

VYUŽITÍ MODELU BGM PŘI ŘÍZENÍ ÚROKOVÉHO RIZIKA V ČESKÉM PROSTŘEDÍ V OBDOBÍ PO FINANČNÍ KRIZI

Dana Cíchová Králová, Vysoká škola ekonomická v Praze

DOI: 10.18267/j.polek.1023

Úvod

Cílem tohoto článku je navržení přístupu k analýze vývoje úrokových měr pro účely řízení úrokového rizika v českém prostředí v současné době, tj. v období po globální finanční krizi, které se z globálního ale i z lokálního hlediska vyznačuje především výraznou expanzivní monetární politikou centrálních bank, včetně souvisejícího nárůstu likvidity na finančních trzích, snahou o regulaci finančních trhů a obecně exogenními zásahy do fungování finančních trhů. Dalším cílem tohoto článku je aplikace Brace-Gatarek-Musiellova modelu (dále jen BGM model) v českém prostředí. Vzhledem k nepříliš rozvinutému a méně likvidnímu českému finančnímu trhu ve srovnání s vyspělými a likvidními finančními trhy v USA nebo v Evropské unii (dále jen EU) a vyplývající neexistenci implikovaných volatilit korunových swapů¹ je v tomto článku navržen nový přístup k této problematice.

Je nutné zdůraznit, že model BGM, stejně jako převážná většina v současnosti používaných modelů úrokových měr, vznikl v době před finanční krizí, kdy na finančních trzích platily odlišné podmínky a vztahy mezi ekonomickými subjekty. Proto je důležité ověřit, zda je možné tento model používat pro účely řízení rizik i v období po finanční krizi a navíc aplikovaný na sazby českého trhu. Dále je nutné uvést, že BGM model byl primárně zkonstruován pro oceňování finančních derivátů navázaných na úrokové míry v rozvinutých ekonomikách s rozvinutými a likvidními finančními trhy. Použití modelu BGM pro účely řízení úrokového rizika portfolia aktiv či pasiv s horizontem držby do jejich splatnosti, tj. pro získání predikcí pravděpodobnostních rozdělení úrokových výdajů a příjmů portfolia, není v praxi pro jeho komplikovanost příliš obvyklé, nicméně dle mého názoru, podpořeného názorem kvantitativních analytiků předních světových bankovních institucí, je možné.

V tomto článku je uveden popis chování modelu BGM v obdobích, která jsou charakteristická různou mírou likviditního a kreditního rizika, stejně jako regulací trhu. Konkrétně jsou v něm analyzována období před začátkem finanční krize, finanční krize a po odeznění finanční a dluhové krize. Charakteristickým rysem finančních trhů v období po začátku finanční krize je zvýšená regulace trhu, nárůst likviditního

1 Možnost vstoupit do úrokového swapu. Výměnou za opční prémii získává kupující právo, ale ne povinnost, vstoupit do daného swapu s emitentem ke stanovenému budoucímu datu.

a kreditního rizika a odlišné vztahy mezi jednotlivými finančními instrumenty a účastníky trhu.

Článek je organizován následovně: V první části je uvedena stručná charakteristika vývoje likviditního a kreditního rizika na finančních trzích dle vývoje bazických spreadů mezibankovních sazeb typu ONIA a IBOR na korunovém i eurovém trhu. V této části je taktéž popsán vliv regulací trhů na jejich fungování. Druhá část článku popisuje volatilitu korunových a eurových úrokových sazeb pomocí modelu GARCH (Generalized AutoRegressive Conditional Heteroscedasticity) ve sledovaných obdobích a analyzuje vztah mezi vývojem volatility českého finančního trhu a volatilitou finančního trhu v eurozóně. V této části je taktéž popsán vývoj kotovaných volatilit swapů, kdy tyto volatility závisí především na aktuálních informacích obchodníků na rozdíl od volatilit získaných pomocí modelu GARCH, které závisí především na historickém vývoji úrokových sazeb. Ve třetí a čtvrté části článku je aplikován v současnosti pravděpodobně nejkomplexnější úrokový model, tzv. LIBOR market model nebo BGM model, který modeluje celou výnosovou křivku na rozdíl od modelů krátkodobé úrokové míry. Model BGM je nejprve aplikován v prostředí rozvinutého a likvidního finančního trhu eurozóny a poté v prostředí nedostatečně rozvinutého a relativně nelikvidního českého finančního trhu, což je spojeno s problémem neexistence kotovaných volatilit korunových swapů, které jsou potřeba k promítnutí aktuálních informací a očekávání do výsledných simulací úrokových sazeb. Simulace úrokových sazeb jsou pro každý trh provedeny pro každé uvažované období a následně jsou tyto simulace porovnány se skutečným vývojem sazeb. Poslední část článku shrnuje závěry učiněné v jeho předchozích částech.

Veškeré výpočty byly učiněny v softwaru Matlab a EViews.

1. Změna charakteru trhu

Poslední velká finanční krize začala v druhé polovině roku 2007 a způsobila otřesení důvěry v doposud známý finanční systém jako celek. Vztahy, které platily po desetiletí do počátku krize, byly najednou porušeny a finanční trh se začal chovat zcela odlišně oproti předpokladům, za nichž vznikaly populární úrokové modely. Například modely oceňující finanční aktiva byly konstruovány za předpokladů, že kreditní a likviditní riziko podkladového aktiva ovlivňuje cenu aktiva pouze marginálně. Nárůst likviditního a kreditního rizika lze dobře dokumentovat na vývoji tržních kotací jednoduchých, ale i složitějších úrokových instrumentů, jako např. swapů, depozit, úrokových forwardů nebo swapů, kde jsou vidět znatelné změny v charakteru jejich vývoje před krizí, tj. před polovinou roku 2007; v krizi, tj. mezi lety 2007–2011; a po krizi, tj. po roce 2011. Přibližně od poloviny roku 2007 vykazují primární úrokové sazby mezibankovního trhu vysoké bazické spready, tj. spready mezi stejně dlouhými instrumenty s rozdílnou frekvencí úročení. Stejný vývoj vykazují bazické spready zohledňující rozdíl mezi

mezibankovní sazbou IBOR, tj. EURIBOR (Euro InterBank Offered Rate²) v eurozóně nebo PRIBOR (Prague InterBank Offered Rate) v ČR, a OIS (Overnight Index Swap). OIS jsou klasické jednoduché úrokové swapy s jednou nohou fixně úročenou a jednou nohou úročenou variabilně v návaznosti na referenční sazbu EONIA (Euro OverNight Index Average³) v eurozóně nebo CZEONIA (CZEch OverNight Index Average⁴) v ČR. Vzhledem ke krátkému tenoru sazby ONIA lze považovat kreditní a likviditní riziko za minimální, což dělá z OIS swapů nejlepší aproximaci bezrizikových tržních sazeb mezi dostupnými sazbami na finančních trzích.

Vývoj šestiměsíční sazby (6M) PRIBOR a 6M CZK OIS, zobrazený na obrázku 1, dokumentuje, že vzhledem k relativně málo rozvinutému a nelikvidnímu finančnímu trhu v ČR jsou OIS denominované v CZK velmi nelikvidní a jejich použití pro finanční analýzy je nevhodné. Pokud by však český finanční trh byl více rozvinutý, bylo by dle mého názoru možné vzhledem k otevřenosti ekonomiky ČR očekávat podobný vývoj spreadů mezi sazbami PRIBOR a CZK OIS jako vývoj spreadů mezi sazbami EURIBOR a EUR OIS v eurozóně, který je zobrazen na obrázku 3. Tento obrázek zobrazuje bazické spready na krátkém konci výnosové křivky mezi sazbami šestiměsíční, dvanáctiměsíční EURIBOR a stejně dlouhými OIS swapy. Na delším konci výnosové křivky je na obrázku 3 dále zobrazen rozdíl mezi tříletým jednoduchým (plain vanilla) úrokovým swapem (dále jen IRS) s variabilně úročenou nohou navázanou na šestiměsíční EURIBOR a stejně dlouhým OIS swapem s variabilně úročenou nohou navázanou na sazbu EONIA. Z obrázku je patrné, že bazické spready ve všech třech zobrazovaných splatnostech vykazují podobný vývoj. Před zářím 2007 bazické spready oscilovaly ve velmi úzkém pásmu ± 5 b.b. (bazických bodů). Po září 2007 začaly vykazovat zvýšenou volatilitu a dosahovaly úrovně až 230 b.b. u šestiměsíční a dvanáctiměsíční splatnosti a až 85 b.b. u tříleté splatnosti. Po odeznění finanční krize v 2. polovině roku 2009 lze pozorovat pokles všech spreadů na úroveň cca 50–60 b.b. při zvýšené volatilitě těchto spreadů. Další výrazný nárůst všech spreadů lze pozorovat v průběhu roku 2011 a hlavně pak v první polovině roku 2012. V tomto období vrcholila v EU dluhová krize, kdy bylo zachraňováno Řecko, a reálně hrozilo, že o pomoc budou muset požádat také ostatní země na periferii Evropy, jako Itálie, Španělsko a Portugalsko. Uklidnění trhů přišlo po vytvoření záchranných programů EU a po vyhlášení neomezených nákupů dluhopisů postižených zemí na sekundárním trhu ze strany Evropské centrální banky (dále jen ECB). Od 2. poloviny roku 2012 se pohybují spready podobně jako před finanční krizí v úzkém intervalu širokém cca 10 b.b., avšak na úrovních o cca 30 b.b. vyšších než před krizí. Vývoj sazeb šestiměsíční EURIBOR a šestiměsíční OIS je zobrazen na obrázku 2.

2 Referenční úroková sazba pro mimoburzovní operace v eurozóně. Sazby EURIBOR jsou konstruovány jako průměrné indikace sazeb pro poskytnutí depozita příslušné splatnosti jiné bance v eurozóně referenční bankou. Celkem existuje 8 splatností nabízených depozit od 1 týdne do 1 roku.

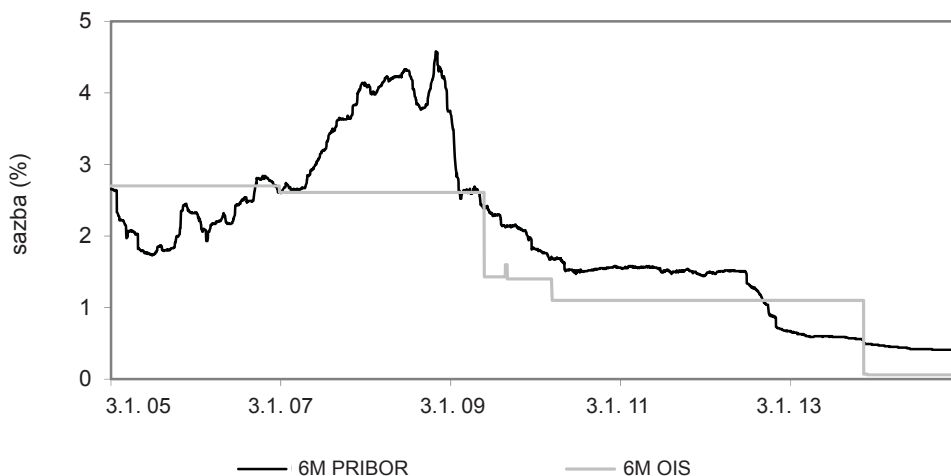
3 Referenční úroková sazba pro mimoburzovní operace v eurozóně. EONIA je konstruována podobně jako sazby EURIBOR pro poskytnutí depozita se splatností 1 den.

