
Bevezetés

Elsősorban mérnökhallgatóknak, mérnököknek szánt könyvet tart a kezében az olvasó. A klasszikus mérnökképzésben részesült nemzedékeknek valószínűleg idegennek tűnhet a könyv tartalma, hisz legtöbbjük legfeljebb csak a valószínűségszámítás legelemibb összefüggéseivel találkozott tanulmányai során. A hagyományos mérnökképzés szemlélete jobbra determinisztikus volt, és ez a szemlélet még jelenleg is tettenérhető mind az oktatásban, mind a mindennapi mérnöki tevékenységet meghatározó szabványosításban, a hatósági előírásokban és jogszabályokban.

A determinisztikus szemlélet – bár tudjuk, hogy a valóságfolyamatok nem determinisztikusak, sokkal inkább véletlenszerűek – a korábbi időszak mérnökeinek ösztönös önvédelme volt a túlságosan bonyolult világ leegyszerűsítése, kezelhetősége érdekében. A mérnök csak akkor tudta feladatait megoldani, ha a létrehozandó alkotásnak csak a kiemelkedően domináns, kezelhető oldalaival foglalkozott, a többi, kezelhetetlen szempontot, mint lényegtelen vizsgálataiban mellőzte. Szándékkal emeltük ki a kezelhető és kezelhetetlen ellentétpárt, mivel szívesebben hivatkoztunk e magatartás kapcsán a lényeglátásra, mint a mérnöki tevékenység elengedhetetlen összetevőjére, pedig számos esetben a „lényegtelen” dolgok nagyon is lényegesnek bizonyultak és elhanyagolásukat nem a lényeglátás, hanem a tudatlanság, az elégtelen ismeret indokolta. A tudatlanság, elégtelen ismeret nem a konkrét elhanyagolást tevő mérnök jellemzője, hanem az adott kor tudományos, műszaki színvonala volt elégtelen egy-egy új feladat megoldásához. Ez a leegyszerűsítő magatartás nemcsak a sztochasztikus-determinisztikus szemléletpárban, hanem pl. az analízis-szintézis, ill. nemlineáris-lineáris ellentétpárokból is érvényesült. A XX. század második felében a számítógépek használatának elterjedésével (és a matematika fejlődésével) a korábban megoldhatatlannak tartott feladatok is kezelhetővé váltak, és nem kényszerülünk hiányos eszköztárunk miatt szaporítani az „elhanyagolható, lényegtelen” vizsgálati szempontokat.

A sztochasztikus-determinisztikus szemléletpár ütközését legkorábban a mérnöki gondolkodásban a vízépítés területén figyelhetjük meg. A folyók vízhozama szeszélyes ingadozást mutatott, és a gátépítés terveit nyilván nem alapozhatták az átlagos vízhozamra, de a rendkívül ritkán (pl. 500 évenként egyszer) előforduló maximumra sem. A gátépítés során számszerűsíthető, ésszerű kockázatot kellett vállalni. A folyók vízhozama az időnek sztochasztikus függvénye, melyet a valószínűségszámítás eszközeivel kell kezelni. A jelenséget leíró összefüggések paraméterei a hosszabb időn keresztül végzett megfigyelésekből – realizációkból – számíthatók. A realizációk elvileg a $0 < T \rightarrow \infty$ időtartományban értelmezendők, gyakorlatilag azonban T mindenkor véges időtartamot jelent. E vizsgálatokban jelentős egyszerűsítést eredményezhet, ha az egymást követő évekre vonatkozó realizációk viselkedése, szezonális ingadozása azonos sztochasztikus jelleget mutat. A vízépítésben többé-kevésbé már kialakultak a mérnöki gyakorlat eszközei e kérdések kezelésére (l. Reimann József e tárgyban írt könyvét, vagy Mistéth Endre készülő monográfiáját). Természetesen tudomásul kell venni, hogy minden folyó más éghajlati és földrajzi környezetben helyezkedik el, így a Nílus viselkedésének ismerete alapján a Tisza nem szabályozható, és fordítva.

A vízépítésnél lényegesen szélesebb mérnöki kört érint a szerkezetek szilárdsági méretezése. Ilyen feladattal egyaránt találkozik az építő-, a gépész-, a közlekedési mérnök. A szilárdsági méretezés gyakorlatának változása, fejlődése nagyon jól mutatja a sztochasztikus szemlélet fokozatos fejlődését.

