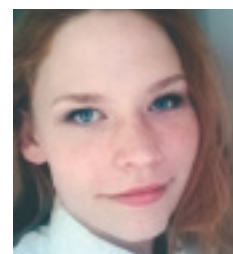


Razvoj rotirajućih upravljivih sustava za bušenje i njihova primjena u praksi

Rotary steerable systems development and their field applications

prof. dr. sc. Nediljka Gaurina Medimurec
Rudarsko-geološko-naftni fakultet
nediljka.gaurina-medjimurec@rgn.hr

Marina Hudoletnjak, mag. ing.
Fika Eco d.o.o.
marina.hudoletnjak94@gmail.com



Ključne riječi: rotirajući upravljivi sustavi, usmjerena bušotina, kut odklona od vertikalne, smjer kanala bušotine, putanja

Keywords: rotary steerable systems, directional well, deflection angle, azimuth, trajectory

Sažetak

Ovaj rad obrađuje razvoj rotirajućih upravljivih sustava za bušenje te opisuje njihovu primjenu na primjerima iz prakse. Navode se razlozi koji su potaknuli razvoj rotirajućih upravljivih sustava za bušenje, kao što su izrada usmjerenih bušotina i problemi povezani s njihovom izradom alatima korištenim prije pojave ovih sustava. U radu su opisani njihovi osnovni dijelovi te operativni principi, odnosno temeljna klasifikacija sustava. Kronološkim redom navedeni su neki od sustava izrađeni i korišteni od njihove pojave sredinom 90-ih godina prošlog stoljeća do danas kako bi se pokazale njihove prednosti i mane te napredak tehnologije. Naposljetku, obrađena su dva primjera primjene rotirajućih upravljivih sustava u praksi koji dokazuju njihovu primjenjivost i superiornost u danim uvjetima.

Abstract

This article elaborates the development of rotary steerable systems and their application in some cases in practice. Reasons for the development of rotary steerable systems such as directional drilling and problems related with the tools used before these systems were developed are stated. The article describes the components of the systems and their operational principles, which are the basis for their classification. Different rotary steerable systems that have been developed and used since their appearance in the mid-1990s to date are described in chronological order to show their strengths and weaknesses and also advances in technology. Finally, two examples of application of rotary steerable systems in practice have been described to demonstrate their applicability and superiority under given conditions.

1. Uvod

Danas se radi širenja područja istraživanja ugljikovodika na nepristupačne terene, duboko more te nekonvencionalna nalazišta nafte i plina sve češće izrađuju horizontalne i usmjerene bušotine velikog dosega

čija izrada nije moguća bez korištenja posebnih alata, uređaja i opreme. Primjer takvih sustava su i rotirajući upravljivi sustavi (engl. Rotary Steerable Systems, RSS) koji su razvijeni sredinom 90-ih godina prošlog stoljeća.

Prilikom izrade usmjerenih bušotina javljaju se specifični problemi uzrokovani oblikom putanje i utjecajem težine alata duž zakrivljenog dijela kanala bušotine (Inglis, 1987). S povećanjem kuta otklona putanje bušotine od vertikale, ti problemi postaju jače izraženi, što produljuje vrijeme potrebno za izradu kanala bušotine i posljedično ukupne troškove njene izrade. Neki od problema koji se često susreću pri bušenju usmjerenih bušotina su: problemi s postizanjem planirane putanje kanala bušotine, mogućnost kolizije s bliskim kanalima bušotina, stvaranje koljena i ključanica u kanalu bušotine, nestabilnost kanala bušotine, diferencijalni prihvat alatki te potreba za izradom novog kanala bušotine (Jones i drugi, 2018). Otežano čišćenje usmjerenog kanala bušotine glavni je uzrok većine navedenih problema. Usmjeravanje dlijeta, a time i kanala bušotine, može se postići korištenjem (Gaurina-Međimurec i drugi, 2017): klina za skretanje (engl. whipstock), mlaza isplake, rotirajućeg dubinskog bušačkog sklopa (engl. Bottom Hole Assembly, BHA), dubinskog motora i kosog prijelaza, te rotirajućeg upravljivog sustava. Pritom se moraju kontrolirati opterećenje na dlijeto i brzina rotacije (Gaurina-Međimurec, 2014). U ovom radu detaljnije se obrađuju samo rotirajući upravljivi sustavi i njihova primjena u praksi za rješavanje različitih problema, smanjenje neproduktivnog vremena i ukupnih troškova te povećanje proizvodnosti bušotina.

2. Kronološki razvoj rotirajućih upravljivih sustava

Rotirajući upravljivi sustavi počeli su se razvijati sredinom 90-ih godina prošlog stoljeća uslijed izrade sve većeg broja usmjerenih bušotina velikog dosega s predviđanjem rješavanja određenih problema kod njihove izrade uz ekonomske prednosti (Barr i drugi, 1995). Nakon pojave koncepta rotirajućih upravljivih sustava za bušenje, tvrtke koje se bave izradom sustava i opreme za bušenje počele su u suradnji s drugim tvrtkama bliskog područja interesa izrađivati, razvijati i testirati rotirajuće upravljive sustave. S primjenom sustava u različitim uvjetima, otkrivale su se njihove prednosti i ograničenja te su prilagođavani budućim primjenama.

Napredak tehnologije rotirajućih upravljivih sustava može se prikazati kroz primjere sustava izrađenih u

početnim fazama nakon njihove pojave. Iz tog razloga opisani su rotirajući upravljivi sustavi tvrtke Camco (razvijen 1995. godine), tvrtke Baker Hughes u suradnji s tvrtkom Agip S.p.A. (razvijen 1998. godine) te tvrtke Phoenix (razvijen 2001. godine). Također su prikazani sustavi za specifične uvjete kao što su ekonomski prihvatljiviji rotirajući upravljivi sustav (iz 2004. godine), rotirajući upravljivi sustav za izradu kanala bušotina s velikim porastom kuta otklona kanala od vertikale (iz 2009. godine) te rotirajući upravljivi sustav za izradu kanala malog promjera (izrađen 2010. godine).

