

# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

## ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

## PŘENOS AUDIOSIGNÁLU PO STANDARDNÍ ETHERNETOVÉ SÍTI

AUDIO SIGNAL TRANSMISSION OVER A STANDARD ETHERNET NETWORK

### BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Tomáš Rubínek

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Robert Bayer

BRNO 2021



# Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Telekomunikační a informační systémy**

Ústav telekomunikací

**Student:** Tomáš Rubínek

**ID:** 195425

**Ročník:** 3

**Akademický rok:** 2020/21

**NÁZEV TÉMATU:**

## Přenos audiosignálu po standardní Ethernetové síti

**POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:**

Seznamte s možnostmi a proveďte rozbor aktuálně používaných technologií pro přenos audio signálu po Ethernetové lince. Navrhněte řešení sítě pro přenos audio signálu zvoleným síťovým protokolem pro vybranou modelovou situaci a prakticky ověřte její funkčnost a parametry.

**DOPORUČENÁ LITERATURA:**

[1] Dante Advanced Configuration. In: Audinate.com [online]. Austrálie: Audinate, 2015 [cit. 2020-11-13]. Dostupné z: <https://my.audinate.com/sites/default/files/PDF/advanced-dante-networkingavnw-2015-audinate.pdf>

[2] IFEACHOR, Emmanuel C. a Barrie W. JERVIS. Digital Signal Processing: A Practical Approach. 2, ilustrované vydání, dotisk. USA: Addison-Wesley, 1993. ISBN 9780201544138.

**Termín zadání:** 1.2.2021

**Termín odevzdání:** 31.5.2021

**Vedoucí práce:** Ing. Robert Bayer

**prof. Ing. Jiří Mišurec, CSc.**  
předseda rady studijního programu

**UPOZORNĚNÍ:**

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

## ABSTRAKT

Práce se věnuje digitálním zvukovým sítím pro přenos audiosignálu a popisuje jednotlivé druhy digitálních sítí. Podrobněji se věnuje digitálním sítím pro přenos audiosignálu po standardní Ethernetové síti a srovnává jejich možnosti a využití. Srovnává několik druhů digitálních sítí pro přenos audiosignálu po standardní Ethernetové síti: Dante, AVB, Ravenna a AES67. Práce dále srovnává tyto sítě z hlediska rozšiřitelnosti a dalšího možného využití. V praktické části se pak věnuji konfiguraci a nastavení zařízení pro síť Dante. Je zde uvedeno několik příkladů využití sítě Dante pro různé modelové situace včetně návrhu konkrétních zařízení připojených k síti. V poslední části pak popisují realizaci Dante sítě v nahrávací a postprodukční režii.

## KLÍČOVÁ SLOVA

AES67, AVB, Dante, digitální přenos zvuku, digitální sítě pro přenos audia, IP sítě, zvukové technologie, návrh sítí

## ABSTRACT

The work describes digital audio networks for audio signal transmission. Describes the various types of digital networks and describes them. It deals in more detail with digital networks for audio signal transmission over a standard Ethernet network and compares their possibilities and uses. It compares several types of digital networks for audio signal transmission over a standard Ethernet network: Dante, AVB, Ravenna and AES67. It also compares these networks in terms of scalability and other possible uses. The practical part of the thesis is then focused on the configuration and settings of devices in the Dante network. There are stated examples for usage of the Dante network in model situations including examples of the concrete Dante devices connected to the network. In the last part of the thesis is described the realization of Dante network in the recording and postproduction room.

## KEYWORDS

AES67, audio technologies, AVB, Dante, digital audio transmission, digital networks for audio transmission, IP networks, network design

RUBÍNEK, Tomáš. *Přenos audiosignálu po standardní Ethernetové síti*. Brno, 2021, 77 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací. Vedoucí práce: Ing. Robert Bayer

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma „Přenos audiosignálu po standardní Ethernetové síti“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Brno .....

.....

podpis autora

## PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu diplomové práce panu Ing. Robertu Bayerovi za odborné vedení, trpělivost a podnětné návrhy k práci. Dále bych chtěl poděkovat panu Pavlu Zgarbovi za technické poradenství při tvorbě práce.

# Obsah

Úvod	10
<b>1 Analogový přenos zvuku</b>	<b>12</b>
<b>2 Digitální přenos zvuku</b>	<b>13</b>
2.1 Vzorkovací frekvence	13
2.2 Bitová hloubka	14
2.3 Vedení signálu	14
2.4 Dělení sítí	15
<b>3 Uzavřené sítě</b>	<b>16</b>
3.1 ADAT	16
3.2 AES/EBU (AES 3)	16
3.3 MADI (AES 10)	17
3.4 AES50	18
<b>4 Otevřené sítě</b>	<b>19</b>
4.1 Dante	21
4.1.1 Synchronizace Dante	21
4.1.2 Přidělování IP adres	23
4.1.3 Switche pro Dante	23
4.1.4 Redundance	24
4.1.5 Zařízení pro Dante	24
4.2 AVB	26
4.2.1 Synchronizace	26
4.2.2 Přenos signálu	26
4.2.3 Podporované switche pro AVB	27
4.3 Ravenna	29
4.4 AES67	30
4.5 Topologie sítí	30
4.6 Návrh sítě	31
<b>5 Konfigurace sítě pro Dante</b>	<b>33</b>
5.1 Software Dante Controller	33
5.2 Konfigurace přepínačů	34
5.2.1 Konfigurace D-Link DGS-1100	35
5.2.2 Konfigurace Cisco SG300-10P	35
5.3 Zpoždění signálu	37

5.4	Měření zpoždění v rámci umělé sítě . . . . .	39
5.4.1	Topologie sítě . . . . .	39
5.4.2	Zpoždění v rámci sítě Dante . . . . .	40
5.4.3	Reálné zpoždění audiosignálu . . . . .	43
<b>6</b>	<b>Využití Dante</b>	<b>46</b>
6.1	Malý live koncert . . . . .	46
6.2	Live koncert s monitorovacím pultem . . . . .	47
6.3	Divadlo . . . . .	50
6.4	Konferenční místnost . . . . .	52
6.5	Plošné ozvučení pomocí Dante . . . . .	53
<b>7</b>	<b>Nahrávací a postprodukční režie</b>	<b>55</b>
7.1	Popis sítě . . . . .	56
7.2	Provoz sítě . . . . .	58
7.3	Routing sítě . . . . .	61
	<b>Závěr</b>	<b>64</b>
	<b>Literatura</b>	<b>70</b>
	<b>Seznam symbolů, veličin a zkratk</b>	<b>76</b>

# Seznam obrázků

5.1	Nastavení routingu v Dante Controller . . . . .	33
5.2	Nastavení EEE pro D-Link DGS-1100-05 . . . . .	35
5.3	Nastavení DSCP priorit pro D-Link DGS-1100-05 . . . . .	36
5.4	Nastavení EEE pro Cisco SG-300-10P . . . . .	36
5.5	Nastavení DSCP pro Cisco SG-300-10P . . . . .	37
5.6	Zapojení sítě Dante pro měření . . . . .	40
5.7	Schéma zapojení měření latence . . . . .	40
5.8	Latence při rychlosti 1 Gbit/s . . . . .	41
5.9	Latence při rychlosti 100 Mbit/s, nastaveno 250 $\mu$ s . . . . .	42
5.10	Latence při rychlosti 100 Mbit/s, nastaveno 500 a 1000 $\mu$ s . . . . .	42
5.11	Latence při zatížení linky 20 % a 80 % . . . . .	43
5.12	Celková latence audiosignálu při nastavení 250 $\mu$ s . . . . .	45
6.1	Malý live koncert . . . . .	47
6.2	Live koncert s monitorovacím pultem . . . . .	49
6.3	Divadlo . . . . .	51
7.1	Blokové schéma zapojení postprodukční režie . . . . .	59
7.2	Ukázka Dante routingu pro nahrávání interpreta . . . . .	61
7.3	Ukázka Dante routingu pro mixing a mastering . . . . .	62

# Seznam tabulek

2.1	Běžně používané vzorkovací frekvence . . . . .	13
4.1	Zařízení pro implementaci Dante do koncových produktů . . . . .	24
4.2	Vybrané switche podporující AVB dle specifikací výrobců . . . . .	27
5.1	Priority pro jednotlivé DSCP hodnoty . . . . .	34
5.2	Zpoždění dat v Dante síti dle softwaru Dante controller . . . . .	41
5.3	Zpoždění audiosignálu v Dante síti . . . . .	44

# Úvod

V této práci se věnuji oblasti přenosu zvukového signálu po standardní ethernetové síti. Zabývám se různými možnostmi a technologiemi digitálního přenosu zvukového signálu s využitím běžné ethernetové sítě. U vybraných typů přenosu se věnuji technickým specifikacím těchto protokolů a jejich vlivu na použití v praxi. Dále prakticky ověřuji chování sítě Dante v praxi a navrhuji několik modelových řešení pro využití sítě a popisuji realizaci jednoho z nich.

V první části práce se věnuji popisu zvukového vlnění a základním principům jeho digitalizace. Věnuji se výhodám i nevýhodám digitálního přenosu zvuku.

Dále se zabývám různými druhy digitálních sítí pro přenos zvukového signálu a uvádím nejčastější příklady protokolů, které jsou pro tento typ komunikace užívány. Při srovnávání jednotlivých protokolů zohledňuji možnosti jejich užití a omezení, která při využití daných digitálních technologií nastávají.

V další části se již věnuji otevřeným sítím využívajících ethernetovou síť. Popisuji základní principy fungování několika nejběžnějších protokolů a popisuji rozdíly mezi nimi. Práce zhodnocuje jednotlivé protokoly a uvažuje jejich možnosti v praktickém využití pro různé modelové situace, a to z hlediska nákladů, rozšiřitelnosti a jednoduhosti instalace. Práce se zabývá parametry, které ovlivňují možnosti rozšíření či jsou důležité pro návrh samotné topologie sítě.

V následující pasáži se věnuji praktickému provozu sítě. Nejprve popisuji základní princip a práci se softwarem Dante Controller, který je využíván pro nastavení a správu zařízení v Dante síti. Dále se věnuji procesu nastavení přepínačů pro provoz v síti Dante. Konkrétně se jedná o switche od firmy Cisco a D-Link, které používám pro spínání v rámci provozu Dante sítě.

Pro ověření chování sítě jsem dále vytvořil v laboratorních podmínkách malou síť, na které jsem testoval různé chování provozu v případě různých situací. Věnoval jsem se zpoždění přenosu dat v rámci sítě v závislosti na počtu switchů, přes které musí signál projít v případě malého zatížení sítě.

Dále, abych mohl ověřit chování v případě velkého zatížení sítě, provádím měření pro situaci, kdy je snížena celková přenosová rychlost. Pro tuto situaci ověřuji chování sítě pro různé úrovně zatížení a sleduji, jak se chová přenos jiných dat i audiosignálu v Dante síti.

Další částí praktického měření je ověření skutečného zpoždění audiosignálu přenášeného přes síť Dante v závislosti na nastaveném zpoždění u jednotlivých zařízení v Dante Controlleru.

V další části se již věnuji návrhům pro různá uplatnění, ve kterých může být využito přenosu zvuku po běžné ethernetové síti. Navrhuji několik příkladů od malých

instalací až po rozsáhlé provozy, ve kterých může být výhodné využívat zařízení pracující na síti Dante. Uvádím konkrétní příklady zařízení, které mohou být využity a popisuji základní funkce a možnosti.

Později se již věnuji praktické realizaci postprodukční a nahrávací režie, kde jsem spolupracoval na velké části navrhování i realizace nejen sítě pro digitální přenos zvuku, ale i dalších technologií. Popisuji základní požadavky na realizovanou instalaci, využitá zařízení a další informace o konfiguraci a možnostech nastavení a routingu dané sítě. V závěru se věnuji shrnutí a komentování základních výhod i nevýhod využívání digitálního přenosu audiosignálu přes ethernetovou síť. Hodnotím reálné uplatnění a možnosti využívání dané technologie a komentuji provoz a výsledky měření a funkce realizované sítě.

# 1 Analogový přenos zvuku

Zvuk je z hlediska fyzikální podélné mechanické vlnění, které se šíří tekutým prostředím, např. vzduchem. Frekvence zvukového vlnění slyšitelného lidským uchem se pohybují v rozmezí 20 Hz – 20 kHz. Měření či zaznamenání tohoto mechanického vlnění může být provedeno s pomocí mechanického zařízení a pozdější zpětné mechanické reprodukce zvukové vlny. Tohoto principu se využívalo např. V původních gramofonech (v nástupcích fonografů), ve kterých se s pomocí velké ozvučnice přenáší vibrace na jehlu, která vyryje vlnění do rotujícího válce či desky. Při přehrávání je obdobným způsobem vibrace z jehly kopírující tvar vyrytých do rotující desky znovu zesílena pomocí ozvučnice.

Pro širší možnosti zpracování a ukládání zvukových záznamů je ovšem nezbytné převedení původního mechanického vlnění na elektrický signál. K tomu se využívají různé měniče (např. mikrofony nebo snímače), kterými je akustická energie přeměněna na energii elektrickou (elektrický proud). Stále ovšem platí, že signál je popisován jako spojitý signál reprezentován hodnotou napětí v závislosti na čase. [1]

## 2 Digitální přenos zvuku

Digitální přenos zvuku je spojen s převedením analogového signálu do číslicové podoby. Nejvíce zavedený, ale také jeden z nejjednodušších způsobů kódování audia, je tzv. pulzně kódová modulace (Pulse code modulation) neboli PCM. Analogový elektrický signál, který reprezentuje zvukové vlnění, je čistě spojitým signálem. Signál, který je převeden do číslicové podoby, je odvozen od průběhu analogového signálu, který byl rozdělen na samply (vzorky) v pravidelných intervalech a konvertován v signál digitální, tedy číslo odpovídající úrovni analogového signálu v daném čase. [2]

### 2.1 Vzorkovací frekvence

Zásadní hodnotou pro převod analogového na digitální signál je smplovací frekvence. Lidské ucho je schopno vnímat frekvence v rozmezí přibližně 20 Hz – 20 kHz. Vhodnou hodnotu vzorkovacího kmitočtu popisuje Nyquistův teorém, ten popisuje, že aby bylo možné zaznamenat danou frekvenci jako digitální signál, je vhodné zvolit vzorkovací frekvenci v hodnotě  $f_{vz} > 2 \cdot 20 \text{ kHz}$ . Z historického hlediska vycházejícího z technik modulování analogového zvuku u VCR kazetových přehrávačů je dnes jednou z nejběžnějších vzorkovacích frekvencí používaných v domácí technice (a to především u audio CD) frekvence 44,1 kHz.

Ta ovšem není jedinou využívanou. V současné době se velmi často setkáváme s vzorkovací frekvencí, která je využívána především v oblastech televizního vysílání a digitální kinematografie, a také při použití s profesionální technikou, která se takto rozšířila do dalších oblastí, které využívají digitální přenos a zpracování zvuku jako jsou streamovací služby, ať už pro přenos zvuku či videa. Jedná se o frekvenci 48 kHz.

Ovšem s vyššími požadavky na kvalitu zpracování zvuku a zvyšujícími se nároky na digitální přenos se dnes často setkáváme s hodnotami vyššími. Z praktických důvodů, kdy je možné jednoduše provádět resampling (převzorkování) na nižší hodnoty vzorkovací frekvence pouhým vynecháním určitého počtu vzorků (tedy např. zahazením každého druhého), se používají výhradně násobky těchto dvou nejběžnějších smplovacích frekvencí 41 kHz a 48 kHz a jejich hodnoty jsou uvedeny v tabulce 2.1.

44,1 kHz	88,2 kHz	176,4 kHz
48 kHz	96 kHz	192 kHz

Tab. 2.1: Běžně používané vzorkovací frekvence

## 2.2 Bitová hloubka

Kromě vzorkovací frekvence je u pulzně kódové modulace zásadní hodnota pro zpracování digitálního zvuku bitová hloubka na každý vzorek. Udává, kolika bitové číslo je použito pro uložení hodnoty signálu každého bitu. Běžné hodnoty užívané v audiotechce jsou 16 bitů (především použití u audio CD), 24 bitů (video technika a profesionální použití) a 32 bitů.

