

POUZDANOST KONSTRUKCIJA ZA AKTIVNOSTI U PODMORJU, STATISTIČKI KRITERIJI NJENOG PLANIRANJA I RAZMATRANJA

Tomislav CAR

Rudarsko-geološki-naftni fakultet, Institut za rudarstvo, geotehniku i naftu, Pierottijeva 6, YU — 41000 Zagreb

Ključne riječi: Konstrukcije za aktivnosti u podmorju, Statistička procjena pouzdanosti, Tehno-ekonomska sigurnost.

Key-words: Offshore structures, Statistical estimation of reliability, Techno-economical safety.

Statistički pristup je jedna od metoda koje mogu dati kvalitativne pokazatelje sigurnosti konstrukcija i osnovne tehnno-ekonomske kriterije njihove pouzdanosti. Osnova takvog pristupa je određivanje vjerojatnosti pojavljivanja grešaka u interaktivnoj vezi sila prirodnog okruženja i svojstava konstrukcije. Rezultati takve analize su osnova za kvantitativno utvrđivanje tehnno-ekonomskog optimuma korištenja konstrukcije i sustava.

Statistical approach is one of methods offering us some quantitative indications of structure security and basic techno-economics criterion of their applications. The basis of that approach is determination of the probability of error occurrence in different interactive relationship between natural forces and structure properties. Results of that analyse are the basis for quantitative definition of the techno-economics optimum for structure and system application.

Uvod

Svaki tehnološki sustav i struktura u naftno-rudarskim aktivnostima u podmorju predstavlja sustav vrlo složene interakcije sila i opterećenja stalnih ili promjenjivih veličina. Te su sile po svom osnovnom karakteru statičke i dinamičke te čvrstoća konstrukcije kao zajednički pojam reaktivnih sila, a po veličini im je raspon od sila uobičajenih i planirano graničnih intenziteta do onih koje ugrožavaju ili uništavaju integritet konstrukcija i sustava. Institucije koje se znanstveno i komercijalno bave problemima sigurnosti i osiguranja konstrukcija i tehnoloških sustava u aktivnostima u podmorju usvojile su klasifikaciju sila prema njihovoj prirodi te učinku djelovanja na strukture i sustave. Grupe sila i opterećenja su slijedeće (oznake prema međunarodnom kodeksu):

P — Stalno djelujuće opterećenje

- masa konstrukcije
- stalni teret i oprema
- hidrostatski tlak

L — Pokretni teret

- uskladišteni materijal, oprema i kapljevina
- aktivnost dizalice
- helikopteri
- sidrenje i pristajanje pomoćnih pločila

E — Prirodne sile

- vjetar

- valovi
- struje, led, snijeg, plima i oseka
- seizmički (trusni) efekti

D — Naprezanja

- tlačna i vlačna naprezanja uslijed promjena tlakova i temperature

A — Opterećenja koja ugrožavaju ili razaraju integritet konstrukcije

- eksplozija
- vatra
- izuzetno snažne trusne pojave
- sudarna opterećenja i rezonantna djelovanja dinamičkih sila
- propadanje konstrukcije u morsko dno.

Za konstrukcije, predviđene za aktivnosti u podmorju (offshore konstrukcije) karakteristične vrijednosti dinamičkih prirodnih sila normalno se određuju kao statistički najvjerojatnije, najveće vrijednosti registrirane u posljednjih 100 godina. To su tek neki od bazičnih podataka koji se u statističkom odnosu učestalo pojavljuju i vjerojatnosti posljedica metodološki obrađuju s ciljem utvrđivanja pouzdanosti konstrukcija po kriterijima razine rizika i granice sigurnosti. Metodološki i numerički postupci su složeni jer obuhvaćaju mnogo podataka različitog raspona pravilnih i nepravilnih frekvencija, djelimično poznatih i mnogo više tek hipotetički poznatih vjerojatnosti posljedica, te sve moguće interakcije i

interferencije, one definirane, hipotetičke čak i one s tek teoretskim vjerojatnostima pojavljivanja.