Tvrtka Camco Drilling Group Ltd. je 1995. godine razvila i izgradila jedan od prvih rotirajućih upravljivih sustava za bušenje. Zbog inovativnog dizajna, eksperimentalni rotirajući upravljivi sustav je bio podložan određenim problemima, kao što su vibracije, promjenjiva opterećenja na aktuatorima, vrludanje dlijeta i povećani promjer kanala bušotine, te utjecaj isplake i čvrstih čestica u njoj na sustav. Mnoge potrebne komponente za izgradnju sustava kao što su aktuatori, kontrolni ventili, impeleri i prijenosnici zakretnog momenta nisu još bile dostupne, već su morale biti razvijene posebno za ovaj sustav. Sustav je izgrađen tek nakon opsežnih laboratorijskih ispitivanja svih navedenih komponenti te je korišten za izradu usmjerene bušotine, čime je dokazana njegova funkcionalnost. Na temelju prednosti i nedostataka ovog sustava nastavljen je daljnji razvoj rotirajućih upravljivih sustava za bušenje (Barr i drugi, 1995).

Prvi rotirajući upravljivi sustav „zatvorene petlje“ (engl. Rotary Closed Loop System, RCLS) razvijen je 1998. godine.

Sustav je trebao ispuniti sljedeće zahtjeve (Andreassen i drugi, 1998):

- imati sposobnost promjene smjera bušenja bez zaustavljanja rotacije niza bušačkog alata;
- biti integriran sustav, eliminirajući upotrebu zasebne MWD jedinice i isplačnog motora;
- osigurati komunikaciju s površinom tijekom bušenja;
- imati sposobnost promjene smjera bušenja prema zahtjevima s površine bez izvlačenja sustava na površinu na temelju mjerenja u bušotini.

Kut otklona i smjer bušotine za vrijeme rotacije bušačkog niza kontrolira se nerotirajućim rukavcem za upravljanje, koji je otpojen od rotirajućeg pogona sustava. U nerotirajućem rukavcu za upravljanje smješteni su: inklinometar, kontrolni elektronički uređaji i kontrolni ventili (Andreassen i drugi, 1998). Sustav ima mogućnost geoupravljanja zahvaljujući podacima: senzora kuta otklona dlijeta, gama karotaže i raspodjele

otpora u blizini dlijeta u realnom vremenu. Osim toga, rezultati standardnih mjerenja smjera i kuta otklona putanje kanala bušotine odašilju se u realnom vremenu na površinu. Primjenom u praksi sustav se pokazao uspješnim, smanjujući vrijeme potrebno za izradu višekanalne bušotine.

Još jedna u nizu inovacija u povijesti razvoja rotirajućih upravljivih sustava za bušenje bio je sustav naziva Well Director Automatic Directional Drilling System tvrtke Phoenix Technology Services LP. Iako je navedeni sustav već bio korišten u rudarskim projektima diljem Europe od sredine 80-ih godina prošlog stoljeća, tek je 2001. godine zahvaljujući određenim tehnološkim poboljšanjima postao komercijalno isplativ za korištenje u izradi usmjerenih bušotina u naftnom rudarstvu. Uz neke izvedene mehaničke preinake sustava kao što su: zamjena čeličnih dijelova ne-magnetskim da bi se dodao magnetometar, poboljšanje sustava za kompenzaciju tlaka u bušotini, povećanje protočnog kapaciteta i količini proizvedene energije za pogon uređaja, bio je potreban i razvoj softvera. Obzirom da je razvoj u tom pogledu ovisio o informatičkoj znanosti, rješavanje tog problema trebalo je pričekati (Buker, 2001). Međutim, principi na kojima radi ovaj sustav bili su dobri temelji za nadogradnju i poboljšanje rotirajućih upravljivih sustava te predstavljaju jedan od koraka u razvoju prema današnjim sustavima.

Problem kod rotirajućih upravljivih sustava na početku njihova razvoja kao nove tehnologije bilo je njihova visoka cijena, pa je njihovo korištenje bilo ekonomski opravdano samo u odobalnim bušotinama koje su izrađivale velike, bogate naftne kompanije. Kombinacijom jedinstvenog dizajna hidrauličkih i elektroničkih dijelova sustava i korištenjem izdržljivih, ali jeftinijih materijala za izradu, 2004. godine napravljen je cjenovno pristupačniji rotirajući sustav (Moody i drugi, 2004). Ovaj rotirajući upravljivi sustav mogao se koristiti i kao sustav koji usmjerava dlijeto guranjem i kao sustav koji dlijeto usmjerava pomoću zglobne osovine. Sustav nije imao stvarnu zglobnu osovinu, već je u tu svrhu iznad dlijeta bio dodan stabilizator koji je služio kao točka oslonca te tri aktivne i neovisne papučice (engl. blades) za usmjeravanje kanala bušotine smještene blizu dlijeta koje su osiguravale konstantnu protusilu na formaciju kroz koju se buši.

Iako su rotirajući upravljivi sustavi pogodniji za izradu bušotina velikog dosega zbog kvalitetnije i brže izrade kanala, dubinski volumetrijski isplačni motori (engl. Positive Displacement Mud Motors, PDM) većinom su ipak bili korišteni u bušotinama u kojima je planirano naglo skretanje kanala. Korištenjem

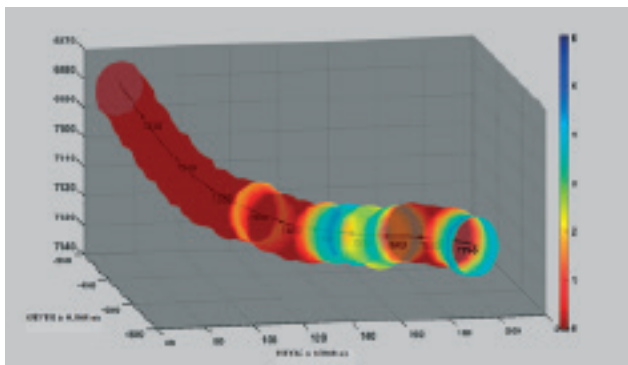
rotirajućih upravljivih sustava bilo je moguće izraditi npr. dionicu kanala bušotine promjera 215,9 mm (8½") čiji kut otklona od vertikale ne iznosi više od 6 do 8° na 30,48 metara (100 ft) duljine dionice, a za izradu zakrivljenijih dionica bilo je potrebno koristiti dubinske isplačne motore. Radi ranije navedenih prednosti rotirajućih upravljivih sustava, 2009. godine razvijen je sustav za bušenje pomoću kojeg se mogu izraditi zakrivljene dionice kanala bušotine s kutom otklona kanala u rasponu od 0 do 15° na 30,48 metara (100 ft) duljine kanala u svim tipovima stijena uz stalnu rotaciju s površine.