Anélkül, hogy a méretezés-elmélet fejlődését részleteiben taglalnánk, érdemes egy egyszerű példán elemezni a problémáit. Egytengelyű feszültségi állapotban lévő prizmatikus, egyenes rudat kell méreteznünk húzásra. A méretezés alapképlete (az összefüggés adott formájában tulajdonképpen utólagos ellenőrzésre szolgál):

$$\sigma_{\text{meg}} \geq \sigma = \frac{F}{A} \quad (1)$$

Az összefüggésben F az ismert, a rúd hosszanti súlyvonalában működő terhelő erő, A a prizmatikus rúd rúdtengelyre merőleges keresztmetszete, $\sigma = \sigma_1$ az egytengelyű feszültségi állapot első főfeszültsége, σ_{meg} a rúd anyagára jellemző, kísérletek során meghatározott adatokból számított megengedett feszültség. Ez utóbbit az F terhelés ismeretében legtöbbször az ún. szakító szilárdság, esetleg folyáshatár valamilyen tört részében adják meg. A hányados értékét biztonsági tényezőnek is szokták nevezni, valójában azonban éppen ismereteink bizonytalanságát jellemzi.

Az (1) összefüggés determinisztikus. A gyakorlatban azonban a képlet baloldalán álló σ_{meg} értékét olyan szakító szilárdsági adatokból vezetjük le, melyek statisztikailag kiértékelt kísérlet sorozatokból származnak, és egyetlen adat helyett csak eloszlásfüggvényünkkel, vagy sűrűségfüggvényünkkel, a műszaki gyakorlatban hisztogramjukkal jellemezhetők. A képlet jobboldalán sze-

replő F terhelő erő értéke sem ismert pontosan és az A keresztmetszet is csak tőrészhatárokkal adható meg, azaz mind F , mind A ugyancsak valószínűségi változók. Érdekes külön elmélkednünk a terhelő erőt és keresztmetszetet elválasztó törtvonalról is. A tört által meghatározott egyenletesen megoszló σ feszültség csak a konkrét F erő bevezetési helyétől elegendően távol fogadható el, ha a prizmatikus rúd anyaga homogén kontinuumnak tekinthető. A gyakorlatban használatos fém rudak azonban kristályos szerkezetű inhomogén struktúrát mutatnak, melyek legtöbbször mikrohibákkal (diszlokációkkal, mikrorepedésekkel, esetleg üregekkel) is terheltek. Ezek környezetében a feszültség állapot már nem egytengelyű.

A rúd térfogategységében lévő hibák számát közelítőleg állandónak tekintve nyilvánvaló, hogy a szilárdsági méretezés eredménye függ a szerkezet méretétől is. (Ez utóbbit az anyagvizsgálat során a szakító próbatestek nagyságának megválasztásával vehetjük figyelembe.) A szilárdsági méretezés legegyszerűbb esete is gondok és problémák sokaságát veti fel, és látható módon a kielégítő megoldáshoz elengedhetetlen a determinisztikus szemlélet feladása, ellenkező esetben csak igen nagy biztonsági tényező választásával nyugtathatjuk meg lelkiismeretünket, miközben fogalmunk sincs a vállalt kockázat nagyságáról, ami végül is ugyancsak (részben szubjektív típusú) valószínűségelméleti probléma.

Összetett gépészeti szerkezetek, pl. járművek tervezése során a szilárdsági méretezés lényegesen bonyolultabb. Mi okozza ezt a bonyolultságot? A mérnöki szerkezetek tömeges méretű elterjedése, a többségében laikus üzemeltetés, a gazdasági kényszeren alapuló anyag- és energiatakarékos kialakítás egyre részletesebb és valóságghűbb terheléstörténet figyelembevételét követeli meg a szilárdsági méretezőtől. Az így kialakított szerkezetekben egyre kevesebb a szilárdsági tartalék, ugyanakkor a felhasználók joggal követelik a kockázat előírt értéken tartását.

