologów należy oprzeć na matematyce, fizyce i chemii, później dołączono do tego biologię i biochemię. Uniwersytet Techniczny nie mógł też zamykać się w jednorodnej grupie nauk, konieczne było wzbogacenie profilu badań i procesu dydaktycznego o nauki ekonomiczne, organizację, językoznawstwo, filozofię, nauki społeczne i historię.

Tymczasem w Europie w latach 30. tryumfujący faszyzm niszczy sieć relacji między instytucjami naukowymi i uczonymi. Przestaje działać koło wiedeńskie, Getynga ma uprawiać rasową matematykę. Morduje się uczonych pochodzenia żydowskiego, następuje masowa emigracja zagrożonych prześladowaniami uczonych. W Polsce następuje nie tylko przerwa w normalnym funkcjonowaniu nauki, ale dokonuje się mordu na jej żywym ciele. Powojenna odbudowa nauki odbywa się w warunkach zdewastowanego warsztatu materialnego i zdziesiątkowanego kapitału ludzkiego. Dodać do tego trzeba zerwanie ukształtowanych sieci powiązań. Żywe relacje z światowym centrum metodologii nauk (Koło Wiedeńskie) zapewniane przez Alfreda Tarskiego i Jana Łukasiewicza zostają zerwane. Tarski emigruje do USA, na domiar złego (to zło dla nauki polskiej mogłoby być traktowane obiektywnie, gdyby nie wybuch II Wojny Światowej) to samo ma miejsce w przypadku dwu matematyków Stanisława Ulama i Marka Kaca, którzy odegrają olbrzymią rolę w matematyce, a w przypadku Ulama również w fizyce i inżynierii. W tym czasie w świecie anglojęzycznym następuje wręcz skok rozwojowy na skutek zaangażowania nauki w wysiłek militarny pociągający za sobą olbrzymie zwiększenie nakładów na badania i napływ światowych sław z całej Europy.

Stany Zjednoczone wydają na badania naukowe i prace rozwojowe więcej niż cała reszta świata. Badania te prowadzi się w ramach wielkich ambitnych programów. Już w czasie wojny olbrzymie zespoły uczonych pracowały nad bombą atomową w programie Manhattan, równocześnie budowano pierwsze komputery. Co ciekawe i będzie mieć dalekosiężne skutki, elity naukowe tych zespołów dobrze się znały i ze sobą współpracowały. To John von Neuman konsultował obliczenia związane z konstrukcją bomby, był też współtwórcą współczesnych komputerów. To Stanisław Ulam prowadził obliczenia związane z bombą wodorową, był też współtwórcą jej konstrukcji. Miano okazję obserwować siłę synergii zespołu intelektualistów w rozwiązywaniu problemów wtedy, gdy zespół ten przekroczy masę krytyczną i reprezentuje różne dyscypliny nauki.

W powojennej Polsce bardzo wcześnie, bo już w latach 40. głosicielem silnych zespołów naukowych staje się profesor Hugo Steinhaus, wytyka Ludwikowi Hirszfeldowi, że nie chce mieć „dwóch słońc" w kierowanej przez siebie jednostce, „zgodził się, więc na habilitację dr Flecka, ale polecił go na katedrę w Lublinie," to cytat z pracy [7]. Praktyka „jednego słońca" w każdej katedrze była powszechna, aż do lat 70. Środowisko naukowe Wrocławia miało w latach 50. i 60. to szczęście, że cały czas mimo rozpadu wspólnego Uniwersytetu i Politechniki i powstaniu wyspecjalizowanych zawodowo uczelni działały integrująco Wrocławskie Towarzystwo Naukowe i utrzymujące wspólnotę nieformalne grupy uczonych w dziedzinie nauk ścisłych. Dyskusje w środowisku na temat wydzielenia Politechniki, jako samodzielnej uczelni rozpoczęły się bardzo wcześnie, bo już w 1948 roku. H. Steinhaus był gorącym przeciwnikiem powstania uczelni wyższych o profilu tylko zawodowym. Pod datą 20.12.1948 pisze wręcz, „grupa inżynierów o małym wykształceniu ogólnym, a o wykształceniu technicznym szablonowym, nie lubi towarzystwa na wyższym poziomie" [7]. Odrębne zawodowe uczelnie powstają w roku 1951. Sprzyja to poszerzeniu kształcenia i dopływowi kadr do gospodarki. Stwarza jednak bardzo poważne problemy w prowadzeniu badań naukowych i ogólnej kulturze środowiska. Pokaźna część katedr obsadzona jest fachowcami z tytułem zastępcy profesora, co najczęściej oznaczało osobę o pewnym dorobku zawodowym, w rzadkich stosunkowo przypadkach popartym publikacjami w zawodowych, a nie naukowych czasopismach. Profesor Dionizy Smoleński oceniając dorobek publikacyjny Politechniki Wrocławskiej w 1955 roku na jej dziesięciolecie stwierdził, że tylko jedną trzecią publikowanych prac można zaliczyć do dorobku naukowego uczelni. Nietrudno było stwierdzić, że ta jedna trzecia to publikacje, prawie wyłącznie chemików, matematyków i fizyków. W pewnym stopniu podobnie przedstawiała się sprawa w pozostałych uczelniach ośrodka o profilu zawodowym. Tym bardziej nie do przecenienia była rola WTN w ramach to, którego środowiska naukowe z tradycjami, szczególnie matematycy mogli kształtować nie tylko zwyczaje akademickie, ale także sposoby kształcenia młodzieży i organizację zespołów naukowych. Pełny opis związanych z tym poglądów zawdzięczamy Profesorowi Edwardowi Marczewskiemu, który swym referatem zainicjował w 1962 roku dyskusję „Mistrzowie i uczniowie" zorganizowaną przez WTN w dniu 8 09 1962. Przedstawiając wieloletni dorobek matematyków, bo sięgający jeszcze przedwojennych lat środowiska lwowskiego i tradycji związanej z tak zwaną „Księgą Szkocką", która tak naprawdę zapoczątkowała ujawnianie tematów badań, jeszcze nierozwiązanych, których opracowania mógł podjąć się każdy. Zebranie zasad, którymi się kierowało środowiska matematyków, w jednym referacie, zatytułowanym „Dziesięć przykazań" stało się swoistego rodzaju rewelacją i to w warunkach, gdy wielu uczestników życia akademickiego traktowało swoje pomysły, jako wręcz tajne, nie przedstawiając ich nawet na seminariach. Sprawy poruszone przez profesora Edwarda Marczewskiego to właściwie pełny opis organizacji uniwersyteckich badań naukowych, których podstawą są stosunki partnerskie wykluczające struktury hierarchiczne. Dodać warto, że środowisko matematyczne wyprzedziło pod tym względem koncepcje organizacyjne przyjmowane w czołowych środowiskach naukowych. Znamienne są słowa wstępne Profesora, w których stwierdzał, że sukcesy Wrocławskiej Szkoły Matematycznej to nie tylko sukcesy naukowe, ale także moralne. Na poglądach Marczewskiego wzorowano politykę naukową niektórych uczelni, a Jego program stał się swoistą utopią, której bliska była i jest wrocławska matematyka. Dla zdominowanych nachyleniem czysto zawodowym kierunków oddziaływanie WTN i wrocławskich matematyków nie miało większego wpływu. Lansowano tezę, że twórczy dorobek zawodowy (szczególnie konstrukcyjny) powinien być podstawą do nadawania stopni i tytułów naukowych. Szczególnie silnie te poglądy głoszono w środowiskach technicznych. Znalazły one swoje odzwierciedlenie nawet w opracowywanej w owym czasie ustawie o stopniach i tytułach naukowych. Warto zauważyć, że nawet dziś podobne poglądy są zgłaszane przy okazji dyskusji o wykorzystywaniu osiągnięć naukowych przez gospodarkę narodową. W nauce problem rozróżnienia sukcesów naukowych od innych rozwiązał Popper w latach 30, we Wrocławiu po kłopotach administracyjnych rozstrzygnięć przyjęto dla nauk technicznych w końcu w latach 70. stanowisko zaproponowane przez Wacława Mejbauma, które głosiło, iż algorytmy pozwalające na generowanie oryginalnych rozwiązań technicznych (a nie same rozwiązania) powinny być zaliczane do dorobku naukowego. W połowie lat 60. (30 lat po MIT) stało się jasne, że koniecznie trzeba inaczej niż to miało miejsce dotychczas, kształcić przyszłych twórców. Środowisko poszukiwało metod kształcenia przyszłych uczonych i to w sposób gwarantujący osiąganie samodzielności naukowej w wieku zapewniającym optymalną twórczość. Korzystano w tym zakresie w dużym stopniu z doświadczeń USA, a więc wymienionego już Comptona, a także decydowano się na specjalne ścieżki kształcenia młodzieży utalentowanej i zaczęto organizować na szeroką skalę studia doktoranckie. Praktycznie dopiero pod koniec lat 60. zaczęto realizować znaną w środowisku matematycznym zasadę wczesnego startu do oryginalnej twórczości naukowej i wczesnego osiągania samodzielnej pozycji w badaniach, co czołowe ośrodki światowe praktykowały już z pełnym powodzeniem w latach 50.