Sugiura i Jones (2010) su opisali razvoj rotirajućeg upravljivog sustava promjera 6¾" kojim se postiže velik kut otklona (12 do 15° na 30,48 metara (100 ft) duljine kanala) pri izradi kanala bušotina promjera 8½" i 8¾" kroz plinonosne škriljavce (engl. gas shale) u Sjevernoj Americi.

Prvi komercijalno dostupni rotirajući upravljivi sustavi za bušenje bili su izrađeni za izradu kanala bušotina promjera 215,9 mm (8½") i 311,2 mm (12¼"), no postojala je potreba za njihovim korištenjem pri izradi bušotina manjeg promjera. Izgradnja takvog rotirajućeg upravljivog sustava bila je kompleksna zbog veličine komponenti, mehaničke snage, zahtjeva otpornosti na djelovanje temperature i tlaka, ugrađenih senzora i cjelokupnog integriteta sustava. Rotirajući upravljivi sustav za bušenje malog promjera kanala bušotine ipak je napravljen 2010. godine tako da su moguće buduće prilagodbe donjeg dijela niza za geoupravljanje i pogon rotirajućeg upravljivog sustava dubinskim volumetrijskim isplačnim motorima (engl. PDM Powered RSS, PRSS). Promjer ovog sustava iznosio je 120,7 mm (4¾"). Glavna razlika između ovog i sustava većeg promjera bila je u promjeni položaja baterija izvan upravljačkog dijela sustava i pogona hidrauličke pumpe elektromotorom umjesto korištenja mehaničke pumpe (Jones i drugi, 2010). Nakon skoro tri desetljeća primjene rotirajući upravljivi sustavi se i dalje razvijaju kako bi omogućili sve zahtjevniju izradu bušotina velikog dosega (engl. Extended – Reach Well).

3. Vrste rotirajućih upravljivih sustava i princip rada

Rotirajući upravljivi sustavi omogućuju usmjeravanje dlijeta tijekom rotacije cjelokupnog bušačkog niza, čime se obično postiže veći napredak bušenja i kvalitetnija izrada kanala bušotine radi glatkih stijenci kanala (Gaurina-Međimurec, 2014). Primjenom rotacije s



Slika 1. Tortuozitet kanala bušotine (Drilling Contractor, 2015)

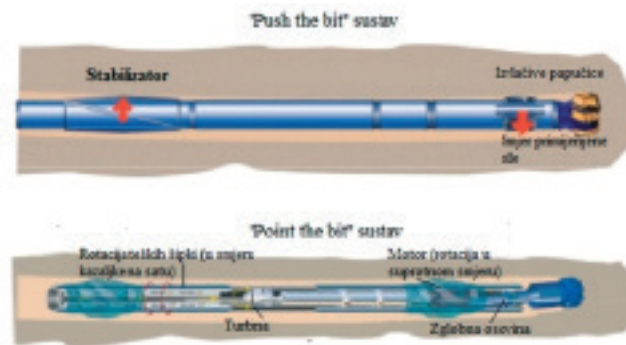
površine poboljšava se čišćenje kanala bušotine od krhotina razrušenih stijena, što je vrlo važno u dijelovima kanala otklonjenim od vertikale, a posebno u dugačkim horizontalnim dionicama. Za usporedbu, kod kliznog načina bušenja upravljivim motorom (nema rotacije niza bušačeg alata iznad motora), probleme stvara aksijalno i rotacijsko trenje između bušačeg alata i stijenke kanala bušotine. Aksijalno trenje otežava kontrolu nad stvarnim opterećenjem na dlijeto u usmjerenom kanalu bušotine, dok rotacijsko trenje i zakretni moment dlijeta u kombinaciji s uvijanjem bušačkih šipki zbog torzije otežavaju usmjeravanje lica dlijeta. Oba efekta povećavaju se s povećanjem lateralnog doseg bušotine, a u kombinaciji uzrokuju promjene smjera dlijeta što dovodi do tortuoziteta (vijugavosti) kanala bušotine, odnosno stvaranja čestih zavoja i koljena na malim intervalima duljine kao što je prikazano na slici 1.

Vijugavost i nagla iskrivljenja kanala bušotine često predstavljaju problem pri daljnjem bušenju zbog povećanja trenja, ali i poteškoće kod kasnijeg opremanja bušotine i pridobivanja ugljikovodika (Barr i drugi, 1995; Alrushud i drugi, 2018; Oliveira i drugi, 2018; Xue i drugi, 2019).

Rotirajući upravljivi sustavi za bušenje dijele se prema načinu usmjeravanja dlijeta, a time i kanala bušotine, na (Gaurina-Međimurec i drugi, 2017):

- sustav koji koristi metodu usmjeravanja dlijeta guranjem pomoću izvlačivih papučica (engl. Push-the-bit RSS),
- sustav koji koristi metodu usmjeravanja dlijeta pomoću zglobne osovine (engl. Point-the-bit RSS) i
- hibridni sustav (engl. Hybrid RSS).

Na slici 2 prikazani su rotirajući upravljivi sustav koji gura dlijeto pomoću izvlačivih papučica i sustav koji dlijetom upravlja preko zglobne osovine.