A teljesség igénye nélkül néhány, a szilárdsági méretezést bonyolulttá tevő körülmény:

- ◇ A nagy darabszámban készülő termékek egyes egyedei a gyártás során lényegesen különbözhetnek egymástól. A méretpontatlanságok, beállítási és szerelési eltérések véletlenszerűen változó tulajdonságú egyedeket eredményeznek. Számos esetben szándékolt típus variánsok készülnek anélkül, hogy az eltérések szilárdsági ellenőrzésre kerültek volna. (A járműiparban egy-egy alaptípus esetenként több száz típus variánsban is készülhet, ilyen nagyszámú egymástól független szilárdsági ellenőrzés viszont gyakorlatilag kivitelezhetetlen.)
- ◇ Az azonos termékek egymástól szignifikánsan különböző üzemeltetési körülmények közé kerülnek. Eltérő éghajlati viszonyok, eltérő terheléstörténet és üzemeltetői mentalitás, járművezetési stílus nagymértékben befolyásolja a termékek elhasználódását, kopását és végső soron az élettartamát.

- ◇ A termékek tulajdonságai az üzemeltetés során nagymértékben változnak. Az új állapotra elvégzett szilárdsági méretezés valójában semmitmondó az élettartama felét már teljesített szerkezetre. A dinamikai terheléseket befolyásoló szerkezeti tulajdonságok egy része időben rendkívül gyorsan változik és így a szilárdsági méretezést igen sok szerkezetvariánusra kell kiterjeszteni (pl. a járművek hasznos terhe rugalmas és csillapító tulajdonságokat is mutat, ezért nem elegendő passzív tömegnek tekinteni, a távolsági repülőgépek üzemanyagának tömegváltozása megközelítheti az össztömeg 50%-át, stb.)
- ◇ Az üzemelés során figyelembe veendő, „mértékadó” független terhelési esetek igen nagy számúak. Ez tükröződik pl. a hajók regiszteri előírásaiban, a repülőgépek építési előírásaiban, a vasúti és közúti járművek baleseti terhelési előírásaiban. A különböző terhelési esetek egyidejűsége, azaz a szinergikus hatása azonban még feltáratlan. A többszörös szinergia pedig hatványozott mértékben (szinte exponenciálisan) megnövelné a szilárdsági ellenőrzés munkaigényességét.
- ◇ A terhelési esetek részben erőteherrel, részben kinematikai teherrel számolnak. A két fajta teher méretezési filozófiája ellentmondó: Erőteherre nagyobb teherbírású, kinematikai teherre pedig nagyobb flexibilitású szerkezetet célszerű megvalósítani. Mindkét teherfajta természetesen véletlen valószínűségi változó.
- ◇ A terhekből számított belső erők általában az egyes szerkezeti elemekben összetett igénybevételt idéznek elő, mely az idő függvényében részben stationáriusan, részben instacionáriusan változik. Az igénybevételekből ellenben – szemben a kiinduló példánkkal – általában többtengelyű feszültségállapot keletkezik a szerkezet különböző pontjaiban.
- ◇ Erre az időben változó többtengelyű feszültségállapotra a szakítószilárdság, ill. a szakítószilárdság valamilyen hányada már nem szolgáltat σ_{meg} megengedhető ellenőrző értéket. A vizsgálatokat – és anyagjellemzőket – ki kell terjeszteni a kifáradási jelenségekre is. A kifáradási vizsgálatok – még szabványosított (szinuszos) körülmények között is – igen nagy szórást mutatnak, tehát csak a valószínűségi számítás eszközeivel (eloszlásfüggvény, sűrűségfüggvény, stb.) tárgyalhatók. Még inkább ez a helyzet az időben rendszertelenül váltakozó terheléseknél.

E rövid kitekintésből is érzékelhető, hogy szerkezeteink szilárdsági méretezése – különösen járművek esetében – mennyire bonyolult, összetett feladat. A bonyolultságot azonban nem csak a szilárdsági méretezésében tapasztaljuk. Hasonló eredményre jutottunk volna, ha pl. az utaskényelmet, baleseti viselkedést, vagy a jármű dinamikai stabilitását vizsgáltuk volna. Az összetett lengéskényelmi, klimatechnikai, zaj vizsgálatok és méretezések, a baleseti viselkedés elemzése a szilárdsági méretezéssel egyezően sztochasztikus prob-

lémákra vezetnek az eltérő üzemeltetési körülmények (éghajlat, időjárás, útminőség, hasznos teherállapot, pillanatnyi sebesség, manőverezés, stb.) miatt.