Obok ukształtowanego przez matematyków stylu kierowania zespołami naukowymi, w praktyce i to znacznie powszechniejszej przyjęto system hierarchiczny, z funkcjonującym na jego czele profesorem i poddanymi mu pracownikami. Udanymi, a nawet chwalebnymi przykładami startu w tym stylu kierowania była Wrocławska Chemia, a szczególnie szkoły Bogusławy Jeżowskiej Trzebiatowskiej i Włodzimierza Trzebiatowskiego. Znacznie gorzej wyglądał start w przypadku zespołów kierowanych przez tak zwanych zastępców profesorów bez dorobku naukowego. Młodzi adepci nauki w większości przypadków skazani byli na własne koncepcje i publikacje w Zeszytach Naukowych, właściwie bez wyjątków polskojęzycznych i recenzowanych przez kierowników katedr. W tych ostatnich przypadkach zmiany zaczęły występować dopiero pod koniec lat 60. wraz ze spostrzeżeniem przez młodych pracowników, że ich starsi koledzy utknęli na pierwszych szczeblach hierarchii systemu.

Na przełomie lat 50. i 60. widać już było w środowisku skutki różnic startu. Matematyka wrocławska dzięki działalności „czwórki założycieli", do których zalicza się profesorów Bronisława Knastra, Edwarda Marczewskiego, Hugona Steinhausa i Władysława Ślebodzińskiego [8] i prac z zastosowań w tym słynnej Taksonomii Wrocławskiej (autorzy K. Florek, J. Łukasiewicz, J. Perkal, H. Steinhaus, S. Zubrzycki) uzyskała już w roku 1951 światowy rozgłos, po publikacji przez autorów wymienionych zgodnie z dziesięcioma przykazaniami w kolejności alfabetycznej. W latach 60. jaśniały już „nowe słońca" matematyczne, rozgłos i międzynarodową pozycję osiągnęli profesor Kazimierz Urbanik i Czesław Ryll-Nardzewski (wychowanek uniwersytetu warszawskiego). Sukcesy w przemyśle Węgla Brunatnego odnosili Stanisław Gładysz i Jerzy Battek dzięki opartej na teorii procesów stochastycznych ocenie wydajności układu Koparka–Taśmociąg–Zwałowarka. Wrocław dysponuje dziś całą plejadą doskonałych matematyków, nie mówiąc o wychowankach rozrzuconych po całym świecie. Każdy z nich opisując swoją naukową karierę wskazuje słuszność spostrzeżenia Marczewskiego, że relacja mistrz uczeń zastąpiona tu została relacją uczeń szkoła. Znany matematyk profesor Wojbor A. Woyczyński, pisze [9] „moje własne zainteresowania naukowe nie wypływały bezpośrednio od Steinhausa, ale od Kazimierza Urbanika, mojego mentora i doradcę" pozostającego pod wpływem przemożnej obecności Steihausa we Wrocławiu. Sam Urbanik był studentem Edwarda Marczewskiego. Na tym lista mistrzów Woyczyńskiego się nie kończy, zachwycał go jeszcze Czesław Ryll-Nardzewski elegancją i głębokością matematycznych prac ustanawiających nieosiągalny ideał. Dziś już działa trzecie pokolenie matematyków z tej szkoły, a czwarte zdobywa rozgłos.