Pokud bychom uvažovali bitovou hloubku 16 bitů, tak pro úroveň signálu kódovaném v každém vzorku máme k dispozici  $2^{16} = 65536$  hodnot. V případě 24 bitů by se potom jednalo o  $2^{24} = 16777216$  hodnot, tedy těchto hodnot je 256krát více. Nejběžnější hodnotou využívanou v profesionální technice bývá 24, případně 32 bitů. [1]

## 2.3 Vedení signálu

Největší výhodou pro použití digitálního signálu oproti analogovému vedení signálu je jeho odolnost vůči rušení. Při použití dlouhých kabelových tras dochází k ovlivnění vedeného signálu rušením, zvyšováním šumu a dalšími negativními vlivy na trase. Tomu se nedá zabránit u analogového ani u digitálního signálu. Rozdíl je ovšem ve vlivu tohoto rušení na samotný signál. Rušení má na analogový signál zásadně negativní vliv a projevuje se jako šum, zkreslení zvuku či různé další poškození signálu, které jsou velmi špatně nebo zcela neoddělitelné od původního zdroje. Tomu je možno se částečně bránit symetrickým vedením signálu a kvalitním stíněním signálových cest. Ovšem nikdy se mu nedá zcela zabránit.

Digitální signál, který je reprezentován číslicovými údaji a přenášen jako logický signál např. nula nebo jedna, je sice tímto rušením zasažen, a to způsobí drobný rozdíl v napětí jednotlivých hodnot, pokud jsou ale tyto údaje stále dobře čitelné a lze rozeznat rozdíly mezi jednotlivými hodnotami, je signál správně přečten a je dále zpracován v nezměněné podobě oproti signálu původnímu. To umožňuje vedení signálu na velké vzdálenosti, aniž by došlo ke kvalitativnímu ovlivnění signálu. [3]

Nejzásadnější nevýhodou, která se projevuje u digitálního přenosu dat, je latence. Pro každé zpracování či přenesení digitálních dat mezi jednotlivými zařízeními či v rámci jednoho zařízení, dojde ke zpoždění mezi příjmem a dalším odesláním dat. Tato jednotlivá zpoždění způsobují, že signál, který je přenášen digitálně, je časově zpožděn. Toto zpoždění se v závislosti na technologii a nastavení může u různých technologií pohybovat ve stovkách mikrosekund až po jednotky či desítky milisekund. V některých případech nemusí zpoždění i několika stovek milisekund (např. v případě jednostranné komunikace) způsobovat žádný zásadní problém pro použití dané technologie.

V některých situacích může být ale zpoždění zvukového signálu kritické pro použití, a i jednotky milisekund mohou způsobovat zásadní problém pro aplikaci digitálního přenosu zvuku. Například při použití v nahrávacích studiích, kdy jsou sluchátka používána jako odposlech pro nahrávání například zpěvu interpreta, je nízká latence pro přenos zvukového signálu z mikrofonu do sluchátek zásadní podmínkou pro její užití.

Další nespornou výhodou digitálního přenosu zvuku je možnost přenosu více kanálů zvuku včetně ovládacích signálů po jednom jediném kabelu. Na rozdíl od analogového přenosu, kde se pro přenos zvuku využívá jeden kabel pro jeden zvukový kanál, nebo se používají těžké a nákladné multipárové kabely, při použití digitálních technologií je možné přenášet po jednom kabelu výrazně více dat. Díky čemuž mohou být ušetřeny náklady a zjednodušuje se proces instalace.

## 2.4 Dělení sítí

Sítě, které jsou využívány pro přenos digitálního zvukového signálu se z hlediska provedení sítě, mohou dělit na sítě uzavřené a otevřené. Sítě uzavřené slouží pouze k propojení dvou zařízení mezi sebou. Pro připojení více zařízení je u některých sítí možné využít speciální rozbočovače, či konvertory. Otevřené sítě na rozdíl od uzavřených umožňují propojení velkého množství zařízení, může se jednat o desítky i stovky. Na rozdíl od uzavřených sítí umožňují některé využít standardní IP infrastrukturu a nevyžadují vlastní oddělenou technologii. [4]

## 3 Uzavřené sítě

Uzavřené sítě jsou určeny pro přenos signálu jen mezi dvěma zařízeními. Typicky se může jednat o propojení mixážního pultu s digitálním stageboxem, kdy je vstupní analogový signál převeden do digitální podoby ve stageboxu a dále je veden digitálně do mixážního pultu. V některých případech je možné řetězit více zařízení za sebe, případně použít speciální rozbočovače. Díky jednoduchosti sítí a jejich jednoúčelovosti bývají tyto sítě stabilnější a mívají menší latenci.

### 3.1 ADAT

Umožňuje přenos až osmi zvukových kanálů s vzorkovací frekvencí 44,1 kHz nebo 48 kHz a případně až čtyř kanálů s vzorkovací frekvencí 96 kHz nebo 2 kanály s frekvencí 192 kHz. Přenos dat je jednosměrný a využívá se optických kabelů s konektory Toslink. [4]

I když byl formát ADAT definován v roce 1991, je dodnes často používán pro digitální přenos audia na malé vzdálenosti např. ve studiových podmínkách. Z důvodu omezení na maximální počet osmi kanálů se nikdy neprosadil ve velkém měřítku a jeho užívání s příchodem modernějších technologií klesá.

### 3.2 AES/EBU (AES 3)

AES/EBU neboli AES3 je standard pro přenos dvoukanálového lineárního zvuku. Přenos zvuku je v tomto formátu realizován smplovací frekvencí 32 – 192 kHz, frekvence signálů přenášená kabelem se pohybuje mezi 4,096 – 24,5 MHz. Doporučeny jsou kabely s impedancí  $110 \Omega \pm 20 \%$ . [5]

Pro přenos zvukového signálu pomocí AES/EBU jsou nejčastěji používány běžné konektory XLR, kdy je signál veden jako symetrický se stejným zapojením jako běžný audiosignál. Je možné AES/EBU vést i v nesymetrické podobě po koaxiálních kabelech.

Signál AES3 se skládá z rámců (frame). Každý rámec obsahuje dva podrámce (subframe) – každý pro jeden kanál. Jednotlivé podrámce jsou dlouhé 32 bitů. Rámce se skládají do bloků, každý obsahuje 192 rámců.

- První 4 bity (Preamble) obsahují informaci o synchronizaci o jednotlivých rámcích a subrámcích.
- Dalších 24 bitů obsahuje samotný PCM zvukový signál.
- Poté je jeden bit pro určení, jestli je signál vhodný k D/A konverzi.
- Uživatelský bit pro další data.
- Channel status – 192bitové slovo pro celý rámec.
- Parity bit – pro detekci chyby.

První čtyři bity ze zvukového signálu PCM mohou být použity pro pomocný signál, např. talkback komunikaci v nízké kvalitě. [5]

AES/EBU je v současnosti nejčastějším způsobem přenosu digitálního zvuku pro použití s zařízeními s malým počtem zvukových kanálů. Typickým příkladem využití AES/EBU pro přenos zvuku je propojení mixážního pultu (nebo digitálního stageboxu) se zesilovačem či aktivním reproboxem nebo např. propojení dvou mixážních konzolí dvoukanálovým zvukem.

Velkou výhodou použití AES/EBU je možnost použití i běžných mikrofonních kabelů s konektory XLR pro přenos na krátké vzdálenosti. Nevýhodou je přenos maximálně dvou kanálů zvuku.

### 3.3 MADI (AES 10)

Z formátu AES3 dále vychází formát AES 10 neboli MADI. To bylo vyvinuto skupinou firem zabývajících se audiotechnikou Neve, SSL, Sony a Mitsubishi. Standard AES10 byl publikován v roce 1991.

Každý podrámec v MADI se skládá z 32 bitů, který se skládá z:

Prvních čtyř bitů, které určují:

- Bit 0: Označení prvního kanálu v rámci.
- Bit 1: Je-li kanál aktivní (ON/OFF).
- Bit 2: Označení stereokanálů, pokud jsou dva kanály označené jako stereo pár.
- Bit 3: Označení začátku audio dat.
- Dalších 24 bitů audio signálu ve formátu PCM.
- Další 4 bity stejně jako u AES3:
  - Poté jeden bit pro určení, jestli je signál vhodný k D/A konverzi.
  - Uživatelský bit pro další data.
  - Channel status – 192bitové slovo pro celý rámec.
  - Parity bit – pro detekci chyby.

Jednotlivé rámce obsahující mezi jednotlivými subrámcí synchronizační signál, který je vkládán minimálně jednou za rámec, ale může se opakovat mezi kanály nebo po posledním kanálu. [6]

MADI podporuje až 64 kanálů při vzorkovací frekvenci 48 kHz (případně 56 kanálů při variabilní vzorkovací frekvenci  $48 \text{ kHz} \pm 12 \%$ ) a 32 kanálů při frekvenci 96 kHz. Celkový datový tok sériové komunikace MADI dosahuje 125 Mb/s. Velkou výhodou použití sériové komunikace je nízká latence dosahují pouze 1 vzorku. MADI se používá jako point-to-point spojení a využívá se pro něj koaxiální kabeláž o impedanci  $75 \pm 2 \Omega$  s maximální délkou 50 m a poklesem signálu  $< 0,1 \text{ dB/m}$  v rozsahu 1 – 100 MHz nebo optické kabely v single nebo multimode. [7]

Velkou výhodou MADI je velmi nízká latence a jednoduchost. Nevýhodou je možnost propojení pouze dvou zařízení a jednosměrný provoz. Pro případ většího množství kanálů a obousměrný provoz je nutné použít více kabelů.

### 3.4 AES50

Je obdobou MADI vedeného po standardní kroucené dvojlice (Cat5/Cat5e). Na rozdíl od MADI umožňuje obousměrný provoz do vzdálenosti maximálně 100 m. Je možné přenášet 48 obousměrných kanálů o samplovací frekvenci 48 kHz a 24 kanálů o frekvenci 96 kHz.

Proprietární implementací AES50 je technologie SuperMAC. Z ní vychází technologie HyperMAC, která umožňuje přenášet až 384 kanálů při 48 kHz po Cat5e/Cat6 nebo optickém kabelu. Latence je  $62,50 \mu\text{s}$  u AES50 a  $41,66 \mu\text{s}$  u HyperMAC.

Stejně jako u MADI je ale možné spojení pouze mezi dvěma koncovými zařízeními. I když tato síť využívá standardní kabeláž, používanou pro IP protokol, nejedná se o IP síť, a není tedy možné pro přenos využívat běžnou ethernetovou síť, ani připojit do cesty jiné než AES50 zařízení. Nelze proto využívat např. přepínačů, pro rozšíření sítě a možné zapojení je pouze přímou linkou mezi dvěma koncovými prvky. [8]

## 4 Otevřené sítě

Uzavřené sítě umožňují přenos digitálního zvuku na relativně velké vzdálenosti s velkým počtem kanálů. Jejich nevýhodou je, že neumožňují zapojení více zařízení do jedné sítě a propojení může být vždy realizováno pouze mezi dvěma body. To přináší řadu nevýhod pro užití ve větších instalacích případně v prostorech, kde je třeba zapojit velké množství přípojných míst či zařízení.

Proto se v poslední době velmi rozšiřuje využití pro otevřené sítě, které bývají založeny na protokolu IP. Na rozdíl od uzavřených sítí umožňují propojení velkého množství zařízení do jedné sítě. Jsou postaveny na standardu Ethernet a většina z nich umožňuje zapojení do běžné ethernetové sítě a využití standardních ethernetových přepínačů. U těchto sítí bývá vyšší latence než u sítí uzavřených. To bývá ale velmi ovlivněno rozsáhlostí sítě a počtem jednotlivých prvků.

Obrovskou výhodou otevřených sítí je možnost využívat pro provoz této sítě standardní ethernetovou infrastrukturu. Díky tomu je největší výhodou těchto sítí možnost libovolně měnit topologii sítě a zapojovat jednotlivá zařízení z kteréhokoli switche zapojeného v síti, aniž by to mělo vliv na funkci tohoto zařízení.<sup>1</sup>

To je velká výhoda oproti sítím uzavřeným, kde každé přemístění zařízení může vyžadovat přepojení kabeláže mezi zařízeními, případně přepojování v patch panelu a konfigurování jednotlivých zařízení, což znesnadňuje obsluhu.

Různých protokolů, které je a bylo možné využít existuje celá řada. V minulosti byl pro přenos zvuku často využíván např. systém EtherSound firmy Digigram. Ten bylo možné využívat v minulosti například v produktech firem Yamaha a Nexo. Ethersound bylo možné provozovat v konfiguraci daisy-chain, ring nebo hvězda. Využití topologie ale bylo omezené a při zapojení do hvězdy bylo možné provádět komunikaci pouze jednosměrně. Switch tedy sloužil jako rozbočovač, kdy byl signál z jednoho zařízení distribuován do ostatních, ale tato zařízení nemohla již odesílat upstream signál nazpátek. [9]

Vývoj Ethersoundu, a to jak jeho stomegabitové tak i gigabitové verze, byl již zastaven a výroba všech výrobků firmy Digigram související s Ethersoundem včetně vývoje softwaru jsou již dle stránek <https://www.digigram.com> ukončeny.

Dalším zástupcem dříve užívaných otevřených sítí byl v minulosti CobraNet®. Ten je ale dle stránek <https://www.cobranet.info> „EOL“ neboli end-of-life a nedoporučuje se jeho používání v moderních zařízeních a instalacích. [10]

V současnosti se v praxi můžeme potkat s několika protokoly, které se nejčastěji používají v IP sítích pro přenos zvukového signálu a jsou zároveň podporovány širším

---

<sup>1</sup>Jediným omezujícím prvkem je relativní vzdálenost zařízení v síti, protože s každým síťovým přepínačem v cestě se prodlužuje doba cesty paketu z jednoho zařízení do druhého a zvětšuje se tedy latence.

zastoupením výrobců audiotechniky. Nejčastěji používané jsou v současnosti:

- **Dante** australské firmy Audinate Pty. Ltd.,
- **AVB** (Audio Video Bridging), který je souhrnné označení pro několik standardů společnosti IEEE (Institut pro elektrotechnické a elektronické inženýrství)
- **Ravenna**, který je vyvíjen německou společností ALC NetworX GmbH, ta je součástí skupiny Lawo Group
- **AES67**, který je vyvíjen společností Audio Engineering Society (AES), který by měl slučovat a umožňovat souběžný provoz několika protokolů pracujících na 3. síťové vrstvě a konkrétně se jedná o protokoly:
  - Dante,
  - Ravenna,
  - Q-Sys (který je protokolem Americké firmy QSC),
  - Livewire (americké korporace The Telos Alliance).

## 4.1 Dante

Dante je protokol pro přenos zvuku přes standardní ethernetovou síť australské firmy Audinate.

Dante je v současnosti jednou z nejpoužívanějších technologií pro profesionální přenos digitálního zvuku. Jednou z největších výhod Dante je jeho možnost pracovat v malých sítích s několika zařízeními s nízkou latencí, ale i ve velkých sítích s desítkami zařízení a přenosem několika stovek kanálů. Další výhodou je možnost používat Dante společně i s jiným datovým provozem v jedné síti. V roce 2019 představila společnost Audinate Dante AV, která do standardu Dante dodává podporu pro přenos videa.

### 4.1.1 Synchronizace Dante

Síť Dante využívá pro synchronizaci jednotlivých zařízení PTP (Precision Time Protocol), který je standardizován jako norma IEEE 61158.

Pro zvukové aplikace s digitálním přenosem s nízkými latencemi je kriticky důležitá přesná synchronizace všech zařízení. S ohledem k tomu, že síť Dante je schopna pracovat s latencemi od 150  $\mu$ s je zásadní velmi přesná synchronizace. Tolerance přesnosti synchronizace v Dante síti je garantovaná s přesností  $\pm 1 \mu$ s, ale reálně je přesnost synchronizace mnohem větší a odchylka se pohybuje v rozmezí  $\pm 0,2 \mu$ s. [11]

Při použití protokolu PTP pro synchronizaci jsou jednotlivá zařízení uspořádána do hierarchické struktury typu řídicí a řízená zařízení (master a slave). K tomu je použit BMCA protokol (Best Master Clock Algorithm), který běží po celou dobu ve všech zařízeních. Díky tomu se nastavení řídicího zařízení pro protokol PTP může kdykoliv změnit a to i při poruše nebo při změně topologie sítě.

#### **BMCA (Best Master Clock Algorithm)**

Na základě BMCA je automaticky zvolen nejlepší zdroj synchronizačního signálu. Pro výběr nejlepšího zdroje jsou použita tato kritéria:

- Kvalita hodin (např. atomové hodiny, GPS apod.)
- Přesnost časové základny
- Stabilita oscilátoru daných hodin
- Nejbližší hodiny v rámci sítě (vzdálenost)
- Unikátní identifikátor portu, který brání dalším možným konfliktům.