4 Vážený průměr úrokových sazeb všech nezajištěných jednodenních depozit uložených referenčními bankami na mezibankovním trhu.

Současný trend vedoucí k širšímu využívání OIS při aplikaci modelů úrokových měr je zřejmý, viz například Smith (2012). Nové přístupy v oceňování finančních derivátů, viz například v knize Bianchetti a Morini (2013), pracují většinou s již před krizí známými modely úrokových měr, které se upravují o vliv vývoje ceny kolaterálu, jelikož v rámci ISDA smluv, podle kterých jsou uzavírány derivátové transakce, se Credit Support Annex upravující kolateralizaci stal tržním standardem. Tyto úpravy ve spojitosti s využíváním OIS vedou k modelování několika křivek najednou. Pro praktické účely řízení úrokového rizika v českém prostředí je dle mého názoru využívání výše zmíněných přístupů nevhodné. Hlavním důvodem je fakt, že převážná část úrokové expozice státního dluhu ČR a českých finančních institucí je navázána na sazby typu PRIBOR a klasické IRS. Využívání nějakého typu aproximace CZK OIS kotací by vedlo ke zkreslení skutečného úrokového rizika, kterému jsou vystavena portfolia zmíněných institucí. Dále ani využívání kolateralizace finančních derivátů není v českých podmínkách na rozdíl od eurozóny běžné.

Obrázek 1

Vývoj 6M PRIBOR a 6M CZK OIS



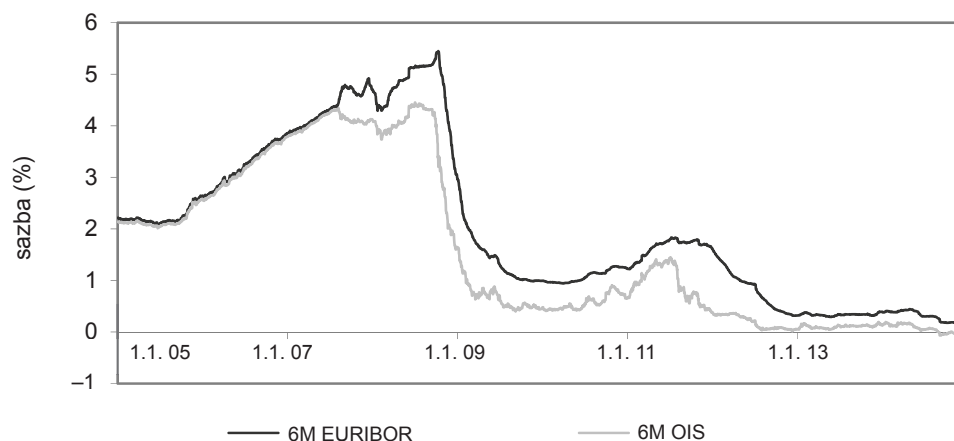
Zdroj: Bloomberg

Od roku 2008 dochází k různým formám ovlivnění přirozeného vývoje trhu v podobě zásahů ze strany centrálních bank a ostatních autorit. Nejsilnějším konvenčním nástrojem centrálních bank k ovlivnění mezibankovních sazeb je nastavení tzv. automatických facilit, tj. depozitní facilita pro depozita uložená u centrální banky a zápůjční facilita pro vypůjčení likvidity od centrální banky. Mimo konvenčně používané nástroje monetární politiky začaly centrální banky během finanční krize, stejně jako po jejím skončení, používat za účelem podpory ekonomiky a odvrácení hrozby deflace další mimořádné facility, jako např. měnové intervence u České národní banky (dále jen ČNB) nebo dodávání v podstatě neomezené likvidity do bankovního systému ve formě dlouhodobých refinančních operací, podstatné rozšíření cenných papírů přijímaných jako kolaterály, nákup dluhopisů na sekundárním trhu nebo i primárním

trhu, zavedení záporné depozitní sazby ve výši -10 b.b. v červnu 2014 a další snížení této sazby v září 2014 na -20 b.b. u ECB. V lednu 2015 rozšířila ECB nákupy aktiv o dluhopisy vládních institucí, neboli zavedla kvantitativní uvolňování, v předpokládaném měsíčním objemu do 60 mld. EUR minimálně do září 2016. Již před zahájením kvantitativního uvolňování bylo v systému poměrně velké množství volné likvidity, která buďto skončila zpět na účtech ECB, nebo způsobovala růst finančních aktiv a související pokles výnosů dluhopisů bez ohledu na rizika emitenta. Pro vyhodnocení dopadů kvantitativního uvolňování na ekonomiku eurozóny je však příliš brzy.

Obrázek 2

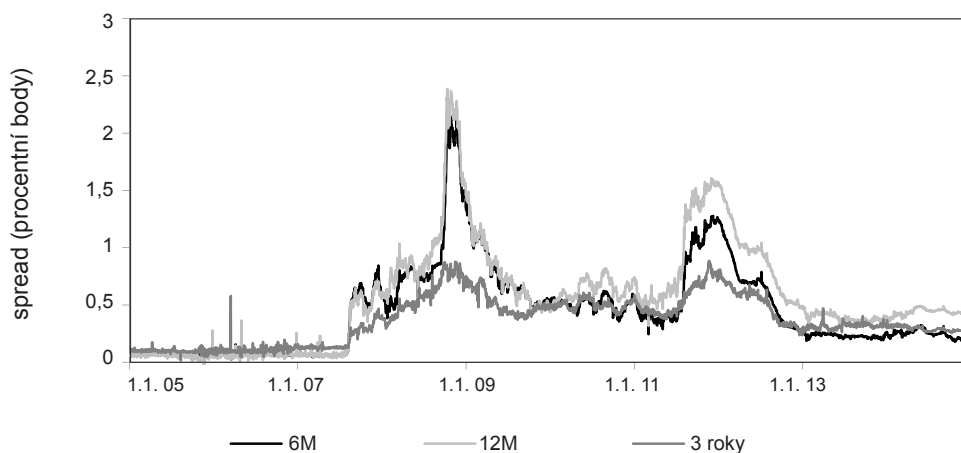
Vývoj 6M EURIBOR a 6M EUR OIS



Zdroj: Bloomberg

Obrázek 3

Vývoj spreadu mezi 6M, 12M EURIBOR, tříletým IRS a stejně dlouhými OIS



Zdroj: Bloomberg a vlastní výpočty

ČNB po rychlém snížení základních úrokových sazeb (dvoutýdenní repo) v roce 2012 na technickou nulu, čímž byl vyčerpán potenciál primárního nástroje monetární politiky, vyhlásila v listopadu 2013 zahájení intervencí proti koruně nastavením capu⁵ na korunu s realizačním kurzem (strikem) na úrovni 27,0 Kč za euro, zatímco floor⁶ nebyl nastaven. To znamená, že ČNB nechá korunu libovolně oslabovat nad úroveň 27,0 Kč za euro, avšak při posílení koruny pod hranici 27,0 Kč za euro začne nakupovat eura za „natištěné“ koruny, čímž oslabí kurz koruny. Tímto vyhlášením došlo k jednorázovému skokovému oslabení koruny vůči euru z úrovně cca 25,5 na 27,0, kde se až na několik výjimek obchoduje z důvodu pokračování intervencí v pásmu 27,0 až 28,0. Původní vyhlášení intervencí počítalo s jejich ukončením v roce 2014. V červnu 2014 však ČNB prodloužila trvání intervencí nejméně do roku 2016. I když na rozdíl od eurozóny ČNB z trhu likviditu dlouhodobě stahuje, díky intervencím likviditu do trhu dodává. V týdnu zahájení intervencí proti koruně se zvýšily závazky ČNB vůči domácím bankám o 44 % v absolutním vyjádření pak o cca 200 mld. korun, což znamená, že v tomto týdnu přibyla do systému nová likvidita minimálně v téže výši. Přebytek likvidity v systému působí další pokles výnosů korunových státních dluhopisů, kdy v 1. čtvrtletí 2015 proběhly na elektronické platformě pro obchodování státních dluhopisů MTS obchody s dvouletým dluhopisem za záporný výnos do splatnosti. O nárůstu likvidity svědčí i vývoj agregátu M2, který se v eurozóně mezi lety 2002 a 2014 zvýšil cca o 100 %, zatímco v ČR o 150 %. I když se na začátku roku 2015 jeví, že v ČR dochází k oživení ekonomického vývoje, s hodnocením intervencí je potřeba ještě posečkat. Důležitá bude zejména forma opuštění tohoto programu. V případě ukončení devizových intervencí Swiss National Bank v lednu 2015 došlo k posílení švýcarského franku vůči euru o více než 30 % během několika málo minut a rozkolísání devizových trhů na několik měsíců.

Dopady devizových operací centrálních bank na finanční trhy a na ekonomiku ve státech, kde centrální banky používají nebo použily tento nástroj monetární politiky, jako např. v Maďarsku, České republice, Izraeli, Hongkongu, Chile, se zabývá kompilát BIS (2013). Součástí tohoto kompilátu je i příspěvek Lízala a Schwartze (2013), který přijímá nikoli neočekávaný⁷ závěr, že v podmínkách ČR jsou devizové intervence nejefektivnější cestou k dosažení inflačního cíle. Fratzscher *et al.* (2014) v analýze politiky ECB na finanční trhy v letech 2007–2013 přijímají závěr, že po finanční krizi došlo v důsledku nekonvenční monetární politiky ECB k výraznému zvýšení cen

5 Opční instrument se závazkem prodávajícího plnit rozdíl mezi aktuální a realizační cenou v případě požádání kupujícího. Za právo požadovat toto plnění zaplatí kupující prodávajícímu prémii. V praxi požaduje kupující plnění pouze v případě růstu aktuální ceny nad úroveň realizační ceny. Závazek ČNB při nákupu eura za českou korunu při posílení kurzu pod 27,0 Kč v podstatě znamená prodej capu s realizačním kurzem na úrovni 27 ze strany ČNB, přičemž držitel eur získává právo požadovat plnění bez nutnosti zaplacení premie.

6 Opční instrument se závazkem prodávajícího plnit rozdíl mezi realizační a aktuální cenou v případě požádání kupujícího. Za právo požadovat toto plnění zaplatí kupující prodávajícímu prémii. V praxi požaduje kupující plnění pouze v případě poklesu aktuální ceny pod úroveň realizační ceny.

7 Lubomír Lízal je člen bankovní rady ČNB a je zastáncem oprávněnosti devizových intervencí ČNB.

finančních aktiv a současnému snížení rizikové premie hlavně na trzích v eurozóně a z části i na globálních trzích.

Obecně lze říci, že zásahy centrálních bank a jejich bezprecedentní expanzivní monetární politika po roce 2008 zásadním způsobem ovlivňují nejen úrokové sazby a výnosy dluhopisů po celé délce výnosové křivky, které neustále prohlubují svá historická minima, ale i cenu všech ostatních finančních aktiv, jako např. měnových párů, akcií či komodit.