A szignifikánsan különböző szerkezeti paraméter értékek (pl. eltérő hasznos tömeg és a folytonosan változó üzemi körülmények) miatt matematikailag értelemben a terheléstörténet, az utaskényelmi vagy baleseti viselkedés sztochasztikus, de nem tekinthető stacionáriusnak és ergodikusnak, még akkor sem, ha egyébként pl. az útegyenlőtlenések gerjesztő hatása önmagában stacionárius és ergodikus sztochasztikus folyamat. Az instacionárius és nem ergodikus sztochasztikus folyamat egészében – a mi vizsgálataink szempontjából – kezelhetetlen, ennek ellenére járművek jelenleg is készülnek, tehát valamilyen közelítéssel kell megoldanunk a tervezés során felmerülő feladatokat.

A teljes folyamat instacionárius és nemergodikus, de mindig találhatóak véges, elegendően hosszú, állandó paraméteres (előírt hasznos teher, állandó sebesség, homogén útfelület) szakaszai, melyek önmagukban stacionáriusnak tekinthetők. A teljes, folytonos paraméter tartományt így véges számú diszkrét realizációval közelíthetjük. A véges számú realizáció kiválasztása és relatív hosszuknak megállapítása korábban üzemelő (közelítőleg akár más típusú) jármű megfigyelése alapján történhet.

Ez a fajta statisztikai adatgyűjtés természetesen országonként (esetleg városonként) más-más eredményre vezethet, és ennek eredményeképp a különböző országokban üzemelő járművek eltérő élettartamúak lehetnek, de fordított tervezői döntéssel olyan szerkezeti módosítások (erősítések) is megvalósíthatók „felárért”, melyek mostohább körülmények között is azonos élettartamot biztosítanak.

Ez a fajta gondolkodás átvezet a Markov-láncok (ill. szemi-Markov-folyamatok) területére. A vizsgálatok kivitelezése két úton is lehetséges:

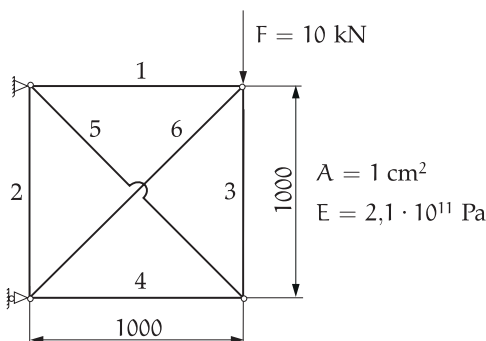
- ◇ A diszkrét realizációkból – előfordulási súlyuk arányaiban – mintegy 1000–1500 km-es egyesített realizációt állítunk össze, a járművet ill. modelljét az idő függvényében végig futtatjuk ezen az egyesített realizáción (közben szakaszonként változtatjuk a hasznos teher mennyiségét, az útminőséget és a haladási sebességet, természetesen kellő számú átmeneti szakaszt is beiktatva a változó sebesség szimulálásával). A jármű dinamikai modelljének kellő számú, kiválasztott pontjában az idő függvényében meghatározzuk az igénybevétel, ill. feszültségállapot adatait, végül ezekből az időfüggvényes adatokból statisztikát készítünk a feszültség változásokról, melyből, már kifáradási károsodás, ill. élettartam becslés számítható.
- ◇ A diszkrét realizációkból – a hozzájuk tartozó gerjesztési spektrum segítségével – a frekvencia függvényében egyenként meghatározzuk a dinamikai igénybevételeinek a spektrumait a jármű modell kiválasztott pontjában, majd ezekből „feszültség jelszint” kereszteződési számot állapíthatunk meg, mely közvetlenül felhasználható kifáradási károsodás, ill. élettartam becslésre.

Látható módon a két eljárás igen közeli rokon vonásokat mutat. Az első eljárás azonban nagyon munkaigényes, a számítógépes szimulációhoz gyakran az úrkutatásban kifejlesztett nagyméretű szimulációs programok bérlése szükséges. Különösen munkaigényes az utólagos statisztikai adatfeldolgozás. Előnye viszont, hogy a jármű dinamikai modellje a valósághoz közelebb állóan nemlineáris lehet.