Takvim postupkom, kao pokazateljem granične pouzdanosti, izvedenim kao funkcija granične sigurnosti i razine rizika, orijentaciono se determiniraju stanja konstrukcije. Stanja su pokazatelj koliko offshore konstrukcija, u području granične sigurnosti uz povećanje faktora rizika, može izdržati djelovanje sila normalne učestalosti i vjerojatnosti pojavljivanja. S obzirom da se ovim razmatranjem želi dati prilog naporima da kritična stanja postanu tek teoretski pojmovi, valja ih ipak navesti kao ilustraciju vrlo realnih stanja koja su posljedica već i minimalnih ljudskih pogrešaka u fazi projektiranja, korištenja i održavanja. Ta stanja su:

a) Konačno granično stanje koje karakterizira granična izdržljivost na opterećenja, a u kojem dolazi do istezanja i lomova sekcija, nestabilnosti pojedinih elemenata konstrukcije ili čak gubitka stabilnosti;

b) Stanje granične mogućnosti djelovanja je stanje mogućeg razaranja integriteta konstrukcije, a izazvano je preopterećenjem ili gubitkom pojedinog elementa konstrukcije, što se može odraziti na veći dio konstrukcije, u uvjetima kada se posljedice greške mogu širiti;

c) Stanje granične izdržljivosti je posljedica nedovoljne otpornosti materijala, odnosno njegovog zamora, a predstavlja posljedicu djelovanja svih sila pravilne i nepravilne frekvencije u vrijeme korištenja zbog čega dolazi do narušavanja integriteta konstrukcije kao posljedice oštećenja;

d) Stanje granične mogućnosti korištenja specificira se kao granični pokazatelj uporabivosti i trajnosti, a najčešće je uvjetovano korozivnim oštećenjima i deformacijama uslijed vibracija te, što je osobito zanimljivo i statistički potvrđeno, neprimjerenim sekvencijalnim zahvatima, tj. djelatnostima dogradnje ili popravaka, čija je granica sigurnosti niža od one projektirane i realne za konstrukciju.

Planiranje pouzdanosti konstrukcije je aktivnost s vrlo značajnim ekonomskim i društvenim implikacijama, koja mora znanstvenim pristupom ili isključiti, ili do granice minimalne vjerojatnosti svesti mogućnost pojavljivanja takvih stanja.

Metodološki kriteriji planiranja pouzdanosti konstrukcije (prijedlog metode)

Temeljna postavka kod procjene sigurnosti, odnosno pouzdanosti konstrukcije ili bilo kojeg sustava, jest mogućnost procjene rizika uvjetovanog pogreškom ili neusklađenošću funkcija. Te pojave uvjetuje nepotpuna određenost pojedinih elemenata konstrukcije, odnosno pa-

rametara, što se statistički može razmatrati kao djelomična nedefiniranost u prikazu odnosa učestalosti (frekvencije, f), pojavljivanja i intenziteta djelujućih aktivnih sila (Q), te nosivosti materijala konstrukcije (R).

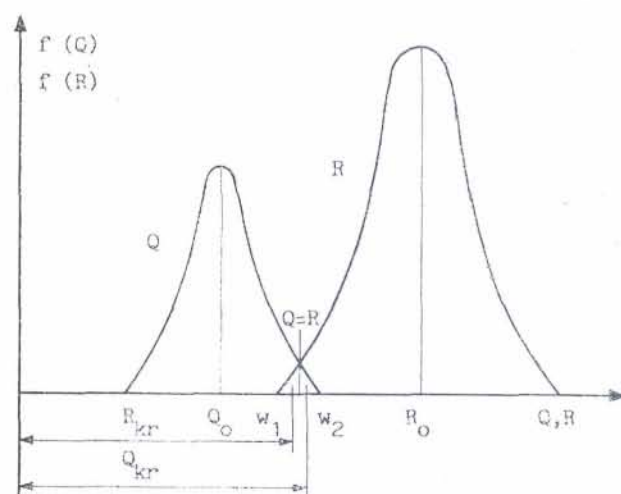
Prirodne sile koje djeluju na konstrukciju, također i ona opterećenja koja su uvjetovana aktivnošću tehnologije, moguće je prikazati kao normalnu raspodjelu određenu Gaussovom krivuljom, čak i u slučaju razmatranja ekstremnih pojava. Čim se takva raspodjela formira u dužem vremenskom razdoblju, tim više je ona vjerodostojnija i pravilnija. Krivulja raspodjele čimbenika čvrstoće konstrukcije može, u odnosu prema gornjoj krivulji, biti različitih oblika i vrijednosti;