Další velmi důležité faktory, které silně ovlivňují vývoj tržních cen aktiv, jsou snahy o regulaci finančních trhů, jako např. zákazy prodeje nakrátko (short sell) některých aktiv, zavedení směrnic typu EMIR (European Market Infrastructure Regulation) nebo požadavky typu BASEL na kapitálovou přiměřenost bank.

Výše popsané exogenní zásahy do fungování finančních trhů znamenají velmi složité prostředí pro aplikaci jakýchkoliv finančních modelů, neboť více než popisovat statistické závislosti mezi jednotlivými proměnnými, které byly platné v historii, je vhodné předpovídat chování centrálních bankéřů a ostatních finančních autorit.

2. Volatilita trhů

V této části se zaměřím na volatilitu sazeb peněžního trhu v EUR i CZK, protože spolu s nárůstem likviditního a kreditního rizika lze pravděpodobně pozorovat i změny ve vývoji volatility jednotlivých úrokových sazeb tvořících výnosovou křivku peněžního trhu. V rámci této části se taktéž zaměřím na srovnání vývoje volatility mezi EUR a CZK trhem. Pro modelování volatility obou trhů použiji model GARCH. Pro úplnost uvádím, že popisem vývoje volatility konkrétní sazby získám popis volatility jednoho konkrétního bodu na příslušné výnosové křivce.

Model ARCH (AutoRegressive Conditional Heteroscedasticity), aplikovaný Englem (1982) na modelování inflace ve Velké Británii, položil základní kámen rozsáhlé třídě modelů, které charakterizují podmíněnou volatilitu. Jejich význam spočívá v tom, že umožňují zachytit měnící se podmínky nejistoty na trhu. Do této třídy modelů patří i model GARCH (Generalized ARCH), který odstraňuje některé nedostatky základního modelu ARCH. Model GARCH(m, s) má tvar

$$y_t = \mu_t + e_t, \quad e_t = \sigma_t \varepsilon_t, \quad \sigma_t^2 = \alpha_0 + \sum_{i=1}^m \alpha_i e_{t-i}^2 + \sum_{j=1}^s \beta_j \sigma_{t-j}^2, \quad (1)$$

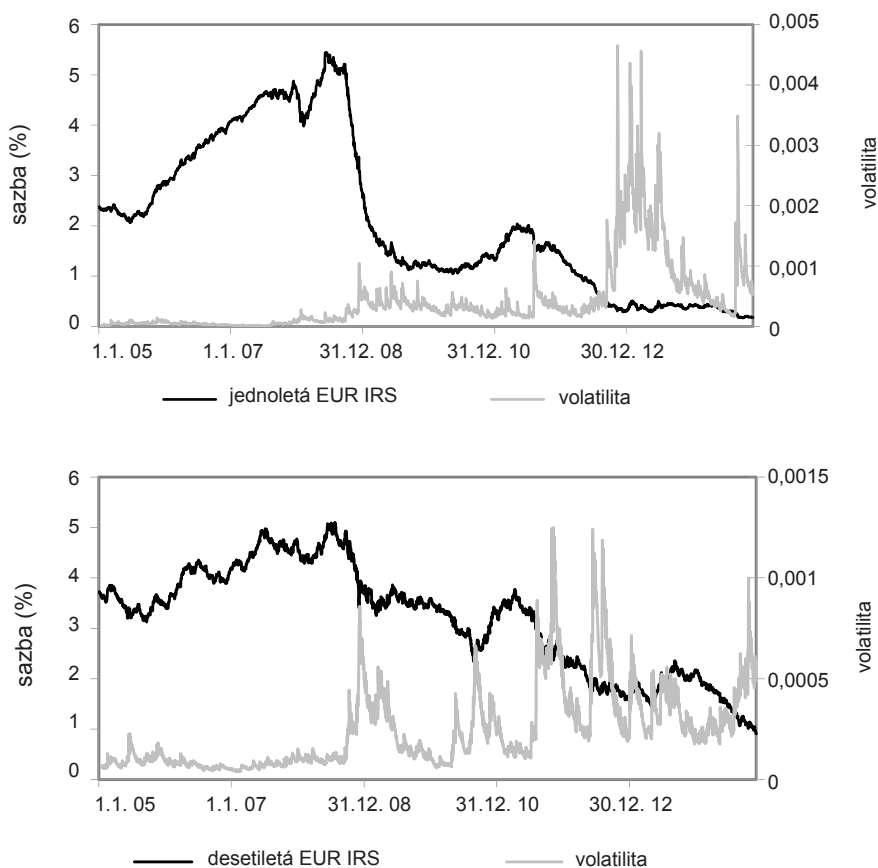
kde y_t je časová řada, μ_t označuje podmíněnou střední hodnotu a σ_t^2 představuje podmíněný rozptyl. Podmíněná střední hodnota μ_t je modelována pomocí vhodné rovnice střední hodnoty, která je obvykle lineární, často se jedná o lineární regresní model nebo ARMA (AutoRegressive Moving Average) proces. Dále v rovnici figurují odchylky od podmíněné střední hodnoty e_t , které jsou nekorelované stejně rozdělené náhodné veličiny s nulovou střední hodnotou, a ε_t značí nezávislé stejně rozdělené náhodné veličiny s nulovou střední hodnotou a jednotkovým rozptylem. Parametry modelu α_i, β_j splňují následující omezení

$$\alpha_0 > 0, \alpha_i \geq 0, \beta_j \geq 0, \sum_{i=1}^{\max(m,s)} (\alpha_i + \beta_i) < 1, \quad (2)$$

kde poslední nerovnost je postačující podmínkou pro existenci rozptylu σ_t^2 . Informace o modelování volatility jsem čerpala z knihy Arlt a Arltová (2009).

Obrázek 4

Vývoj volatility jednoletého a desetiletého EUR IRS



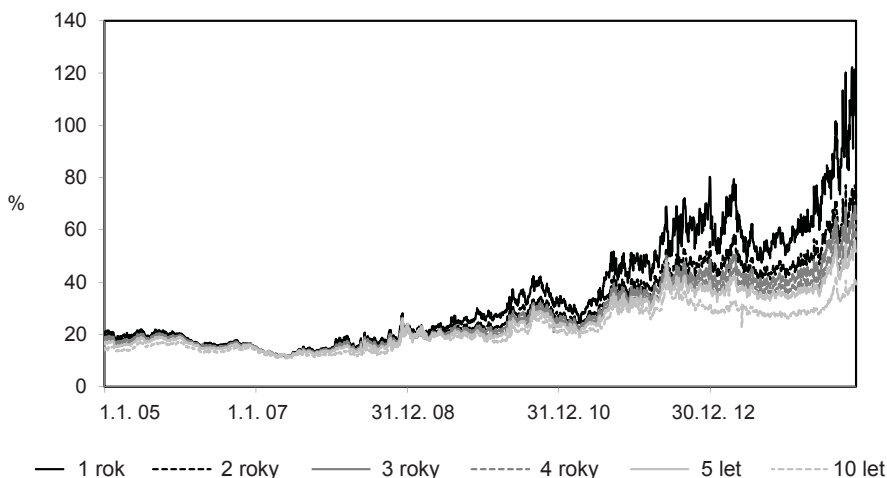
Zdroj: Bloomberg a vlastní výpočty

Na obrázku 4 jsou zobrazeny volatility jednoleté a desetileté EUR IRS sazby modelované pomocí modelu GARCH, ze kterých je patrné, že volatilita úrokových sazeb se před začátkem finanční krize vyvíjela odlišně oproti období po krizi. Volatilita sazeb před finanční krizí je ve srovnání s obdobím po krizi poměrně nízká a pohybovala se v relativně úzkém koridoru. V průběhu roku 2008 lze pozorovat výrazný několikanásobný nárůst volatility oproti období před rokem 2008. Je zajímavé,

že ačkoliv bazické spready EURIBOR–OIS vykazovaly nervozitu trhů již od září 2007, volatilita sazeb reaguje na tyto změny pomaleji, což lze pozorovat hlavně u jednoleté EUR IRS sazby, kdy hodnota volatility sice od první poloviny roku 2007 roste, avšak na úroveň vyšší než v roce 2005 se dostane až v druhé polovině roku 2008. Vysokou nervozitu trhů dle vývoje volatility lze pozorovat u jednoleté i desetileté EUR IRS sazby po krachu Lehman Brothers v září 2008. Zajímavé však je, že volatilita úrokových sazeb se po odeznění finanční krize nesnížila, ale naopak vzrostla, a v současné době se i po znatelném uklidnění nervozity trhů pohybuje zejména u desetileté EUR IRS sazby v průměru na svých maximálních hodnotách, což je cca o 300% více oproti úrovním před finanční krizí. Volatilita jednoleté EUR IRS sazby se po odeznění finanční krize během první poloviny roku 2013 prudce zvýšila na přibližně čtyřnásobek svých úrovní z období finanční krize, poté rychle klesla pod své úrovně z období finanční krize a na podzim 2014 opět skokově narostla na úroveň vyšší než v období finanční krize, avšak nižší než v roce 2013. Pomocí modelu GARCH jsem dále popsala volatilitu ostatních splatností EUR IRS s podobnými závěry jako u vývoje volatility desetileté EUR IRS sazby.

Obrázek 5

Vývoj kotací volatilit evropských ATM EUR swapcí

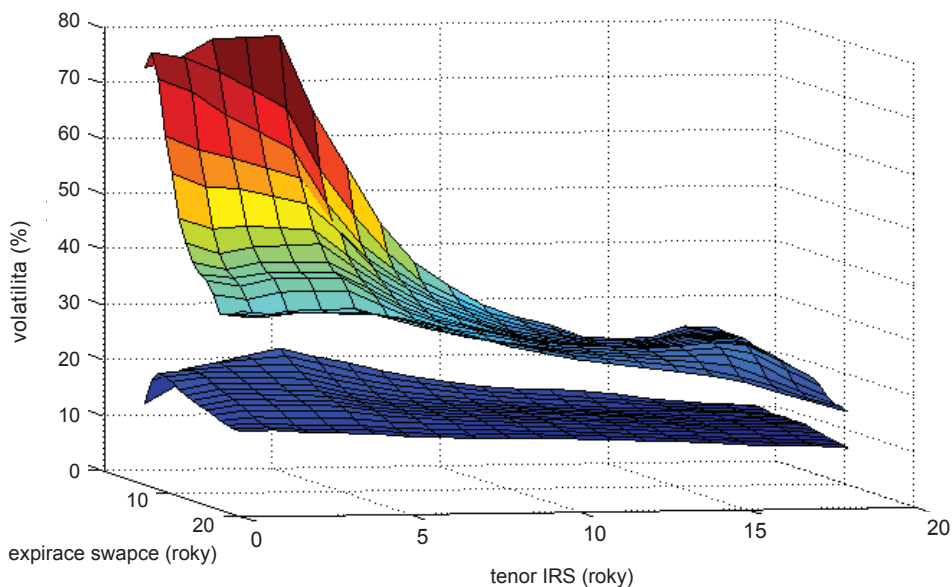


Poznámka: Kotované Blackovy volatility evropských ATM swapcí s podkladovým EUR IRS s datem expirace 3 roky a délkou IRS 1, 2, 3, 4, 5, a 10 let.

