

Ing. Vojtěch ZAVŘEL, Ph.D.^{1),2)}
 Ignacio TORRENS, MSc¹⁾
 prof. dr. ir. Jan L. M. HENSEN^{1),2)}

¹⁾ Eindhoven University of
 Technology, Building Physics and
 Services dept.

²⁾ ČVUT v Praze, Fakulta strojní,
 Ústav techniky prostředí

Recenzenti:
 doc. Ing. Ondřej Šíkula, Ph.D.
 Ing. Pavel Herout

Holistické řízení datacenter: metodika pro uvedení do provozu víceoborového řízení datacenter s použitím simulace budov

Holistic Data Center Operation: Methodology for Commissioning of Multi-Domain Data Center Management Using Building Energy Simulation

Spotřeba elektrické energie datacenter rapidně poroste a v současné době je odhadována na 1,7 až 2,2 % z celkové světové spotřeby elektrické energie. Dosažení udržitelnosti v tomto sektoru vyžaduje vývoj nových strategií pro zvýšení efektivity provozu datacenter. Výzkum se zabývá využitím holistického řízení, tj. řízení, kde jsou optimalizovány a koordinovány základní procesy jako zpracování dat, chlazení a dodávka energie včetně dodávky energie z místních obnovitelných zdrojů. Testování moderních řídicích strategií, které je nezbytné pro vývoj a implementaci tohoto typu řízení, není možné provádět v běžném provozu vzhledem k riziku omezení dostupnosti provozovaných služeb nebo odstavení data centra z provozu. Výpadek datacenter souvisí se značnými finančními ztrátami a ztrátou důvěryhodnosti. Z toho důvodu je testování často znemožněno. Avšak simulace budov, která umožňuje numerickou reprezentaci energetického chování datacenter, může nabídnout bezpečné testovací prostředí pro moderní řídicí algoritmy, a tak výrazně podpořit jejich uvedení do provozu. Článek pojednává o metodice testování moderních řídicích algoritmů s využitím simulace energetického chování datacenter.

Klíčová slova: datacenter, holistické řízení, uvedení do provozu, testování, simulace energetického chování budov, GENIC řídicí platforma

The world data center energy consumption has been growing rapidly and currently is estimated at 1,7–2,2% of the world-wide electricity consumption. Achieving sustainability in this sector calls for development new energy efficient strategies and measures. Current research deals with development of holistic operation i.e. operation, where all essential processes such as data processing, cooling and power delivery and supply (including renewable energy sources) are optimized a coordinated. Testing of modern operational strategies, which is necessary for development and commissioning, is not possible during the regular operation due to the risk of limitation of the services or outage of the data center operation. Any outage of the data center is related with financial and reputation losses. Therefore, the testing is extremely limited. Alternatively, building energy simulation may offer "safe" testing environment for advanced control algorithms and accelerate their implementation in practice. This paper describes a novel workflow for testing of modern control algorithm and new application of building energy simulation of data center.

Keywords: data center, holistic operation, commissioning, testing procedure, building energy simulation, GENIC control platform

ÚVOD

Nástroje simulace budov, které byly původně určeny výhradně k analýze energetické potřeby v rezidenčních a kancelářských budovách, se stále vyvíjí. Vzhledem k tomu, že nástroje pro simulaci budov již prokázaly schopnost řešit víceoborové úlohy a provádět energetické analýzy součinnosti různých systémů budov, jejich uplatnění se rozšířilo i na ostatní průmyslové objekty, v tomto případě datacentera.

Exponenciální růst energetické spotřeby datacenter si v posledních letech vyžádal značnou pozornost řady výzkumných projektů i široké odborné veřejnosti. V současné době se globální spotřeba elektrické energie datacenter odhaduje mezi 1,7 až 2,2 % [1] z celosvětové spotřeby elektrické energie a další růst je očekáván. K dosažení udržitelnosti v tomto sektoru je zapotřebí vývoj moderních energeticky efektivních strategií. Jednou z diskutovaných strategií v současné době je tzv. holistické řízení datacenter, zaměřené na celkovou optimalizaci a koordinovaný chod všech nezbytných procesů probíhající v datacentrech, tj. zpracování dat, zajištění provozních podmínek informační technologie (IT) a zajištění nepřetržitého přívodu elektrické energie včetně dodávky z místních obnovitelných zdrojů.