a) Ako je srednja vrijednost pokazatelja čvrstoće konstrukcije manja od srednje vrijednosti djelujućih opterećenja, tada će, bez obzira na učestalost pojavljivanja, doći do raspada konstrukcije. Konstrukcija je apsolutno nepouzdana.

b) Ako su krivulje raspodjele istovjetne, konstrukcija je u rezonanciji, njena pouzdanost je granična, tj. konstrukcija nije realno primjenjiva.

c) Ako je srednja vrijednost pokazatelja čvrstoće po Gaussovoj krivulji veća od srednje vrijednosti djelujućih opterećenja, tada je neposredni pokazatelj pouzdanosti konstrukcije veličina područja koje obje krivulje zatvaraju. To je područje rizika u odnosu na koje se određuju kriteriji pouzdanosti konstrukcije i njena realna primjenjivost. Ovakav odnos, koji jedini odgovara realnim situacijama, shematski je prikazan na slici 1.

d) Teoretski je moguće pretpostaviti konstrukciju izgrađenu od materijala takvih svoj-



Sl. 1 Shematizirani statistički odnosi metode određivanja pouzdanosti konstrukcije

Fig. 1 Schematic statistical relations of the method for determining a construction reliability

stava da se projektom maksimalno mogućih faktora sigurnosti eliminira zajedničko područje dviju krivulja, ili da ono po učestalosti i veličini bude izvan granične vrijednosti sigurnosti. No takva konstrukcija, koja bi po osnovnoj ideji trebala biti integralna (jednočlana), koliko god bila visoke razine sigurnosti, ne bi izdržala nijedno ekonomsko vrednovanje s obzirom na troškove izrade.

Evidentno je, da je treća hipoteza jedina koja omogućava realno razmatranje. Pri tome i učinak opterećenja, Q , i graničnu čvrstoću (nosivost, otpornost) konstrukcije, R , treba uzeti u obzir kao nezavisne varijable statistički utvrđene zakonom distribucije vjerojatnosti učestalosti $f(Q)$ i $f(R)$.

Iz raspodjele parametara Q i R po Gaussovoj krivulji moguće je determinirati standardnu devijaciju, σ , kao pokazatelje pouzdanosti pojedinih parametara obuhvaćenih raspodjelom.

Standardna devijacija dana je izrazom

$$\sigma \equiv s = \sqrt{\frac{\sum (x - \bar{x})^2}{n}} \quad (1)$$

x ... pojedinačna vrijednost; Q ili R u konkretnom slučaju

\bar{x} ... srednja vrijednost; Q_0 i R_0 u konkretnom slučaju

n ... broj razmatranih podataka, varijabli

Kod normalne, Gaussove raspodjele, oko 68 % vrijednosti nalazi se u intervaju $\bar{x} \pm 1s$, oko 95 % vrijednosti u intervalu $\bar{x} \pm 2s$ i gotovo svi rezultati u intervalu $\bar{x} \pm 3s$. Taj pokazatelj moguće je koristiti kao granicu pouzdanosti podataka, a time se posredno omogućuje i eliminacija podataka iz graničnih dijelova raspodjele.

Kvalitativni pokazatelj sigurnosti za odnose Q i R , obrađene raspodjelom, predstavlja varijablu čija je funkcija distribucije određena veličinom mjerenih opterećenja i projektirane nosivosti (čvrstoće) konstrukcije. Izraz glasi:

$$S = \frac{R}{Q} \quad (2)$$

Iz tog kvantitativnog odnosa evidentno je da je sigurnost konstrukcije proporcionalna vrijednosti S i da je kritično stanje karakterizirano vrijednošću $S = 1$.

Veličina » S « označava faktor sigurnosti konstrukcije i vrlo je značajan kod projektiranja.