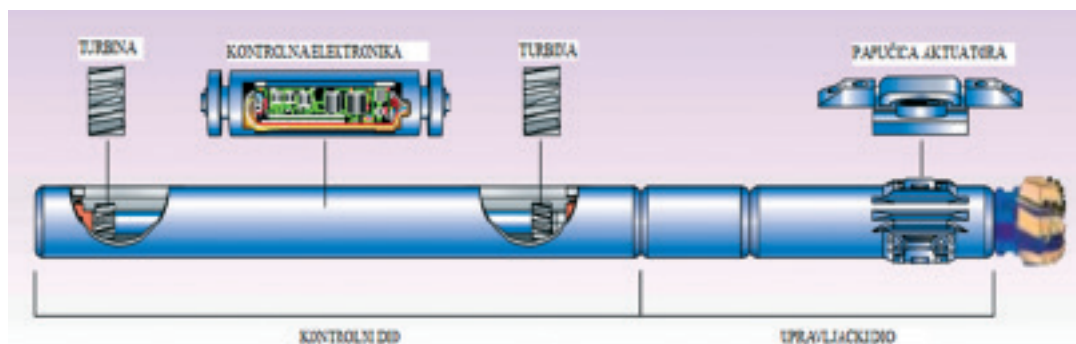
Slika 2. Inačice rotirajućih upravljivih sustava za usmjeravanje dlijeta (Saavedra, 2014)

Današnji komercijalno dostupni rotirajući upravljivi sustavi proizvode se za različite uvjete bušenja kao što su bušenje visokotemperaturnih bušotina i abrazivnih stijena, te izradu različitih dijelova kanala bušotina, kao što su vertikalni dijelovi kanala, dijelovi kanala velikog kuta otklona od vertikale i dijelovi kanala malog promjera.

3.1. Rotirajući upravljivi sustav koji usmjerava dlijeto guranjem

Kod sustava koji usmjerava dlijeto guranjem (engl. Push-the-bit RSS), dlijeto se usmjerava dodavanjem bočnog opterećenja upiranjem izvlačivih papučica (engl. pad), koje se nalaze iznad dlijeta, o stijenke kanala bušotine što omogućava bržu reakciju na promjene parametara. Za povećanje kuta otklona papučice se upiru o donju stijenku kanala, a za smanjenje kuta otklona o gornju stijenku kanala bušotine. Uspješnost usmjeravanja dlijeto direktno je povezana s kvalitetom stijenke kanala bušotine. Kod primjene ovog sustava postoji potreba za češćim popravljivanjem putanje zbog korištenja kraćih dlijeta koja lakše skreću te mogu stvoriti efekt spiralne bušotine. Najnovije inačice rotirajućih upravljivih sustava za bušenje ostvaruju konstantnu bočnu silu, slično klasičnim stabilizatorima (Gaurina-Međimurec, 2014).

Rotirajući upravljivi sustav koji usmjerava dlijeto guranjem sastoji se od upravljačkog i kontrolnog dijela, kao što je prikazano na slici 3. Upravljački dio sustava smješten je odmah iza dlijeta te služi za prenošenje sile na dlijeto u željenom smjeru dok istovremeno cijeli niz bušačkih alatki rotira. Kontrolni dio koji se nalazi iza upravljačkog, sadrži elektroničke komponente s vlastitim pogonom, senzore i kontrolni mehanizam koji daju podatke o prosječnoj jačini i smjeru bočnih opterećenja na dlijeto potrebnih za bušenje u željenom smjeru.



Slika 3. Dijelovi rotirajućeg upravljivog sustava koji usmjerava dlijeto guranjem (Downton i drugi, 2000)

Upravljački dio sustava usmjerava dlijeto pomoću papučica koje svojim izvlačenjem i upiranjem o stijenke kanala uzrokuju skretanje dlijeta u suprotnom smjeru. Upravljanje papučicama obavlja se kontroliranim protokom isplake kroz ventil koji reagira na razliku u tlaku isplake unutar upravljačkog dijela sustava i izvan njega. Na slici 4 prikazan je upravljački dio ovog tipa rotirajućeg upravljivog sustava.

Papučice sustava se izvlače oko 10 mm izvan kućišta sustava kod svake pune rotacije upravljačkog dijela sustava. Ulazno vratilo povezuje trostrani ventil s kontrolnim dijelom sustava kako bi se moglo kontrolirati gdje se nalazi točka upiranja. Kontrolni dio sustava održava odgovarajući kutni položaj ulaznog vratila ovisno o formaciji, a s kućištem je povezan ležajevima da bi mogao rotirati oko osi bušačkog alata. Opremljen je i turbinama koje proizvode električnu struju za pogon elektroničkih uređaja. Sustav se može unaprijed programirati na površini za željene smjerove i kuteve otklona. Praćenje smjera i kuta otklona kanala izvodi se pomoću MWD mjernog sklopa te pomoću senzora u kontrolnom dijelu sustava. U slučaju potrebe promjene parametara, signali o promjeni parametara mogu se

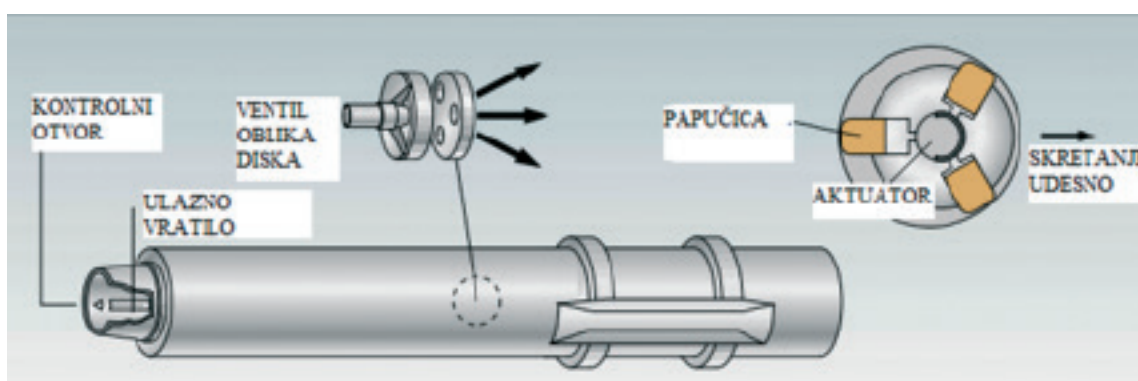
prenijeti s površine do sustava u obliku promjena u protoku isplake (Downton i drugi, 2000).