Avšak vývoj a uvedení do provozu takto komplexního řídicího systému je velice náročným úkolem. Typickým omezením pro uvedení do provozu je v těchto případech:

- přístup a testování řízených systémů v plném řídicím rozsahu včetně extrémů,
- potřeba rozsáhlé znalosti celkového systému přesahující rámec jednoho oboru [2].

Situace je navíc pro datacentera komplikována tím, že koncoví uživatelé očekávají k těmto službám nepřetržitý přístup. Jákýkoliv výpadek služeb datacentera, který hrozí v průběhu instalace netestované řídicí platformy, by vedl k značným finančním ztrátám a ztrátě důvěry. Z tohoto důvodu je jakékoliv testování moderních řídicích algoritmů na reálném systému datacentera velice omezené.

Naproti tomu energetické modelování a dynamická simulace chování datacentera může představovat bezpečné testovací zázemí pro nově vyvíjené algoritmy. Úspěšné testování řídicích algoritmů za použití simulace budov může urychlit aplikaci moderních řídicích algoritmů v praxi.

Článek se zabývá metodikou testování víceoborových externích algoritmů v uzavřené smyčce za použití nástrojů simulace budov. Tato me-

todika byla následně testována v rámci mezioborového projektu Genic sponzorovaného Evropskou unií [3], [4].

KONCEPT VIRTUÁLNÍHO TESTOVACÍHO PROSTŘEDÍ PRO TESTOVÁNÍ V UZAVŘENÉ ŘÍDICÍ SMYČCE

Základní myšlenkou pro řešení problematického vývoje a uvedení do provozu tzv. holistického řízení je vybudování virtuálního testovacího prostředí, které bude simulovat chování budovy datacentra včetně energetického chování IT zařízení, chladičů systému a systémů pro výrobu a dodávku elektrické energie. Pro úspěšné testování a uvedení do provozu všech řídicích algoritmů, které dnes často fungují na principu prediktivního řízení, je nezbytné zajistit co nejpodobnější podmínky reálného provozu. Tímto však není myšlena pouze přesnost modelu, ale také napodobení procesu řízení. Koncept je tedy takový, že simulační model reprezentující datacenter je součástí řídicí smyčky v roli řízeného systému. Proto je nezbytné, aby simulační model interaktivně komunikoval s řídicí platformou v každém simulačním kroku. Simulační model budovy tak musí být schopný simulovat energetické chování systému v relativně krátkém časovém horizontu.

Oproti běžnému trénování algoritmů za pomoci statických dat (např. naměřených profilů) zahrnuje testování v uzavřené smyčce při použití simulačního modelu dynamiku chování řízeného systému a zároveň mohou testované algoritmy zohlednit také emulované „poruchové“ veličiny, např. meteorologická data atd. Navíc, pokud virtuální testovací prostředí reprezentuje více systémů, je umožněno testování několika víceoborových algoritmů současně, a je tedy možnost vyhodnotit vliv koordinace mezi jednotlivými systémy. Schematicky je testování v uzavřené smyčce, za použití virtuálního testovacího prostředí, znázorněno na obr. 1.

Takové testování může být velice efektivní pro vyhodnocení vlivu řídicích strategií na řízený systém před samotným uvedením do provozu. Avšak využití tohoto konceptu je zatím v praxi relativně vzácné kvůli potřebné znalosti numerického modelování a komplikovaného nastavení virtuální řídicí smyčky. Obecně se toto testování uplatní u složitějších tzv. „nadřazených“ řídicích platform, které zahrnují více systémů, což je případ holistického řízení datacenter. Obdobný postup pro podporu vývoje a

uvedení do provozu nových řídicích strategií je v současné době použit také v jiných odvětvích [5], [6].