Podobne sukcesy odniosły zespoły kierowane przez małżeństwo Bogusławy i Włodzimierza Trzebiatowskich mimo zasadniczo różnego podejścia do relacji między członkami zespołów badawczych. Bogusława Jeżowska Trzebiatowska zamknęła swoją karierę wychowaniem prawie osiemdziesięciu doktorów nauk, jak mówił profesor Józef Ziółkowski, traktowała nas jak swoją własność, ale skłaniała do publikowania w renomowanych czasopismach, przecierała szlaki współpracy z światowymi ośrodkami. W rezultacie z tego zespołu wychowanków około 30 zostało profesorami. Spuścizna po profesorze Włodzimierzu Trzebiatowskim to duży politechniczny Instytut Chemii Nieorganicznej i Metalurgii Pierwiastków Rzadkich i założony wspólnie z profesorem S. Ingardenem Instytut Niskich Temperatur i Badań Strukturalnych Akademii Nauk oraz Międzynarodowe Laboratorium Silnych Pól Magnetycznych i Badań Strukturalnych. Wszystkie te placówki cieszyły się i cieszą do dziś międzynarodową renomą. Znane wrocławskie szkoły, ta matematyczna, jak i obie chemiczne, to mimo różnic w ich prowadzeniu wielkie sukcesy ich założycieli. Dyskusja w nauce o organizacji badań i stosunkach między uczonymi partnerskich i na drugim biegunie z dystansem wręcz narzucanym dalej się toczy i pozostaje na podstawie badań historycznych bez wyroku. Tak samo to wygląda w Stanach Zjednoczonych, gdzie w wielu publikacjach podkreśla się skuteczność obu szkół.

To, co na pewno sprzyjało intensywnemu rozwojowi badań w USA to olbrzymie programy badań prowadzone w czasie wojny, a następnie w czasach zimnej wojny praktycznie bez ograniczeń finansowych. Uczeni polscy nigdy nie przeżyli tak korzystnego okresu dla rozwoju badań. W warunkach braku środków na wyposażenie warsztatu pracy doświadczalnej sukcesów można się było spodziewać właśnie w matematyce. Tak się szczęśliwie złożyło, że polska matematyka od czasów Janiszewskiego (oryginalne poglądy na planowanie badań) i dzięki bogatemu dorobkowi lwowskich matematyków (Księga Szkocka [10]), a następnie wrocławskich (Dziesięć przykazań) polska myśl dotycząca organizacji badań i relacji między uczonymi nie pozostawała w tyle za koncepcjami przyjmowanymi w USA, a w wielu wypadkach je wyprzedzała.

Część II

Metodologia badań doświadczalnych

Specyficzność metodologii badań w naukach technicznych

Nauki techniczne zajmują się procesami, które zostały już opisane w badaniach podstawowych, a często również przez nauki podstawowe stosowane.[save=pktb] Tak, więc dysponujemy już opisem procesu w języku określonej teorii, z ściśle zdefiniowanymi pojęciami i metodami pomiaru występujących w opisie wielkości, a także równaniami teorii, podającymi relacje między zmiennymi w równaniach. Po badaniach podstawowych stosowanych opisana jest też kontrola przebiegu procesu. W tej sytuacji pozostają badania wdrożeniowe, które mają ustalić techniczne warunki wykorzystania procesu, to jest konstrukcję urządzeń, w których proces dla uzyskania odpowiedniego celu zachodzi, można go kontrolować, jak i optymalnie sterować jego przebiegiem.

W tradycji polskiej, nauki techniczne dzieli się na dużą ilość dyscyplin, przy czym nie ma istotnych kryteriów, co się rozumie pod pojęciem obszaru danej dyscypliny. Istnieje bardzo radykalne podejście do struktury dyscyplin nauki prezentowane w jednej z amerykańskich klasyfikacji dyscyplin nauki, bliskich autorowi niniejszego opracowania, a prezentowane w pracy [11]. Zgodnie z nim do dyscyplin nauk technicznych zalicza się: mechanikę, elektrotechnikę (bardzo szeroko rozumianą łączne z elektroniką), przetwarzanie energii, komunikację, inżynierię materiałową. To, co w Polsce jeszcze zalicza się do nauk technicznych, w tym podejściu należy do problemów techniki, lub podstawowych problemów techniki. Wszelkie odmiany budowy maszyn w sensie ich konstrukcji i technologii są problemami, które rozwiązuje się korzystając z interdyscyplinarnej wiedzy w twórczy i oryginalny sposób. Dość specyficzne miejsce zajmuje informatyka. Udział w rozwiązywaniu jej problemów mają dzisiaj obok nauk technicznych, teoria poznania, językoznawstwo, semantyka. A przez udział w tej problematyce nauk technicznych należy rozumieć elektronikę, inżynierię materiałową, mechanikę kwantową, biologię i genetykę.

Współczesna mechanika, to również mechanika kwantowa i bardzo zaawansowana inżynieria materiałowa. Stoimy przed rewolucją w technologiach zarówno informatycznych jak i dotyczącej układów wykonawczych, którymi mają być nanoroboty i być może słynny asembler (pomysł K.E. Drexler'a stworzenia samoreplikującego się nanorobota zaprogramowanego lub dającego się programować do wykonywania określonych zadań).

Wymienione wyżej dyscypliny nauk technicznych występują w wspomnianej klasyfikacji po naukach podstawowych, jeśli przyjmiemy opisany wyżej podział to w obrębie nauk technicznych dysponujemy już językiem opisu procesów. Możemy się zajmować analizą procesów i analizą urządzeń, zarówno w oparciu o opracowane modele matematyczne, jak i analizę empiryczną. Pewnym wyjątkiem jest tu chemia, biochemia i biologia, w których zwyczajowo uczelnie techniczne wkraczają często w zakres badań podstawowych, pozostawiając inżynierii chemicznej to, co rzeczywiście robi się w naukach technicznych. W końcu waga błędów w projektowaniu urządzeń i procesów przemysłowych jest na tyle duża, a związane z tym koszty na tyle ogromne, że oprócz szerokich testów laboratoryjnych w technice stosuje się dodatkowo tak zwane badania ćwierć techniczne i pół techniczne, a nawet badania konstrukcji i urządzeń w skali 1:1. Są to całkowicie specjalne techniki badań, o własnych podstawach i bogatej literaturze.