Na osnovu pouzdanih, konstruktivno provjerenih pretpostavki moguće je u značajno većem stupnju vjerojatnosti procijeniti razinu rizika iz razlike srednjih vrijednosti i veličine Q i R . Granica sigurnosti, G_s , kvantitativno se definira iz tih parametara kao

$$G_s = R - Q \quad (3)$$

Kao odnos srednjih vrijednosti ($R_0 = \bar{R}$; $Q_0 = \bar{Q}$) taj izraz glasi

$$\bar{G}_s = \bar{R} - \bar{Q} \quad (4)$$

Koeficijent varijacije veličina \bar{R} i \bar{Q} glasi

$$V_R = \frac{\sigma_R}{\bar{R}}; V_Q = \frac{\sigma_Q}{\bar{Q}} \quad (5)$$

Ovaj izraz je odnos standardne devijacije i aritmetičke sredine, veličina R i Q .

Standardna devijacija označava mjeru disperzije aritmetičke sredine. Što je manja standardna devijacija, to je koeficijent varijacije manji, što u našem slučaju znači da se može računati s malim odstupanjem od aritmetičke sredine. To je svakako povoljno.

Ako se sada uvede veličina recipročne vrijednosti koeficijenta varijacije, onda se taj pokazatelj može upotrijebiti kao indeks sigurnosti. U daljnjem razmatranju treba preuzeti da veličina \bar{R} mora biti u svakom slučaju veća od \bar{Q} . Ona (\bar{R}) označava aritmetičku sredinu čvrstoće (nosivosti) konstrukcije, a \bar{Q} označava aritmetičku sredinu djelujućih sila.

Kod obje veličine poželjno je da standardne devijacije tj. mjere disperzije budu što manje a razlika $\bar{R} - \bar{Q}$ što veća.

Kao pokazatelj sigurnosti može se uvesti izraz

$$I_s = \frac{\bar{R} - \bar{Q}}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_Q^2}} \quad (6)$$

Pokazatelj sigurnosti I_s označava pouzdanost konstrukcije. Što je pokazatelj sigurnosti veći, pouzdanost konstrukcije je veća.

Ako želimo taj izraz prikazati kao funkciju varijacije i koeficijenta sigurnosti onda taj izraz dijelimo sa \bar{Q} :

$$I_s = \frac{\frac{\bar{R}}{\bar{Q}} - 1}{\sqrt{\left(\frac{\bar{R}}{\bar{Q}}\right) V_R^2 + V_Q^2}} \quad (7)$$

Analogno s izrazom (2) može se odnos srednjih vrijednosti \bar{R} i \bar{Q} , smatrati uvjetnim faktorom sigurnosti S_{uvj} :

$$S_{uvj} = \frac{\bar{R}}{\bar{Q}} \quad (8)$$

Pretpostavljajući da je raspodjela varijabli Q i R pravilna, tj. simetrična, moguće je poistovjetiti uvjetni faktor sigurnosti, S_{uvj} , sa sredšnjim faktorom sigurnosti, S_0 ;

$$S_0 = \frac{R_0}{Q_0} \quad (9)$$

Ako se funkcije Q i R prikazuju u poluloga-ritamskom sustavu, faktor sigurnosti iz izraza $\ln S = \ln R - \ln Q$ je tada normalno distribuiran i jednostavniji za prikaz.

Analiza pouzdanosti sustava i konstrukcije nosi u sebi sve pogreške aproksimacija u zbiru referentnih parametara odvojeno istraženih i definiranih podsustava. Ta činjenica ističe koliko je, i za takve kvantitativne pokazatelje, značenje kvalitetnih podataka o uvjetima prirodno okruženja, konstruktivnim svojstvima konstrukcije i djelatnostima na njoj.