Zdroj: Bloomberg

Obrázek 6

Kotace volatilit evropských ATM EUR swapcí k 1. 10. 2005 a k 1. 10. 2012



Poznámka: Kotované Blackovy volatility evropských ATM swapcí s podkladovým EUR IRS. Expirace swapcí je zobrazena na ose x, délka podkladového IRS je zobrazena na ose y. Spodní plocha zobrazuje matici volatilit kotovaných ke dni 1. 10. 2005, horní plocha zobrazuje matici volatilit kotovaných ke dni 1. 10. 2012.

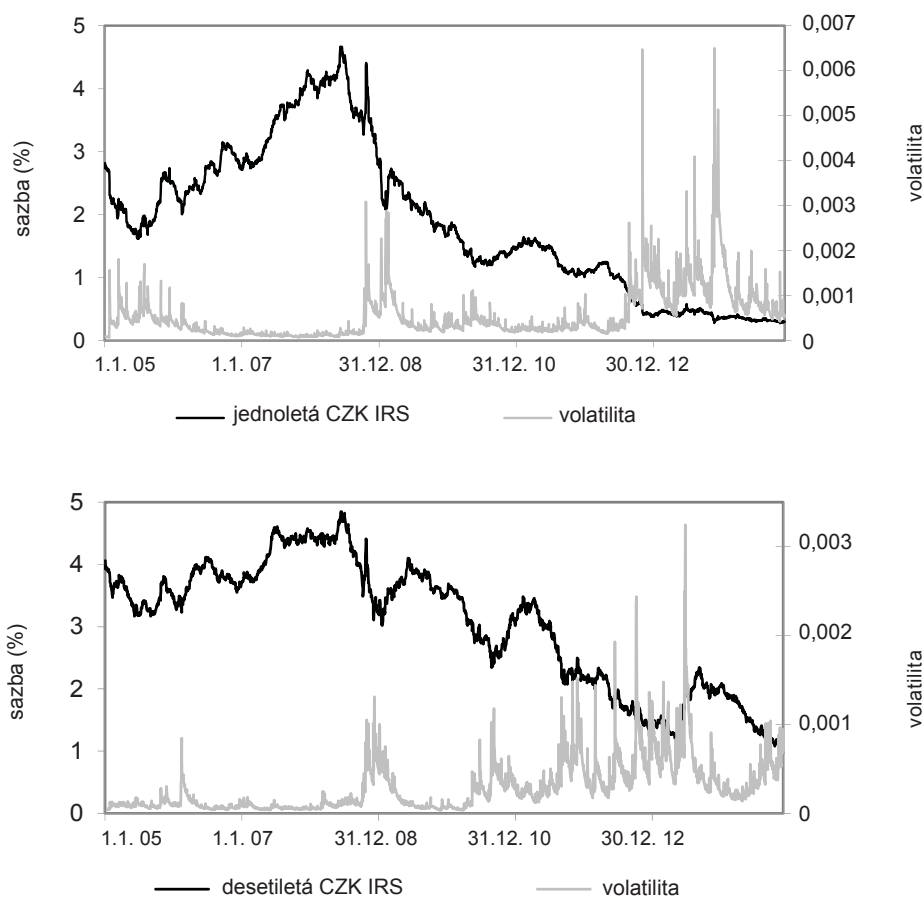
Zdroj: Bloomberg

Výše popsany vývoj volatilit EUR IRS sazeb získaný pomocí modelu GARCH je částečně konzistentní s vývojem kotací volatilit swapcí. Obrázek 5 zobrazuje kotace Blackových volatilit evropských at-the-money (dále jen ATM) swapcí s datem expirace 3 roky a délkou podkladového EUR IRS od 1 roku do 10 let. I z těchto tržních kotací je patrné, že volatilita swapcí spojených s příslušnými podkladovými IRS všech zobrazených délek se nacházejí po odeznění finanční krize na několikanásobně vyšších úrovních oproti jejich úrovním před finanční krizí. V roce 2014 se nacházejí kotované volatilita na svých maximálních úrovních. Dále je patrné, že s delší dobou do expirace podkladového IRS kótovaná volatilita klesá. Je nutné připomenout, že zatímco volatilita modelované pomocí GARCH jsou založené na historických pozorováních, kotované volatilita v sobě obsahují pouze aktuální očekávání obchodníků se swapci (volatilita swapcí kotuje např. mezibankovní broker ICAP). Uvedené vlastnosti volatilit dokumentuje i obrázek 6, který zobrazuje celou matici kotací Blackových volatilit ATM evropských swapcí k 1. říjnu 2005 a k 1. říjnu 2012. Z obrázku je jasné patrný posun celé plochy volatilit směrem k vyšším úrovním, matice kotací volatilit k pozdějšímu datu dosahuje vyšších hodnot. Obecně lze říci, že při relativně normálních situacích na trhu klesá volatilita swapcí spolu s prodlužující se délkou podkladového IRS, stejně jako s prodlužující se dobou do expirace swapce.

Vysoké úrovně kotací volatilit swapcí po ukončení finanční krize částečně souvisí, dle mého názoru, s historickou zkušeností obchodníků, kteří se do svých kotací volatilit reflektují zkušenosti z finanční krize, umocněnou vysokou nejistotou pramenící ze zásahů centrálních bank a snahy autorit o regulace finančních trhů, neboť pro obchodníky je značně rizikové předpovědět chování politiků a centrálních bankéřů. V neposlední řadě je vysoká volatilita swapcí pravděpodobně způsobena i samotnými úrokovými sazbami nacházejícími se na historicky nejnižších úrovních, kdy i relativně malá změna absolutní úrovně sazby v rámci minimálního možného přírůstku kotace znamená relativně vysokou procentuální změnu oproti situaci, kdy se absolutní úrovně úrokových sazeb nacházely na několikanásobně vyšších úrovních.

Obrázek 7

Vývoj volatility jednoletého a desetiletého CZK IRS



Zdroj: Bloomberg a vlastní výpočty

Na obrázku 7 jsou zobrazeny volatility jednoleté a desetileté CZK IRS sazby, které byly modelovány stejně jako v případě EUR IRS modelem GARCH. Ve srovnání s vývojem volatility EUR IRS stejné splatnosti dosahuje volatilita hlavně jednoleté CZK IRS sazby během roku 2005 výrazně vyšších úrovní. Stejně tak na počátku roku 2009 po krachu Lehman Brothers v září 2008 byla průměrná volatilita jednoleté CZK IRS sazby vyšší o cca 50 % než volatilita stejné sazby v EUR. Naopak po odeznění finanční krize se průměrná volatilita CZK IRS sazby snížila a dostala se na úroveň průměrné volatility EUR IRS v tomto období. V případě volatility desetileté CZK IRS sazby se její vývoj před rokem 2008 podobá vývoji volatility EUR IRS sazby s tím rozdílem, že pravděpodobně z důvodu nedostatečné likvidity nabývají maximální volatility CZK IRS vyšších hodnot než volatility EUR IRS, avšak v průměru se nacházejí na podobných úrovních. V průběhu finanční krize lze u obou splatností opět pozorovat vyšší maxima u volatility CZK IRS, avšak průměrná volatilita desetileté CZK IRS sazby se během finanční krize nachází na podobných úrovních jako průměrná volatilita EUR IRS sazby. V období po finanční krizi vzrostla průměrná volatilita desetileté CZK i EUR IRS sazby na vyšší úroveň než v průběhu finanční krize.

3. BGM model

V této části popíšeme dynamiku výnosové křivky pomocí BGM modelu, který je mezi kvantitativními analytiky velmi populární a často užívaný. Jak již bylo zmíněno, hlavní využití modelu spočívá v oceňování derivátů navázaných na úrokovou míru. Tento model vytvořili v roce 1994 Miltersen *et al.* (1997), poté v roce 1995 model vylepšili do podoby aplikovatelné v praxi Brace *et al.* (1997). Do současné podoby model upravil Jamshidian (1997), přičemž využil abstraktní formulaci z článku Musiela a Rutkowski (1997).

Řada $0 = T_0 < T_1 < \dots < T_m$ značí posloupnost časových okamžiků, kde vzdálenost mezi sousedními okamžiky je konstantní. Forwardovou úrokovou míru v čase t pro období $[T_{n-1}, T_n]$ označme $L_n(t)$. V modelu BGM se forwardová úroková míra v rizikově neutrálním prostředí řídí procesem:

$$dL_n(t) = L_n(t)\gamma_n(t) \cdot dW_n(t), \quad (3)$$

kde deterministická funkce $\gamma_n(t)$ je volatilita příslušné forwardové míry a $W_n(t)$ označuje Wienerův proces pod danou forwardovou mírou. Důkladný popis teorie a odvození modelu BGM lze nalézt například v Brace *et al.* (1997). V tomto článku jsem se zaměřila především na aplikaci modelu, při níž jsem poznatky čerpala z knihy Gatarek *et al.* (2007).

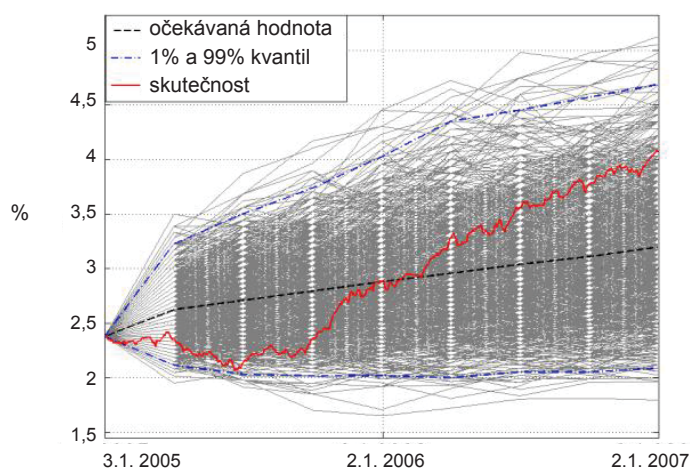
Pro modelování forwardových sazeb podle BGM modelu je třeba nejprve odhadnout jejich volatility. Ke kalibraci se obvykle využívají jako vstupní data volatility capů či swapů. Algoritmů kalibrace je celá řada, viz například Rebonato (2002) či Brigo *et al.* (2005). Zde je zvolen lokálně jednofaktorový přístup, který využívá aktuální volatility swapů a předpokládá, že volatility jsou v daných časových intervalech konstantní. Touto metodou se získají odhady volatility forwardových sazeb $\gamma_n(t)$. Vstupními daty

jsou volatility swapcí a spotové sazby peněžního trhu. Pro aproximaci chybějících hodnot vstupních dat je použita nelineární regrese, detailnější popis této regrese se nachází v Bertocchi *et al.* (2000). Simulace jsou generovány na základě binomického stromu, kde se pro každý uzel určí hodnoty uvažovaných forwardových sazeb pomocí lognormální aproximace sazeb. Forwardové sazby pro čas nula se získají z aktuální známé spotové křivky peněžního trhu. Poté se ze zkonstruovaného binomického stromu vygenerují simulace forwardových sazeb. Je vytvořeno 1 000 simulací pro dvouletý horizont v každém sledovaném období. Na závěr se převedou simulace forwardových sazeb na spotové sazby, podrobnější vysvětlení lze nalézt v Hull (2005).