Clegg i drugi (2019) procjenjuju da je u SAD-u trenutno 72% bušotina izrađeno uz primjenu rotirajućih upravljivih sustava koji usmjeravaju dlijeto guranjem, a samo 21% uz primjenu rotirajućih upravljivih sustava koji usmjeravaju dlijeto pomoću zglobne osovine.

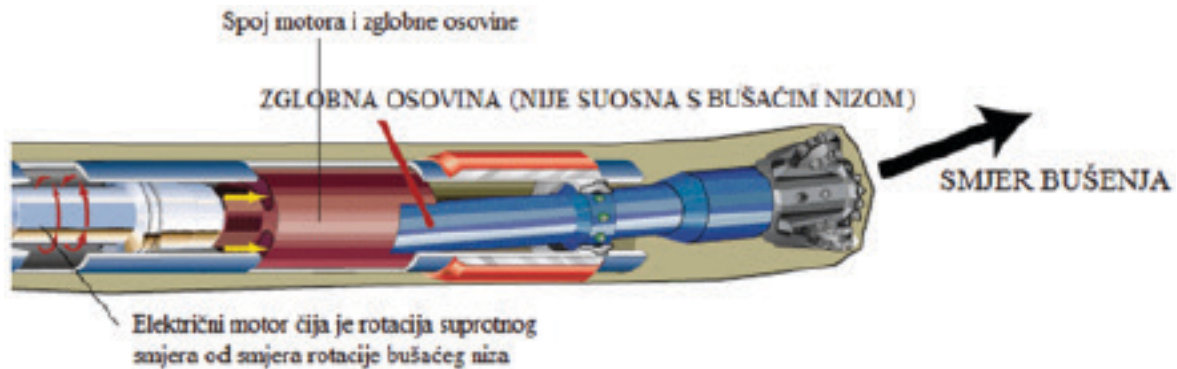
3.2. Rotirajući upravljivi sustav koji usmjerava dlijeto pomoću zglobne osovine

Sustav koji dlijetom upravlja preko zglobne osovine (engl. Point-the-bit RSS), sporije reagira na promjene parametara jer je lice dlijeta osovinom usmjereno u željenom smjeru, ali prednost mu je što koristi dulja dlijeta pa je smanjen efekt spiralnog kanala bušotine.

Eksperimentalni prototip ovih sustava napravljen je 1998. godine s tadašnjim MWD alatima, te je primjenom u nekoliko bušotina dokazano da je funkcionalan, ali da su potrebna određena poboljšanja. Radi toga su razvijeni softverski algoritmi za bolju kontrolu sustava u teškim uvjetima bušenja, elektroničke



Slika 4. Upravljački dio rotirajućeg upravljivog sustava koji usmjerava dlijeto guranjem (Downton i drugi, 2000)



Slika 5. Upravljački dio rotirajućeg upravljivog sustava koji dlijeto usmjerava pomoću zglobne osovine (Schaaf i drugi, 2000)

komponente napravljene su izdržljivijima, a poboljšan je i mehanički dizajn sustava radi veće pouzdanosti.

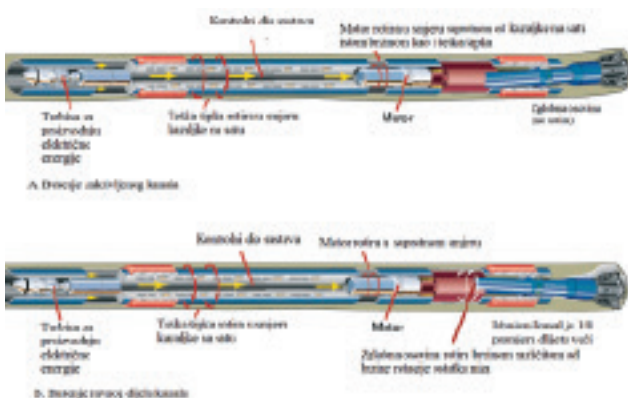
Sustav se sastoji od tri glavne komponente: upravljačkog dijela, kontrolnog dijela i dijela za proizvodnju električne energije potrebne za pogon elektroničkih uređaja. Upravljački dio prikazan je na slici 5.

Upravljački dio sustava sadrži univerzalni spoj koji omogućava prijenos okretnog momenta i opterećenja na dlijeto, ali dopušta osi dlijeta da bude pomaknuta pod nekim kutom u odnosu na os ostatka alata, te time omogućava kontrolu smjera putem kontakta s kanalom bušotine u tri točke. Osovinu dlijeta pod zadanim kutom održava vreteno. Tijekom rotacije teških šipki vreteno se održava stacionarnim pomoću elektromotora koji rotira u suprotnom smjeru. Kontrola i povratna veza s elektromotorom ostvaruju se putem kontrolnog dijela sustava koji se sastoji od elektroničkih uređaja za mjerenje i senzora. Senzori prate i rotaciju niza teških šipki i rotaciju elektromotora, te pružaju povratne informacije o smjeru i kutu odklona izrađivanog kanala bušotine. Dio sustava za proizvodnju električne energije sastoji se od turbine i alternatora (Schaaf i drugi, 2000).

Svi dijelovi ovog sustava, uključujući one koji su u kontaktu sa stijenkama kanala bušotine konstantno rotiraju, što uvelike poboljšava čišćenje kanala od krhotina razrušenih stijena, te smanjuje opasnost od diferencijalnog prihvata alata. Ukoliko se želi održavati smjer kanala bušotine (bez skretanja kanala), pogonska osovinu dlijeta rotira brzinom različitom od brzine rotacije ostatka niza (Schaaf i drugi, 2000). Na slici 6. sustav je prikazan u položaju za izradu zakrivljenog dijela kanala te dijela kanala bušotine bez porasta kuta odklona od vertikale.