Hlavními klady tohoto relativně složitějšího procesu testování je:

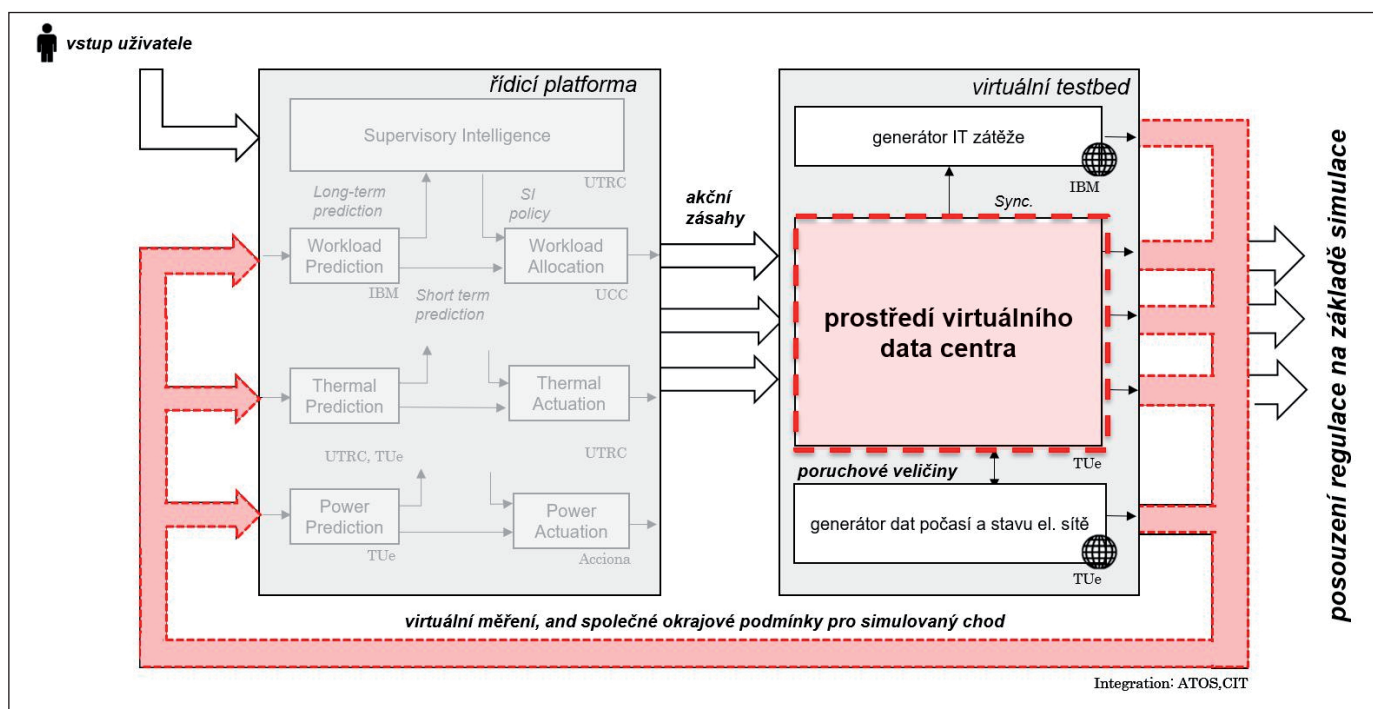
- dynamická odpověď simulovaného systému,
- různé možnosti konfigurace testování (např. testování pro více algoritmů současně, testování pro extrémní okrajové podmínky),
- identické okrajové podmínky pro testování, které zajišťují opakovatelnost a porovnatelnost výsledků z testování.

Jak již bylo řečeno, většina nadřazených řídicích algoritmů využívá principu prediktivního řízení. Proto se často stává, že samotný řídicí algoritmus pracuje s tzv. prediktivními modely. V takové situaci jsou v řídicí smyčce při testování dva typy modelů, které je nutno definovat:

- prediktivní model, sloužící k optimalizaci řídicích zásahů – tento model je součástí řídicí platformy,
- simulační model, sloužící k testování řídicí platformy, který napomáhá jejímu uvedení do provozu; simulační modely nejsou součástí řídicí platformy a po uvedení platformy do provozu jsou nahrazeny reálným systémem.