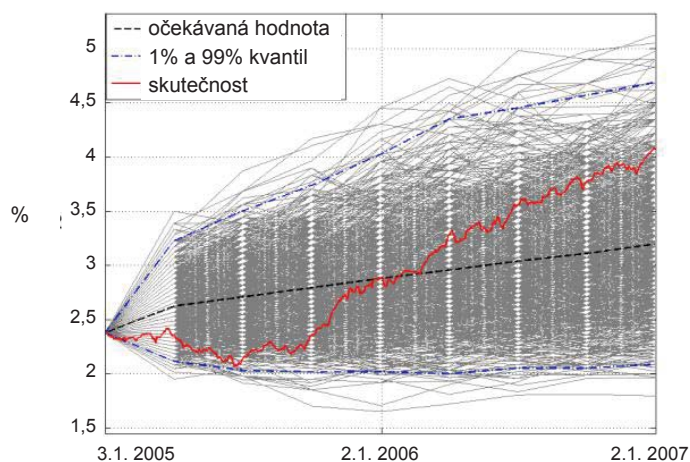
Obrázek 8

Simulace a skutečná realizace jednoletého a desetiletého EUR IRS v období před krizí

jednoletý EUR IRS



desetiletý EUR IRS



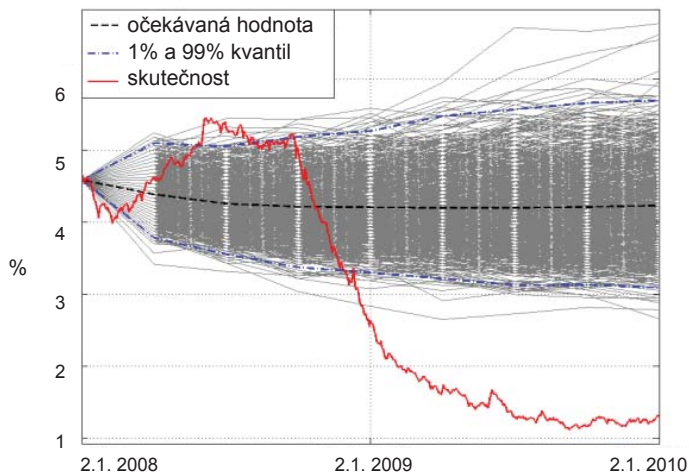
Zdroj: Bloomberg a vlastní výpočty

Obrázek 8 zobrazuje dvouleté simulace jednoleté a desetileté EUR IRS sazby provedené pomocí BGM modelu v období před krizí, tj. k 3. lednu 2005. V tomto prvním sledovaném období setrvává skutečný vývoj jednoleté i desetileté sazby kromě několika dní v intervalu daným 1% až 99% kvantilem simulací. Desetiletá EUR IRS sazba se sice v průběhu 2. poloviny 2005 dostala pod 1% kvantil simulací, avšak neopustila prostor simulací a od druhého čtvrtletí 2006 osciluje okolo své očekávané hodnoty.

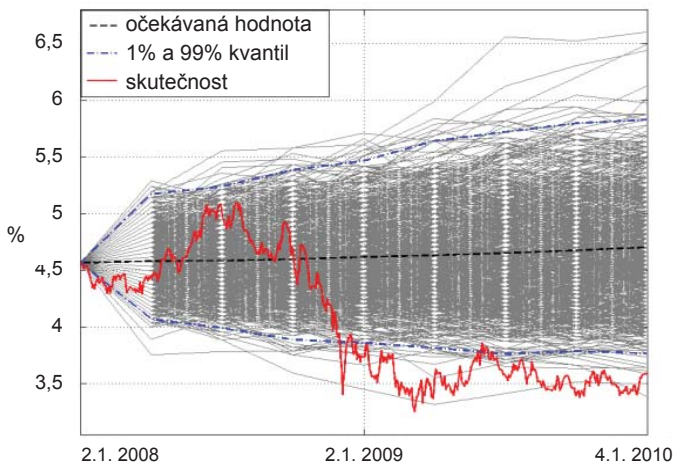
Obrázek 9

Simulace a skutečná realizace jednoletého a desetiletého EUR IRS v době finanční krize

jednoletý EUR IRS



desetiletý EUR IRS



Zdroj: Bloomberg a vlastní výpočty

Na obrázku 9 jsou simulace a skutečný vývoj daných sazeb v době finanční krize, tj. k 2. lednu 2008. Při srovnání simulací se skutečným vývojem sazeb lze pozorovat jednoznačné selhání modelu BGM hlavně v případě jednoleté sazby, kdy model nedokázal popsat prudký růst sazeb v první polovině roku 2008, stejně jako následující prudký propad sazeb v druhé polovině téhož roku. Skutečné sazby všech splatností se po celý rok 2009 pohybují mimo prostor daný 1% a 99% kvantilem simulací, avšak u splatností 10 let a více se skutečné sazby pohybují alespoň v prostoru simulací.

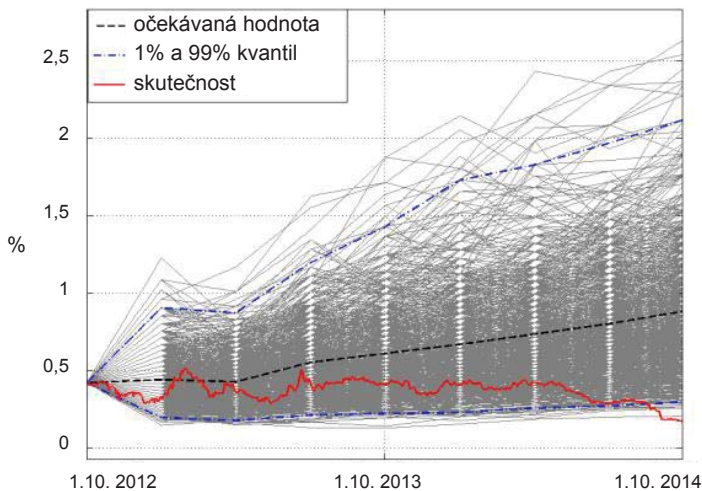
Obrázek 10 zobrazuje dvouleté simulace jednoleté a desetileté EUR IRS sazby provedené pomocí BGM modelu po ukončení finanční krize a uklidnění dluhové krize v EU, tj. k 1. říjnu 2012. Při srovnání simulací se skutečným vývojem sazeb lze pozorovat, že se skutečný vývoj jednoleté i desetileté EUR IRS sazby pohybuje v prostoru daným 1% a 99% kvantilem simulací kromě přibližně posledního měsíce, kdy se pravděpodobně tyto sazby dostaly z důvodu dalšího snížení depozitních sazeb od ECB na ještě nižší záporné hodnoty pod 1% kvantil. Z vývoje simulací je zřejmé, že model BGM očekával v říjnu 2012 rostoucí trend sazeb všech modelovaných splatností, zatímco skutečný vývoj sazeb signalizuje spíše klesající trend hlavně v průběhu roku 2014. Fakt, že se skutečný vývoj sazeb dostal pod hranici 1% kvantilu, ještě neznamená, že model BGM nedokázal vysvětlit skutečnou volatilitu sazeb. Vzhledem k tomu, že v realitě může nastat pouze jedna z možných cest stochastického procesu (3) a zásahy ECB v současném rozsahu se v okamžiku tvorby simulací jevily jako velice nepravděpodobné, tj. byly zahrnuty obchodníky do kotací volatilit swapcí s velice nízkou váhou, sleduje skutečný vývoj sazeb pravděpodobně extrémní cestu procesu (3). Dalším zajímavým poznatkem je fakt, že v případě sazeb blízkých 0 model BGM rozpoznal asymetrické riziko mezi dalším omezeným poklesem sazeb a možností jejich výraznějšího růstu, kdy rozdíl mezi 99% kvantilem simulací a očekávanou hodnotou je vyšší než rozdíl mezi očekávanou hodnotou simulací a 1% kvantilem.

Podobný vývoj, jako vykazují zde zobrazené jednoletá a desetiletá EUR IRS sazba, lze pozorovat i u ostatních splatností EUR IRS, které však nejsou v tomto článku zobrazeny z důvodu nedostatku prostoru. Obecně však lze říci, že sazby o splatnosti delší než jeden rok ale, kratší než 10 let vykazují nižší volatilitu simulací i skutečné realizace oproti volatilitě jednoleté sazby, avšak vyšší volatilitu oproti volatilitě desetileté sazby. Simulace sazeb i jejich skutečná realizace o splatnosti více než 10 let pak vykazují volatilitu nižší než desetiletá sazba.

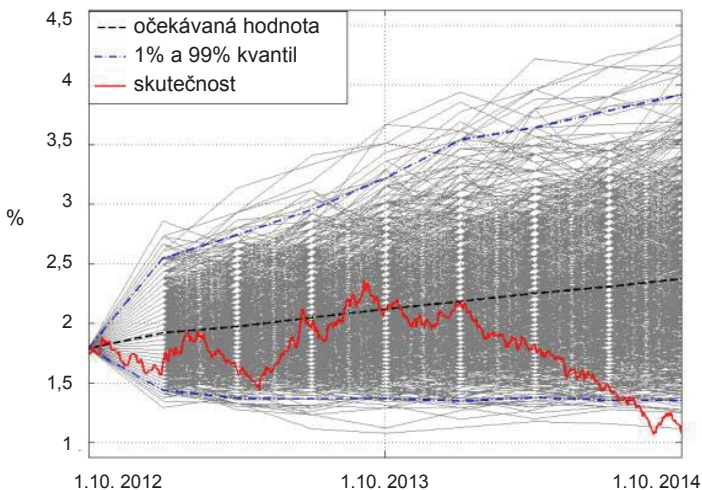
Obrázek 10

Simulace a skutečná realizace jednoletého a desetiletého EUR IRS po ukončení finanční krize a po uklidnění dluhové krize v EU

jednoletý EUR IRS



desetiletý EUR IRS



Zdroj: Bloomberg a vlastní výpočty

Porovnání aplikace několika různých modelů úrokových měr pro účely řízení úrokového rizika lze nalézt v článku Cícha a Králová (2014), kde vyšel nejlépe právě model BGM. Tento model dával kvalitní a realistický odhad, nezanedbával extrémní

scénáře a obstál i při konfrontaci se skutečností. U ostatních modelů (Cox-Ingersoll-Rossův model a obecný parametrický model) byly naopak pozorovány významné nedostatky, které zapříčinily nekvalitní předpověď a výraznou odlišnost od skutečnosti. K podobnému závěru dospěli i Teichmann a Würthrich (2015), kteří porovnávali predikce úrokových sazeb učiněné pomocí modelů krátkodobé úrokové míry (např. Vasickův model nebo Cox-Ingersoll-Rossův model) s predikcemi učiněnými pomocí modelů celé křivky v rámci modelů s Heath-Jarrow-Mortonovým (HJM) popisem dynamiky úrokových sazeb, mezi něž patří například i BGM model. Na základě empirického výzkumu při použití úrokových sazeb na švýcarský frank v období let 2001–2011 autoři konstatují, že predikce úrokových sazeb učiněné pomocí HJM modelů jsou výrazným způsobem robustnější oproti predikcím učiněným na základě modelů krátkodobé úrokové míry. Modely typu HJM vystihly budoucí vývoj úrokových sazeb ve všech případech na rozdíl od modelů krátkodobé úrokové míry, které budoucí vývoj sazeb pokryly pouze v několika případech.