[12]

Výhodou BMCA protokolu je, že uživatel může prioritizovat zařízení, která mají sloužit jako Master pro danou síť. V případě výpadku Master clocku je ale na základě

BMCA protokolu automaticky vybráno další zařízení, které roli Masteru okamžitě přebírá. Je zabráněno, že nevznikne konflikt v rámci sítě, protože jednotlivá zařízení nemusí vyjednávat mezi sebou, který clock bude master a nemůže dojít ke špatné konfiguraci, jako chybějící řídicí zařízení nebo naopak dva či více řídicích zařízení.

### Synchronizace pomocí PTP

Aby bylo možné synchronizovat přesně jednotlivá zařízení, je nutné určit přesné zpoždění linky mezi nimi. Zařízení určené jako Master, odesílá v pravidelných intervalech zprávu *Sync* a zaznamenává čas odeslání této zprávy  $t_1$ . Slave obdrží zprávu *Sync* a zaznamená čas jejího doručení  $t_2$ . Master následně po zprávě *Sync* zasílá časový údaj pro Slave s časem odeslání zprávy *Sync* v podobě *Follow\_Up* zprávy.

Slave poté vyšle obdobně zprávu typu *Delay\_Req* a uloží čas odeslání zprávy  $t_3$ . Master zaznamená přijetí zprávy a uloží čas  $t_4$ , který odesílá na Slave ve zprávě *Delay\_Resp*. Slave poté na základě těchto údajů dopočítá zpoždění linky mezi zařízeními.

$$t_{delay} = \frac{(t_4 - t_1) - (t_3 - t_2)}{2}$$

A nyní může Slave na základě informace o zpoždění linky mezi jednotlivými zařízeními určit rozdíl v synchronizaci jejich hodin:

$$\Delta t = (t_2 - t_1) - t_{delay}$$

Na základě určeného  $\Delta t$  pak dojde k přenastavení hodin na řízeném zařízení. Zatímco zprávy *Sync* jsou vysílány řídicím zařízením v pravidelných intervalech, dopočet rozdílu času probíhá pouze, pokud o něj řízené zařízení požádá zprávou *Delay\_Req*. Pro správné fungování této synchronizace platí předpoklad, že zpoždění komunikace mezi řídicím a řízeným zařízením je stejná v obou směrech komunikace a po dobu výměny zpráv je toto zpoždění konstantní. [13]

### Nastavení synchronizace pro Dante

Pro nastavení chování sítě Dante se využívá software Dante controller. Ten umožňuje nastavit preferovaný master pro synchronizaci a zvolit, zdali je u zařízení využít externí wordclock vstup. Poté se priorita výběru, které zařízení bude master pro synchronizaci wordclocku určuje takto:

1. Přednostně se za Master volí zařízení, které je uživatelem preferováno.
2. Zařízení, které má vstup wordclocku z externího generátoru.
3. Zařízení s nejlepší kvalitou hodin.
4. Zařízení s nejnižší MAC adresou. [11]

### 4.1.2 Přidělování IP adres

IP adresy v síti Dante jsou standardně přidělovány dynamicky. Je možné pro přidělování IP adres používat DHCP server. Pokud není v síti žádný DHCP server k dispozici, využívá Dante funkci Automatic Private IP Addressing (APIPA), tedy automatické přidělování IP adres. V tomto případě jsou adresy pro primární rozhraní přidělovány v rozsahu 169.254.0.0/16. Sekundárním portům jsou v tomto případě udělovány adresy 172.31.0.0/16. Je možné adresy přidělovat i staticky, ovšem pro funkci Dante zařízení je důležité, aby byla všechna zařízení v jednom subnetu.

Pro většinu aplikací sítě Dante je ale vyhovující využívat základní nastavení přidělování IP adres pomocí Automatic Private IP Addressing.

### 4.1.3 Switche pro Dante

Dante funguje na 3. síťové vrstvě a díky tomu je možné pro něj využívat i běžné neprogramovatelné switche. Pro použití s Dante se doporučuje využívat především plně duplexní síť s rychlostí přenosu 1 Gbit/s. Některá zařízení s menším počtem kanálů mají síťové rozhraní s rychlostí 100 Mbit/s. Jedním z největších problémů pro provozování IP sítě s provozem s nízkou latencí je používání technologií pro úsporu energie.

Metody pro úsporu energie používaných u ethernetových sítí se souhrnně označují zkratkou EEE (Energy-Efficient Ethernet), které se nejčastěji v zařízeních objevují jako standard IEEE 802.3az případně Green Ethernet. V praxi se tyto technologie projevují tak, že v případě nečinnosti portu může zařízení uvést port v případě, kdy nedochází k přenosu dat do „režimu spánku“. [14]

To ovšem v případě užití s Dante může vést k náhodnému odpojení portu a k výpadku signálu. To je pro přenos zvuku přes IP síť zcela nežádoucí, a z toho důvodu není možné provozovat síť Dante na zařízeních s aktivní funkcí EEE.

V současné době ale naprostá většina nemanagovatelných switchů podporuje funkci EEE a jejich použití pro síť Dante je tedy zcela nevhodné.

Pro malé sítě s menším počtem zařízení a malým datovým tokem jsou tedy plně dostatečné gigabitové switche, které umožňují vypnutí funkce EEE.

Pro větší množství zařízení se v rámci Dante využívá management provozu QoS pomocí differentiated services (diffserv, DSCP). Každý paket, který prochází sítí, obsahuje značku, která označuje, jaká třída přenosu je přidělena paketu. Jednotlivé směrovače během přenosu přečtou značku, kterou je paket označen a na základě této značky řídí, jakým způsobem bude daný paket zpracován. [15]

Pro potřeby Dante se upravují priority pro jednotlivé značky v QoS tabulce tak, aby nejvyšší prioritu měl synchronizační PTP signál, vyšší prioritu měla samotná

zvuková data. Nižší priorita je pak určena pro kontrolní a ovládací data a nejnižší priorita je nastavena pro ostatní provoz v síti.

#### 4.1.4 Redundance

Dante umožňuje provoz na jakékoli topologii, kterou podporují běžné IP sítě. Pro použití v situacích, kdy je vyžadována záloha proti případnému výpadku, porušení kabelu či poruše, umožňuje Dante plně redundantní provoz. Ten zajištěn zdvojením konektorů na zařízeních podporující Dante. Ty jsou běžně označeny jako Primary (primární) a Secondary (sekundární) port. Je tak možné pro zapojení realizovat dvě zcela nezávislé a oddělené sítě, které tak zajišťují provoz i v případě poruchy v jedné z nich. [11]

#### 4.1.5 Zařízení pro Dante

Dante v současnosti nabízí přes 2000 produktů podporující Dante od různých výrobců. [16]

Pro implementaci Dante do jednotlivých zařízení nabízí firma Audinate řadu čipů, modulů a dalších řešení, které se implementují do jednotlivých zařízení. Jedná se čipy a moduly, které mohou být implementovány do produktů jednotlivých výrobců. Jejich seznam je uveden v tabulce 4.1. Celkově Audinate nabízí řešení pro 1 kanál až celkově 512 kanálů v každém směru.

Produkt	Počet kanálů	Popis
Dante Ultimo	2x2, 4x4	čip
Dante Broadway	8x8, 16x16	čip
Dante Brooklyn II	8x8, 32x32, 64x64	modul
Dante HC	až 512x512	čip
Dante Adapter Modules	1, 2, 2x2	moduly adaptérů
Dante AV	8x8 audio, 1 video	modul
Dante PCIe-R Soundcard	256x256	PCIe karta

Tab. 4.1: Zařízení pro implementaci Dante do koncových produktů

Kromě čipů a modulů pro hardwarovou implementaci, nabízí Dante i softwarové řešení pro např. Linuxovou platformu běžící na procesorech architektury x86 nebo ARM a i další platformy. [17]

Kromě těchto řešení, která jsou určena pro výrobce a jejich implementaci do jednotlivých zařízení, nabízí Audinate i software pro koncové uživatele, který umožní využít běžný počítač, resp. jeho síťové rozhraní jako zvukovou kartu pro síť Dante.

K tomu je možno použít software Dante Virtual Soundcard, který umožňuje přenášet až 64 obousměrných kanálů mezi počítačem a dalšími zařízeními nebo Dante Via, který umožňuje přenášet až 48 kanálů, které lze v počítači přiřadit jednotlivým aplikacím (až 16 kanálů) či hardwarovým zařízením (až 32 kanálů). Oba softwary jsou k dispozici jak pro platformu Windows, tak Mac OS. Díky tomu je možné velmi jednoduše použít počítač jako multikanálový rekordér či přehrávač.  
[18]

## 4.2 AVB

Jednou z metod pro přenos zvukového signálu je standard AVB (Audio Video Bridging). Tento protokol je určen k přenosu nejen audia, ale i videa po sdílené ethernetové infrastruktuře. AVB je založeno na několika standardech definovaných Institutem pro elektrotechnické a elektronické inženýrství (IEEE) popisujících základní parametry protokolu.

### 4.2.1 Synchronizace

Pro synchronizaci AVB je používán je používán gPTP standard, který je definován pomocí IEEE 1588-2008. Jedná se o Precision Time Protocol, který využívá i síť Dante, který ovšem obsahuje přidané funkce navíc, díky kterým dosahuje gPTP větší odolnosti proti kolísání zpoždění, což je způsobenou podporou tohoto protokolu na 2. linkové vrstvě ve všech switchích. Díky tomu nedochází ke zdržení synchronizačních paketů ve frontě v jednotlivých zařízeních.

Stejně jako u Dante sítě je pro výběr řídicího zdroje synchronizačního signálu použit Best master clock algorithm (BMCA) definovaný v PTP standardu. Obdobně jako v Dante je ale možné nastavit hlavní master zdroj pro synchronizování ostatních řízených zařízení a to i záložní hlavní zdroj pro případ výpadku zdroje primárního. [19]

### 4.2.2 Přenos signálu

Samotný přenos streamovaných dat začíná až v momentě, kdy je dohodnuta komunikace mezi dvěma zařízeními a přenos dat již poté probíhá pouze mezi těmito dvěma koncovými body. K tomu je využit MSRP (Multiple Stream Reservation Protocol). Aby mohlo být spojení vytvořeno, zašle zařízení, které má zasílat AVB stream (Talker), upozornění na lokálně dostupné streamy, každý označen unikátním ID. Tato zpráva obsahuje data o parametrech streamu, jako je potřebná přenosová kapacita, třída, priorita streamu a další. Jednotlivé switche poté tuto zprávu přepošlou všem dostupným AVB zařízením, které mají dostatek volné přenosové kapacity pro přijetí daného streamu.

Zařízení schopná přijmout AVB stream dostanou zprávu, kterou zpracují (Listener). Poté odešlou pomocí MSRP (Multiple Stream Reservation Protocol) zprávu o tom, o které streamy má zařízení zájem, aby mu byly odesílány. Switche, které předávají po cestě tuto zprávu zpět pro Talker, z kterého byla zpráva odeslána, již rezervují kapacitu pro přenos datového streamu. Poslední switch před Listener si také uloží multicastovou MAC adresu portu. Listener poté odesílá zprávu "Listener is ready" zpět na Talker.

Samotný přenos dat již poté může být prováděn v různých formátech. Během přenosu je stále ověřováno, že je Listener stále dostupný. Switche v AVB síti předávají data pouze na definovaný Listener port. Po celou dobu je rezervována kapacita a priorita pro daný přenos na všech switchích po trase přenosu streamu. [20]

### 4.2.3 Podporované switche pro AVB

AVB pro rezervování kapacity pro jednotlivé streamy využívá automatické konfigurování virtuálních sítí (Automatic VLAN configuration), automatické přidělování multicastové MAC adresy, rezervaci kapacity datového přenosu, řízení provozu, garantované doručení a časovou synchronizaci na základě standardů IEEE 802.1.

<b>Cisco</b>	Catalyst 3650 (pouze vybrané modely) Catalyst 3850 (pouze vybrané modely) Catalyst 9300 <sup>2</sup> Catalyst 9500 <sup>2</sup> (pouze vybrané modely) [21]
<b>Luminex</b>	GigaCore série [22]
<b>Extreme Networks</b>	X435, X440-G2, X450-G2, X460-G2, X465 5530 X620, X670-G2, X695 X870 [23]
<b>Biamp</b>	TesiraCONNECT TC-5 [24]
<b>L-Acoustics</b>	LS10 [25]
<b>Netgear</b> <sup>2</sup>	GS7xx série
<b>MOTU</b> <sup>2</sup>	AVB Switch [26]
<b>Presonus</b> <sup>2</sup>	SW5E [27]

Tab. 4.2: Vybrané switche podporující AVB dle specifikací výrobců

Pro jejich správnou funkci je nezbytné, aby veškerý AVB provoz v síti byl prováděn přes switche, které mají AVB podporu. Je tedy možné používat pouze některá zařízení, která jsou schopna s AVB pracovat. Výběr přepínačů, které podporují AVB je tedy omezen. V tabulce 4.2 jsou uvedeny někteří výrobci, kteří vyrábí switche, které jsou schopny pracovat s AVB protokolem. Firmy L-Acoustics, BiAmp, PreSonus a MOTU nabízí pouze jeden switch, který je volen jako doplněk k jejich produktové řadě.

MOTU AVB Switch a PreSonus SW5E má pouze 5 portů RJ-45. [26, 27] Stejný počet portů RJ-45 nabízí také Switch firmy BiAmp. [24] Větší konektivitu nabízí L-Acoustics LS10, který má celkem 8 EtherCON™ konektorů a 2 SFP konektory.

<sup>2</sup>Nejsou certifikovány Avnu Aliancí

[25] Všechny tyto switche jsou ale určeny do malých instalací pro specifické použití s AVB.

Pokud je potřeba připojit větší počet zařízení, tak se možnosti výrazně zmenšují. Switche firmy Netgear vyžadují dokoupení licence pro zprovoznění podpory AVB. Kromě toho jsou funkce AVB omezené a není možné kombinovat v síti switche Netgear se switchi jiných značek a i kombinace některých modelů v rámci jedné sítě nemusí být funkční. [28] Podobně tak switche Extreme Networks je možné provozovat s AVB až po dokoupení dodatečné licence.

Pro potvrzení kvality produktů a zajištění kompatibility v rámci provozu AVB sítě funguje od roku 2009 Avnu Aliance, která slučuje firmy z různých odvětví průmyslu pro certifikaci zařízení pro použití s AVB a Time-Sensitive Networking. Členy této aliance je řada velkých výrobců IT technologií, např. Intel a Cisco, a také řada výrobců profesionální audiotechniky podporujících standard AVB, např. Harman International Industries (člen skupiny Samsung), Adamson Systems Engineering, Avid Technology, L-Acoustics, PreSonus nebo Meyer Sound Laboratories a další. [29]

Použití certifikovaných výrobků v rámci AVB sítě je doporučováno většinou výrobců AVB zařízení. Z tabulky 4.2 jsou certifikované dle stránek Avnu Aliance pouze switche firem Cisco, Luminex, Extreme Networks, Biamp a L-Acoustics.

Kromě malého výběru switchů kompatibilních s AVB, které není možné provozovat na již současných zařízeních, pokud nesplňují podmínky pro provoz AVB, je nevýhodou pro tvorbu větších sítí, ve kterých je předpokládán síťový provoz protokolem AVB, také vysoká cena managovatelných switchů s parametry pro AVB sítě.

## 4.3 Ravenna

Ravenna síťový protokol vyvinutý německou společností ALC NetworX, která je v současné době v čele vývoje této technologie.

Stejně jako Dante, narozdíl od AVB, funguje na třetí, síťové, vrstvě referenčního modelu a není tedy třeba podpora pro tento protokol v přepínači. Pro synchronizaci je využíván Precision Time Protocol ve verzi 2, který je definován ve standardu IEEE 1588-2008. To je aktualizovaná verze, která na rozdíl od první verze, kterou využívá Dante, zvyšuje robustnost a přesnost synchronizace. [30]

Pro přenos zvuku využívá Ravenna RTP protokol, který pomocí UDP přenáší zvuková data přes Ethernetovou síť. Základní formát pro přenos zvuku je PCM pro bitovou hloubku 16 nebo 24 bitů se vzorkovací frekvencí 48 kHz. V rámci Ravenny je možné přenášet různé množství dalších formátů a vzorkovacích frekvencí a v současnosti byla definována možnost pro přenos videa pomocí protokolu Ravenna.