A második, frekvencia függvényében végzett analízis lényegesen egyszerűbb, az igénybevétel-, ill. feszültség szintkeresztezési adatok a válasz derivált spektrumával egyszerűen számíthatók. Hátránya, hogy a szerkezet dinamikai modellje az eredetihez kevésbé hasonlító linearizált modell. Ennek legkézenfekvőbb formája az aktuális paraméter kombinációhoz tartozó munkaponti linearizálás lehet.

Mindkét eljárás modellje tovább finomítható a hasznos teher aktív tulajdonságainak (rugalmasság, csillapítás) figyelembevételével, valamint a figyelembe vett diszkrét realizációk számának szaporításával, azaz a folytonosnak tekinthető változó üzemeltetési tartomány finomabb beosztásával. Továbbfejlesztésként elképzelhető a szerkezet elhasználódásának figyelembevétele, azaz a teherhordó szerkezet kopásának, lazulásának, változó rugalmas és csillapító tulajdonságának lépcsőzése is. A modell finomításnál azonban tekintettel kell lenni arra, hogy két állapot feltételezése már megkétszerezi a vizsgálathoz szükséges számítások és adatok mennyiségét.

A determinisztikus szemlélet és a jelenségek véletlen valószínűségi leírása szignifikánsan eltérő eredményekre vezethet már egyszerű, kisméretű feladatok megoldásánál is. Vizsgáljuk meg például az 1. ábrán látható egyszerű, 6 rúdból álló statikailag határozatlan, ideális síkbeli rácsos tartó erőjátékát determinisztikusan és a rudak véletlen méretpontatlanságát valamint a teher ingadozását figyelembe véve valószínűségszámítás eszközeivel. A vizsgálatok során ismertek a névleges geometriai és teher adatok, valamint azok ingadozásának szélső értéke, tűrésmezeje, valamint feltételezzük, hogy a tűrésmezőn belül az egyes elemek hossz méretének valószínűségi eloszlása – a gépgyártástechnológiában már számos alkalommal igazolt feltételezéssel – normálisnak tekinthető. Ebben az esetben a rudak hosszának várható értéke a névleges méretükkel, míg szórása a tűrésmező $1/6$ -ával adható meg. A külső terhelő erő nagysága a névleges érték körül $\pm 30\%$ -os tartományban ingadozhat és eloszlásfüggvénye ugyancsak normálisnak tekinthető, melynek szórása a névleges érték 10% -a. A rúd hosszakat összességükben független valószínűségi változóknak tekintjük, annak ellenére, hogy az 1–4 határoló rudak, valamint az 5–6 átlók valószínűleg ugyanazon készülékben lettek méretre szabva. Természetesen egy készülékben is készülhetnek eltérő méretű végtermékek pl. az alkatrészek eltérő hőmérséklete miatt (nyáron, ill. télen készült termékek különbözősége, ha a készülék hőtágulási együtthatója igen kicsiny). A külső teher a rúdhosszaktól természetesen független valószínűségi változó. (A köl-



1. ábra. 6 rúdból álló ideális síkbeli rácsos tartó erőjátéka

csönös függéssel itt nem foglalkozunk, de a feladat a függetlenség feltételezése nélkül is megoldható, ha ismert a kölcsönös függés mértéke egy elegendően nagy mintából.)

A rúderőket (és ezzel a bennük ébredő normál feszültségeket is) a determinisztikus szemlélet alapján három szignifikánsan különböző esetre határoztuk meg:

- a rudak hossza pontos és a teher névleges értékű,
- a rudak hossza pontos és a teher a tűrésmező szélére esik ($1,3F$ illetve $0,7F$),
- a rudak hossza a tűrésmező szélére esik és a legkedvezőtlenebb kombinációban alkotják a szerkezetet (pl. az 1–4 határoló rudak mind hosszabbak a névleges méretnél, az 5–6 átlók pedig rövidebbek, illetve fordítva), a terhelő erő a tűrésmező szélén helyezkedik el.

A valószínűségi számításokon alapuló megfontolás során négy esetet vizsgáltunk:

- a 6. rúd hosszának a tűrésmezeje ± 1 mm, az összes többi rúd, valamint a külső teher névleges értékű,
- az 5. és 6. rúd hosszának tűrésmezeje ± 1 mm, az összes többi rúd, valamint a külső teher névleges értékű,
- az összes rúd tűrésmezeje ± 1 mm, a külső teher névleges értékű,
- az összes rúd tűrésmezeje ± 1 mm, a külső teher tűrése $\pm 1\%$.