4. Aplikace BGM modelu v českém prostředí

Jak již bylo uvedeno, použití modelu BGM pro účely řízení úrokového rizika portfolia aktiv či pasiv s horizontem držby do splatnosti, tj. pro predikování pravděpodobnostních rozdělení úrokových výdajů a příjmů portfolia, není v praxi pro jeho komplikovanost příliš obvyklé, nicméně dle mého názoru, podpořeného názorem kvantitativních analytiků předních světových bankovních institucí, je možné.

Pro aplikaci modelu BGM v českém prostředí je nejprve nutné získat volatility swapcí. Jelikož swapce na CZK IRS nejsou kotovány, je potřeba nalézt jejich vhodnou aproximaci. Touto aproximací implikovaných volatilit swapcí by mohlo být stanovení historické volatility úrokových CZK forwardů příslušných splatností, jejichž kotace existují. Tento přístup by však do velké míry potlačil informaci o aktuálním očekávání trhů ohledně dalšího vývoje, která je obsažena v aktuálních kotacích volatilit swapcí. Dle mého názoru je využití aktuálních informací při modelování budoucího vývoje úrokových sazeb velmi důležité, neboť tímto způsobem lze v simulacích alespoň v určité míře zohlednit více či méně očekávaný zásah centrálních bank nebo ostatních autorit do fungování finančních trhů. Vzhledem k závislosti ekonomiky ČR na eurozóně navrhuji pro získání požadovaných aproximací implikovaných volatilit swapcí akceptovat předpoklad, že charakter volatilit EUR a CZK sazeb je podobný, což se ostatně potvrdilo při aplikaci modelu GARCH na EUR a CZK IRS. Za tohoto předpokladu je možné využít následujícího vztahu:

$$\sigma_{N_EUR} = M \cdot \sigma_{N_CZK} \quad , \quad (4)$$

kde σ_{N_EUR} značí gaussovskou (normální) volatilitu evropské EUR ATM swapce a σ_{N_CZK} gaussovskou (normální) volatilitu evropské CZK ATM swapce. M představuje koeficient, kterým je možné zohlednit odlišnou úroveň volatilit EUR a CZK úrokových sazeb v daném období. Rovnici (4) je možné interpretovat tak, že

implikovaná volatilita swapce se stejně dlouhou expirací na stejně dlouhý podkladový IRS, vyjádřená v absolutních jednotkách (b.b.), neboli gaussovská volatilita, je po vynásobení určitým koeficientem stejná pro EUR i CZK.

Domnívám se, že při využití modelu k simulacím úrokových sazeb za účelem risk managementu ve smyslu předpovědi budoucích pravděpodobnostních rozdělení úrokové míry a potažmo i úrokových výdajů navázaných na tyto úrokové míry není existence arbitráže mezi CZK a EUR swapcemi, která by mohla nastat v důsledku použití rovnice (4), zcela zásadní. Pokud by byl model BGM využit pro účely oceňování finančních derivátů, byla by naopak podmínka neexistence arbitráže zcela klíčová. Jak je již uvedeno výše, zásadním argumentem pro nalezení vhodné aproximace aktuálních kotací CZK swapcí je zahrnutí všech dosud známých ekonomických a finančních informací do těchto kotací, což znamená, že existuje možnost rychlé reakce a přizpůsobení parametrů modelu novým skutečností. Jelikož však kotace CZK swapcí neexistují, závisela by případná existence arbitráže na způsobu jejich ocenění. Na základě konzultace s odborníky z praxe lze říci, že obdobný mechanismus převodu volatilit mezi jednotlivými měnami používají i velké finanční instituce při oceňování finančních derivátů.

Vzhledem k tomu, že pro aplikaci modelu BGM je potřeba znát Blackovy volatility ATM swapcí, musejí se nejprve převést kotované Blackovy volatility EUR swapcí na gaussovské volatility. Po získání gaussovské volatility CZK swapce dle vztahu (4) se tyto volatility převedou zpět na Blackovy volatility CZK ATM swapcí, které jsou vstupem do modelu BGM. Přesný vzájemný vztah gaussovské a Blackovy volatility v případě evropské swapce je:

$$\sigma_N = \sigma_B \frac{f - K}{\ln(f / K)} \cdot \frac{1}{1 + \frac{1}{24} \left[1 - \frac{1}{120} \ln^2(f / K) \right] \sigma_B^2 \tau + \frac{1}{5760} \sigma_B^4 \tau^2}, \quad (5)$$

kde f představuje forwardovou úrokovou míru s příslušnou splatností a příslušnou dobou jejího počátku, K označuje realizační sazbu (strike) příslušné swapce a τ zastupuje dobu do expirace (v jednotkách let). V situaci ATM swapce platí $f \rightarrow K$ a rovnici lze zjednodušit do tvaru:

$$\sigma_N = \sigma_B f \frac{1}{1 + \frac{1}{24} \sigma_B^2 \tau + \frac{1}{5760} \sigma_B^4 \tau^2}. \quad (6)$$

Pro odvození Blackovy volatility z gaussovské volatility je třeba řešit rovnici 4. stupně:

$$\frac{1}{5760} \tau^2 \sigma_N \sigma_B^4 + \frac{1}{24} \tau \sigma_N \sigma_B^2 - f \sigma_B + \sigma_N = 0, \quad (7)$$

ze které jsou získána čtyři řešení, a je vybráno to, které je nejbližší aproximativnímu odhadu $\sigma_B = \sigma_N / f$. Další informace o jednotlivých typech volatilit spojených se swapcemi lze nalézt například v textu Hagana (2011).

Hodnotu příslušného úrokového forwardu, který je v případě ATM swapce zároveň i její realizační sazbou, lze získat z kotací některých bank nebo výpočtem za použití rovnice (8) ze sazeb peněžního trhu, tj. ze sazeb typu IBOR pro splatnost do jednoho roku, a sazeb IRS pro splatnost nad jeden rok nebo ze sazeb OIS. V tomto článku používám pro úrokové EUR forwardy kotace bank a ke stanovení úrokových CZK forwardů rovnici (8), jelikož vzhledem k nerozvinutému a nelikvidnímu českému trhu jsou kotace příslušných korunových forwardových sazeb velmi nekvalitní, podobně jako nekvalitní kotace šestiměsíční CZK OIS na obrázku 1, a zřídka kdy existují. Tímto způsobem získám časovou řadu úrokových CZK i EUR forwardů pro každou kombinaci expirace swapce a délky podkladového IRS.

Úrokový forward f mezi budoucími časy (d_1, d_2) je definován jako:

$$\frac{D(d_0, d_2)}{D(d_0, d_1)} = \frac{1}{1 + f(t) \cdot t}, \quad (8)$$

kde $t = t(d_1, d_2)$ označuje časový interval mezi dvěma časy (d_1, d_2) a d_0 představuje aktuální čas. Dále $D(d_0, d) = \frac{1}{1 + r(t) \cdot t}$ je diskontní faktor z času d (čas v budoucnu) do aktuálního času d_0 a r zastupuje spotovou sazbu.

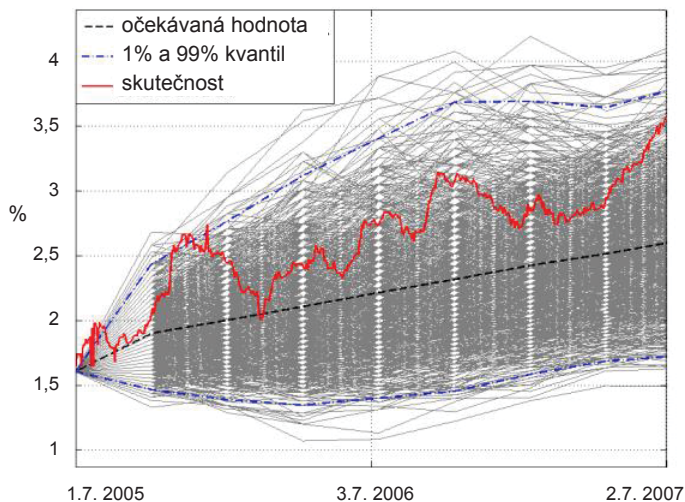
Po získání gaussovských volatilit evropských EUR ATM swapcí a získání příslušných úrokových EUR i CZK forwardů je potřeba pro získání volatilit CZK swapcí k požadovanému datu stanovit koeficient M , který zohledňuje fakt, že volatilita úrokových CZK a EUR sazeb může být odlišná, jak jsem ukázala při modelování volatility pomocí GARCH. Při stanovení odhadu koeficientu M se použije znalost časových řad jednotlivých úrokových forwardů v EUR a CZK, když se popíše volatilita každého požadovaného úrokového forwardu pomocí GARCH. Odhady koeficientů M pro každou kombinaci expirace swapce a délky podkladového IRS se stanoví jako podíl průměrných úrovní volatility CZK forwardů za posledních 6 měsíců a průměrných úrovní volatility EUR forwardů za totéž období. Pro většinu odhadů koeficientu M platí, že volatilita úrokových CZK forwardů je nižší než volatilita totožných EUR forwardů na kratším konci výnosové křivky, tj. pro dobu expirace swapce či pro délku podkladového IRS do cca 3 až 4 let, zatímco na delším konci výnosové křivky nejsou rozdíly mezi volatilitou CZK a EUR forwardů příliš vysoké.

Tímto postupem byly získány všechny potřebné členy do rovnic (4) a (7). Z rovnice (4) se vypočítají implikované gaussovské volatility evropských ATM CZK swapcí σ_{N_CZK} , které se řešením rovnice (7) převedou na implikované Blackovy volatility σ_{B_CZK} .