3.3. Hibridni rotirajući upravljivi sustav

Hibridni rotirajući upravljivi sustav (engl. Hybrid RSS) koristi kombinaciju oba načina usmjeravanja dlijeta te ujedinjuje njihove prednosti (npr. PowerDrive Archer RSS tvrtke Schlumberger). Ovaj sustav ima 4 aktuatora klipa koji se odupiru o unutarnju stijenkama bušotine, što omogućava sustavu da se ponaša kao sustavi koji usmjeravaju dlijeto guranjem (Push-the-bit sustavi). Sustav ima unutarnji rotirajući ventil koji se održava geostacionarnim obzirom na lice dlijeta, a služi za preusmjeravanje dijela toka isplake na klipove za usmjeravanje. Isplaka aktivira klipove te se oni odupiru o unutarnju stijenkama rukavca. Kada se želi zadržati smjer i inklinacija pod kojim dlijeto buši, ventil konstantno rotira te se bočna sila na dlijeto jednakomjerno raspoređuje po obodu kanala bušotine. Mjerenja kao što je gama karotaža te mjerenje inklinacije i azimuta provode se blizu dlijeta te daju informacije o putanji kanala bušotine, koje



Slika 6. Rotirajući upravljivi sustav koji dlijeto usmjerava preko zglobne osovine u dva načina rada (Schaaf i drugi, 2000)



Slika 7. Hibridni rotirajući upravljivi sustav (Felczak i drugi, 2012)

se pomoću kontrolnog dijela sustava putem impulsa isplake prenose do površine i obratno. Obzirom da su sve pomične komponente sustava smještene unutar rukavca te samim time zaštićene od uvjeta u bušotini, manja je vjerojatnost njeogovog kvara ili oštećenja, što mu produže vijek trajanja (Felczak i drugi, 2012). Sustav je prikazan na slici 7.

Način rada i namjena rotirajućih upravljivih sustava poznatih tvrtki Halliburton (Geo-Pilot RSS), Schlumberger (PowerDrive RSS) i Baker Hughes (AutoTrak RSS) koji su trenutno prisutni na tržištu prikazani su u tablici 1. Operativne karakteristike nekih PowerDrive i AutoTrak rotirajućih upravljivih sustava prikazane su u tablici 2.

Tablica 1. Način rada i namjena Geo-Pilot, PowerDrive i AutoTrak rotirajućih upravljivih sustava (Halliburton, 2018; Baker Hughes, 2018; Schlumberger, 2019)

NAZIV	NAČIN RADA	NAMJENA
Geo-Pilot RSS tvrtke Halliburton (Halliburton, 2018)		
Geo-Pilot	Usmjeravanje dlijeta pomoću osovine (<i>engl. Point the bit</i>)	Precizno usmjeravanje kanala bušotine uz rotaciju bušačeg niza
Geo-Pilot XL		Ojačano kućište sustava za rad u teškim uvjetima
Geo-Pilot Dirigo		Postizanje velikog stupnja zakrivljenosti kanala bušotine velikog promjera
Geo-Pilot Duro		Duboko more i bušotine velikog dosega
Geo-Pilot GXT		Velika brzina bušenja
SOLAR Geo-Pilot XL		Ekstremni uvjeti tlaka i temperature (do 347°C i 207 MPa)
PowerDrive RSS tvrtke Schlumberger (Schlumberger, 2019)		
PowerDrive Xcel	Usmjeravanje dlijeta pomoću osovine	Visokoprofilirane usmjerene bušotine
PowerDrive Orbit	Guranje dlijeta	Velike rotacijske brzine
PowerDrive vortex Max	Kombinacija oba načina rada	Cjelokupno rotirajući sustav, veće brzine rotacije i veći okretni moment
PowerDrive ICE UltraHT	Guranje dlijeta	Uvjeti visoke temperature
PowerDrive Archer High Build Rate	Kombinacija oba načina rada	Bušotine kompleksnih putanja, velikog stupnja zakrivljenosti
PowerV Vertical Drilling	Guranje/usmjeravanje dlijeta	Vertikalne bušotine
PowerDrive Xceed Ruggedized	Usmjeravanje dlijeta pomoću osovine	Abrazivne i meke stijene, uvjeti visoke temperature
PowerDrive vortex Powered	Kombinacija oba načina rada	Veliko opterećenja na dlijeto i velik okretni moment
PowerDrive X6	Guranje dlijeta	Bušotine kompleksnih putanja
AutoTrak RSS tvrtke Baker Hughes (Baker Hughes, 2018)		
AutoTrak eXact	Guranje dlijeta (<i>engl. Push the bit</i>)	Svi uvjeti
AutoTrak Curve		Vrlo zakrivljene dionice kanala
AutoTrak G3		Uvjeti visoke temperature i tlaka, duboke bušotine
AutoTrak extreme		S integriranim motorom za povećanje snage na dlijetu
AutoTrak eXpress		Raskrivanje malih ležišta
AutoTrak V		Vertikalne dionice kanala bušotine

Tablica 2. Operativne karakteristike nekih PowerDrive i AutoTrak rotirajućih upravljivih sustava (Hawkins i drugi, 2013; Baker Hughes, 2018)

Parametar	PowerDrive RSS			AutoTrak RSS	
	Xcel	Orbit	Archer	eXact	G3
Promjer (mm)	171,5–228,6	120,7 –279,4	120,7–171,5	120,7–171,5	120,7–269,9
Duljina (m)	7,60 – 8,50	4,11 – 4,63	4,56 – 4,922	2,93 – 3,19	3,75 – 17,7
Maks. porast kuta otklona (°/30,48 m)	6,5 – 8	2 – 10	15 – 18	13 – 15	3 – 10
Maks. nateg (kN)	4448	1512 – 11.121	1210 – 1779	2100 – 3100	2100 – 6800
Maks. opt. na dljeto (kN)	245 – 334	138 – 1001	156 – 245	156 – 250	67 – 450
Maks. brzina rotacije (min ⁻¹)	350	220/350	350	400	300 – 400
Dobava (L/min)	984 – 6183	454 – 7571	492 – 2464	475 – 3407	300 – 6050
Maks. radni tlak (MPa)	137,9	137,9	137,9	172,5 – 207	138 – 207
Maks. radna temp. (°C)	150	150	150	150 – 165	125 – 175