A számítást nem részletezzük, de a 7 vizsgált esethez tartozó rúderőket az 1. táblázatban összefoglaltuk.

Az 1. táblázatból megállapítható, hogy a rudak $0,1\%$ körüli hosszváltozása okozta kinematikai terhelésből a külső erő terheléssel egyező nagyságrendű rúderők keletkezhetnek a szerkezetben. Mivel ilyen mértékű hosszváltozások nemcsak pontatlan gyártásból, hanem a szerkezet egyes elemeinek felmelegedéséből is származhatnak, ezért a szerkezet igen érzékeny az egyenlőtlen

1. táblázat. A 7 vizsgált esethez tartozó rúderők

vizsgált eset	A rúderők értéke kN-ban						
	névleges érték	tűrésmező szélessége					
rúd jele	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	<i>e</i>	<i>f</i>	<i>g</i>
1, 2	5						
3, 4	-5	±1,5	±15,52	±3,075	±4,35	±6,15	±6,33
5	-7,071						
6	7,071	±2,121	±22,08	±4,35	±6,15	±8,7	±8,955

felmelegedésre. A három, determinisztikus módszerrel vizsgált esetből a *c* variáns rendkívül kedvezőtlen képet mutat, a névleges rúderők négyszerese is előfordulhat a szerkezetben. Ha a tervezés során ezt vennénk figyelembe mértékadó teherként, igen gazdaságtalan szerkezetet valósítanánk meg.

A valószínűségszámítás módszereivel számított *g* variáns ezzel szemben a névleges rúderők alig valamivel több, mint kétszeresét mutatja ki, így kevésbé túlméretezett – tehát gazdaságosabb – szerkezetet eredményez.

A szilárdsági méretezéshez hasonlóan determinisztikus számítások helyett sztochasztikusan kell tárgyalni a járművek általános mozgásdinamikáját is. A kérdést végletekig leegyszerűsítve a jármű mozgását önkényesen szétválasztjuk főmozgásának irányába (longitudinális) és arra merőlegesen kereszt irányában (laterális dinamika), illetve „függőlegesen” (vertikális dinamika) parazita mozgásokra. A főmozgás elsősorban energetikai szempontból, a függőleges mozgás az utazási kényelem (áruvédelem) szempontjából, míg a keresztirányú mozgás biztonsági szempontból érdemel figyelmet. A szétválasztás természetesen csak durva közelítés, a valóságban mindhárom irányú mozgás kölcsönösen kihat a jármű energiafogyasztására, kényelmére és biztonságára is. Még szembetűnőbb ez a kölcsönhatás, ha a translációk mellett figyelembe vesszük a jármű főtengelyei körüli forgó mozgásokat is (bólintás, támoltyág [legyezés], orsózás). Tekintsük át a fő- és parazita mozgások vizsgálatában felmerülő sztochasztikus problémákat.

Közismert, hogy a városi forgalomban a gépjárművek fajlagos (km-kénti) üzemanyag-fogyasztása lényegesen nagyobb (a kis sebességek és kis légellenállás ellenére), mint városon kívül. A nagyobb fogyasztás több hatás következménye. A jármű motorja ilyenkor általában nem az optimális üzemiállapotban működik, hanem a gyorsan változó forgalmi (sebesség) viszonyokhoz kell a fordulatszámot megválasztani; sűrűn kényszerülünk fékezésre, melynél a jármű mozgási energiáját hővé alakítjuk, a jármű újra gyorsítása is többlet energiát igényel; a piros lámpánál álló jármű motorja üres járatban is fogyasztja az üzemanyagot. Ez a tranzien্স üzemmód sztochasztikusan változik,

a járművezetők reagálása is véletlenszerűen késleltetett folyamat. Átlagos felkészültségű vezető nagyvárosi forgalomban akár a kétszeresére is növelheti a fajlagos üzemanyag-fogyasztást az állandósult állapotú országúti fogyasztáshoz képest. A jelenségből két irányú következtetést vonhatunk:

- ◇ A járművet olyan szabályozó berendezésekkel (érzékelők, fedélzeti számítógép, beavatkozók) kell felszerelni, melyek minimális késleltetéssel mindig optimális motorüzemelését valósítanak meg, piros lámpánál pedig leállítják, majd szabad jelzésnél újra indítják a motort.
- ◇ Olyan forgalomirányítást (akár off-line, akár on-line) kell kiépíteni, mely az egész városi forgalom energiafogyasztását minimalja. Ilyen bonyolult, nagy rendszer optimalása azonban nem nélkülözheti a teljes sztochasztikus közlekedési folyamat feltárását, beleértve a beavatkozások és szabályozások következményeinek a kimutatását is (lásd pl. a mikro káosz problémákat).