Zatímco pro prediktivní modely jsou typické tzv. black-box modely, které nemají žádný fyzický základ, reprezentují pouze část systému a jsou definovány na základě vstupních dat (např. autoregresní modely), simulační modely musí reprezentovat větší část systému pro relativně široký rozsah platnosti simulace. Pro tento typ modelů lze využít výhod nástrojů simulace budov. Tyto nástroje (např. EnergyPlus, Trnsys, ESP-r) umožňují reprezentovat energetické chování budovy a dalších energetických systémů na základě daných fyzikálních vztahů [7]. Použití těchto modelů je sice výpočetně náročnější, což omezuje jejich uplatnění přímo pro řízení, ale fyzikální podstata modelů zaručuje širší rozsah platnosti a možnost konfigurace modelů na základě technické dokumentace. Nástroje pro simulaci budov mají rovněž často otevřený zdrojový kód, takže umožňují vývoj nových uživatelských funkcí. Toto je zejména zapotřebí pro vytvoření komunikačního rozhraní nutného pro uzavření kontrolní smyčky.

Ačkoliv energetické simulace budov splňují většinu teoretických požadavků dané definicí virtuálního testovacího prostředí, numerické mode-



Obr. 1 Koncept simulovaného testování v uzavřené řídicí smyčce

Fig. 1 Concept of simulation-based testing in closed control loop

lování datacenter nebylo donedávna pro tyto nástroje běžné. Aktuálním trendem je rozšířit využitelnost nástrojů simulace budov také na průmyslové objekty. V současné době je již k dispozici řada doplňujících knihoven s energetickými modely IT a jiných zařízení datacenter. Tyto modely jsou například dostupné pro Energy Plus (version 8.3, released 2015) [8] a také je k dispozici speciální knihovna renewIT pro TRNSYS (TRNSYS, renewIT library, 2016) [9].

Co se týče modelování vnitřního prostředí datacenter, Phan and Lin popsali postupy pro EnergyPlus pro vícezónové modelování vnitřního prostředí s fyzickým oddělením prostoru před a za technologickými skříněmi [10]. Obdobně lze nalézt zjednodušené metody výpočtu pro proudění vzduchu ve vnitřním prostředí datacentera pro prostředí Modellica a Trnsys [11], [12]. V neposlední řadě jsou dnes k dispozici postupy pro modelování místních obnovitelných zdrojů speciálně pro případ datacentera [13] [14].

Lze shrnout, že energetické simulace budov jsou vhodné pro danou aplikaci virtuálního testovacího prostředí pro externí algoritmy. V tomto případě bylo použito pro numerickou reprezentaci datacentera, IT zařízení, chlazení a dodávky elektrické energie včetně obnovitelných zdrojů co-simulace TRNSYSu a CONTAMu. Dále bylo vytvořeno komunikační rozhraní pomocí Matlabu, které zajišťovalo synchronizovanou komunikaci mezi energetickým modelem a testovanými algoritmy. Vývoj a validace virtuálního testovacího prostředí je detailně popsána v literatuře [15].

METODIKA PRO UVEDENÍ HOLISTICKÉHO ŘÍZENÍ DATACENTER DO PROVOZU

V této části je představen obecný postup testování víceoborových algoritmů, které byly vyvinuty různými externími subjekty. Tento postup byl popsán na základě zkušenosti z projektu Genic [3] zabývajícího se vývojem holistického řízení datacenter. Metodika popisuje průběh testování algoritmů v uzavřené řídicí smyčce při použití simulace. Tato metodika je dělena do pěti hlavních kroků (viz níže) a znázorněna vývojovým diagramem na obr. 2 a 3. Metodika může být dále dělena na aktivity náležící vývojářům řídicích algoritmů a aktivity náležící vývojářům virtuálního testovacího prostředí:

- sběr dat a definice výpočetního experimentu (např. definice případové studie, definice hlavních kritérií atd.),
- vývoj virtuálního testovacího prostředí a vyhodnocení kvality,
- individuální testování jednotlivých algoritmů v otevřené řídicí smyčce (např. za pomoci naměřených dat),
- individuální testování jednotlivých algoritmů v uzavřené řídicí smyčce při použití simulace,
- testování více algoritmů současně v uzavřené řídicí smyčce při použití simulace (kombinace „partnerských“ algoritmů tvořících platformu holistického řízení).

Sběr dat a definice výpočetního experimentu

Sběr dat je aktivita společná pro všechny aktéry. Je nezbytné mít společné povědomí o technické specifikaci umístěného IT zařízení, geometrii a uspořádání vnitřního prostoru datacentera, chladicího zařízení a zařízení pro dodávku a výrobu elektrické energie. V této fázi může být také provedeno předběžné měření systémů, pokud je měřicí systém k dispozici. Také je nezbytné odsouhlasit všemi aktéry definici experimentu, jako jsou cíle testování, hlavní kritéria testování, referenční případ a testovací scénáře (např. okrajové podmínky pro testování).

Vývoj, validace a demonstrace virtuálního testovacího prostředí

Tato aktivita je prováděna vývojářem virtuálního testovacího prostředí. Virtuální testovací prostředí je třeba před jeho použitím řádně validovat a demonstrovat jeho funkčnost ostatním aktérům testování. Lze doporučit ověřením kvality modelů dle standardů CIBSE [16]. Samotná

dokumentace použitých modelů a jejich kvality je velice důležitý krok pro navázání důvěry s vývojáři řídicích algoritmů. Na druhou stranu, vzhledem k typicky širokému rozsahu simulované úlohy, není nezbytné pro simulační modely eliminovat chybu na absolutní minimum. Pro vývojáře testovaných algoritmů je většinou dostačující kvantifikovat chybu modelu a prokázat, že je pod doporučenými hodnotami [17], a dále demonstrovat dynamické chování simulačního modelu. Vzhledem k tomu, že nakonec jsou simulované výsledky z testovacích scénářů porovnány se simulovanou referencí, chyba simulačního modelu vůči skutečnosti není v testování zahrnuta.

Trénování individuálních algoritmů v otevřené řídicí smyčce

Tato aktivita je prováděna vývojáři řídicích algoritmů. Testování v otevřené řídicí smyčce je v současné době standardní proces pro přípravu algoritmů prediktivního řízení pro uvedení do provozu. Tento proces zůstává v této metodice jako počáteční krok pro kontrolu kvality testovaných řídicích algoritmů. Pro tento druh testování jsou zapotřebí tzv. data pro trénování řídicího algoritmu. Tato data mohou pocházet z měření ze studovaného datacentera nebo z jiného datacentera s obdobnou typologií. Je třeba brát v potaz lokální řízení jednotlivých komponent a po dobu měření také zaznamenat nastavení těchto lokálních regulátorů.