4. Primjena rotirajućih upravljivih sustava u praksi

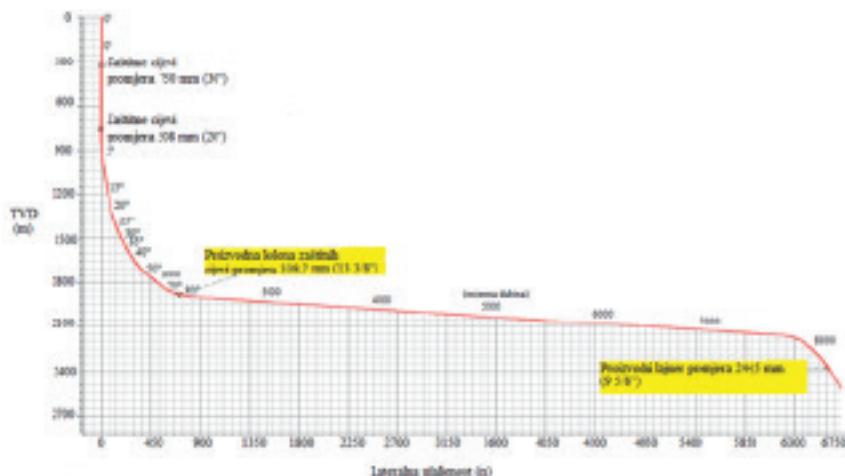
Rotirajući upravljivi sustavi za bušenje bili su primijenjeni pri izradi bočne (engl. re-entry) bušotine 33/9-C-16-A na polju Statfjord u Sjevernom moru (Hussain i drugi, 2017), čija je planirana putanja prikazana na slici 8.

Za izradu opisane bušotine bili su korišteni Schlumbergerovi PowerDrive Xceed rotirajući upravljivi sustavi. U kombinaciji s dijamantnim dljetima različitih promjera (engl. Polycrystalline Diamond Compact, PDC) izrađene su sve sekcije kanala bušotine osim početne vertikalne sekcije koja je već postojala te posljednje sekcije kanala, promjera 152,4 mm (6"). Bušotina je izrađena prema planiranoj putanji uz korištenje rotacijskog upravljivog sustava u zahtjevnim uvjetima bušenja. Nakon gotovo 500 sati rada u bušotini, rotirajući upravljivi sustav

nije bio pretjerano oštećen niti mu je smanjena funkcionalnost, što pokazuje njegovu izdržljivost. Također, zahvaljujući HIA (engl. Hold Inclination and Azimuth) načinu rada, tangentna sekcija kanala bušotine izrađena je bez većih promjena kuta otklona kanala bušotine.

Rotirajući upravljivi sustavi korišteni su i pri izradi naftne bušotine velikog dosega, mjerene dubine 6800 m i vertikalne dubine 2700 m (Jerez i drugi, 2013), čija je putanja prikazana na slici 9. Izrađena je u moru dubine 1000 m na zapadnoj obali Afrike, a svrha njene izrade bilo je crpljenje nafte iz nedosegnutog dijela ležišta. Duljina tangentne sekcije ove bušotine iznosila je 3400 m (Jerez i drugi, 2013).

Prilikom izrade ove bušotine bila je upitna sposobnost postizanja dovoljno velikog kuta otklona kanala bušotine od vertikale bez bušenja kanala povećanog promjera u mekim stijenama. Pri kraju tangencijalne sekcije bila je vrlo bitna i precizna kontrola opterećenja



Slika 8. Planirana putanja kanala bušotine 33/9-C-16A na polju Statfjord (Hussain i drugi, 2017)