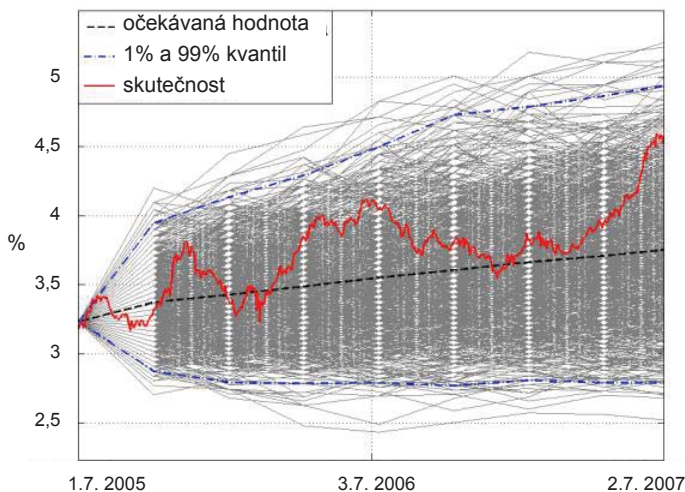
Obrázek 11

Simulace a skutečná realizace jednoletého a desetiletého CZK IRS v období před krizí

jednoletý CZK IRS



desetiletý CZK IRS

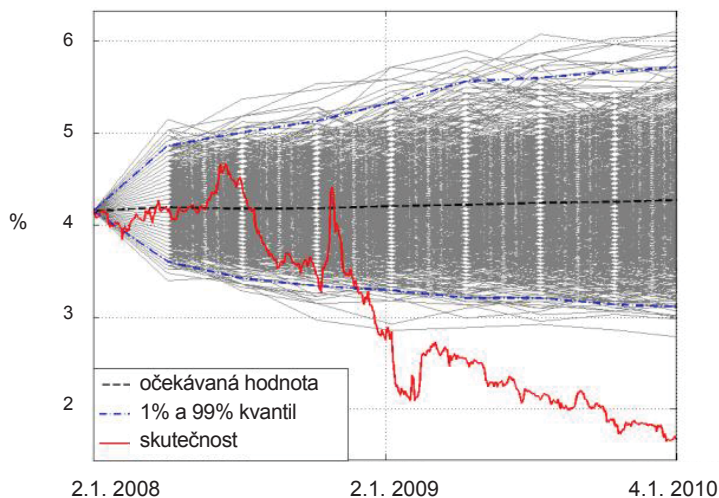


Zdroj: Bloomberg a vlastní výpočty

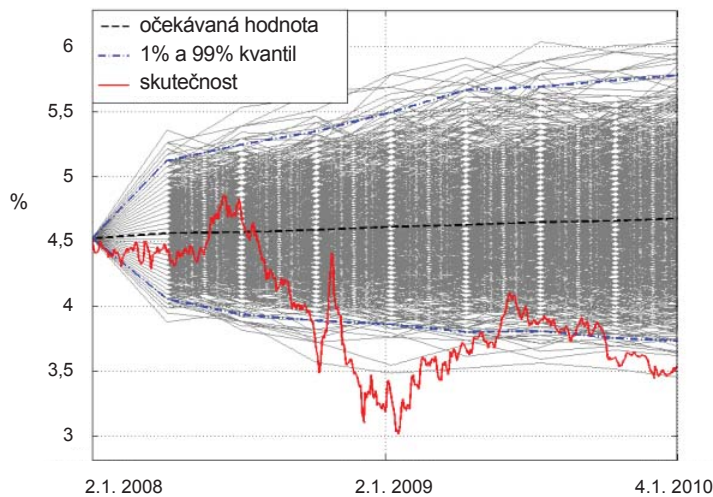
Obrázek 12

Simulace a skutečná realizace jednoletého a desetiletého CZK IRS v době finanční krize

jednoletý CZK IRS



desetiletý CZK IRS



Zdroj: Bloomberg a vlastní výpočty

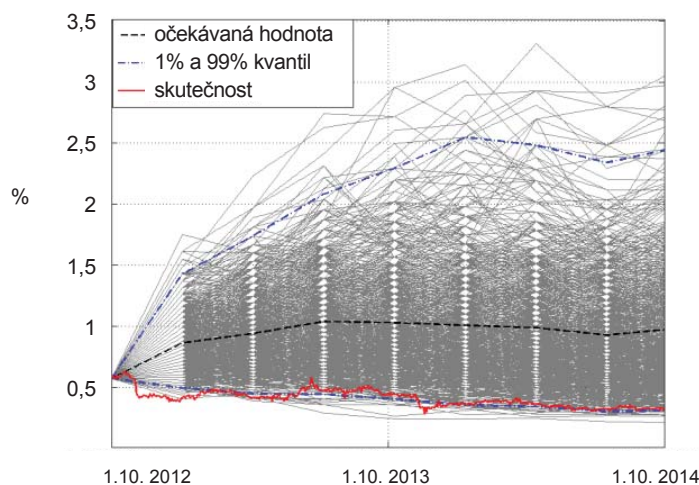
Po získání požadovaných σ_{B_CZK} aplikuji model BGM stejným způsobem jako u EUR pro stejná období s tím rozdílem, že vzhledem ke špatné kvalitě dat v první polovině roku 2005 provedu simulace v prvním období ke dni 1. července 2005. To však nemění nic na faktu, že se celý dvouletý horizont simulací nachází v období před finanční krizí. Simulace jednoleté a desetileté sazby pro příslušná období jsou zobrazeny na obrázku 11, 12 a 13. Z obrázku 11 je patrné, že stejně jako v případě

simulací EUR IRS v období před finanční krizí i v případě CZK IRS simulací odhadl model BGM poměrně dobře skutečný vývoj jednoleté i desetileté sazby, kdy obě sazby několikrát testovaly hranici danou 99% kvantilem simulací a v případě jednoleté sazby ji na několik málo dnů přesáhly. Na obrázku 12 jsou zobrazeny simulace a skutečný vývoj daných sazeb v období finanční krize, kdy se v případě obou sazeb dostaly jejich skutečné realizace, stejně jako v případě EUR IRS, zcela mimo prostor simulací.

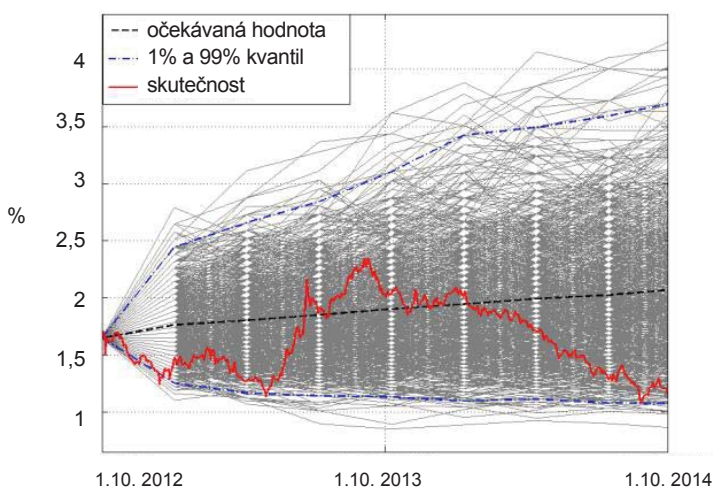
Obrázek 13

Simulace a skutečná realizace jednoletého a desetiletého CZK IRS po ukončení finanční krize a po uklidnění dluhové krize v EU

jednoletý CZK IRS



desetiletý CZK IRS



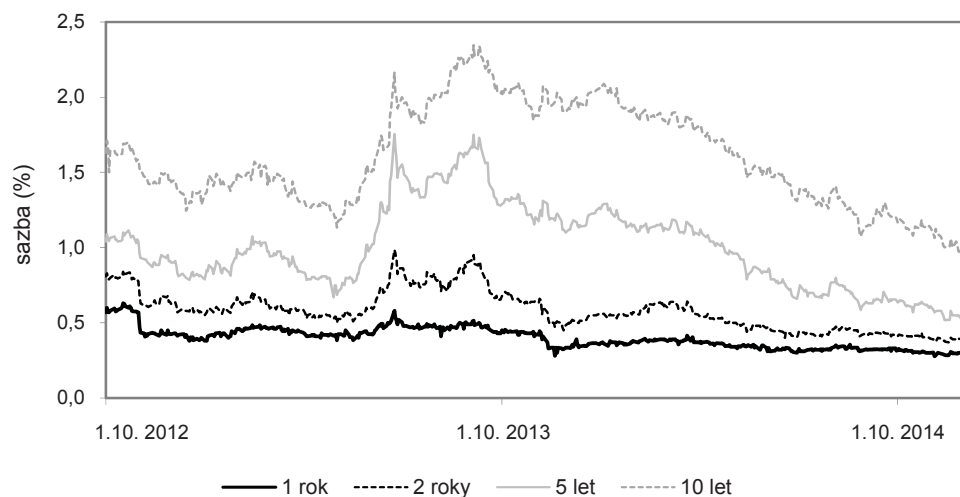
Zdroj: Bloomberg a vlastní výpočty

Obrázek 13 zobrazuje opět dvouleté simulace jednoleté a desetileté CZK IRS sazby provedené v období po finanční krizi. Je zajímavé, že zatímco skutečný vývoj desetileté CZK IRS sazby využil velkou část prostoru simulací daného 1% a 99% kvantilem, skutečný vývoj jednoleté CZK IRS sazby se pohyboval po většinu doby na hranici 1% kvantilu simulací. Tato situace je pravděpodobně zapříčiněná zcela odlišným vývojem jednoleté CZK IRS sazby ve sledovaném období oproti CZK IRS sazbám ostatních splatností, což lze pozorovat na obrázku 14, kde jednoletá sazba vykazuje velmi nízkou volatilitu.

Ve srovnání se simulacemi EUR IRS sazeb je zajímavé, že i přes vyhlášení intervencí ČNB neopouští skutečné sazby CZK IRS prostor simulací daný 1% a 99% kvantilem. Vzhledem k tomu, že skutečný vývoj desetileté EUR IRS sazby po vyhlášení záporných sazeb na depozita a po oznámení dalších monetárních stimulů ze strany ECB se v závěru simulačního horizontu dostal na podzim 2014 pod 1% kvantil simulací, lze usuzovat, že v kotacích volatilit swapcí nebyly kroky ECB pravděpodobně zahrnuty. Skutečný vývoj desetileté CZK IRS sazby setrval v prostoru mezi 1% a 99% kvantilem simulací i po vyhlášení intervencí ze strany ČNB.

Obrázek 14

Vývoj jednoletého, dvouletého, pětiletého a desetiletého CZK IRS



Zdroj: Bloomberg

Například v článku Vojtek (2004) využívá autor ke kalibraci BGM modelu GO-GARCH (Generalized Orthogonal GARCH) model a přijímá stejně jako já závěr, že model BGM lze použít i na český neefektivní trh. Na rozdíl od tohoto článku však používá ke kalibraci modelu historii úrokových sazeb, čemuž jsem se snažila vyhnout a chtěla jsem využít spíše okamžité informace obsažené v aktuálních kotacích swapcí. Tento článek se však zabývá oceňováním finančních derivátů.

Znamé modely úrokových měr, jako např. Cox-Ingersoll-Rossův, Ho-Leeův, Vasickův, mohou být obecně používány i pro neefektivní trhy s podobnými výsledky jako na vyspělých trzích, což dokumentuje například Cícha a Zimmermann (2006).

Závěr

V tomto článku byl navržen přístup k analýze vývoje úrokových měr pro účely řízení úrokového rizika portfolií finančních aktiv a pasív navázaných na úrokovou míru a držených do splatnosti v prostředí českého finančního trhu, který se vyznačuje nedostatečnou rozvinutostí a relativně nízkou likviditou a v prostředí vysoké nejistoty vyplývající z častých zásahů centrálních bank a ostatních autorit do fungování finančních trhů. Pro tyto účely byl aplikován model BGM popisující dynamiku celé výnosové křivky nejprve na rozvinutý a likvidní trh eurozóny a následně na méně rozvinutý a méně likvidní český trh.