Pro správný provoz sítě Ravenna je stejně jako u Dante vhodné definovat QoS priority pro jednotlivé druhy dat. Nastavení priorit pro dané pakety je možné např. pomocí DiffServ stejně jako u Dante. Nejvyšší priorita je určena pro synchronizační signál, vysoká priorita pro zvuková či video data přenášená pomocí RTP, nízká priorita pak pro ovládací data. Veškerá ostatní komunikace má nastavenou nejnižší prioritu.

Výhodou protokolu Ravenna je možnost připojit se k existujícímu zdroji RTSP streamu. Obdobně je možné, aby byl obsah streamu Ravenna protokolu přehrán i zařízením, které nepodporuje Ravennu. Nebude ale schopno přečíst další údaje udávané protokolem, jako jsou např. parametry synchronizace).

Pro správnou komunikaci v IP síti je třeba, aby každému zařízení byla přidělena unikátní IP adresa. Stejně jako v Dante jsou adresy v případě nepřítomnosti DHCP serveru přidělovány automatickou metodou pro přidělování IP adres. Ve větších sítích se doporučuje používat pro přidělování IP adres běžný DHCP server.

Latenci je možné konfigurovat pro každý stream individuálně, což umožňuje přizpůsobit její nastavení dané konfiguraci sítě. Ravenna je uzpůsobena i pro přenos mezi několika sítěmi a latenci je možné uzpůsobit konkrétní síti. Ravenna podporuje jak Fast Ethernet tak i Gigabit Ethernet, který je pro většinu užití doporučován. Pro větší počty kanálů je možné použít i vyšší rychlosti Ethernetu.

Síť Ravenna je stejně jako Dante možné provozovat v plně redundantním zapojení. [31]

## 4.4 AES67

Od roku 2000 zaznamenává rozvoj přenosu audiosignálu po Ethernetové síti zásadní rozvoj. Téměř každý výrobce audiotechniky přišel s vlastním protokolem, který používal pro přenos audiosignálu. Z důvodu růstu využití IP sítí a poklesu cenu jednotlivých prvků část z nich byla založena na IP protokolu a využívala RTP protokol. Po roce 2010 existovala řada technologií podporujících přenos signálu po Ethernetové síti, které ale byly zcela vzájemně inkompatibilní.

Proto byla výrobci zabývající se zařízeními pro přenos audia po ethernetové síti vytvořena skupina a v roce 2013 byl definován standard AES67. Ten využívá standardy, které již byly využívány v existujících protokolech:

- **PTP** – pro synchronizaci,
- **RTP** – pro přenos datového proudu,
- **QoS** – nejvyšší priorita pro synchronizační data, poté samotný datový přenos, nižší pro ovládací a komunikační data a nejnižší pro ostatní provoz.
- **SDP** (Session Description Protocol) – pro sdílení dalších informací mezi jednotlivými stranami přenosu

AES67 byl navrhnout jako protokol, který umožňuje sdílet data mezi zařízeními, která byla navrhována pro protokoly:

- Dante,
- Ravenna,
- Livewire,
- Q-LAN,
- a další. [32]

Jedná se o nejpoužívanější protokoly v oblasti přenosu zvukového signálu po Ethernetové síti. O další rozvoj a užití standardu AES67 se v současnost stará aliance firem AIMS (The Alliance for IP Media Solutions – <https://aimsalliance.org>).

V současnosti lze na stránkách najít seznam zařízení, která podporují AES67. V současné době (prosinec 2020) je v seznamu přes tři stovky zařízení, která podporují protokol AES67. Najdeme mezi nimi například mixážní pulty, zesilovače, procesory, převodníky, rozšiřující karty a další výrobky firem QSC, Yamaha, Digigram, Linear Acoustics, Axia Audio, Atterro Tech, Focusrite, Solid State Logic, Studio Technologies, Inc., Riedel, Lawo, Studer, Wheatstone, a další. [33]

## 4.5 Topologie sítí

Všechny protokoly pro otevřené sítě pro přenos audia a videa přes standardní ethernetovou síť je možné provozovat na všech běžných topologiích pro IP síť. Pro spolehlivost zapojení a bezchybovost provozu je výhodné využívat redundantní zapojení. To

je realizováno tak, že je každá síť realizována dvojitě, tedy veškerá kabeláž, přepínače či další zařízení jsou v síti realizovány dvakrát. To umožňuje zařízením připojených redundantně do sítě v případě poruchy některého ze síťových přepínačů, využít sekundární port, který tak slouží jako záloha v případě výpadku sítě primární. Díky tomu, že je tato redundance přímo součástí jednotlivých protokolů, dokáží zařízení v případě výpadku primární sítě okamžitě reagovat a při poruše primárního kabelu dochází k přepojení bez výpadku zvukového signálu. [11]

Nejčastěji se zvukové sítě navrhují jako topologie strom. Nejpoužívanější rychlostí, která je potřebná pro přenos audiosignálu je 1 Gbit/s. Proto aby nedocházelo k problémům s příliš velkým vytížením sítě, což by mohlo způsobovat výpadky audia či synchronizačního signálu, se nedoporučuje zatěžovat jednotlivé porty a spoje více než 70 % jejich celkové kapacity. V případě vzorkovací frekvence 48 000 Hz a bitové hloubky 24 bit vyžaduje jeden kanál přibližně  $48 \cdot 10^3 \cdot 24 \approx 1,2$  Mbit/s.

V případě vytížení sítě menší než 70 % je tedy přes síť o rychlosti 1 Gbit/s možné přenést celkem přibližně 500 kanálů. To je pro většinu aplikací dostatečný počet kanálů i pro náročné použití v hudebním odvětví, kdy tento počet kanálů je dostatečný pro odbavení i náročných hudebních aplikací.

Pokud by došlo ke zvolení větší bitové hloubky (32 bitů) a větší vzorkovací frekvence (např. 96 kHz) je již datový tok PCM zvukového signálu větší.

Celkově se bude jednat o:  $96 \cdot 10^3 \cdot 32 \approx 3$  Mbit/s a tak je celkový možný počet kanálů přenášený po síti s rychlostí 1 Gbit/s přibližně 200 kanálů.

Pokud by toto množství nebylo pro některé aplikace dostatečné, případně by byla síť využívána i pro přenos videosignálu, jehož datové toky mohou dosahovat výrazně vyšších hodnot, je možné používat i ethernetovou síť s vyššími rychlostmi. Pro hlavní signálové trasy je tak možné využít ethernet s rychlostí 10 Gbit/s případně pomocí agregace linek dosáhnout vyšší propustnosti.

Zařízení, která obsluhují menší počet kanálů, často pracují se síťovým rozhraním o rychlosti 100 Mbit/s. V případě kombinování více rychlostí ethernetu v síti je zásadní pro správnou funkci prioritizace dat využít přepínače se správně nakonfigurovanou funkcí QoS pro daný protokol.

## 4.6 Návrh sítě

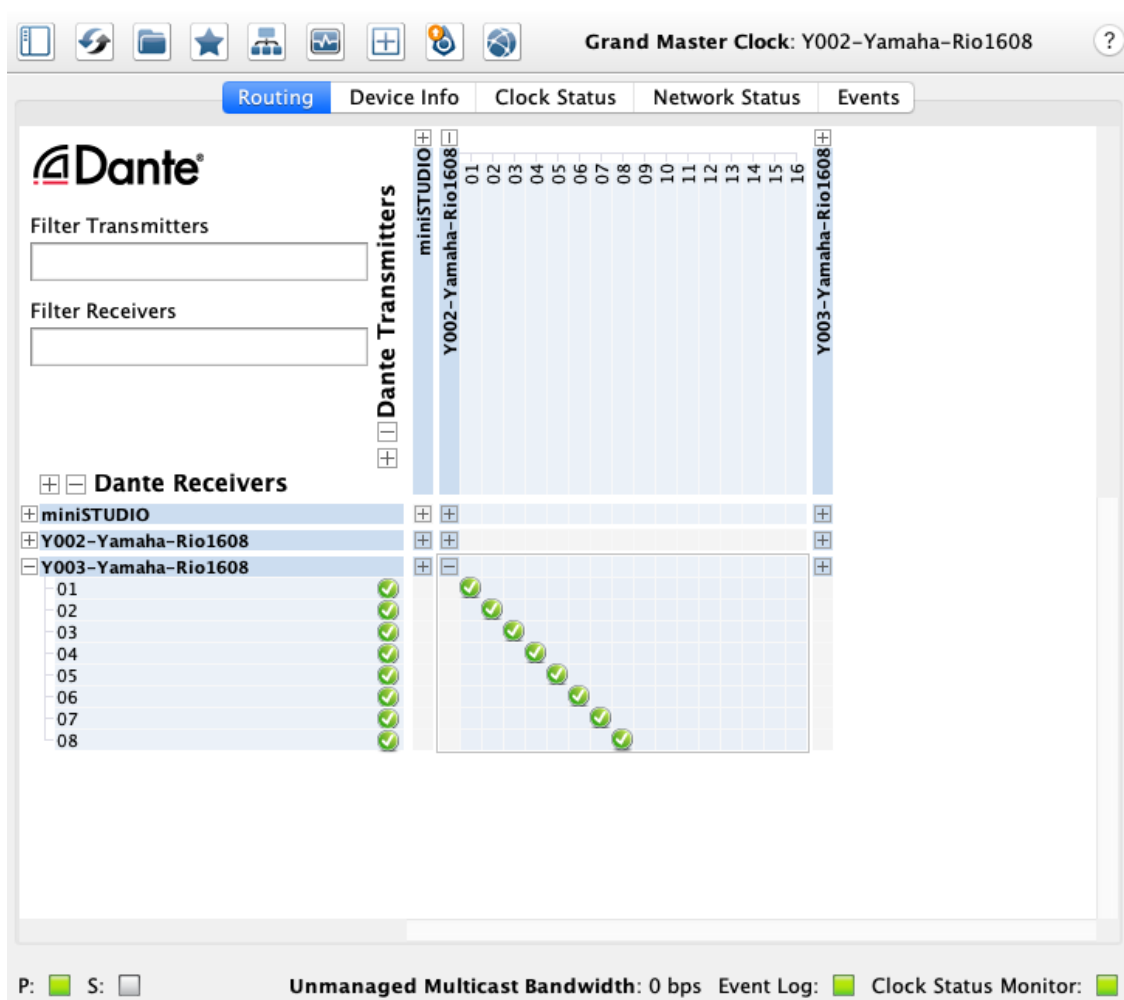
Pro návrh sítě je možné využít běžnou kabeláž, která odpovídá parametrům ethernetové sítě. Je možné využít jak metalické, tak optické kabely, což umožňuje přenos audio dat i na velké vzdálenosti. Nejčastějším typem kabeláže jsou metalické kabely UTP nebo STP kategorií Cat5e a Cat6. Pro velké instalace je poté možné použít optické kabely či metalické kabely s vyššími přenosovými rychlostmi např. kategorie Cat6a.

Výhodou přenosu zvuku po standardní ethernetové síti je možnost, že infrastruktura může být sdílená s dalším síťovým provozem. V případě instalace tedy může být pro více druhů provozu použit jeden stejný druh kabeláže, který může být využit pro více druhů síťového provozu, což zjednodušuje a zlevňuje samotnou instalaci. Dále je také možno např. oddělením pomocí virtuálních sítí využívat jednu linku pro více technologiích, které mohou využívat stejnou kabeláž.

## 5 Konfigurace sítě pro Dante

### 5.1 Software Dante Controller

Pro správnou funkci zařízení v rámci sítě Dante a přenos je využíván software Dante Controller od firmy Audinate. Ten kromě routování samotného signálu mezi zařízeními v rámci sítě umožňuje nastavovat zařízením připojeným v Dante síti další parametry jako nastavení latence, přenosové rychlosti a vzorkovací frekvence zvuku či IP adresy jednotlivých zařízení. Dále je zásadní pro nastavení hlavního zdroje synchronizačního signálu v rámci Dante sítě. V rámci Dante je primární zdroj synchronizace, tedy wordclocku, určován automaticky, viz kapitola 4.1.1. Je možné ale v rámci Dante Controlleru uživatelem vybrat tzv. *Preferred Master*, který bude přednostně určen jako hlavní zdroj synchronizace pro Dante síť.



Obr. 5.1: Nastavení routingu v Dante Controller

Při nastavování sítě ale nejvíce využíváme nastavení routingu výstupů jednoho zařízení do vstupů druhého. Jak je vidět na obrázku 5.1 routing v Dante Controlleru se provádí formou tabulky. Sloupce v tabulce zobrazují vstupy jednotlivých zařízení do sítě Dante, tedy zařízení, která odesílají data. Na řádcích se poté zobrazují zařízení, která data přijímají, tedy výstupy jednotlivých zařízení ze sítě Dante. Na obrázku 5.1 je tedy prvních osm kanálů ze zařízení Y002-Yamaha-Rio1608 do prvních osmi kanálů zařízení Y003-Yamaha-Rio1608.

## 5.2 Konfigurace přepínačů

Jak je popsáno v kapitole 4.1.3, pro správnou funkci Dante musí být použity switche bez funkce EEE (Energy-Efficient Ethernet). Ovšem nemanagovatelné switche bez funkce úspory energie se již nevyrábí a proto se ve většině případů provozuje síť Dante na managovatelných přepínačích, ve kterých se funkce EEE zakáže.

Pro síť s malým počtem zařízení se nemusí provádět další konfigurace. Pro náročnější síťový provoz a zajištění spolehlivosti je ale vhodné zajistit upřednostnění určitého druhu síťového provozu. To se v rámci Dante nastavuje pomocí konfigurace DSCP tabulky. Pomocí differentiated services je možné nastavit prioritu pro 64 různých datových druhů. V rámci Dante se nastavuje nejvyšší priorita pro Precision Time Protocol (56), dále je vysoká priorita nastavena samotnému audio signálu (46). Nižší priorita je pak nastavena datům pro ovládání a monitoring (8).

DSCP hodnota	Priorita	Data
8	2 (medium)	Ovládání a monitoring
46	3 (high)	Audio
56	4 (highest)	PTP
Ostatní	1 (low)	Ostatní provoz v síti

Tab. 5.1: Priority pro jednotlivé DSCP hodnoty

Jak je již napsáno v kapitole 4.1.3, je pro provoz Dante možné využít široké spektrum přepínačů. Pro běžný provoz na středně velké síti dostačuje managovatelný přepínač, který kromě vypnutí EEE umožňuje i nastavení priorit pomocí DSCP. Tyto nároky splňují např. switche od výrobce D-Link řady DGS-1100. Jedná se o levné managovatelné switche (pěti nebo osmi portová verze se dá koupit do 1000 Kč), ale splňují požadavky pro provoz Dante. Pro náročnější provoz a konfiguraci je možné využít switche od firmy Cisco. Nejčastěji se na Dante používají switche od firmy Cisco řady SG300 (v současnosti novější řada SG350).

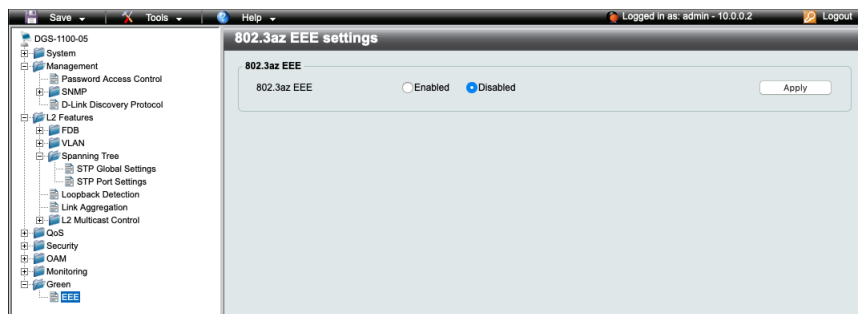
Pro profesionální aplikace se dají využít i speciální přepínače od výrobců audio-techniky. Typickým příkladem může být řada SWP1 od výrobce Yamaha, které jsou

speciálně navržené pro provoz s audiotechnikou včetně osazení porty Ethercon pro vyšší odolnost konektorů. [34]

V rámci měření latence byly využity dva druhy přepínačů. Byl použit jeden switch D-Link DGS-1100-05 a tři switche Cisco SG300-10P.

## 5.2.1 Konfigurace D-Link DGS-1100

Pro konfiguraci switche je třeba se připojit k webovému rozhraní switche. Ve webovém rozhraní pak nastavíme vypnutí Green Ethernetu. Ten najdeme v menu pod položkou **Green > EEE**. Zde je třeba u položky **802.3az EEE** zvolit *Disabled*.