Tehno-ekonomska procjena i vrednovanje prethodnih pokazatelja i relacija mora biti sinteza temeljena na kriteriju empirijski dopustivih vrijednosti greške. Takvim pristupom ipak se ne smije minimizirati nijedan vid mogućih posljedica na integritet konstrukcije i njenih funkcija, te posrednih i neposrednih materijalnih reperkusija. Zato se u smislu tehno-ekonomskog optimuma može definirati relacija

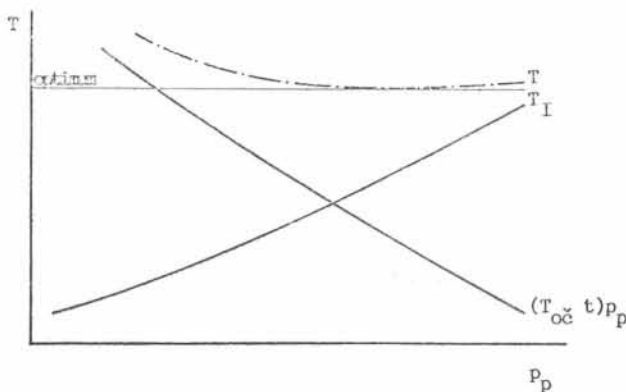
$$T = T_i + (T_{o\check{c}} \cdot t)_{p_p} \quad (10)$$

U gornjem izrazu pojedini simboli znače:

- T — troškovi vezani za konstrukciju
- T_i — investicioni troškovi, troškovi konstrukcije
- $T_{o\check{c}}$ — očekivani, planirani troškovi vezani za gubitke u funkciji konstrukcije kao posljedice vjerojatnosti pogreške
- t — vrijeme korištenja konstrukcije

Razmatrani tehno-ekonomski odnosi su shematizirano prikazani na slici 2.

Investicioni troškovi, odnosno troškovi konstrukcije, T_i , rastu ovisno o vjerojatnosti greške, dok su očekivani troškovi, $T_{o\check{c}}$, planirani u određenoj empirijskoj, ili od osiguravatelja



Sl. 2 Tehno-ekonomski pokazatelji odnosa troškova i vjerovatnosti pogrešaka

Fig. 2 Techno-economic indicators of cost and probability errors relation

uvjetovanoj vrijednosti. To su dakle limitirani troškovi, korigirani za vrijednost inflacije i stope obavezne amortizacije, jer bi njihovo povećanje, apsolutno ili relativno, tj. udio u općim troškovima, ukazivao na realni trend ugrožavanja integriteta konstrukcije i funkcije sustava, što dovodi do njegovog kritičnog stanja. S obzirom na relativnu nepromijenjenost $T_{o\check{c}}$, udio tih troškova će pri relativno normalnom korištenju konstrukcije i sustava, vremenom biti sve manji. Kao zaključak: tehno-ekonomski optimum korištenja konstrukcije i sustava postiže se u području najmanjeg zbira ovih troškova.

Prikaz na slici 2 posve je kvantitativan i općen, jer, osim poznavanja trenda kretanja pojedinih vrsta troškova, nije pouzdano utvrđen ni nagib, ni tip krivulje koji ih kvalitativno karakteriziraju. Iako je po ideji takav koncept vrlo jednostavan, njegova primjena je krajnje složena zbog nemogućnosti procjene porasta cijena i troškova kroz dulje vremensko razdoblje, što je bitni uvjet vrednovanja realnih tehnoloških i ekonomskih pokazatelja. Iz istih razloga je nemoguće procijeniti materijalne posljedice raznih vidova grešaka. Zaseban problem je uvođenje kvantitativnih pokazatelja u vrednovanju takvih posljedica grešaka kao što je napr. gubitak života. Takav koncept, osim što je ilustrativan, primjenjiv je i opravdan kao jedan od kriterija u projektu konstrukcija proizvodnih postolja aktivnosti u akvatoriju.

Zaključak

Opisani metodološki pristup moguće je sintetizirati u pet faza:

- 1 — utvrđivanje raspodjele, odnosno vjerojatnosti raspodjele, djelujućih prirodnih sila na konstrukciju,
- 2 — utvrđivanje raspodjele, odnosno vjerojatnosti raspodjele, nosivosti (čvrstoće) konstrukcije,
- 3 — procjena vjerojatnosti grešaka u konstrukciji,
- 4 — definiranje projektiranih pokazatelja sigurnosti i graničnih stanja i
- 5 — utvrđivanje tehno-ekonomskog optimuma korištenja konstrukcije.