V článku byl na příkladu vývoje bazických spreadů mezi sazbami EURIBOR, případně IRS a OIS, demonstrován nárůst premií spojených s kreditním a likviditním rizikem, pozorovaným na finančním trhu v průběhu finanční krize oproti situaci před krizí. I po ukončení finanční krize zůstávají tyto spready na několiknásobně vyšších úrovních oproti období před krizí, avšak jsou nižší než v průběhu krize. Na příkladu kotací CZK OIS je ukázána nedostatečná rozvinutost a nízká likvidita českého trhu. Pokud tyto kotace existují, nereflktují tržní vývoj. V mnoha případech však kotace OIS na českém trhu neexistují, ačkoliv na rozvinutých finančních trzích jsou tyto instrumenty stále více používané a zvolna nahrazují dominanci klasických IRS.

Na základě modelování volatility úrokových sazeb pomocí metody GARCH byl učiněn závěr, že se charakter vývoje volatility na finančních trzích v eurozóně i v České republice po začátku finanční krize změnil oproti období před finanční krizí. Volatilita se po odeznění finanční krize nesnížila, ale naopak vzrostla a v současné době se i po znatelném uklidnění nervozity trhů pohybuje zejména u desetileté EUR i CZK IRS sazby v průměru na svých maximálních hodnotách. Zatímco se průměrná volatilita jednoleté CZK IRS sazby před začátkem finanční krize pohybovala na výrazně vyšších úrovních než průměrná volatilita jednoleté EUR IRS sazby, v průběhu finanční krize se rozdíl obou průměrných volatilit snížil a po odeznění finanční krize se úrovně obou průměrných volatilit vyrovnaly. V případě volatility desetileté CZK IRS sazby se její vývoj před rokem 2008 podobá vývoji volatility EUR IRS sazby s tím rozdílem, že pravděpodobně z důvodu nedostatečné likvidity nabývají maximální volatility CZK IRS vyšších hodnot než volatility EUR IRS, avšak v průměru se nacházejí na podobných úrovních. V průběhu finanční krize lze u obou splatností opět pozorovat vyšší maxima u volatility CZK IRS, avšak průměrná volatilita desetileté CZK IRS sazby se během finanční krize nachází na podobných úrovních jako průměrná volatilita EUR IRS sazby. Po odeznění finanční krize se průměrná volatilita desetileté CZK IRS sazby nachází na vyšší úrovni než průměrná volatilita desetileté EUR IRS sazby. Je zajímavé, že zatímco IBOR–OIS bazické spready vykazovaly zvýšenou nervozitu

trhů již od září 2007, volatilita CZK a EUR IRS sazeb reagovala pomaleji a nad své úrovně z roku 2005 se dostala až v druhé polovině roku 2008. Z kotací volatilit swapcí, které se nacházejí po ukončení finanční krize na svých maximálních úrovních, lze usuzovat, že obchodníci do těchto kotací reflektují své zkušenosti z období finanční krize umocněné vysokou nejistotou pramenící ze zásahů centrálních bank a snahou autorit o regulace finančních trhů v období po finanční krizi.

Po aplikaci modelu BGM v prostředí eurozóny a navržení způsobu aplikace téhož modelu v českém prostředí a po provedení srovnání skutečného vývoje úrokových sazeb a sazeb simulovaných za použití modelu BGM byl učiněn závěr, že zatímco v krizi model BGM zcela selhal, po odeznění finanční a dluhové krize se jeví jako robustní i vůči změnám v charakteru trhu, které nastaly během finanční krize a po jejím skončení. Je však důležité upozornit, že zásahy centrálních bank a zavedení různých typů regulací trhu vnášejí do trhu předdefinování vztahů, které modely úrokových měr vysvětlit neumějí a nemohou. Na druhé straně platí, že pokud obchodníci kotující volatilitu swapcí správně vyhodnotí a zohlední dopady minulých, současných i předpokládaných budoucích zásahů centrálních bank a regulací trhů do svých kotací, promítne model BGM tato očekávání do simulací sazeb. Výhodou modelu BGM je fakt, že odhad parametrů modelu probíhá na základě aktuálních kotací, které v sobě nesou aktuální informace, a tudíž mohou hodnoty parametrů modelu zareagovat okamžitě na nové skutečnosti, zatímco odhad parametrů z historických dat toto neumožňuje. Další výhodou modelu BGM je skutečnost, že modeluje celou výnosovou křivku vcelku, a proto v simulacích nedochází k potlačení volatility delšího konce výnosové křivky a k dalším nekonzistentnostem jako v případě simulací provedených na základě modelů krátkodobé úrokové míry, viz například Cícha a Zimmermann (2006) a James a Weber (2002). V tomto článku bylo dokázáno, že model BGM je aplikovatelný i v prostředí českého nedostatečně rozvinutého a málo likvidního trhu a navíc i v období vysoké nejistoty, pramenící ze zásahů centrálních bank a ostatních autorit do fungování finančních trhů, a jeho aplikace může znamenat znatelné zlepšení kvality řízení úrokového rizika.

Poděkování

Výzkum byl podporován Vysokou školou ekonomickou v Praze: projekt IGA 128/2014.

Literatura

- ARLT, J.; ARLTOVÁ, M. 2009. *Ekonomické časové řady*. 1. vyd. Praha: Professional Publishing, 2009, pp. 127–162. ISBN 978-80-86946-85-6.
- BERTOCCHI, M.; DUPAČOVÁ, J.; MORIGGIA, V. 2000. Sensitivity of Bond Portfolio's Behavior with Respect to Random Movements in Yield Curve: A Simulation Study. *Annals of Operation Research* 99. Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 2000, pp. 267–286.
- BIANCHETTI, M.; MORINI, M. 2013. *Interest Rate Modelling after the Financial Crisis*. London: Risk Books, 2013. ISBN 978-1-906348-93-9.

- BIS. 2013. Market volatility and foreign exchange intervention in EMEs: what has changed? [BIS Papers No. 73]. Basel: Bank for International Settlements, 2013. ISBN 92-9131-962-7.
- BRACE, A.; GATAREK, D.; MUSIELA, M. 1997. The market model of interest rate dynamics. *Mathematical Finance*. 1997, Vol. 7, No. 2, pp. 127–156. doi: 10.1111/1467-9965.00028.
- BRIGO, D.; MERCURIO, F.; MORINI, M. 2005. The LIBOR model dynamics: Approximations, calibration and diagnostics. *European journal of operational research*. 2005, Vol. 163, No. 1, pp. 30–41. doi: 10.1016/j.ejor.2003.12.004.
- CÍCHA, M.; KRÁLOVÁ, D. 2014. Interest rate models in debt management. *Acta Aerarii Publici*. 2014, Vol. 11, pp. 66–76.
- CÍCHA, M.; ZIMMERMANN, P. 2006. Nové možnosti využití modelů úrokových měr v podmínkách ČR. In FISCHER, J. (ed.). *Sborník prací účastníků vědeckého semináře doktorského studia FIS VŠE*. Praha: VŠE FIS, 2006, pp. 150–157. ISBN 80-245-1037-5.
- ENGLE, R. F. 1982. Autoregressive conditional heteroscedasticity with the estimates of the variance of United Kingdom inflations. *Econometrica*. 1982, Vol. 50, No. 4, pp. 987–1007. doi: 10.2307/1912773.
- FRATZSCHER, M.; LO DUCA, M.; STRAUB, R. 2014. ECB Unconventional Monetary Policy Actions: Market Impact, international Spillovers and Transmission Channels. Jacques Polak Annual Research Conference. Washington, DC, 2014.
- GATAREK, D.; BACHERT, P.; MAKSYMIAK, R. 2007. *The LIBOR market model in practice*. Chichester, England: John Wiley & Sons, 2007. ISBN-13: 978-0-470-01443-1. doi: 10.1002/9781118673348.
- HAGAN, P. 2011. Volatility Conversion Calculators. New York: Bloomberg, 2011.
- HULL, C. J. 2005. *Options, futures & other derivatives*. 6. vyd. New Jersey: Prentice Hall, 2005. ISBN-13: 978-0131499089.
- JAMES, J.; WEBER, N. 2002. *Interest Rate Modeling*. Chichester: John Wiley & Sons, Ltd., 2002. ISBN-13: 978-0471975236.
- JAMSHIDIAN, F. 1997. LIBOR and swap market models and measures. *Finance and Stochastics*. 1997, Vol. 1, No. 4, pp. 293–330. doi: 10.1007/s007800050026.
- LÍZAL, L.; SCHWARTZ, J. 2013. Foreign exchange interventions as an (un)conventional monetary policy tool. [BIS Papers No. 73]. Basel: Bank for International Settlements, 2013. ISBN 92-9131-962-7.
- MILTERSEN, K.; SANDMANN, K.; SONDERMANN, D. 1997. Closed form solutions for term structure derivatives with log-normal interest rates. *J. Finance*. 1997, Vol. 52, No. 1, pp. 409–30. doi: 10.1111/j.1540-6261.1997.tb03823.x.
- MUSIELA, M.; RUTKOWSKI, M. 1997. Continuous-time term structure models: Forward measure approach. *Finance and Stochastics*. 1997, Vol. 1, No. 4, pp. 261–91. doi: 10.1007/s007800050025.
- REBONATO, R. 2002. Modern Pricing of Interest-Rate Derivatives the LIBOR Market Model and Beyond. Princeton, New Jersey, USA: Princeton University Press, 2002. ISBN: 9780691089737.
- SMITH, D. J. 2012. Valuing Interest Rate Swaps Using OIS Discounting [Research Paper Series No. 2012-11]. Boston: Boston University School of Management, 2012.
- VOJTEK, M. 2004. Calibration of Interest Rate Models – Transition Market Case [Discussion Paper No. 2004 – 119]. Praha: CERGE-EI, 2004.
- TEICHMANN, J.; WÜTHRICH, M. V. 2015. Consistent Yield Curve Prediction. V recenzním řízení. ca. 2015. <https://people.math.ethz.ch/~jteichma/index.php>.

APPLICATION OF THE BGM MODEL FOR INTEREST RATE RISK MANAGEMENT IN THE CZECH ENVIRONMENT AFTER FINANCIAL CRISIS

Dana CíCHOVÁ KráLOVÁ, University of Economics in Prague, W. Churchill sq. 4,
CZ – 130 67 Prague 3 (xkrad900@vse.cz)

Abstract

This article proposes an approach to an interest rate analysis for purposes of risk management of financial portfolio consisting of assets or liabilities linked to interest rates and held to maturity in the Czech environment. Czech financial market is characterized by relative underdevelopment and relatively low liquidity, and in an environment of high uncertainty due to interventions and regulations of central banks and other authorities. This article first describes the volatility of the Czech koruna and euro interest rates using the GARCH model. Based on this description, relationships between levels of koruna and euro swaptions volatilities are determined. After obtaining estimates of koruna swaptions implied volatilities, the BGM interest rate model is applied to Czech koruna and euro interest rate simulations. They are then compared with the real development of given interest rates. It turns out that although the BGM model was developed for the purpose financial derivatives valuation in the environment of developed and liquid financial markets without significant distortions, resulting simulations are relatively good, and their use can improve interest rate risk management even in the Czech environment.

Keywords

interest rate risk, volatility, GARCH, BGM model, Czech koruna, euro

JEL Classification

G170, G180, C580