Obr. 5.2: Nastavení EEE pro D-Link DGS-1100-05

Dále je potřeba nastavit DSCP priority. Ty najdeme v menu pod položkou **QOS > 802.1p/DSPC Default Priority**. Nejprve je třeba přepnout hodnotu **Select QoS Mode** na hodnotu *DSCP* a potvrdit stisknutím na horní tlačítko *Apply*.

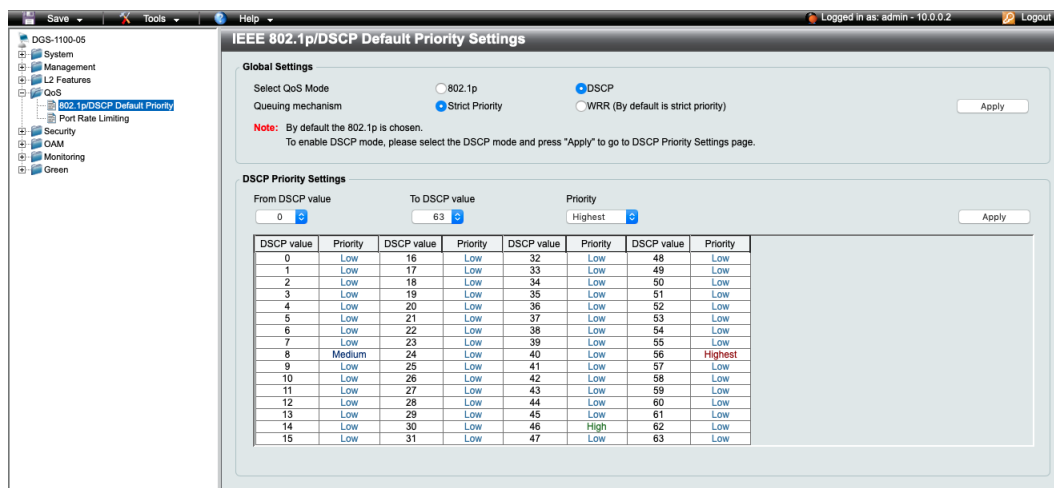
Poté se objeví tabulka s hodnotami DSCP. Zde je pomocí výběru *From DSCP value* a *To DSCP value* společně s *Priority* a potvrzením tlačítkem *Apply* nastavit nejprve všechny hodnoty v tabulce na prioritu Low. Zvolíme tedy *From DSCP value* na hodnotu **0**, *To DSCP value* na hodnotu **63** a *Priority* na hodnotu **Low** a potvrdíme tlačítkem *Apply*.

Dále nastavujeme jednotlivé priority dle tabulky 5.1. Zvolíme tedy např. *From DSCP value* na hodnotu **8**, *To DSCP value* na hodnotu **8** a *Priority* na hodnotu **Medium** a potvrdíme tlačítkem *Apply*. Pro nastavení první DSCP hodnoty, a obdobně takto nastavíme celou tabulku jako na obrázku .

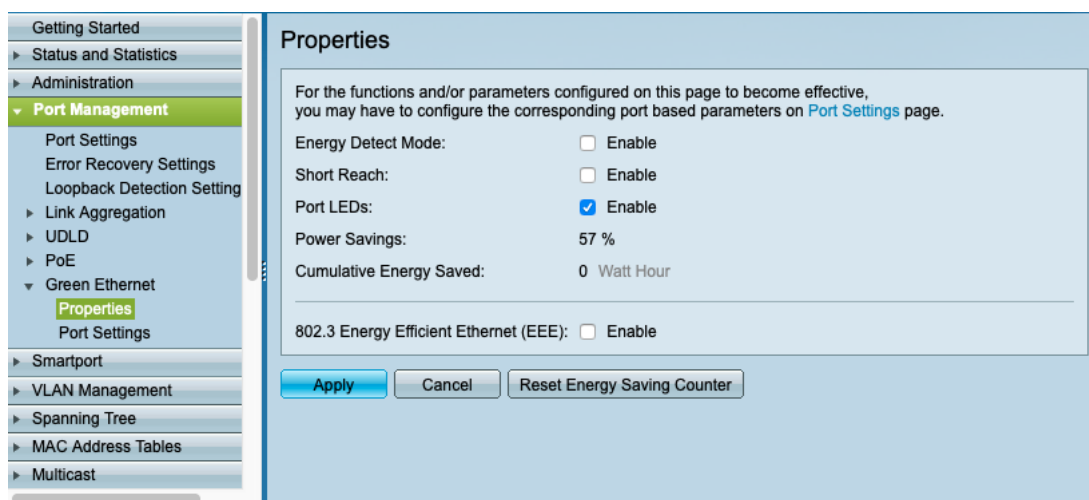
Po nastavení konfigurace uložíme nastavení zařízení pomocí tlačítka *Save* a poté *Save configuration* a potvrdíme stisknutím tlačítka *Apply*.

## 5.2.2 Konfigurace Cisco SG300-10P

Nastavení parametrů na zařízení Cisco se provádí podobně jako u switche D-Link. Po přihlášení do webového rozhraní přepínače přejdeme na položku v menu:



Obr. 5.3: Nastavení DSCP priorit pro D-Link DGS-1100-05



Obr. 5.4: Nastavení EEE pro Cisco SG-300-10P

**Port Management > Green Ethernet > Properties.** Zde je třeba, aby byla položka **802.3 Energy Efficient Ethernet (EEE)** neoznačena jako na obrázku 5.4. Potvrzení provedeme tlačítkem *Apply*.

Pro možnost nastavit priority provozu je nejprve nutné v položce v menu **Quality of Service > General > QoS Properties** nastavit **QoS Mode** na hodnotu *Advanced*. Potvrdíme tlačítkem *Apply*.

Dále u **Quality of Service > QoS Advanced Mode > Global Settings** je třeba nastavit **Trust Mode** na hodnotu *DSCP* a **Default Mode Status** na hodnotu *Trusted* a stiskneme *Apply*.

Poté je již možné nastavit priority DSCP v menu switchu pod položkou

**Quality of Service > General > DSCP to Queue** podobně jako v případě předchozího switchu D-Link dle tabulky 5.1. V tomto případě volíme prioritu u každé hodnoty DSCP zvlášť. Oproti nastavení v D-Link je nastavení sice na první pohled jednodušší, ale zase je časově náročnější, než se podaří nastavit všech 64 hodnot. A opět potvrzení provedeme tlačítkem *Apply*.

The screenshot shows the 'DSCP to Queue' configuration page. On the left is a navigation tree with 'Quality of Service' expanded. The main area contains a table with 64 rows, each representing a DSCP value and its corresponding output queue. The 'Apply' button is highlighted in blue.

Ingress DSCP	Output Queue	Ingress DSCP	Output Queue	Ingress DSCP	Output Queue	Ingress DSCP	Output Queue
0 (BE)	1	16 (CS2)	1	32 (CS4)	1	48 (CS6)	1
1	1	17	1	33	1	49	1
2	1	18 (AF21)	1	34 (AF41)	1	50	1
3	1	19	1	35	1	51	1
4	1	20 (AF22)	1	36 (AF42)	1	52	1
5	1	21	1	37	1	53	1
6	1	22 (AF23)	1	38 (AF43)	1	54	1
7	1	23	1	39	1	55	1
8 (CS1)	2	24 (CS3)	1	40 (CS5)	1	56 (CS7)	4
9	1	25	1	41	1	57	1
10 (AF11)	1	26 (AF31)	1	42	1	58	1
11	1	27	1	43	1	59	1
12 (AF12)	1	28 (AF32)	1	44	1	60	1
13	1	29	1	45	1	61	1
14 (AF13)	1	30 (AF33)	1	46 (EF)	3	62	1
15	1	31	1	47	1	63	1

Buttons: Apply, Cancel, Restore Defaults

Queue 1 has the lowest priority, queue 4 has the highest priority.

Obr. 5.5: Nastavení DSCP pro Cisco SG-300-10P

Stejně jako u předchozího příkladu u zařízení D-Link je třeba konfigurace kliknutím na blikající nápis *Save Configuration* nebo v menu pod položkou **Administration > File Management > Copy/Save Configuration** s ponecháním zvolených *Source File Name: Running configuration* a *Destination File Name: Startup Configuration* uložit konfiguraci stisknutím tlačítka *Apply*.

### Konfigurace novější řady Cisco SG350

U novější verze switchů Cisco řady SG350 je nastavení velmi podobné starší řadě SG300 a drobné odlišnosti v nastavení nejsou nijak zásadní.

## 5.3 Zpoždění signálu

Při přenosu digitálního signálu se vždy budou přenášená data při přenosu zpožďovat oproti původnímu analogovému signálu. Děje se tak kromě zpoždění na samotném AD/DA převodníku, kdy vždy trvá nějakou dobu než se analogový signál zpracuje a odešle v digitální podobě.

Zpoždění se běžně pohybuje v případě digitálních zařízení řádově v úrovních milisekund. Např. u profesionálních digitálních zesilovačů začíná minimální latence na 0,5 ms (Nexo NXAMP mk2 ve flat mode). U náročnějšího procesingu pro reproboxy se ale latence samotného zesilovače může pohybovat i v několika milisekundách (např. 3,84 ms u L'acoustics LA4X – standard standard operating mode). [35, 36]

Velkým podílem na zpoždění při přenosu signálu je jeho zpracování. V případě analogového přenosu signálu a digitálního zpracování se zpoždění zvětšuje z důvodu nutnosti převodu digitálního signálu na analogový signál a poté zpět na signál digitální. V případě zpracování signálu v digitálním mixážním pultu, dochází ke zpoždění potřebou přenášená data někam uložit a následně je zpracovat a opět odeslat. I když je velká snaha výrobců zpoždění signálu v digitálních mixážních pultech, procesorech, zesilovačích a dalších zařízení velmi snižovat a v dnešních zařízeních je zpoždění velmi málo postřehnutelné – v moderních mixážních pultech se zpoždění signálu pohybuje okolo jedné milisekundy – např. 1 ms u mixážního pultu Digico SD12. [37]

Přestože samotné zpoždění v rámci jedné komponenty audiosystému nemusí být veliké, zásadní je pro praktické užití celkové zpoždění signálu od vstupu až po výstup z audiořetězce. To se běžně označuje jako roundtrip. Tedy jak dlouho trvá signálu celá cesta od např. mikrofону až po výstup z reproboxu, sluchátka apod. Vliv na toto zpoždění má celá řada prvků. Zpoždění signálu způsobuje každý převod mezi digitální a analogovou formou, tedy každý AD/DA převod. Kromě toho ale se na zpoždění podílí každý další prvek vřazený do signálové cesty. V reálném světě se tak může jednat nejen o mixážní pult, procesorovou jednotku pro PA systém, případně procesing v zesilovači či aktivním reproboxu, samotné zesilovače pro reproboxy, které jsou dnes často digitálně řízené, tedy ve třídě D nebo třeba bezdrátový přenos z mikrofону či do IN-EAR sluchátek hudebníka, který je dnes v širokém zastoupení také realizován digitálně. A mimo jiné se na celkové latency může nemalou měrou podílet i samotný přenos signálu.

Celkových propojů v rámci jedné cesty signálu mezi např. jevištěm, mixážní konzolí a zpět do odposlechu, in-ear monitorovacích sluchátek nebo do PA systému může být větší množství a v případě složitějších instalací se jejich počet může blížit nebo i překročit deset spojů. Protože se celkové zpoždění po cestě sčítá, může být i menší zpoždění v rámci jednotlivých spojení v celkovém součtu zásadní pro používání systému jako celku.

V rámci konfigurace sítě Dante je možné různým zařízením nastavit pomocí softwaru Dante Controller rozdílné latence pro různá zařízení v síti. Díky tomu je možné používat dle potřeby různé části sítě s rozdílným zpožděním dle možností sítě.

## 5.4 Měření zpoždění v rámci umělé sítě

V rámci práce bylo provedeno měření na uměle vytvořené síti v laboratorních podmínkách pro zjištění reálného chování sítě při různých situacích, které mohou reálně nastat při praktickém provozu sítě.

V rámci této sítě bylo zjišťováno několik parametrů. Nejprve došlo k ověření reálného zpoždění signálu oproti parametrům nastaveným u jednotlivých zařízení pomocí Dante controlleru. Dalším úkolem bylo zjistit, jak se síť bude chovat v případě velkého zatížení datovým v rámci Dante sítě, jaký vliv bude mít toto velké zatížení sítě na přenos audiosignálu a jeho zpoždění a jak se projeví v případě přetížení sítě.

Dalším cílem bylo zjistit, jak se bude měnit zpoždění přenášeného signálu v případě zvětšování či snižování počtu přepínačů mezi jednotlivými Dante zařízeními.

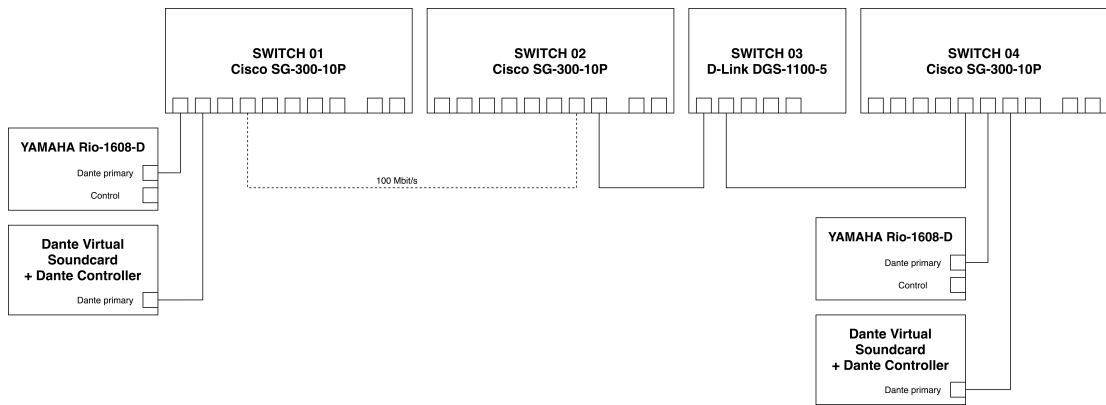
Pro ověření možností sítě a ověření nastavené latence v rámci sítě Dante byly použity dva stageboxy od firmy Yamaha Rio-1608-D první generace. Jedná se o dnes již nevyroběný model, který byl nahrazen druhou generací, přesto se dnes jedná o velmi často využívané zařízení, se kterým je možné se potkat ve spoustě instalací i u rentalových firem.

### 5.4.1 Topologie sítě

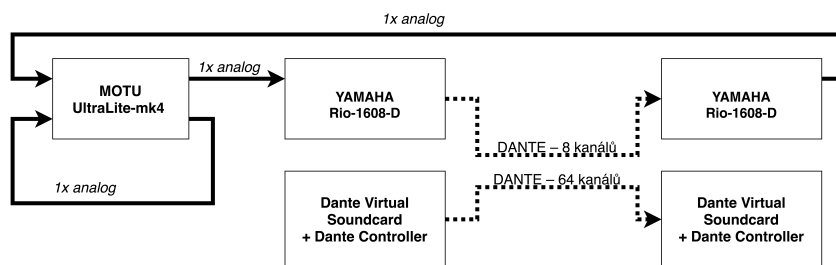
Síť byla vytvořena celkem ze čtyř přepínačů. Tři byly switche od firmy Cisco SG-300-10P. Čtvrtý switch byl D-Link DGS-1100-05. Síť byla zapojena dle schématu, tedy signál mezi jednotlivými stageboxy musel projít přes všechny čtyři switche. Mezi jednotlivými stageboxy bylo přenášeno osm zvukových kanálů z prvních osmi analogových vstupů zařízení, který je v síti označen jako Y002-Yamaha-Rio1608 do osmi analogových výstupů na zařízení Y003-Yamaha-Rio1608. Pro větší vytížení sítě byly dále použity dva počítače se softwarem Dante Virtual Soundcard, mezi kterými bylo přenášeno 64 kanálů audiosignálu.

K měření signálu byla použita zvuková karta MOTU UltraLite-mk4. Ta byla připojena k počítači se softwarem Open Sound Meter k měření latence prošlého audio signálu. Ze softwaru Open Sound Meter byl na výstupy 1 a 2 zvukové karty MOTU poslán generovaný signál pro účely měření. Jednalo se o růžový šum. Z výstupu 1 byl signál analogově přiveden na vstup 1 zařízení Y002-Yamaha-Rio1608. Odtud signál byl v rámci Dante sítě přiveden na analogový výstup zařízení Y003-Yamaha-Rio1608. Odtud byl analogově přiveden na vstup 3 zvukové karty MOTU. Z výstupu 2 zvukové karty MOTU byl signál přiveden analogově přímo do vstupu 4 na MOTU.