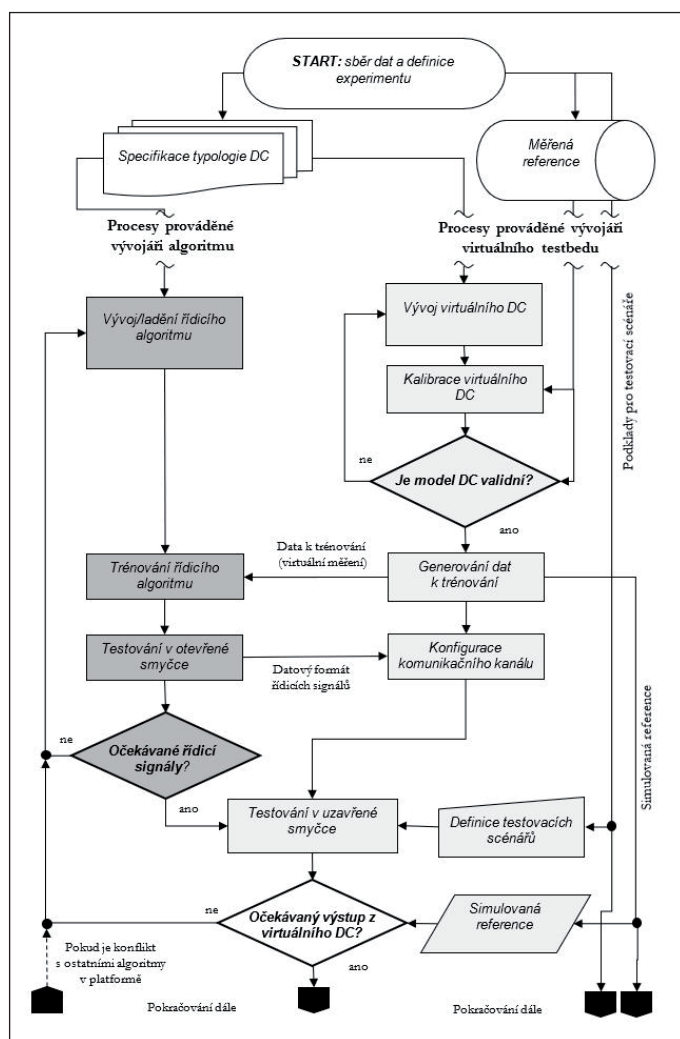
Alternativně je zde možnost využít virtuálního testovacího prostředí, které může generovat sadu trénovacích dat dle požadavků daného vývojářského týmu (např. data pro skokovou změnu systému, data pro extrémní podmínky apod.).

Během testování v otevřené řídicí smyčce není testovaný algoritmus připojen k žádnému akčnímu zařízení (např. servopohonu). Kvalita regulace může být tedy posouzena pouze na základě akčního signálu. Toto testování může být dostatečné pro jednodušší řídicí smyčky, ne však pro složitější regulační celky. Takové posouzení je často nedostatečné v případě, že je třeba posoudit regulátor s více vstupy a výstupy. Přesto je zapotřebí provést toto testování i v případě složitějších regulátorů, protože výstupem tohoto testování jsou důležité informace ohledně očekávaného počtu a rozsahu akčních signálů regulátoru, které jsou cenné v dalších krocích této metodiky.

Simulované testování individuálních algoritmů v uzavřené řídicí smyčce

Pokročile víceoborové řídicí platformy, jako je holistické řízení, mají většinou distribuovanou architekturu čítající několik podmodulů tzv. management, které se starají o optimalizaci jednotlivých procesů v datacenteru. Tyto moduly většinou zahrnují systémy z jednoho odvětví (např. IT management, tepelný management, nebo management přívodu el. energie). V tomto kroku jsou tyto moduly testovány postupně bez vlivu ostatních podmodulů v simulované uzavřené řídicí smyčce (zbytek simulovaného systému je regulován základním „referenčním“ řízením). Testovaný management je připojen k virtuálnímu testovacímu prostředí, přičemž je mu umožněno snímat virtuální měření (simulovaná data). Na základě těchto dat vydává řídicí signály, které vstupují do simulačního modelu a ovlivňují jeho chování jako při skutečném řízení. Takto testovaný algoritmus je pak posuzován na základě simulovaného chování řízeného systému, a ne na základě akčního signálu jako v předešlém případě. Výsledky tohoto testování berou v úvahu předpokládané poruchové veličiny (např. vliv počasí) a hlavně dynamické chování řízeného systému dané simulačním modelem.

Testováním jednotlivých modulů v uzavřené smyčce lze vyhodnotit komplexní chování regulace, zahrnující všechny výstupy z daného algoritmu. Toto testování může detekovat potenciální limity a chyby, které by se mohly vyskytnout během uvádění do provozu. Navíc může být toto testování použito také k posuzování a výběru z několika konkurenčních algoritmů.