Ovakav pristup kao i sve dosadašnje procjene sigurnosti te definirani kriteriji i postupci njihovog određivanja kvantitativnog su karaktera, a u svojoj neposrednoj primjeni koriste se najčešće kao kodeksi konstrukcije. Takvi konvencionalni kodeksi ispunjavaju niz kriterija po kojima se konstrukcije normativno i pravno klasificiraju. Kodeks je u osnovi karakteriziran kontrolom pouzdanosti metode određivanja odnosne razine sigurnosti.

Klasificirane razine sigurnosti mogu se pojednostavljeno prikazati, prema metodama koje se koriste za njihovo određivanje, na slijedeći način:

a) razina I — Ta se razina određuje metodom vjerojatnosti, zasnovanoj na karakterističnim vrijednostima varijabli u projektu, a osnova je analiza mehaničkih svojstava i zahtjeva koji su sadržani u nazivu »granično stanje«. Ovakve su metode nekada bile standardne za betonske konstrukcije na suhom, a nakon niza godina prilagođene su za betonske i čelične konstrukcije u akvatoriju.

b) razina II — Ta je razina determinirana metodama približne sigurnosti temeljene na

obradi svih uočenih čimbenika kroz maksimalno mogući broj podataka, čiju je pouzdanost i raspodjelu moguće definirati. Metode ove vrste danas su prihvatljive isključivo korištenjem elektroničkih računskih strojeva. Po svom konceptu razmatrani prijedlog metode pripada ovoj kategoriji.

c) razina III — Ta razina, danas još praktički samo teoretska kategorija, zasnovana je na metodama analize apsolutne pouzdanosti cjelokupnog sustava i konstrukcije uz pretpostavku o mogućnosti utvrđivanja i eliminacije svih vjerojatnosti pogrešaka. Takvim metodama još ne raspolažu ni vodeće svjetske institucije.

Primljeno: 28. XII. 1988.

Prihvaćeno: 6. III. 1989.

LITERATURA

- Car, T. (1987): Osnove logističkog sustava planiranja opreme za proizvodnju nafte i plina iz podmorja. *Nafta*, 38, 3, Zagreb.
- Car, T. (1988): Ocjena razine rizika i analiza sigurnosti za sustave proizvodnje nafte i plina iz podmorja. *Nafta*, 39, 1, Zagreb.
- Det norske Veritas (1977): Rules of the Design, Construction and Inspection of Offshore Structures. DNV, Oslo.
- Graff, W. J. (1981): Introduction to Offshore Structures. Gulf Publishing Company, Houston—London—Paris—Tokyo.
- Hsu, T. H. (1984): Applied Offshore Structural Engineering. Gulf Publishing Company, Houston — London—Paris—Tokyo.
- Kaarstad, O., Wulff, E. (1984): Safety Offshore. Universitets forlaget, Stavanger—Oslo—Bergen—Tromsø.
- Perišić, M. (1976): Predmet »Statistika« na post-diplomskim studijama za područje »Razrada naftnih i plinskih ležišta« i »Pridobivanje nafte i plina«. Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Zagreb.
- Petz, B. (1985): Osnovne statističke metode za nematematičare. SNL, Zagreb.

Structure Reliability for Underwater Activities, Statistical Aspect of Its Planning and Considerations

T. Car

This article discusses the method of using statistical approach to achieve quantitative indications of structure security and basic economics, criterion of their application, depending on construction reliability, i.e. directly upon the probability of error occurrence.

Such methodological procedure is performed in five phases.

1. Determination of value and probability of load distribution on the structure,

2. Determination of the nature and distribution probability of the structure constructure properties,

3. Evaluation of error probability in the construction and function of a structure,

4. Definition of project criteria of the security indications and ultimate conditions and

5. Determination of techno-economic optimum in structure use.

Each of the discussed phases is possible to be processed by some of the complex numerical evaluation methods using the electronical computer, but the criteria with absolute reliability in phase 4 are possible to be achieved only hypothetically. Turbulence of the world economic relations makes the achievement of absolute quantitative indications in phase 5 impossible. The discussed method as such can present just one of the complex project procedures or alternatives.