Badania doświadczalne według J.M. Bocheńskiego [1]

K.R. Popper w swym dziele [3] stwierdzał, że teorie naukowe są przez uczonych wymyślane. Kwestionował poglądy empirystów, którzy przypisywali istotną rolę uogólnieniom obserwacji, a więc indukcji. Fizyka drugiej połowy XX wieku zgodnie z poglądami Einsteina i Poppera stała na stanowisku, że wielkie teorie wymyślamy tak by były zgodne z niepodważalnymi faktami, a następnie przechodziły test falsyfikacji, tym pewniejszy, jeśli oparty o wydedukowane z falsyfikowanej teorii fakty, które nie były uprzednio znane, lub z dotychczasowych teorii niedające się wydedukować. Wspomniany już poprzednio J. M. Bocheński przypisuje uogólnieniom istotną rolę w nauce. Proponuje jednak pewne ważne zabezpieczenie, nasze uogólnienie faktów doświadczalnych musi być zgodne z istniejącym stanem wiedzy, a więc również z akceptowanymi w jej obrębie teoriami. Wymieńmy za [1] cztery główne postulaty, które przyjmuje empirysta dla opisu interesującego go procesu:

Postulat 1 zwany postulatem determinizmu, jednak specyficznie rozumianemu. Zgodnie z [1] oznacza on swoistą wiarę, że opis da się skonstruować najlepiej w języku matematyki, przy czym opis ten może być deterministyczny, lub probabilistyczny.

Postulat 2 zamkniętego systemu, też specyficznie rozumiany, jako umiejętność przedstawienia listy zmiennych mających wpływ na przebieg procesu. Lista ta traktowana jest podobnie jak lista Milla, przygotowana do eliminacji zmiennych, niemających wpływu na badany proces, ale zawierająca na pewno wszystkie zmienne mające nań wpływ. Dodajmy, że w interesujących nas zadaniach zmienne te muszą być ściśle zdefiniowane, w sensie podania ich definicji pomiaru (zgodnie z klasyczną teorią pomiaru, patrz [12, 13]).

Postulat 3 prostoty, zwany też przez Bocheńskiego postulatem brzytwy Ockhama. Do postulatu tego wrócimy przy omawianiu opisu matematycznego procesu.

Postulat 4 zgodności z istniejącym stanem wiedzy. Żąda, by otrzymany opis w postaci modelu matematycznego procesu był zgodny z podstawowymi prawami. Wyjaśnimy dokładniej ten postulat przy omawianiu prób uogólnienia zaobserwowanych faktów.

Wyobraźmy sobie, że istnieje demon empirysta o nieograniczonej potędze i sprawności, posługujący się jak człowiek metodą naukową i logiką. Obserwuje wszystkie zdarzenia i je zapamiętuje. Po fazie obserwacji i opisu następuje jak chce Hempel [2] faza analizy i klasyfikacji, potem faza indukcyjnego podawania uogólnień i ostatecznie ich testowanie. Tak pojęte badania empiryczne są niewykonalne. Przypuśćmy, że wprowadzamy ograniczenia do faktów istotnych ze względu na interesujący nas problem. To zawężenie też nie precyzuje zakresu obserwacji. Zazwyczaj badający przyjmuje pewną wstępną hipotezę, która ogranicza zakres obserwowanych faktów.

Prześledźmy znane przypadki. Przed sformułowaniem hipotezy Palmgren'a i Miner'a wiedziano, że jeśli element konstrukcji będzie obciążony naprężeniem zmiennym w czasie o stałej amplitudzie to będzie mógł bezpiecznie pracować, aż do osiągnięcia granicznej liczby cykli N. Autorzy hipotezy interesowali się czasem bezpiecznego życia w przypadku, gdy element ten obciążany jest różnymi σ_i amplitudami, przy czym dla każdej liczba cykli wynosi n_i. Uszkodzenie materiału przy zadanej amplitudzie mierzone jest stosunkiem $\frac{n_i}{N_i}$. Przy tym założeniu logicznym wydawało się przyjęcie, że jeśli $\sum_i^k \frac{n_i}{N_i}$ będzie równa 1, to element ulegnie uszkodzeniu. Racjonalnie, więc że przy przyjętej mierze uszkodzenie zakres bezpiecznej pracy konstrukcji wystąpi wtedy, kiedy suma po i $\frac{n_i}{N_i}$ będzie mniejsza od 1. W tym czasie wiedziano też, że częstość, w pewnym dostatecznie szerokim zakresie, nie ma wpływy na czas życia konstrukcji, mierzony liczbą cykli. Z punktu widzenia przyjmowanej hipotezy obserwacje istotne to te, które określały czas życia przy różnych stosunkach n/N.

Zbieranie danych doświadczalnych pozwalających na oszacowanie czasu życia daje się już teraz przeprowadzić. Znacznie łatwiej jest, jeśli hipotezę formułujemy w oparciu o ugruntowaną teorię, w takiej sytuacji formułował swoją hipotezę M. T. Huber, zakładając, że o wytężeniu materiału decydują odkształcenia postaciowe, a objętościowe nie mają wpływu na wytrzymałość materiałów. Pozwoliło to od razu na ilościowe matematyczne sformułowanie hipotezy Hubera. M. Zakrzewski w tym laboratorium przez kilka lat prowadził próby falsyfikacji hipotezy umieszczając próbki materiału w pojemnikach poddanych bardzo wysokim ciśnieniom. Przy osiąganych ciśnieniach materiał nie uległ uszkodzeniu.

W ogólnym przypadku hipotezę formułujemy, jako pewną zależność między przyjętymi do opisu wielkościami, przyjmijmy, że zależność tę można przedstawić w postaci pewnej funkcji zależnej od określonej liczby zmiennych. Funkcja ta powinna dobrze przybliżać wartość wielkości ocenianej w hipotezie, a jej wyrażenia winny być interpretowalne w języku teorii, który opisuje badany proces.