V softwaru Open Sound Meter byl vstup 3 ze zvukové karty MOTU zvolen jako



Obr. 5.6: Zapojení sítě Dante pro měření



Obr. 5.7: Schéma zapojení měření latence

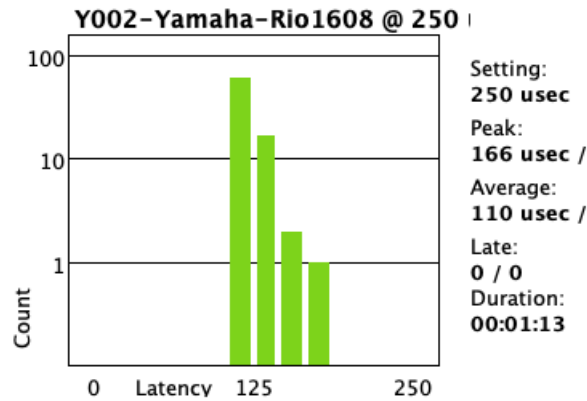
vstup pro měření a vstup 4 jako referenční vstup. Pomocí funkce *estimated delay time* tak je možné měřit rozdíl ve zpoždění měřeného signálu (vstup 3), který byl převeden přes Dante zařízení oproti původnímu signálu přivedenému na vstup 4.

Dále bylo zjišťováno, jak se síť chová v případě velkého zatížení daného spojení. Pro účely měření nebylo možné využít tolik zařízení, aby bylo možné zatížit port s rychlostí jeden gigabit natolik, aby se začaly v síti projevovat problémy. Běžně se doporučuje, aby při běžném provozu bylo možné na gigabitové síti přenášet více než 500 kanálů jedním směrem, aniž by byl pozorovatelný dopad na síť. Z toho důvodu byly dva switche dle obrázku propojeny pouze 100 Mbit/s linkou, aby bylo možné dosáhnout plného zatížení linky.

#### 5.4.2 Zpoždění v rámci sítě Dante

Nejprve bylo provedeno měření při ponechané nastavené plné rychlosti 1 Gbit/s. V Dante controlleru byla nastavena latence na obou stageboxech Rio na 250  $\mu$ s. Při přenosu celkem 72 kanálů po dané lince se latence příchozích paketů do Yamaha Y003-Yamaha-Rio1608 dle údajů v Dante controlleru průměrně pohybovala na hodnotě 110  $\mu$ s. Maximální hodnota byla 166  $\mu$ s. Hodnota latence tak odpovídá

teoretickým předpokladům. U sítě s tolika přepínači by bylo dle doporučení výrobce vhodné použít nastavení latence na 1 ms, je ale zřejmé, že tyto hodnoty jsou nastaveny s dostatečnou rezervou pro případ většího zatížení sítě s větším množstvím zařízení a v této konfiguraci by bylo možné síť bez potíží provozovat na latenci 250  $\mu$ s bez jediného problému a výpadku.



Obr. 5.8: Latence při rychlosti 1 Gbit/s

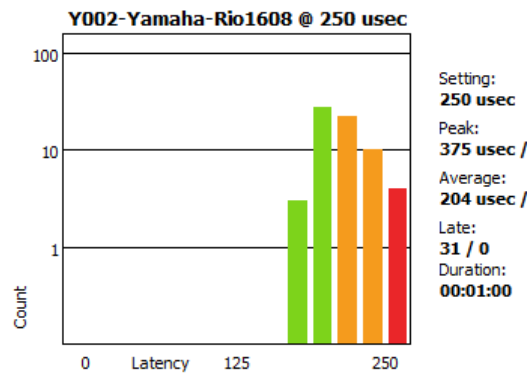
Dále bylo měřeno, jaký vliv má zpoždění paketů přenášených mezi jednotlivými zařízeními v případě poklesu počtu přepínačů v trase signálu. V případě snižování počtu zařízení docházelo k poklesu zpoždění. Pokud byly připojeny přes pouze jeden switch, průměrné zpoždění se pohybovalo okolo 86  $\mu$ s a maximální hodnota dosahovala 104  $\mu$ s. Měření byla prováděna při přepnutí zařízení do *switched módu*. V případě přepnutí zařízení do *redundantního módu* nebyl v rámci měření pozorovatelný rozdíl ve zpoždění signálu v rámci Dante controlleru. Jednotlivá zpoždění jsou uvedena v tabulce 5.2.

Průměrné zpoždění [ $\mu$ s]	Naximální zpoždění [ $\mu$ s]	Počet switchů
110	166	4
104	125	3
94	104	2
86	104	1
83	104	0

Tab. 5.2: Zpoždění dat v Dante síti dle softwaru Dante controller

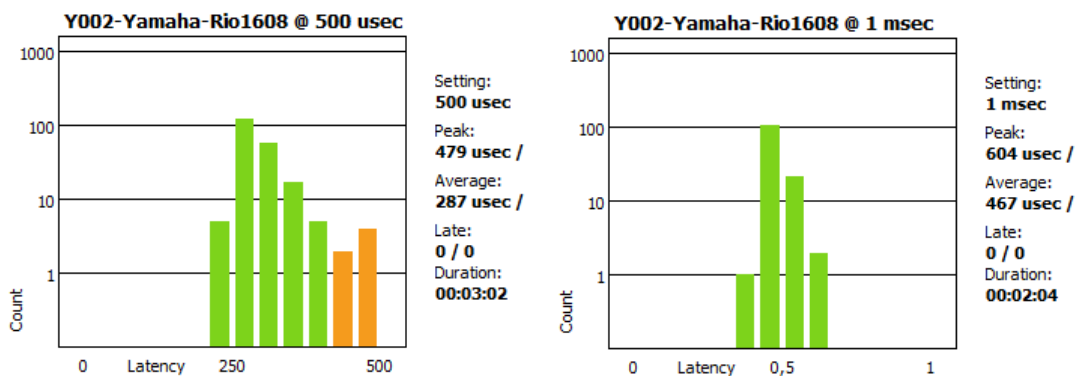
V případě snížení propustnosti na 100 Mbit/s dojde k výrazné změně v chování sítě. Celkový počet přenášených kanálů je 72 a celkový potřebný datový tok tak mírně převyšuje 100 Mbit/s. Kvůli tomu začne na switchi s portem o rychlosti

100 Mbit/s docházet k zahazování paketů. Můžeme se tím ověřit správné nastavení priorit v DSCP tabulce. Maximální vytížení linky způsobí v první řadě zahazování paketů s nejnižší prioritou, tedy pakety, které mají na starost sledování a nastavování parametrů v rámci sítě Dante. V softwaru Dante Controller se tak není možné upravovat nastavení zařízení a kontrolovat jejich stav, pokud se nachází za místem s velkým vytížením sítě. Z důvodu velkého provozu v zúženém místě se také zvýší latence přenosu dat.



Obr. 5.9: Latence při rychlosti 100 Mbit/s a plném zatížení, nastaveno 250  $\mu$ s

Jak je patrné z obrázku 5.9, je v tomto případě již nastavená latence nedostatečná a v některých případech dokonce došlo k výpadku zvuku z důvodu moc velkého zpoždění paketů. Je tedy vhodné zvýšit nastavenou latenci pro komunikaci mezi Y002-Yamaha-Rio1608 a Y003-Yamaha-Rio1608.



Obr. 5.10: Latence při rychlosti 100 Mbit/s, nastaveno 500 a 1000  $\mu$ s

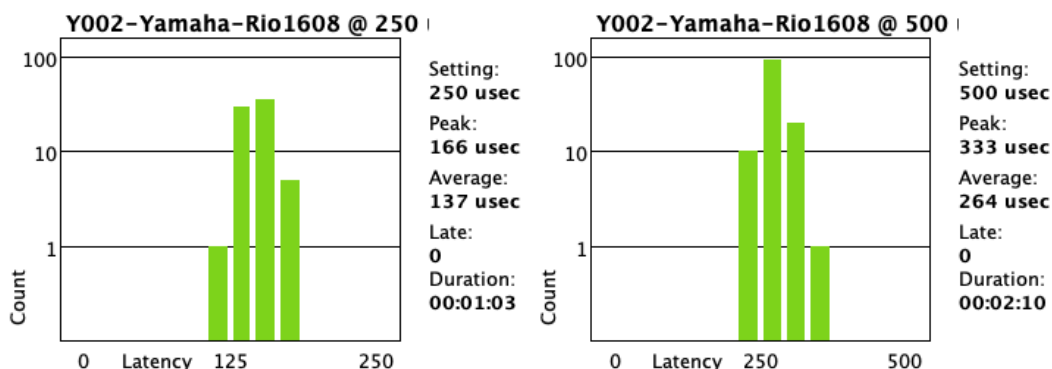
Jak je patrné z obrázku 5.10, při nastavení 500  $\mu$ s je špičková hodnota těsně pod nastavenou úrovní latence, tedy toto nastavení by se v praxi mohlo projevit jako nespolehlivé, protože zpoždění paketů se pohybuje na hraniční hodnotě a mohlo by

tak docházet k výpadkům signálu. Z toho důvodu by bylo vhodné nastavit hodnotu 1 ms, při které již hodnoty latence paketů odpovídají průměrným necelým 500  $\mu$ s.

Zde jsme si ověřili, že je možné síť extrémně zatížit a i přes to, že jsme dle údajů z Dante controlleru přenášeli přes port s rychlostí 100 Mbit/s téměř 100 Mbit dat za sekundu, tak se při nastavené latenci 1 ms podařilo dosáhnout toho, že nedocházelo k výpadku audiosignálu a ten byl bez problému přenášen. Dále ale bylo cílem zjistit, jak síť bude chovat při menších hodnotách zatížení. Toto měření opět probíhalo při omezeném datovém toku na 100 Mbit/s.

Pokud bylo množství přenášených dat malé, tak síť bez problému fungovala při nastavené latenci 250  $\mu$ s. V prvním případě je na obrázku 5.11 vlevo přenášeno 8 kanálů mezi stageboxy Yamaha Rio. Celkový datový tok dat je přibližně 20 Mbit/s. Celková kapacita linky je tak vytížena přibližně na 20 %. Při tomto a nižším počtu kanálů bylo možné mít nastavenou latenci na 250  $\mu$ s. V případě navyšování datového toku již docházelo k růstu latence nad přijatelnou hodnotu a pro spolehlivý provoz sítě bylo třeba navýšit latenci na 500  $\mu$ s.

V případě navýšení nastavené latence bylo možné navyšovat přenos dat až do úrovně přibližně 80 % vytížení linky – tedy při zatížení cca 80 Mbit/s. To je patrné na obrázku 5.11 vpravo. Nad touto úrovní by již bylo třeba navýšit latenci na 1 ms.



Obr. 5.11: Latence při zatížení linky 20 % a 80 %

### 5.4.3 Reálné zpoždění audiosignálu

Druhou částí měření je určení skutečného zpoždění signálu mezi analogovým vstupem a výstupem stageboxů Rio-1608-D. V případě zpoždění signálu v rámci sítě Dante, je třeba uvést, že signál je vždy na výstupu zpožděn na nastavenou hodnotu, tedy i při velmi malé síti, kdy přenos paketu může trvat například jen sto mikrosekund, bude vždy na výstupu signál zpožděn o nastavenou hodnotu, tedy kupříkladu 2 ms. Při samotných měřeních se tedy změna konfigurace sítě, která

měla vliv na latenci přenosu paketů v rámci Dante sítě, nijak neprojevila na zpoždění samotného analogového signálu. V případě vyšší nastavené hodnoty latence v konfiguraci Dante zařízení tak bude signál vždy zpožděn. V opačné situaci, tedy kdy je nastavená latence v Dante menší než skutečné zpoždění paketů může nastat k výpadkům signálu až k úplnému tichu, v extrémní situaci.

Protože při měření byly použity na Dante zařízení analogové vstupy a výstupy, je třeba v rámci měření uvažovat samotné zpoždění signálu při převodu z analogového na digitální a při následném převodu z digitálního na analogový.

<b>Celkové zpoždění [ms]</b>	<b>Nastavené v Dante [ms]</b>	<b>Vypočtené [ms]</b>
1,90	0,25	0,25
2,17	0,5	0,52
2,65	1	1,0
3,65	2	2,0
6,65	5	5,0

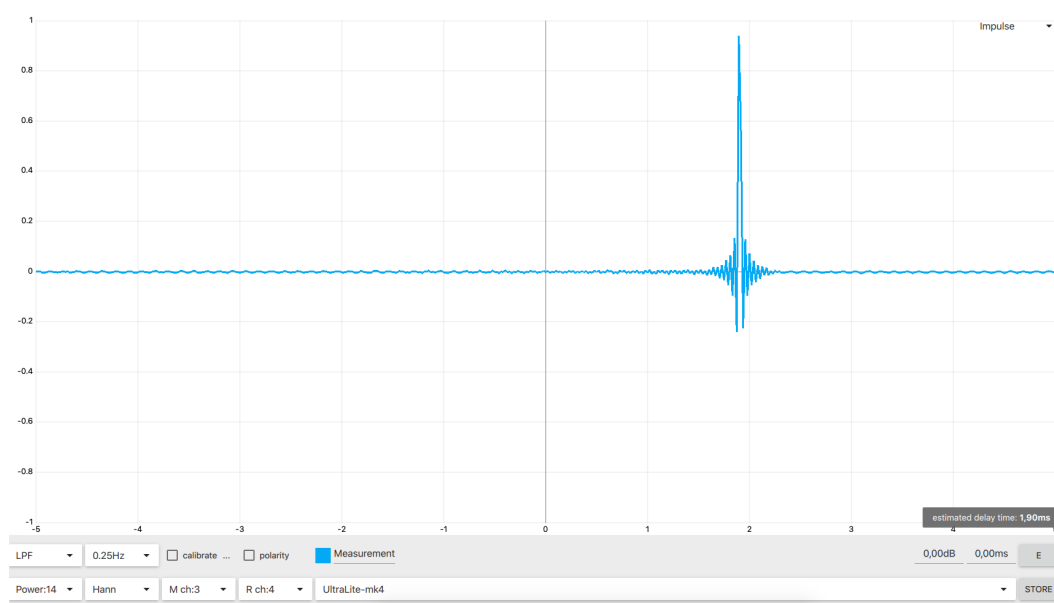
Tab. 5.3: Zpoždění audiosignálu v Dante síti

Jak je vidět na obrázku 5.12, celková latence při nastavení Dante zařízení na 250  $\mu$ s dosahovala 1,9 ms. Při měření bylo z jednotlivých měření určen předpoklad, že samotný převod signálu z analogové do digitální podoby a zpět způsobí zpoždění přibližně 1,65 ms. Protože toto zpoždění je způsobeno samotnou technologií převodu signálu, můžeme určit, že latence způsobená samotným přenosem přes síť Dante je tedy: celkové zpoždění od kterého je odečteno 1,65 ms. Takto je tedy určená vypočtená hodnota zpoždění v Dante síti. Např. pro 1. řádek v tabulce 5.3:

$$1,90 - 1,65 = 0,25$$

V tabulce 5.3 můžeme vidět, že naměřené zpoždění signálu po odečtení zpoždění na analogově-digitálních převodnicích velmi přesně odpovídá nastavené hodnotě v zařízeních Dante. Nepřesnost v druhém řádku je patrně způsobena nepřesností danou vzorkovací frekvencí. Při přenosu zvuku se vzorkovací frekvencí 48 kHz je časová prodleva mezi jednotlivými vzorky  $\frac{1}{48000}$  s, tedy přibližně 0,02 ms. Protože se signál přenáší digitálně, je zřejmé, že se při měření latence pohybujeme na úrovni jednotlivých vzorků a proto je tato chyba způsobena nejspíše zvolenou malou vzorkovací frekvencí. Pro praktické využití je poté takto malý rozdíl zcela zanedbatelný.

Na obrázku 5.12 vidíme snímek obrazovky z programu Open Sound Meter. Na grafu je zobrazena vypočtená impulsní odezva na jednotkový impuls. Zpoždění impulsu v grafu odpovídá naměřenému údaji cca 1,9 ms. Přesně určená hodnota softwarem se pak nachází v pravém dolním rohu snímku.