Obr. 2 Metodika pro testování holistického řízení (část 1)

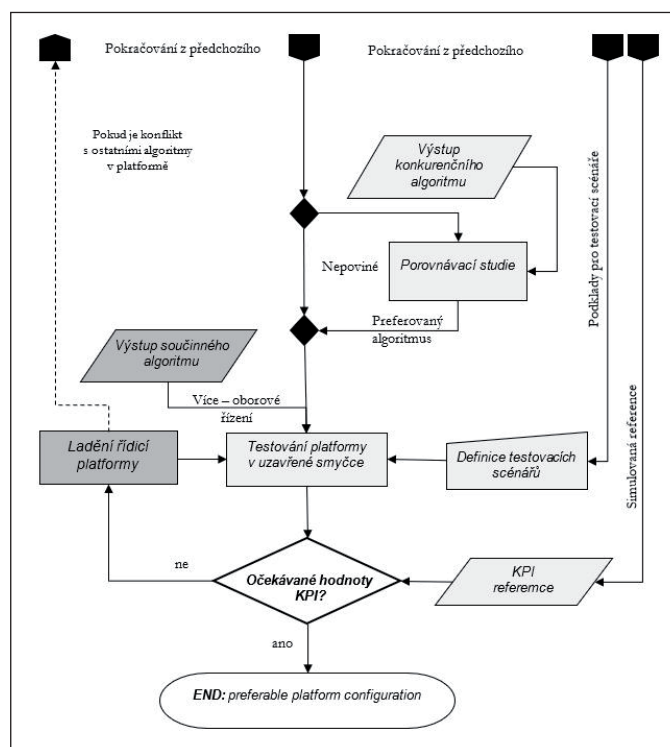
Fig. 2 Testing methodology of holistic operation (part 1)

Simulované testování součinnosti více algoritmů v uzavřené řídicí smyčce

Poslední krok prezentované metodiky je finální testování součinnosti všech modulů společně s případnými nadřazenými algoritmy pro zajištění koordinace mezi moduly (managementy). Obdobně jako v předchozím případě je řídicí platforma holistického řízení připojena k simulačnímu modelu a testování probíhá v uzavřené řídicí smyčce. V této fázi se vyhodnocuje fungování systému jako celku a součinnost jednotlivých modulů (např. rozdělování IT zátěže pro dosažení ideální distribuce tepla v datacentru nebo odkládání neurgentního výpočetního výkonu na dobu, kdy je k dispozici energie z obnovitelných zdrojů apod.). V tomto případě se kvalita řízení posuzuje na základě předem definovaných kritérií, zahrnujících celkové chování datacentra (např. účinná práce datacentra, předpokládaná spotřeba energie datacentra, ekvivalentní CO₂ emise anebo indikátor účinnosti Power Usage Effectiveness – PUE). Tato vícekritériální analýza může odhalit případné konfliktní chování jednotlivých řídicích modulů (např. zpracovávání neurgentních IT úloh v době, kdy není k dispozici obnovitelná energie apod.). Na základě těchto kritérií je vyhodnocena kvalita koordinaci všech řídicích modulů a řízení datacentra jako celku.

SHRNUTÍ

V článku byla představena nová aplikace nástrojů simulace budov jako podpůrného nástroje k testování komplexních řídicích algoritmů. Nová me-



Obr. 3 Metodika pro testování holistického řízení (část 2)

Fig. 3 Testing methodology of holistic operation (part 2)

todika testování prezentovaná v tomto článku byla obecně popsána v pěti bodech. Popsaný postup testování byl použit pro uvedení do provozu platformy holistického řízení datacenter vyvíjené v rámci projektu Genic [3]. Zkušenost z tohoto projektu potvrdila, že nástroje simulace budov mají vysoký potenciál pro podporu vývoje a uvedení do provozu složitých řídicích algoritmů nejen v případě datacenter. V tomto případě bylo však použití simulačních metod nezbytné vzhledem k povaze prostředí datacenter, kde by jakýkoliv výpadek související s instalací řídicích algoritmů vedl ke značným finančním ztrátám a ztrátě důvěry koncových zákazníků.