Wyjaśnijmy ten ostatni warunek na przykładzie, w którym poszukujemy wzoru określającego wypływ czynnika smarującego obrabiarkę, na podstawie danych uzyskanych z obserwacji konkretnego urządzenia. Składało się ono z pompy dostarczającej czynnik smarujący pod ciśnieniem p mierzonym w MPa, dyszy kończącej przewód w miejscu smarowania o średnicy d mierzonej w mm i naczynia, do którego spływała ciecz, jej objętość Q mierzono w $\mathrm{m^3h^{-1}}$. Wyniki pomiarów pokazano w niżej zamieszczonej tabeli. W sumie autor tej pracy założył, że

$$Q = \phi\,(p, d)$$

Do znalezienia funkcji ϕ posłużono się wynikami pomiarów zamieszczonych w tabeli:

L.p.	p [MPa]	D [mm]	Q [$\mathrm{m^3h^{-1}}$]
1	0,04	0,5	0,13
2	0,04	0,8	0,5
3	0,04	1,6	1,61
4	0,08	0,5	0,21
5	0,08	0,8	0,78
6	0,08	0,16	2,56
7	0,16	0,5	0,4
8	0,16	0,8	1,36
9	0,16	0,16	4,5

Przedstawione wyniki bez zmiany jednostek aproksymowano wielomianem drugiego stopnia uzyskując wynik jak niżej:

$$Q = 0{,}14 - 0{,}30d + 0{,}43d^2 - 7{,}14p + 5{,}55p^2 + \\ + 18{,}33pd$$

Ponieważ każde wyrażenie wielomianu ma wymiar inny (nie tylko, dlatego, że tak wstawiano wartości z tabeli), to uzyskana suma nie spełnia podstawowego warunku, iż każdy jej wyraz powinien mieć ten sam wymiar. Można też kwestionować sens występowania pewnych wyrażeń, wypada zwrócić uwagę, że ciecz płynie nie przez średnicę, tylko przez pole przekroju przewodu. Wzór, więc otrzymany z aproksymacji, zamieszczonej w pracy [14] nie nadaje się do jakiejkolwiek interpretacji, podaje w zakresie obserwowanych zmiennych dość dobre przybliżenie wartości Q i nic więcej. Przy dużo mniejszej liczbie zabiegów można było uzyskać wynik ścisły. Do tego celu wystarczyło przedstawić wszystkie zmienne w jednym układzie jednostek np. m, kg, s i zauważyć, że pompa była potrzebna z tego powodu, że ciecz była lepka, by otrzymać ścisły wynik przy dodatkowym założeniu, że w każdym wzorze wymiar lewej i prawej strony musi być taki sam, lub zastosować do jego budowy twierdzenie Π (patrz [13]). Otrzymamy w końcu:

$$Q = \varphi\frac{pd^3}{\eta}, \quad \varphi \in R_+$$

W obu przypadkach oszacowania otrzymywanych wartości Q są identyczne, ostatni wzór jest jednak sensowny i daje się interpretować w języku opisu procesu. Otrzymano go przyjmując, że η ma wymiar m^{-1}kgs^{-1}.

Pokazaliśmy, że sformułowanie hipotezy pozwala na jednoznaczne określenie wielkości, które musimy obserwować. Powiedziano już wyżej, że wielkości te muszą być ściśle zdefiniowane w operacjach pomiarowych, lub za pomocą związków konstytutywnych. Dodatkowo żąda się by skale pomiarowe stosowane w naszych obserwacjach były skalami liniowymi. Dodatkowo ze względu na dopuszczalność operacji dodawania każda z wielkości może być tensorem odpowiedniego rzędu. Wielkości występujące w modelu matematycznym są addytywne, jeśli:

1. mają ten sam wymiar (w przyjętym układzie jednostek każda z nich jest tak samo definiowana),
2. są tensorami tego samego rzędu,
3. operacja dodawania jest postulowana przez odpowiednią teorię, lub jest interpretowalna w kontekście empirycznym tej operacji (np. dodawanie prądów w połączeniu równoległym, a spadków napięć w połączeniu szeregowym).

Jeśli poszukiwana zależność jest funkcją to poszukiwanie modelu matematycznego sprowadza się do zadania aproksymacji, lub jak mówimy w języku technicznym identyfikacji.

Sukces tej procedury gwarantowany jest twierdzeniem Weierstrassa, jeśli aproksymowana funkcja spełnia tezę tego twierdzenia to otrzymany opis zbliża się do danych z obserwacji z dowolną dokładnością. Twierdzenie to usprawiedliwia w pewnym sensie pierwszy postulat Bocheńskiego, wiarę obserwatora w możliwość opisu obserwacji w języku matematyki.

Zgodnie z drugim postulatem Bocheńskiego lista zmiennych funkcji ϕ winna być kompletna, w tym sensie, że nie istnieje zmienna, która może mieć jeszcze wpływ na badany proces. Najprostsza procedura badania czy jakaś zmienna ma wpływ na proces jest badanie korelacji między tą zmienną a wartością funkcji. Po to by to badanie było możliwe trzeba umieć tą zmienną mierzyć, w pewnych wypadkach, a nawet w większości tego nie możemy zrobić, bo nawet nie wiemy, co to jest za wielkość? W pracy [13] podano procedurę testu kompletności listy zmiennych funkcji ϕ, jest ona oparta o wspomniane już twierdzenie Π. Nie wymaga też umiejętności mierzenia nieznanej wielkości. Istnieją już, więc dwa powody by twierdzenie to podać a dopiero później wrócić do omawiania pozostałych postulatów Bocheńskiego.