Obr. 5.12: Celková latence audiosignálu při nastavení 250  $\mu$ s

## 6 Využití Dante

Digitální přenos audiosignálu po ethernetové síti přináší řadu výhod pro použití v profesionálních audio aplikacích. Může být aplikován při ozvučování malých koncertů od sítě s pouze dvěma zařízeními, tedy např. pro přenos mezi mixážním pultem a stageboxem s AD/DA převodníky, až po rozsáhlé instalace v klubech a divadlech s desítkami nebo i stovkami zařízeními, kde může být přes ethernetovou síť přenášén nejen zvuk, ale i zařízení mohou být konfigurována a kontrolována během provozu.

Obrovskou výhodou může být při tomto použití variabilita digitální sítě, kdy nastavení toku jednotlivých audiokanálu je možné velmi jednoduše konfigurovat ze softwaru v počítači či přímo v konzoli mixážního pultu, a to z kteréhokoli místa v síti. Zároveň pro různé varianty použití a změny v nastavení sítě mohou být centrálně uloženy ze všech zařízení a tento *preset* s konfigurací sítě pak může být stejně jednoduše nahrán do sítě zpět. To může přinášet obrovskou výhodu v rozsáhlých instalacích, kde pro různé aplikace a použití technologie může být uloženo různé nastavení, které je jen načteno v případě potřeby. Tím se značně zjednodušuje náročnost na obsluhu a provoz v případě potřeby provedení změn. Výhodou digitálního přenosu zvuku přes ethernetovou síť je i možnost provádění konfigurace a nastavení na dálku bez přímého fyzického přístupu k zařízením.

V této kapitole se věnuji typickým situacím, které mohou být uplatněny v praktickém provozu. Snažím se na nich předvést výhody využití Dante sítě v různých instalacích i s návrhem možností využití konkrétního hardwaru připojeného do sítě.

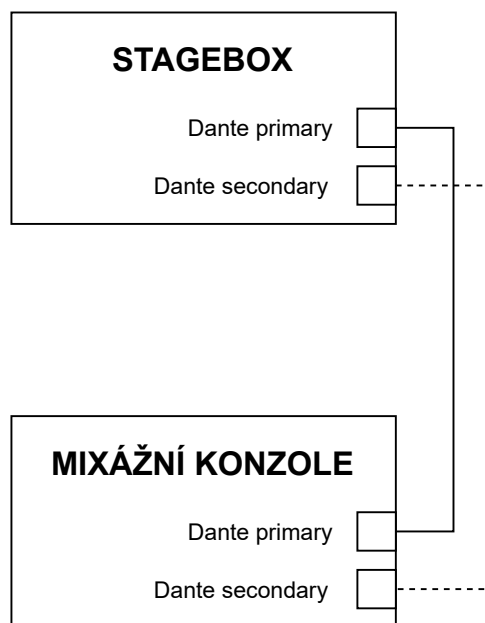
### 6.1 Malý live koncert

Prvním příkladem je velmi jednoduché použití pro malý koncert. V této konfiguraci pravděpodobně nebude využit celý potenciál, který je možné při přenosu zvuku po ethernetové síti uplatnit. V případě velmi malých koncertů, kdy je zvuk jako pro výstup do PA systému, tak pro odposlechy na jevišti mícháán na jedné konzoli. Pro co nejjednodušší konfiguraci, kdy pouze propojujeme dvě zařízení, nepotřebujeme použít switch, stačí tedy dvě zařízení propojit přímým nekříženým kabelem. V tomto případě je také možné využít jednoduše redundantní mód, ve kterém se propojí nejen primární, ale i sekundární porty na zařízeních, celkem tedy dvěma kabelem. Díky tomu bude využit režim, kdy v případě výpadku primárního spojení dojde k automatickému připojení na sekundární kabel.

Typickým příkladem by mohl být např. mixážní pult DiGiCo S21 s kartou DMI-DANTE a stagebox DiGiCo DQ-Rack.

Při této konfiguraci jsou parametry většiny digitálních způsobů přenosu srovnatelné. U přenosu zvuku přes ethernetovou síť se oproti sériovému přenosu, jako

u protokolu MADI, projeví mírně větší latence přenosu. U Dante se minimální latence pohybuje řádově ve stovkách mikrosekund. U MADI je možné dosahovat latence na úrovni dvou vzorků. V praxi se ale jedná o latence natolik nízké, že je téměř není možné postřehnout. Při této konfiguraci je navíc velkou výhodou i jednoduchost nastavení samotné sítě Dante. S ohledem na jednoduchosti patche není třeba využívat žádná externí zařízení a routing je možné jednoduše nastavit přímo z mixážní konzole. [38, 39, 40]



Obr. 6.1: Malý live koncert

## 6.2 Live koncert s monitorovacím pultem

V tomto případě je již do sítě připojeno větší množství zařízení. Kromě stageboxu na jevišti a FOH (front of house) mixážního pultu je v Dante síti připojen monitorovací pult, který slouží k obsluze odposlechů na jevišti. Zesilovače jak pro PA systém, tak pro monitory na jevišti jsou také připojeny přímo do Dante sítě.

V tomto případě by bylo nejjednodušším řešením zapojit všechna zařízení pomocí ethernetového přepínače. Velkou výhodou je, že při tomto zapojení není důležité, k jakému portu se které zařízení připojí. Obsluha tedy při zapojování technologie pouze zapojí všechna Dante zařízení do odpovídajícího switchu. Veškeré routování signálu a identifikace zařízení již může probíhat pouze softwarově, díky čemuž může být ušetřeno spoustu času při přípravě oproti zapojení každého jednotlivého kanálu na speciální výstup analogově nebo pomocí AES/EBU.

V případě menších konfigurací, případně pokud není vyžadováno redundantní zapojení, je možné zařízení přepnout do daisy chain módu. V tom případě se primary i secondary port v každém zařízení chová jako by byly připojeny ke switchi. Díky tomu je možné zapojit Dante do kteréhokoli z těchto portů a druhým z nich řetězit další zařízení. Dá se tak omezit potřeba switche případně snížit množství kabeláže a zjednodušit zapojení. Nevýhodou je, že každý přepínač, který je připojen do Dante sítě, zvyšuje dobu, po kterou signál putuje mezi jednotlivými zařízeními, a zvyšuje tak celkovou latenci sítě.

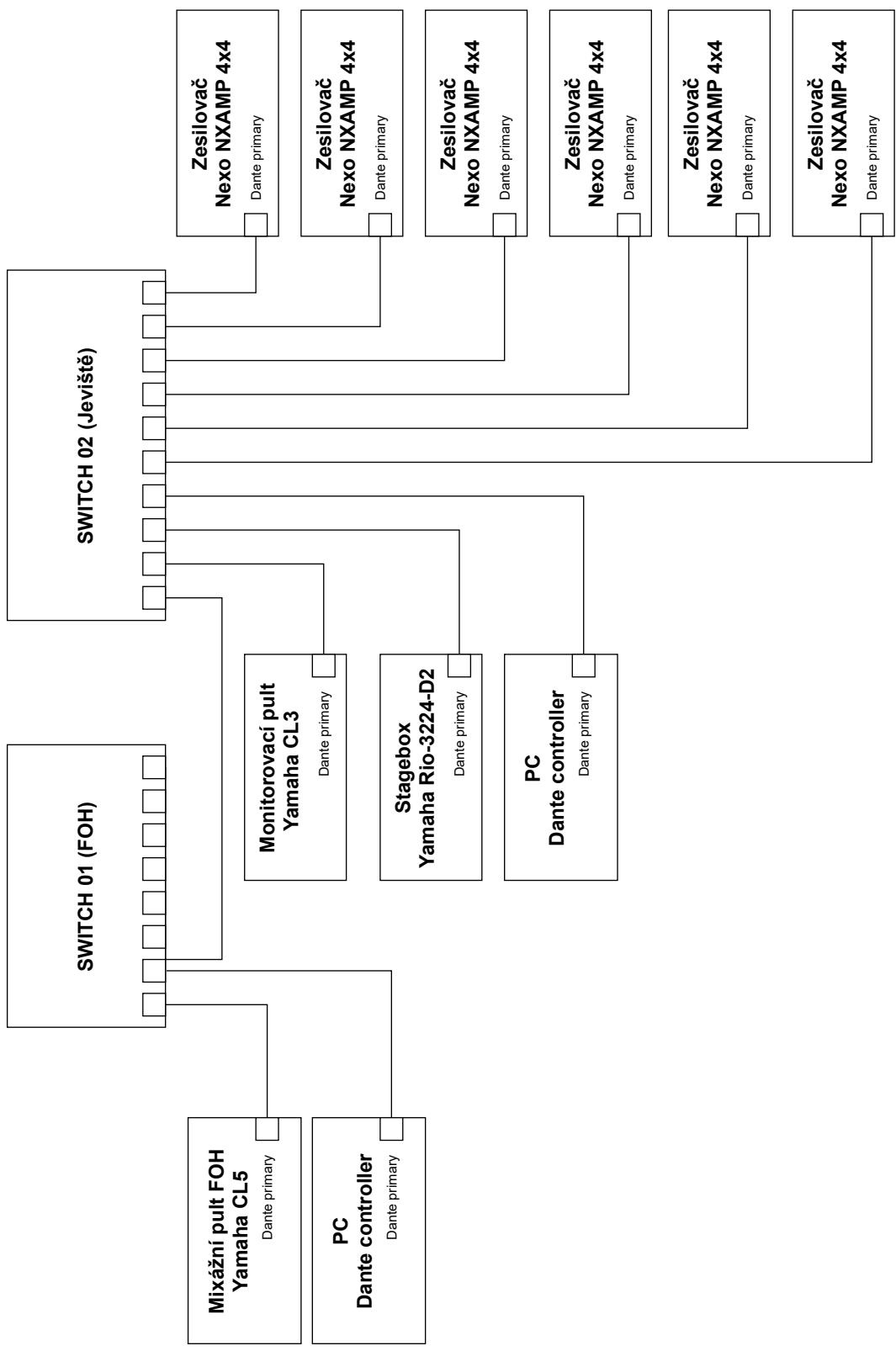
Typickou ukázkou řešení by mohlo být vyžití stageboxu a mixážních konzolí od firmy Yamaha. Příkladem FOH mixážní konzole by mohla být Yamaha CL5 a jako monitoringový pult může být využita např. Yamaha CL3. Pro připojení vstupních a případně výstupních kanálů na jevišti je využit stagebox Yamaha Rio3224.

Dále jsou pro zjednodušení obsluhy připojeny do sítě počítače se softwarem Dante Controller, které jsou umístěny jak u FOH, tak u monitového mixážního pultu. Dále jsou do Dante sítě připojeny zesilovače, které jak jsou určeny nejen pro PA systém, ale i pro odposlechy na jevišti. V konkrétním příkladě by se mohlo jednat např. o zesilovače NEXO NXAMP 4x4 MK2 opatřené Dante kartou NXDT104 MK2. V našem případě můžeme uvažovat větší koncert, kde jsou pro obsluhu PA systému použity celkem čtyři zesilovače. Pro odposlechy na jevišti jsou dále využity další dva zesilovače stejného typu. Celkem tedy můžeme v případě většího koncertu pro několik set diváků uvažovat o příkladu šesti zesilovačů NEXO NXAMP 4x4 MK2. [41]

Velkou výhodou zesilovačů připojených přímo do sítě Dante je možnost nejen pomocí Dante sítě do zesilovačů posílat signál, který je tak navíc po celou dobu přenosu v digitální podobě, a nedochází tak k jeho degradaci opakovanou konverzí mezi analogovou a digitální podobou, ale i výhoda možnosti zařízení připojená přímo do Dante sítě (např. zesilovače Nexo) přes tuto síť i konfigurovat. Díky tomu může být celá správa a nastavení zařízení jednodušší než v případě potřeby konfigurovat každé zařízení zvlášť.

Celkové řešení sítě je v tomto návrhu realizováno pomocí dvou switchů. Jeden je umístěn na pozici FOH u hlavní mixážní konzole. Druhý se poté nachází na jevišti a je využit k zapojení stageboxu, monitorovacího mixážního pultu, zesilovačů. Pro jednoduchou obsluhu je možnost pro oba zvukaře připojit do sítě počítač, ve kterém je možné využít Dante controller, případně i další software pro konfiguraci např. zesilovačů.

Velkou výhodou, kterou umožňuje přenos audia po ethernetové síti, je možnost téměř libovolného routování v rámci sítě. Je tak možné velmi jednoduše např. do jednoho zesilovače přivést jeden kanál z jednoho zařízení a druhý z jiného. Díky tomu je možné využívat jeden zesilovač připojený do Dante sítě částečně pro odposlechy



Obr. 6.2: Live koncert s monitorovacím pultem

na jevišti a částečně pro PA systém. Zároveň je možné jeden vstup posílat do více výstupů, díky tomu je možné jednoduše provozovat dva mixážní pulty v jedné síti.

V případě provozu ve velké síti, kdy je např. pro in-ear monitoring třeba dosahovat nízké latence je možné Dante síť provozovat, jak již bylo uvedeno v kapitole 5.3, s rozdílnými latencemi mezi různými zařízeními. Je tak možné v dané konfiguraci nastavit pro zařízení, u kterých je provoz s minimální latencí jako je monitorovací pult, zesilovače pro monitory a stagebox na latenci 250  $\mu$ s a zároveň pro zařízení, která se starají o obsluhu PA systému, a data tak musí projít *delší trasu* přes dva switche, jako FOH pult a zesilovače pro PA systém na 500  $\mu$ s nebo 1 ms.

Na obrázku 6.2 je zobrazena pouze primární síť. V případě redundantního zapojení by byla celá síť vedena dvojitě a i počet přepínačů by byl dvojnásobný.

## 6.3 Divadlo

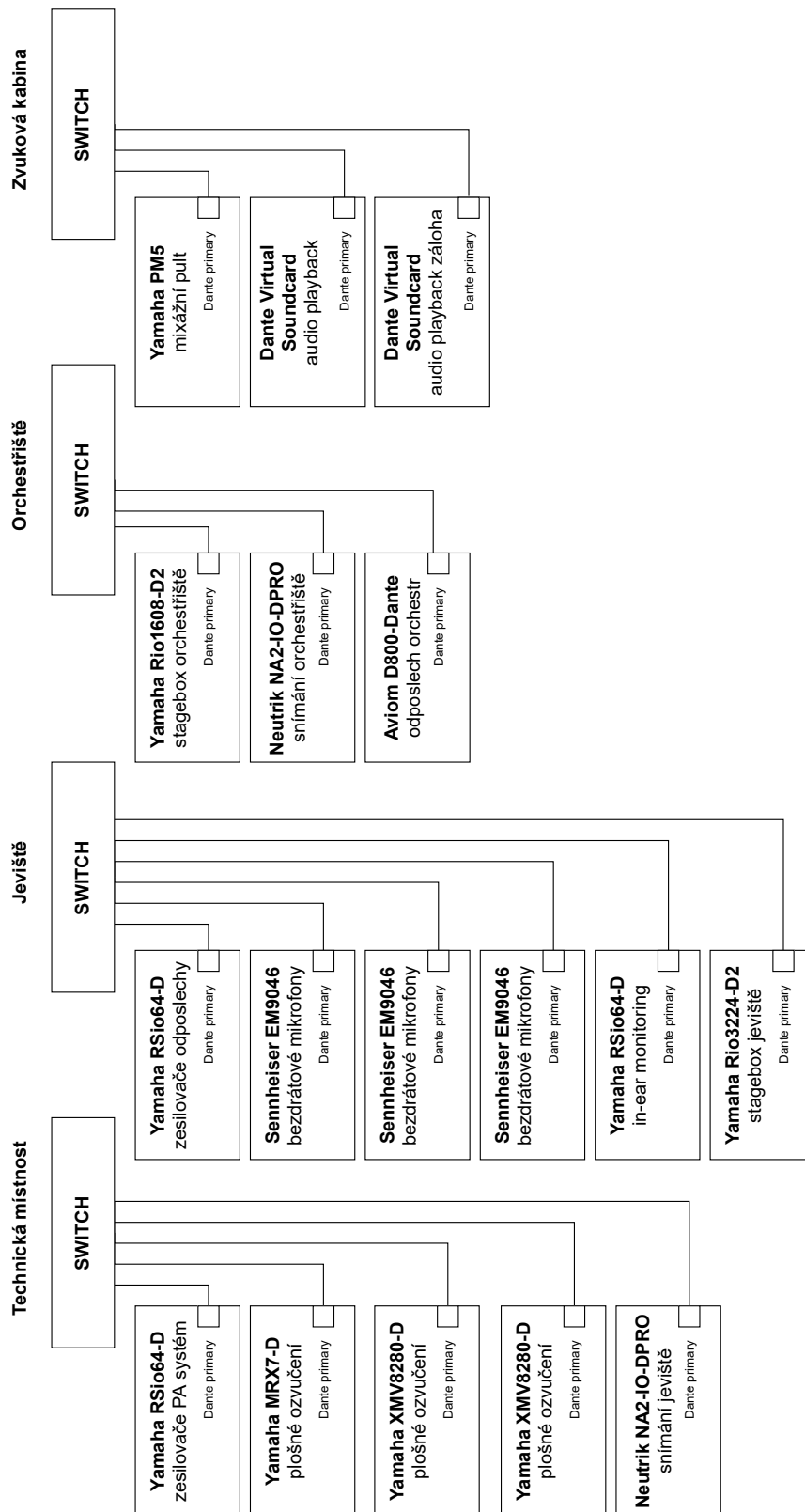
V tomto případě se již jedná o rozsáhlou síť, ve které se může nacházet velké množství zařízení. Kromě mixážních pultů, zesilovačů a stageboxů na jevišti se může jednat například o bezdrátové mikrofony a další zařízení připojená přímo do Dante sítě.