Závěrem lze konstatovat, že simulací uzavřené řídicí smyčky bylo dosaženo podobného prostředí pro testované externí algoritmy jako v reálném provozu. Ačkoliv vývoj virtuálního testovacího prostředí je relativně náročný (jak časově, tak technicky), tento postup pomohl konfigurovat optimální nastavení holistického řízení a zajistil hladké uvedení do provozu, kdy první prototyp tohoto typu řízení byl instalován na zkušební datacenter. Více informací ohledně vývoje virtuálního testovacího zařízení je k dispozici v dizertační práci [15].

Kontakt na autora: Vojtech.Zavrel@fs.cvut.cz

Poděkování: Tento projekt byl částečně financován z programu Evropské komise FP7, číslo grantu 608826.

Použité zdroje:

- [1] SHEHABI, A. et al. United States Data Center Energy Usage Report. 2016.
- [2] SALSBURY, T. I., ASHISH, S. Control System Commissioning for Enhanced Building Operations. In: *Proc. 3rd Int. Conf. Enhanc. Build. Oper.* Oct. 13–15, 2003, vol. 1, no. 414, pp. 1–9.
- [3] Consortium Genic. Project GENIC [online]. 2013. Dostupné z: <http://project-genic.eu/>
- [4] European Commission. European Commission: CORDIS: Projects & Results Service: Globally optimized ENERGY efficient data Centres – GENIC [online]. [cit. 01-Jul-2017]. Dostupné z: http://cordis.europa.eu/project/rcn/110718_en.html

- [5] Technische Universität Darmstadt. Forschungsprojekt ETA-Fabrik – ETA-Fabrik – Technische Universität Darmstadt [online]. 2017 [cit. 02-Jul-2017]. Dostupné z: <http://www.eta-fabrik.tu-darmstadt.de/eta/index.de.jsp>
- [6] MÜLLER, D., FÜTTERER, J. *The E.ON ERC Main Building – a Demonstration Bench for Control Research*.
- [7] HENSEN, J. L. M., LAMBERTS, R. *Building performance simulation for design and operation*. Abingdon: Spon Press, 2011.
- [8] The National Renewable Energy Laboratory (NREL). EnergyPlus version 8.3 [software]. 2015.
- [9] RenewIT consortium. Green Data Centre Library – RenewIT [online]. 2016 [cit. 03-Jul-2017]. Dostupné z: <http://www.renewit-project.eu/green-data-centre-library/>
- [10] PHAN, L., LIN, C.-X. A multi-zone building energy simulation of a data center model with hot and cold aisles. *Energy Build.* 2014, vol. 77, pp. 364–376.
- [11] LEVA, A., MASTRANDREA, D., BONVINI, M., PAPADOPOULOS, A. V. Object-Oriented Modelling and Simulation of Air Flow in Data Centres Based on a Quasi-3D Approach for Energy Optimisation. In: *7th International Conference on Utility and Cloud Computing*, 2014.
- [12] SALOM, J., ORÓ, E., de BESÓS, A. G. S. A. Dynamic Modelling of Data Centre Whitespaces, Validation with Collected Measurements. In: *Building Simulation 2015, 14th International Conference of the International Building Performance Simulation Association*, 2015.
- [13] ORÓ, E., DEPOORTER, V., GARCIA, A., SALOM, J. Energy efficiency and renewable energy integration in data centres. Strategies and modelling review. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2015, vol. 42, pp. 429–445.
- [14] Thermal Energy System Specialists. TRNSYS: Transient System Simulation Tool. 2012.
- [15] ZAVREL, V. Building energy modelling to support the commissioning of holistic data centre operation. Eindhoven University of Technology, Eindhoven, 2018.
- [16] HAZIM, A. *CIBSE 2015 AM11 Building performance modelling*. Second. London: CIBSE, 2015.
- [17] COAKLEY, D. RAFTERY, P., KEANE, M. A review of methods to match building energy simulation models to measured data. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2014, vol. 37, pp. 123–141.