Literatura

1. AL-ENEZI, D., GHOLOUM, S., AL-HAJERI, M., MOHAMMED, J., AL-ENEZI, R., DEORI, R., PANDYA, M., OMAR, M., AGAWANI, W., VALBUENA, F., ABDELHAMID, A.: Middle East Success Story with World's First Adaptive Drill Bit and Premium Rotary Steerable Technology. – SPE Asia Pacific Oil and Gas Conference and Exhibition, Brisbane, Australia, 2018, SPE-191869-18APOG-MS.
2. ALRUSHUD, A., MOHAMMAD, M., OLIVEIRA, V., ZAHRANI, B.: Effect of the Rotary Steerable System Steering Mechanism on Wellbore Tortuosity in Horizontal Wells. – Offshore Technology Conference Asia, Kuala Lumpur, Malaysia, 2018, OTC-28497-MS.
3. ANDREASSEN, E., BLIKRA, H., HJELLE, A., KVAMME, S. A., HUAGEN, J.: Rotary Steerable System Improves Reservoir Drilling Efficiency and Wellbore Placement in Statfjord Field. – IADC/SPE Drilling Conference, Dallas, Texas, 1998, IADC/SPE 39329, 313 – 326.
4. BARR, J. D., CLEGG, J. M., RUSSELL, M. K.: Steerable Rotary Drilling With an Experimental System. – SPE/IADC Drilling Conference, Amsterdam, Netherlands, 1995, SPE/IADC 29382, 435 – 450.
5. BUKER, M.: Advancements in Rotary Steerable Technology. – Petroleum Society's Canadian International Petroleum Conference, Calgary, Alberta, Canada, 2001, 2001-040-EA
6. CLEGG, J., MEJIA, C., FARLEY, S.: A Paradigm in Rotary Steerable Drilling – Market Demands Drive a New Solution. – SPE/IADC International Drilling Conference and Exhibition, The Hague, The Netherlands, 2019, SPE-194170-MS
7. DOWNTON, G., HENDRICKS, A., KLAUSEN, T. S., PAFITIS, D.: New Directions in Rotary Steerable Drilling. – Oilfield Review, Schlumberger, 2000, 18 – 29.
8. FELCZAK, E., TORRE, A., GODWIN, N. D., MANTLE, K., NAGANATHAN, S., HAWKINS, R., LI, K., JONES, S., SLAYDEN, F.: The Best of Both Worlds – A Hybrid Rotary Steerable System. – Oilfield Review, Schlumberger, 23, 4, 2012.
9. GAURINA-MEĐIMUREC, N., PAŠIĆ, B., MIJIĆ, P.: Nove tehnologije izrade naftnih i plinskih bušotina [*Oil and Gas New Drilling Technologies – in Croatian*]. – Croatian Academy of Engineering Yearbook 2016., Croatian Academy of Engineering, Zagreb, 2017, 101-127.
10. GAURINA-MEĐIMUREC, N.: Usmjereni bušenje [*Directional drilling – in Croatian*]., – Unpub. Presentation for Drilling 2 Class, Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering, University of Zagreb, Zagreb, 2014.
11. HYLAND, K. B., LAING, M., MATHIESON, G., O'NEILL, D., BOYCE, F., KEEN, A., TARN A., MILNE R.: HPHT Wells Spudded Utilising a Rotary Steerable System Below a 26-in × 36-in Hole Opener to Improve Tophole Drilling Performance. – IADC/SPE Drilling Conference and Exhibition, Fort Worth, Texas, USA, 2018, SPE-189639-MS
12. INGLIS, T. A.: Directional Drilling. – Petroleum Engineering and Development Studies, Volume 2, London, England, 1987, 272 p.
13. JEREZ, H., DIAS, R., TILLEY, J.: Offshore West Africa Deepwater ERD: Drilling Optimization Case History. – SPE/IADC Drilling Conference and Exhibition, Amsterdam, The Netherlands, 2013, SPE-163485-MS.
14. JONES, S., SUGIURA, J., DAS, P.: Design, Development and Testing of a Slimhole Rotary Steerable System. – CPS/SPE International Oil & Gas Conference and Exhibition, Beijing, China, 2010, SPE 130920.
15. JONES, S., SUGIURA, J., FEDDEMA, C., CHARTER, M.: A New Rotary-Steerable System Designed for Vertical and Nudge Applications in North America Pad Development Drilling. – IADC/SPE Drilling Conference and Exhibition, Fort Worth, Texas, USA, 2018, SPE-189705-MS.
16. MARAFI, A. A., AL MULAFY, M., SEKHRI, A., IQBAL, H., AL-BATENI, E., FARHI, N., GHONEIM, M., SAMIE, M., HAMIDA, M. B., KHIRFAN, M.: Novel Downhole Technology With a True Point-the-Bit Rotary Steerable System Delivers Significant Operational Improvement and Cost Savings in a Challenging Reactive Shale Formation: Case Study, Kuwait. – SPE Kingdom of Saudi Arabia Annual Technical Symposium and Exhibition, Dammam, Saudi Arabia, 2018, SPE-192399-MS.
17. MOODY, M., JONES, S., LEONARD, P.: Development & Field Testing of a Cost Effective Rotary Steerable System. – SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Houston, Texas, USA, 2004, SPE 90482.
18. OLIVEIRA, V., ZAHRANI, B., ALRUSHUD, A., MOHAMMAD, M.: Evaluating Wellbore Tortuosity in Horizontal Wells Caused by RSS Steering Mechanism. – SPE Kingdom of Saudi Arabia Annual Technical Symposium and Exhibition, Dammam, Saudi Arabia, 2018, SPE-192211-MS.
19. OMAR, M. G., YACOUB BOUSHAHRI, M., GHANIM, A., AL-OSAIMI, M., DIXIT, R., MUBARAK, S., TAQI, G., TAHA, M., ABDELHAMID, A., AGAWANI, W., LEE, R., VALBUENA, F. G.: Hybrid Drill Bit Technology Improves Build Up Rate Capabilities of RSS Tools and Eliminates Drilling Vibrations in Interbedded Carbonates. – Abu Dhabi International Petroleum Exhibition & Conference, Abu Dhabi, UAE, 2016, SPE-183173-MS.
20. SCHAAF, S., MALLARY, C. R., PAFITIS, D.: Point-the-Bit Rotary Steerable System: Theory and Field Results. – SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Dallas, Texas, USA, 2000, SPE 63247.
21. SUGIURA, J. & JONES, S.: Rotary Steerable System Enhances Drilling Performance on Horizontal Shale Wells. – International Oil and Gas Conference and Exhibition in China, Beijing, China, 2010, SPE-131357-MS.
22. TEREKULOV, O., SHAKUROV, R., SIROTIN, D.: New Kick-Off Procedure with RSS Reduces the Operation Time by 92%. Western Siberia Experience. – SPE Russian Petroleum Technology Conference, Moscow, Russia, 2018, SPE-191523-18RPTC-MS.
23. VORONIN, A., GILMANOV, Y., EREMEEV, D., DUBROVIN, A., ABALTUSOV, N., PERUNOV, A.: An Analysis of Rotary Steerable Systems for Sidetracking in Open Hole Fishbone Multilateral Wells in Vostochno-Messoyakhskoye Field. – SPE Russian Petroleum Technology Conference, Moscow, Russia, 2017, SPE-187702-MS.
24. XUE, Q., HUANG, L., WANG, J., LI, L., LIU, B.: The Specialty of Push-the-Bit Rotary Steerable Tool Dynamics. – SPE/IADC International Drilling Conference and Exhibition, The Hague, The Netherlands, 2019, SPE-194116-MS.

Web izvori

- BAKER HUGHES, 2018. – URL: <https://www.bakerhughes.com>)
- DRILLING CONTRACTOR, 2015. – URL: http://www.drillingcontractor.org/wpcontent/uploads/2015/01/3D_new2.png
- HALLIBURTON, 2018. – URL: <http://www.halliburton.com>
- SAAVEDRA, L. C., 2015. – URL: <https://image.slidesharecdn.com/cursodireccional-141130181654-conversion-gate01/95/curso-perforacion-direccional-31-638.jpg?cb=1417554845>
- SCHLUMBERGER, 2019. – URL: <http://www.slb.com>