Analiza wymiarowa i relacja podobieństwa

Podamy tu tylko twierdzenie Π i relacje podobieństwa bez wdawania się w szczegóły, jeśli Czytelnik będzie nimi zainteresowany to odsyłamy go do pracy [15]. Interesuje nas tak zwana funkcja wymiarowa, wymiarowo jednorodna (niezależna od wartości swoich argumentów) i wymiarowo niezmiennicza (niezależna od układów jednostek, w których argumenty te są opisane). Przedstawimy ją jak niżej:

$$\mathbf{Z} = \Phi(\mathbf{Z}_1, \mathbf{Z}_2, \ldots, \mathbf{Z}_s) \tag{1}$$

Wartość funkcji Φ, jak i jej argumentów opisana jest w układzie jednostek $\mathbf{E}_1, \mathbf{E}_2, \ldots, \mathbf{E}_n \ni \Pi$, inaczej mówiąc wszystkie omawiane dotąd wielkości są elementami przestrzeni Π, w której znany jest układ jednostek $\mathbf{E}_i$. Wartość funkcji (1) i jej argumentów zapisujemy w układzie jednostek, jak niżej:

$$\mathbf{Z} = Z \prod_1^n \mathbf{E}_i^{z_k}, \quad k = 1, 2, \ldots, n \tag{2}$$

Przyjęliśmy tu konwencję zapisu, w której wielkości wymiarowe zapisujemy pogrubionymi literami, a ich miary liczbowe normalnymi. Wielkości $\mathbf{Z}_l$, przy $l = 1, 2, \ldots, s$, można zapisać też w pokazanym wyżej układzie jednostek, jak niżej:

$$\mathbf{Z}_l = Z_l \prod_1^n \mathbf{E}_k^{Z_{lk}}, \quad k = 1, 2, \ldots, n, \qquad (3)$$

wybieramy bazę wymiarową (wielkości wymiarowe, wymiarowo niezależne, mają w przestrzeni wymiarowej podobne znaczenie jak baza wektorowa w przestrzeni wektorowej, obie przestrzenie są izomorficzne, przestrzeń wymiarowa jest wersją multiplikatywną przestrzeni wektorowej) o m elementach $m \leq n$.

Na to by wielkości $\mathbf{Z}_i$, były wymiarowo niezależne potrzeba i wystarcza by ich macierz wykładników $\{z_{\text{ik}}\}$ była rzędu m, wtedy zapiszemy funkcję (1) jak niżej:

$$\mathbf{Z} = \Phi(\mathbf{Z}_1, \mathbf{Z}_2, \ldots \mathbf{Z}_m, \mathbf{Z}_{m+1}, \ldots \mathbf{Z}_{m+r}) =$$
$$= f(\varphi_1, \varphi_2, \ldots, \varphi_r) \prod_1^m \mathbf{Z}_i^{a_i}, \quad a_i \in R, \quad (4)$$

$$\varphi_j = \frac{\mathbf{Z}_{m+j}}{\prod_1^m \mathbf{Z}_i^{a_{ji}}}, \; i = 1, 2, \ldots, m,$$
$$j = 1, 2, \ldots, r, \; m + r = s, \; \varphi \in R \quad (5)$$

Aby rzeczywiście zapisać wzory (4) i (5) trzeba jeszcze wyznaczyć wykładniki a_i i a_{ji}. Łatwo je otrzymać żądając, by we wzorach (4) i (5) wymiar prawej i lewej strony był taki sam, wstawiając za $\mathbf{Z}$ wzór (2), a za $\mathbf{Z}_l$ wzór (3) otrzymamy:

$$\mathbf{Z} = Z \prod_1^n \mathbf{E}_k^{z_k} = \varphi \prod_1^m \mathbf{Z}_i^{a_i} =$$
$$\varphi \prod_1^m Z_i^{a_i} \prod_1^n \mathbf{E}_k^{\sum_1^m a_i z_{ik}}; \qquad (6)$$
$$\varphi = \frac{Z}{\prod_1^m z_1^{a_i}} \quad z_k = \sum_1^m a_i z_{ik}$$

$$\mathbf{Z}_{m+j} = Z_{m+j} \prod_1^n \mathbf{E}_k^{z_{m+j,k}} =$$
$$\varphi_j \prod_1^m Z_i^{a_{ji}} \prod_1^n E_k^{\sum_i^m a_{ij} z_{ik}} \qquad (7)$$
$$Z_{m+j,k} = \sum_1^m a_{ji} z_{ik}$$

i uwzględniając (4) otrzymamy, że miara liczbowa

$$Z = f(\varphi_1, \varphi_2, \ldots, \varphi_r) \prod_1^m Z_i^{a_i}. \qquad (8)$$

dla $\varphi_j = \text{const}$ przy $j = 1, 2, \ldots, r$ wartość funkcji f jest też stała, jest to tak zwany przypadek podobieństwa modelowego wykorzystywany w badaniu kompletności zbioru argumentów funkcji (1). Na to by nie można było odrzucić hipotezę, że zbiór agumentów jest kompletny potrzeba i wystarcza, by w wybranej realizacji procesu wartości φ_j się nie zmieniały, a zmieniały się tylko wartości elementów bazy, czyli wartości Z_i (w tych warunkach odpowiednio muszą się też zmieniać wartości Z_{m+j} tak, by φ_j pozostały stałe).

Jest to znane już nam twierdzenie, ale zapisane za pomocą miar liczbowych wielkości wymiarowych. Dla $\varphi_i = \text{const}$ przy $j = 1, 2, \ldots, r$ wartość funkcji f jest też stała, jest to tak zwany przypadek podobieństwa modelowego wykorzystywany w badaniu kompletności zbioru argumentów funkcji (1). Na to by nie można było odrzucić hipotezę, że zbiór argumentów jest kompletny potrzeba i wystarcza, by w wybranych realizacjach procesu wartości się nie zmieniały, (a zmieniały się tylko wartości elementów bazy, czyli wartości

Zapis (4) jest dla funkcji zapisem zgodnym z Twierdzeniem Π. Zgodnie z nim zamiast poszukiwać funkcji φ, która jest funkcją s zmiennych poszukujemy funkcji f od r zmiennych. Część funkcji zależnej od zmiennych wymiarowo niezależnych jest z góry określona. Dla przykładu zajmijmy się problemem rozwiązanym przez Bernoulliego, który jak pamiętamy poszukiwał, jak zależą parametry przepływu w przekroju „1" od parametrów w przekroju „2". Ponieważ pokazaliśmy, że zapis twierdzenia można zapisać posługując się jedynie miarami liczbowymi wielkości wymiarowych, to problem rozważany zapiszemy:

$$\boldsymbol{p_2} = \phi(\boldsymbol{p_1}, \boldsymbol{\varrho}, \boldsymbol{g}, \boldsymbol{h_1}, \boldsymbol{h_2}, \boldsymbol{v_1^2}, \boldsymbol{v_2^2}),$$

w bazie $\boldsymbol{p_1}, \boldsymbol{\varrho}, \boldsymbol{g}$, pozostałe argumenty funkcji ϕ zapiszemy za pomocą wielkości bezwymiarowych φ_j, jak niżej:

$$\begin{aligned} \boldsymbol{h_1} &= \varphi_1 \boldsymbol{p_1} \boldsymbol{\varrho^{-1}} \boldsymbol{g^{-1}}, \\ \boldsymbol{h_2} &= \varphi_2 \boldsymbol{p_1} \boldsymbol{\varrho^{-1}} \boldsymbol{g^{-1}}, \\ \boldsymbol{v_1^2} &= \varphi_3 \boldsymbol{p_1} \boldsymbol{\varrho^{-1}}, \\ \boldsymbol{v_2^2} &= \varphi_4 \boldsymbol{p_1} \boldsymbol{\varrho^{-1}} \end{aligned}$$

i ostatecznie:

$$\boldsymbol{p_2} = f(\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \varphi_4)\boldsymbol{p_1},$$