A járművek függőleges lengése elsősorban az utazó kényelemérzetét befolyásolja. A korábbi időszak jármű tervezőinek egyik fő feladata volt a jármű főrugójának megtervezése úgy, hogy a járműfelépítmény függőleges lengésének első saját frekvenciája 1 Hz körül helyezkedjék el. A normális gyalogos lépés frekvenciájához szokott ember ugyanis ennél lényegesen kisebb, vagy lényegesen nagyobb frekvenciájú lengésnél igen kellemetlenül érzi magát. Determinisztikus problémaként kezelve a kívánatos frekvencia beállítása természetesen egyértelmű és lényegében egyszerű feladat. Sajnos azonban a jármű tömege az üzemelés során változó hasznos tehertől akár 100%-kal is növekedhet az üres állapothoz képest, ez pedig az üres állapotbeli saját frekvenciát kb. 30%-kal csökkenti a teljesen terhelt állapotban. A 0,7 Hz-es saját frekvencia az emberek többségénél rosszul éreztetést vált ki. Természetesen e megállapítás csak lineáris rugó karakterisztikára érvényes. Progresszív karakterisztikájú rugóval közel állandó frekvencia állítható be teherállapottól függetlenül. A determinisztikus tervezés nem vesz tudomást az útfelület (és motor) széles sávú gerjesztési spektrumáról sem. A frekvenciával együtt a gerjesztés amplitúdója is változik, tehát egy üzemi pont beállítása helyett sokkal általánosabb gerjesztési spektrumot, sőt a jármű több kereke miatt spektrumokat kell a fő rugók tervezése során figyelembe venni. Az egyes kerekei általában más-más nyomon futnak, a gerjesztések időbeli lefolyása a geometriai útegyenlőtlenségek mellett a jármű sebességétől is függnek, az útgerjesztés amplitúdója a pálya deformálhatósága (rugalmas és maradó egyaránt lehetséges) miatt függ a pillanatnyi keréknyomástól, közvetve a jármű tömegétől és mozgásállapotától. Ráadásul a lengések okozta fárasztó hatások az utas szervezetében halmozódnak, a halmozódás nem egyszerű összegződés, mert az emberi szervezet érzékenysége is frekvenciafüggő. A kumulálódó hatásokra minden ember (ha kis mértékben is) eltérően reagál. A sztochasztikus tárgyalás tehát nemcsak

a gerjesztés szabatos leírásához szükséges, hanem a tervezésnél figyelembe kell venni a gerjesztést elviselő személyek véletlenszerűen változó egyéni tulajdonságait is. A jelenséget tovább színezi az, hogy a hosszdinamika (fékezés, gyorsítás) járulékos függőleges gyorsulásokat is eredményezhet a jármű egyes részeiben (bólintás) és ez a hatás a véletlenszerűen változó forgalmi szituációtól, a vezető szubjektív vezetési stílusától, valamint az útfelület minőségétől (pl. száraz, vagy jeges) is függ.

Ezen belül különösen összetett a fékezés folyamata, mely a jármű és fék aktuális tulajdonságain kívül az útfelület kerekenként esetleg eltérő adhéziós viszonyaitól és a jármű tömegeloszlásától is függ. Bármilyen vezérlést és szabályozást is választunk a fékrendszerhez, az csak a fizikai lehetőségeket tudja kihasználni, de ezek a fizikai adottságok pillanatról-pillanatra (helyről-helyre) változhatnak.

Ugyanilyen megállapítások tehetők a jármű laterális dinamikájára. Az oldalirányú mozgást (a jármű keresztirányú kisodródását, borulását, stabilitását) a kerekek alatti pillanatnyi adhézió, a kerék aktuális függőleges lengésgyorsulása, a jármű súlypontjának rakománytól függő helyzete, a hasznos teher pillanatnyi önálló mozgásállapota (pl. folyadékszállító tartálykocsiknál) a vezető szubjektív vezetési stílusa, a forgalmi helyzet megkövetelte manőver kényszer mind véletlenszerűen befolyásolja.

Az oldalirányú parazita mozgás vizsgálatával áttértünk a közlekedés egyik fő problémáját jelentő balesetek területére. Az eddig tárgyalt befolyásoló körülmények mellett figyelembe kell venni a balesetet szenvedő jármű baleseti partnerét is. A „partner” lehet egy másik álló, vagy mozgó jármű, esetleg épület, villanyoszlop, stb. A lehetőségek száma szinte végtelen.

A baleset, ill. katasztrófa elemzés a hagyományos mérnöki tevékenységnek korábban elhanyagolt területe volt. Jelenleg azonban már mind a kísérleti, mind az elméleti (számításos szimulációs) vizsgálatok a mindennapi tervező munka részévé váltak. A baleset, ill. katasztrófa elemzés legérdekesebb eredménye az, hogy bár a baleseti szituációk véletlen valószínűségi változók, bennük mégis még jelenleg is dominál és szükséges a determinisztikus szemlélet. A sztochasztikus szemlélet, statisztikák feldolgozása, gyakorisági vizsgálatok a már megtörtént balesetekre terjednek ki. Ezekből az utólag készített statisztikákból választják ki a tipikus, gyakrabban előforduló baleseti szituációkat (baleseti partner tulajdonságai, az ütközés iránya, az ütközés előtti sebesség, stb.), melyek mintegy szabványosítva – megszabják az ütköztetési kísérlet kezdeti értékeit és peremfeltételeit. E kísérletek igen költségesek, és gyáranként legfeljebb néhány száz végezhető el belőlük évente, ez pedig nem elegendő a közlekedés balesetbiztonságának megkívánt szintjéhez. A kísérleteket kiegészítik a számítógépes szimulációs vizsgálatokkal is, ezzel a megvizsgált esetek száma akár 1–2 ezerre is növelhető. A számítógépes vizsgálatok is – a kísérletekhez hasonlóan – pontosan definiált determinisztikus esetekre korlátozód-

nak. A statisztikát a vizsgálatok stratégiájának megtervezésére kell felhasználni. Ez az utóbbi példa is világosan mutatja, hogy a sztochasztikus szemlélet nem teszi feleslegessé a determinisztikus módszereket.

A vázolt, egyszerűsített gondolatmenet alapján nyilvánvaló, hogy a sztochasztikus alapon történő tervezésnek és méretezésnek még csak a kezdetén tartunk. Természetesen az irodalomban számos részfeladat megoldása megtalálható. E könyv szerzői is szerény mértékben hozzájárultak a fogalmak szétválasztásához és tisztázásához. A véletlen kinematikai teherrel, valamint a járművek sztochasztikus terhelés történetével kapcsolatos dolgozataik és konkrét tervezési feladat megoldásaik érdeklődést keltettek a járműtervezők és a gyártók köreiben. A jól algoritmizált teljes és általános sztochasztikus tervezés és méretezés elméletig azonban a tudomány még nem jutott el. A valószínűségelméleti megközelítésen kívül felmerülhet egyes feladatok intervallum algebrai ill. „lehetőségelméleti” azaz fuzzy modellezés és szemlélet alkalmazásának lehetősége is.

Az informatika korábban elképzelhetetlen méretű feladatok megoldását is lehetővé teszi. A legnagyobb nehézségek jelenleg inkább a kiinduló paraméter tartományok kísérleti vizsgálatában merülnek fel. A kísérletekre pedig igen sok idő szükséges és rendkívül költségesek. A jövő közlekedésének a biztonság fokozása miatt a pályát és a járműveket előbb, vagy utóbb egységes információs rendszerbe kell foglalnia, ehhez pedig elengedhetetlen a több céget összefogó, átgondolt kísérletsorozatok és adatgyűjtések megtervezése, a tervezésben és méretezésben figyelembe veendő üzemeltetési esetek jogi rögzítése, szabványosítása, a szabványok folyamatos korszerűsítése. Ez már valóban az új évszázad (ill. évezred) mérnökének a feladata.