Pokazaliśmy, że można otrzymać opis obserwowanego procesu nie tylko odpowiednio dokładny (fitting model), ale też interpretowalny w języku teorii (sensible model). W ten sposób wyczerpaliśmy życzenia postulatów 2 i 3 według Bocheńskiego.

Jednym z istotnych problemów w budowie modelu jest jego dokładność. Powinna ona być ustalona przed przeprowadzeniem aproksymacji, na podstawie wiedzy, jaką ma eksperymentator o wymaganiach stawianych modelowi. Budowany model będzie potrzebny do analizy funkcjonowania urządzenia i oceny jego niezawodności. Stąd da się określić potrzebną dokładność modelu matematycznego. To powinno być określone przed eksperymentem, narzuci bowiem dokładność pomiarów i klasę urządzeń pomiarowych, a w końcu pozwoli sprawdzić po przeprowadzeniu aproksymacji, czy spełnia ona założoną dokładność modelu.

Postulat 3, zwany też postulatem prostoty

W wielu podręcznikach z zakresu metodologii nauki zwany też postulatembrzytwy Ockhama, służył do odrzucania w języku teorii bytów, które nie występowały w modelach matematycznych tych teorii. Tak było z cieplikiem w termodynamice i z eterem w przestrzeni. Gorzej jest z rozstrzygnięciem, która hipoteza jest prostsza, w przypadku, gdy jej postać uzyskamy z aproksymacji. Hempel [2] podaje odpowiedni przykład hipotez opisujących krzywą przechodzącą przez punkty (0, 2), (1, 3), (2, 4) i (3, 5). Sformułowano następujące:

$H_1 \,:\, v = u^4 - 6u^3 + 11u^2 - 5u + 2$
$H_2 \,:\, v = u^5 - 4u^4 - u^3 + 16u^2 - 11u$
$H_3 \,:\, v = u \;+ 2.$

Krzywa podana przez H_1, H_2, H_3 jest zgodna z otrzymanymi danymi. Jeśli nie mamy innych informacji poza danymi z doświadczenia, to oczywiście wybierzemy hipotezę trzecią, ponieważ jest najprostsza. Zastosowanie tej zasady do całych teorii ilustruje się najczęściej w podręcznikach przykładem teorii kopernikańskiej, znacznie prostszej niż wyparta przez nią teoria geocentryczna. Cecha prostoty jest bardzo ceniona, do dzisiaj jednak nie sformułowano kryteriów, które pozwoliłyby rozstrzygać obiektywnie, która z hipotez jest prostsza. Cytowany tu Autor przedstawia interesującą według Niego propozycję H. Reichenbacha. Sprowadza się ona do procedury zgodnej z twierdzeniem Weierstrassa interpretowanym, jako poszukiwanie $f\,(u)$ oparte o coraz większą liczbę punktów uzyskanych z pomiaru. Jest to tak naprawdę procedura najlepszego dopasowania, a nie wyboru na podstawie postulatu prostoty. Wypada się jeszcze usprawiedliwić, dlaczego rozważania ograniczyliśmy tylko do modelu w postaci funkcji, mimo, że bardzo często w mechanice i nie tylko modele matematyczne podaje się w postaci równań różniczkowych i całkowych. Jednak i wtedy identyfikacja modelu sprowadza się do wyznaczenia funkcji podcałkowej lub funkcji spełniającej zadane równanie różniczkowe

Postulat zgodności z zastanym stanem wiedzy

W naukach technicznych naturalnym wydaje się żądanie by przyjmowane modele matematyczne były zgodne z powszechnie akceptowanymi podstawowymi prawami fizyki. Co najmniej, więc będziemy żądali spełnienia pierwszej i drugiej zasady termodynamiki. W mechanice przy opisach stanu naprężenia zażądamy spełnienia równań równowagi. Postępowanie eksperymentatora pokażemy na niżej pokazanych przykładach.

1. Przykład doświadczalnego wyznaczenia płaskiego stanu naprężenia spełniającego warunek równowagi.
   Z pomiaru uzyskano w wielu punktach powierzchni konstrukcji składowe stanu naprężenia, a więc $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_{zy}$, opis funkcyjny, który otrzymamy z aproksymacji spełniać powinien równania równowagi [15]:
   $$\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} = -\frac{\partial \sigma_{\mathrm{xy}}}{\partial y},$$
   $$\frac{\partial \sigma_y}{\partial y} = -\frac{\partial \sigma_{\mathrm{xy}}}{\partial x},$$
   jeśli z aproksymacji otrzymaliśmy σ_{xy} jako funkcję od x, y to
   $$\sigma_x = -\int \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial y} \mathrm{dx} + \alpha(y),$$
   a
   $$\sigma_y = -\int \frac{\partial \sigma_{\mathrm{xy}}}{\partial x} \mathrm{dy} + \beta\left(x\right);$$
   jak widać wyznaczenie σ_{xy} podaje już funkcję σ_x z dokładnością do funkcji α(y) i σ_y z dokładnością do funkcji $\beta\left(x\right)$. Pewność, że pomiar stanu naprężenia wraz z jego opisem po aproksymacji jest w pełni wiarygodny uzyskamy sprawdzając warunek równowagi, w którym jawnie wystąpią siły zewnętrzne.
2. Wyznaczanie związków konstytutywnych. To bardzo często spotykany przypadek wymagający szerokiej wiedzy z zakresu mechaniki teoretycznej, jak i sprawności eksperymentalnej. Spotykamy się z tym poszukując modelu ciała stałego, niezbędnego w obliczeniach inżynierskich, coraz też częściej konstruowane w oparciu o różne rodziny smart materiałów urządzenia wymagają podania ich charakterystyki, co również sprowadza się do podania zależności między sygnałem wejścia i wyjścia. Przetworzeniu tych sygnałów (jak w każdym przetworniku energii) towarzyszy dyssypacja energii. Rzecz wymaga uwzględnienia w rozważaniach równań termodynamiki z takim doborem parametrów stanu i parametrów wewnętrznych, by otrzymać obserwowane pętle histerezy. Jest to codzienne doświadczenie szerokiej grupy pracowników, odsyłam więc do dobrze udokumentowanych prac Grażyny Ziętek [14]. Rozwój urządzeń opartych o wspomniane wyżej materiały, jak i szerokie doświadczenie katedry, która jest pionierem zastosowań w Polsce, pozwalają zakładać, że ten typ prac będzie dość powszechnie uprawiany.
3. Proces dyfuzji i przewodnictwa cieplnego. Procesy te opisane są równaniami różniczkowymi cząstkowymi tak, więc poszukiwana funkcja powinna spełniać określone równanie różniczkowe, jak również Twierdzenie Π, w pewnych wypadkach udaje się sprowadzić równanie różniczkowe cząstkowe do równania różniczkowego zwyczajnego. Szereg przypadków budowy modeli opartych o takie procedury podano w pracy [13].
4. Procesy gromadzenia.
   Przykładem budowy modelu gromadzenia energii były prace Jerzego Kalety poświęcone hipotezie złomu zmęczeniowego.

Oparte one były na hipotezie, że zniszczenie materiału wymaga dostarczenia odpowiedniej ilości energii. Opracowana przez M. Zakrzewskiego, a następnie poszerzona przez L. Gołaskiego hipoteza zakładała, że energia ta jest równa energii cieplnej potrzebnej do stopienia materiału. L. Gołaski pomniejszał ją o energię związaną z występującą w materiale gęstością dyslokacji. J. Kaleta pragnął uzyskać pełny bilans energii związanej z występującymi zjawiskami krzyżowymi. Stąd olbrzymie zainteresowanie laboratorium tymi efektami i sposobami mierzenia rozpraszanej przez nie energii.

Na tym można zakończyć omawianie podstawowej dla metodologii nauk empirycznych pracy J.M. Bocheńskiego. Na zakończenie warto zwrócić uwagę na dwa jeszcze problemy przez Bocheńskiego pomijane, prawdopodobnie ze względu na ograniczenie do indukcji, a podkreślane przez innych metodologów, a także wielkich fizyków. Zarówno C.R. Popper, jak i A. Einstein podkreślają wielką harmonię wiedzy naukowej, w której to wszystkie elementy do siebie pasują, nie ma oddziaływania na odległość (został spin sprzężonych cząstek). Następną cechą teorii fizycznych jest redukcjonizm, szczegółowe prawa wynikają z podstawowych. Podstawowe struktury materii (np. kryształy) tłumaczą własności polikryształów. Te ostatnie wymagania nabierają znaczenia przy tak zwanej homogenizacji, przeprowadzanej przed obliczeniami numerycznymi. W zespole obecnej katedry temu była poświęcona praca [16]. Uzyskano dla polikryształów żelaza α przybliżenia znacznie lepsze niż nawet średnia z wyników Voigta i Reussa. Na koniec warto zauważyć, że pełne wymagania i algorytmy pozwalające na racjonalne planowanie eksperymentów i opracowanie ich wyników podano w pracach dr W. Myszki.

Literatura

[1] Bocheński J.M., *Współczesne metody myślenia*, Wydawnictwo ANTYK, Komorów 2009.

[2] Hempel C.G., *Podstawy nauk przyrodniczych*, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 1966.

[3] Popper K.R., *Logika odkrycia naukowego*, WPWN, Warszawa 1972.

[4] Kuhn T.S., *Struktura rewolucji naukowych*, Aletheia, Warszawa 2011.

[5] Ziman J., *Społeczeństwo nauki*, PWN, Warszawa 1972.

[6] Pelz D.C., Andrews F.M., *Scientists in organization: Productive climates for research and development*, J. Wiley, Oxford 1966.

[7] Steinhaus H., *Wspomnienia i zapiski*, Oficyna Wydawnicza ATUT, Wrocław 2002.

[8] Duda R., *Śląska republika uczonych*, 2, rozdz. Ślązacy z wyboru — pionierzy matematyki w powojennym Wrocławiu, Oficyna Wydawnicza Atut 2006, 450–470.

[9] Woyczynski W.A., *The legend of Hugo Steinhaus: tales of two cities, up close and personal*, Wiadomości Matematyczne, 48, 2, 2012, 293–311.

[10] Mauldin R.D., *TheScottish Book: mathematics from the Scottish Café, with selected problems from the New Scottish Book*, Birkhäuser, Cham 2015, oCLC: 968155532.

[11] Kasprzak W., *Struktura dyscyplinowa nauki i jej użytki w pracy badawczej i nauczycielskiej*, Zagadnienia Naukoznawstwa, 169, 3, 2006, 341–347.

[12] Bridgman P.W., *The Logic of Modern Physics*, Forgotten Books 2018.

[13] Kasprzak W., Lysik B., *Construction of a mathematical model for process description in continuous media mechanics*, Bulletin de l'Academie Polonaise des Sciences. Serie des Sciences Techniques, nr 1/2, 1981, 23–31.

[14] Potrykus J., *Smarowanie minimalne obrabiarek*, nr 12 [w Prace Naukowe Instytutu Technologii Budowy Maszyn Politechniki Wrocławskiej. Monografie, Wydawnictwo Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1991.

[15] Kasprzak W., Lysik B., Rybaczuk M., *Dimensional analysis in the identification of*

mathematical models, World Scientific, Singapore 1990.

[16] Kasprzak W., *Obliczanie własności sprężystych polikryształów na podstawie stałych sprężystych monokryształów*, Archiwum Hutnictwa, T. 12, z. 2, 1967, 171–177.