Obdobně jako v 6.2 je možné do sítě Dante připojit všechny zesilovače přímo do sítě Dante. V případě připojení zesilovačů, které neumožňují přímé připojení do Dante, je možné využít rozhraní Yamaha RSio-64D. To umožňuje využití čtyř Mini-YGDAI slotů pro převod až celkem 64 vstupních a 64 výstupních kanálů do jiných formátů, např. AES/EBU pro vstup digitálního singálu do zesilovačů. Tato rozhraní jsou v této síti využita jak pro připojení zesilovačů PA systému, tak pro odposlechy na jevišti. [42]

V technické místnosti se dále nachází procesor Yamaha MRX7-D. Ten je primárně určen k řízení signálů pro vstup do Dante zesilovačů. Může se jednat o zesilovače pro PA systém, ale také o zesilovače Yamaha XMV8080-D. Ty mohou být využity pro plošné stovoltové ozvučení prostor divadla. Může se jednat o ozvučení foyer či dalších společenských prostor, ale i vnitřní rozhlas do zákulisí divadla. [43, 44]

Dále je ze switche v technické místnosti připojen do sítě Dante i předzesilovač Neutrik NA2-IO-DPRO. Jedná se o zařízení s dvěma mikrofonními vstupy a dvěma linkovými výstupy. Je možné jej přepnout i do režimu, kdy přijímá i vysílá dva kanály pomocí AES/EBU. Ten je určen k připojení mikrofونů pro možnost odposlechu z jeviště. Ten může být využit jako hlasitý odposlech do šaten pro umělce během představení přes procesor Yamaha MRX7-D a do rozvodů plošného ozvučení či pro záznam z představení a zkoušek. [45]

Další zařízení v Dante síti jsou umístěna na jevišti. Stejně jako v technické místnosti je zde umístěno rozhraní Yamaha RSio64-D pro převod signálu z Dante do



Obr. 6.3: Divadlo

AES/EBU pro zesilovače odposlechů na jevišti. Dále jsou v Dante síti připojeny přijímače bezdrátových mikrofónů Sennheiser EM 9046 DAN. Jedná se osmikanálové digitální přijímače pro bezdrátové mikrofony Sennheiser. Ty mohou být připojeny přímo do sítě Dante.

Pro připojení bezdrátových in-ear odposlechů je opět využito Yamaha RSio64-D. Kromě karty s AES/EBU výstupy je možné jej osadit i kartami s analogovými výstupy pro výstup do bezdrátových sluchátkových vysílačů.

Dále je na jevišti umístěn stagebox Yamaha Rio3224-D2 pro připojení dalších mikrofónů či nástrojů. [46]

Další zařízení se nachází v orchestřišti. Zde může být umístěn druhý stagebox Yamaha, tentokrát v menším provedení Rio1608-D2. Dále se zde nachází druhý Neutrik NA2-IO-DPRO pro připojení mikrofónů pro celkové snímání orchestru, který může být využit například pro přizvučení orchestru do odposlechů na jevišti nebo do budovy. [47]

Dále se v orchestřišti nachází distributor Aviom D800-Dante, který je připojen do Dante sítě a umožňuje distribuci signálu do sluchátkových předzesilovačů pro odposlech hudebníků v orchestru. [48]

Ve zvukové kabině je do sítě Dante připojen mixážní pult Yamaha PM5, respektive jeho procesorová jednotka. Dále se zde nachází dva počítače určené pro přehrávání scénické hudby a dalších zvuků, jeden jako hlavní a druhý jako záložní. Ty jsou připojeny do sítě Dante pomocí softwaru Dante Virtual Soundcard. [49]

V rámci obrázku 6.3 není již zobrazeno propojení jednotlivých switchů. V rámci Dante je vhodné realizovat zapojení jednotlivých switchů do hvězdy nebo do stromu. Proto by zapojení mohlo být realizováno pomocí centrálního switchu do hvězdy. Výhodou by ve velkém divadle mohlo být využití centrálního switchu s SFP porty a základní kabelové trasy do jednotlivých místností vést pomocí optických kabelů.

Podobná instalace se bude ale velmi lišit dle potřeb a využití daného divadla. Ve velkém divadle by se ve skutečnosti mohlo nacházet více mixážních konzolí, např. nejen v kabině, ale i na livepostu v divadelním sále. Také rozmístění jednotlivých prvků v různých místech záleží velmi na dispozicích divadla a reálných možnostech.

## 6.4 Konferenční místnost

Kromě užití přenosu zvuku po ethernetové síti v profesionálních audio aplikacích, kterými mohou být např. koncerty, hudební kluby, divadla a další, je ale možné využít výhod přenosu zvuku po ethernetové síti i v menších instalacích, kde může digitální síť výrazně zjednodušit náklady na instalaci systému a nároky na jeho obsluhu.

Situace s omezeními tykajícími se koronavirové pandemie výrazně zvýšila nároky a požadavky na video konference a přenosy či záznamy přednášek, porad a dalších schůzek, jelikož nebylo možné se jich účastnit přímo na místě. Je pravděpodobné, že v nejbližší době bude využívání online prostoru pro pořádání různých událostí pokračovat. Velkým problémem ale v tomto případě může být zajištění kvalitního přenosu zvuku v případě většího množství účastníků připojených z jednoho místa.

Zde může být velkou výhodou využití zařízení v rámci Dante sítě. Rozšiřování Dante a digitálních technologií pro přenos zvuku způsobuje zlevňování technologií a rozšiřování celkového portfolia možných zařízení. Příkladem mohou být například instalační mikrofony od firmy Audio Technica či konferenční systém od firmy Shure. Díky softwaru Dante Virtual Soundcard nebo převodníkům Audinate AVIO je tak možné připojit jednoduše Dante zařízení k počítači, tabletu nebo i telefonu pomocí bluetooth. Přednášková nebo konferenční místnost tak může být vybavena nainstalovanými mikrofony pro snímání více mluvících osob, případně bezdrátovým mikrofonom připojeným do sítě Dante.

V instalaci se může například nacházet procesor Yamaha MRX7-D nebo Shure INTELLIMIX P300, který bude pomocí automixeru automaticky míchat signál do výstupu. Ten pak může být pouštěn do reproboxů ozvučení, nahráván nebo připojen do počítače a streamován. [50, 51, 52]

## 6.5 Plošné ozvučení pomocí Dante

Přenos zvuku po ethernetové síti se navíc může najít uplatnění v prostorech, kde je vyžadováno plošné ozvučení. Může se jednat o obchodní domy, výstavní prostory, galerie, muzea nebo i firmy s potřebou jednosměrné komunikace.

Příkladem může být např. ozvučení ve výstavním prostoru, kde je třeba upravovat nastavení a možnosti zvukové technologie dle potřeb aktuální výstavy. Plošné ozvučení pomocí stovoltové technologie vyžaduje pro každý samostatný okruh speciální výstup na zesilovači a samostatný kabel pro každý okruh, takže s narůstajícím počtem okruhů, roste cena i náročnost instalace. V případě využití digitální technologie je možné jednoduše přiřazovat jednotlivá zařízení k daným okruhům, a je tak možné velmi variabilně reagovat na aktuální potřeby.

Příkladem instalačního reproduktoru může být Shure Microflex MXN5W-C. Jedná se o podhledový reproduktor, který je možné připojit do sítě Dante nebo AES67. Je napájený pomocí PoE nebo PoE Plus a je možné jej tak připojit jediným krouceným kabelem. [53]

Dalším příkladem reproboxů připojitelných do Dante sítě je řada instalačních reproboxů napájených přes technologii PoE od finské firmy zabývající se výrobou studiových monitorů Genelec. Jedná se o reproboxy s označením Smart IP Installation

Speaker 4420A a 4430A. [54]

V případě potřeby hlasitější produkce to pak mohou být například reproboxy z řady RSX od výrobce Eastern Acoustic Works, které také umožňují připojit signál přímo z Dante sítě. [55]

Díky tomu je možné připojení jednotlivých zařízení pro reprodukci hudby či jiných audio materiálů řešit softwarově a při návrhu sítě postačuje připojit všechna zařízení v rámci sítě Dante. Pro případ využití přenosných zařízení postačuje využít přípojná místa ethernetové sítě pro zapojení dalších zařízení. Zařízení s menším odběrem navíc mohou být napájena pomocí PoE technologie, a odpadá tak potřeba samostatného napájení pro zařízení, která tak mohou být připojena jen jedním kabelem.

Nezanedbatelnou výhodou je i možnost centrální správy a nastavení zařízení. Signál je možné směřovat např. z procesoru nebo mixážního pultu do jednotlivých zařízení, a je tak možné jednoduše daný signál vysílat pouze do jednoho zařízení stejně jako do všech.

## 7 Nahrávací a postprodukční režie

V rámci dílčí rekonstrukce postprodukční režie v Mahenově divadle docházelo kromě akustických úprav a rekonstrukce technologií zvukového řetězce i ke kompletní přestavbě digitální sítě pro přenos zvuku.

Při návrhu řešení na rekonstrukci režie bylo potřeba uvažovat v zadání několik způsobů pro možnosti budoucího využití režie. Postprodukční režie v Mahenově divadle, které je primárně využíváno pro potřeby souboru Činohry Národního divadla Brno, slouží pro úpravu hudby, zvukových podkresů, mluveného slova a dalšího audio materiálu pro potřeby představení činohry. Může být ale využíváno i jinými soubory Národního divadla Brno. Režie je např. využíváno baletním souborem pro postprodukcii a přípravu materiálů pro baletní představení a zkoušky. Režie může být také využíváno pro nahrávání mluveného slova a malých hudební těles pro představení a propagace Národního divadla Brno.

Dalším požadavkem je možnost nahrávání jednotlivých zvukových stop z hlavní scény Mahenova divadla (např. záznamy koncertů, přestavení apod.) a jejich další postprodukce.

Celkově tedy musí instalace umožňovat jak nahrávání, tak postprodukcii zvukových materiálů a musí být propojena s hlavní scénou Mahenova divadla pro možnosti multikanálového záznamu.

Postprodukční režie je umístěna přímo v budově Mahenova divadla. Skládá se celkem ze čtyř prostorů, které mohou být pro nahrávání využity.

Jedná se o režii, ve které se nachází počítač s DAW stanicí a ovládací konzolí. Dále jsou zde umístěny studiové monitory, analogové mikrofonní předzesilovače a další efektové jednotky – dozvukové efekty apod. – které je třeba připojit do sítě Dante.

Druhou místností je samotný prostor určený k nahrávání, které slouží jako primární prostor pro zaznamenávání interpretů. Je potřeba zajistit možnost připojení mikrofونů a výstupů pro odposlech, např. sluchátkových zesilovačů.

Třetí místnost, která se může využívat pro potřeby nahrávání, je primárně využívána jako zkušebna pro soubor činohry. Zde není umístěno trvalé vybavení, ale je možnost ji v případě potřeby využít jako další prostor pro potřeby nahrávání.

V rámci prostoru se ještě nachází malá technická místnost, do které je možné umístit switche a další technologická zařízení.

Protože je v rámci rekonstrukce vyžadována kompatibilita se stávajícím systémem pro přenos zvuku a z důvodu, aby i po rekonstrukci bylo možno využívat stávající vybavení, bude využita technologie Dante, která je využívána i v dalších částech zvukového řetězce v divadle. Prostor režie je s dalšími technologiemi zvukového řetězce divadla propojen optickým multimode kabelem. Pro možnost vícecestného nahrávání je tak možné spojit režii s Dante kartou v mixážní konzoli v hlavním

sále Mahenova divadla.

## 7.1 Popis síť

V rámci rekonstrukce se uvažuje využití původních switchů Cisco SG300-10P, které byly využity v režii již před rekonstrukcí. Celkem se v síti nachází 4 switche. Jeden je pro připojení zařízení přímo v režii. Druhý je umístěn v technické místnosti pro připojení zařízení v technické místnosti a dalších zařízení nacházejících se v nahrávací místnosti. Třetí switch je využit jako přenosný, který umožňuje připojení dalších zařízení pro nahrávání na zkušebně nebo v dalších prostorech.

Poslední switch zapojený do Dante sítě nahrávací režie je umístěn u mixážní konzole na hlavní scéně pro její připojení pro potřeby multistopého záznamu z divadelního sálu.

Pro přenos digitálního zvuku v rámci prostoru režie je tedy využívána síť Dante. Jedním ze základních parametrů pro volbu sítě Dante je kompatibilita s dalšími technologiemi divadla, a je tak možné využívat současné vybavení spolu s novými technologiemi pro potřeby nahrávání.

Základním prvkem, který umožní záznam a přehrávání zvuku z a do počítače, ve kterém poběží DAW software, je zvuková karta. Jedná se o PCI Express zvukovou kartu Yamaha AIC 128-D. Ta umožňuje přenos až 256 kanálů digitálního zvuku mezi počítačem a sítí Dante. Při vzorkovací frekvenci 96 kHz a nižší, tedy i u nejčastěji v režii využívané vzorkovací frekvenci 48 kHz, je možno přenášet až 128 vstupních a 128 výstupních kanálů s bitovou hloubkou 24 bitů. Minimální latence, na kterou je možné Dante rozhraní nakonfigurovat, je 150  $\mu$ s. [56]

Kromě zvukové karty je ještě počítač s DAW softwarem připojen do Dante sítě i běžným ethernetovým rozhraním pro možnost konfigurace a nastavování sítě a další komunikaci, které mezi počítačem a Dante sítí není možné provádět přes PCI zvukovou kartu.

Dalšími třemi zařízeními, které jsou připojeny do stejné sítě jako Dante je hardwarový kontroler pro DAW software. Do postprodukční režie byl použit systém od japonské firmy Yamaha Nuage. Celkem jsou do systému zapojeny dva fader moduly a jeden master modul. Nejedná se sice o zařízení, které umožňuje přenos zvuku po síti Dante, jsou ale připojeny k stejné síti jako Dante zařízení pro možnost komunikace s dalšími technologiemi v síti. Díky tomu je možné přímo z konzole ovládat některé parametry a hlasitost na matrixovém mixážním pultu, který je do Dante sítě také připojen.

Dále jsou v přepínači v režii připojeny ještě vstupně výstupní zařízení pro připojování dalších zařízení do sítě Dante. Je možné je využívat pro připojení dalších

zařízení do insertních bodů v DAW nebo jako převodníky z analogových předzesilovačů pro nahrávání audio signálu. Pro tento účel jsou využity zařízení firmy Yamaha NUAGE I/O. Tato zařízení je možné využívat v konfiguraci 16 analogových vstupů a 16 analogových výstupů nebo 8 analogových a 8 digitálních vstupů a výstupů nebo 16 digitálních vstupů a 16 digitálních výstupů. [56]

Do přepínače umístěného v technické místnosti je zapojen procesor a výstupní modul pro studiové monitory. Ten je určen k ovládní výstupů z DAW softwaru do jednotlivých studiových monitorů, dále routing signálu do sluchátkových a studiových odposlechů. Jedná se o procesor Yamaha MMP1. Ten umožňuje až 64 vstupů a výstupů do Dante sítě a je vybaven dvěma matrix mixéry. Jeden je určen pro míchání monitorovacích výstupů a je označen jako monitor matrix a druhý, speaker matrix, pro výstup do studiových monitorů. Dále je vybaven 8 channel stripy umožňující ekvalizaci a využití dynamického kompresoru pro vstupní signály do monitor matrixu. [57]

Dále je v technické místnosti umístěno vstupní zařízení Yamaha Ri8-D. To může být využito jako vstupní předzesilovač pro mikrofonní a linkové vstupy do sítě Dante. Tento předzesilovač umožňuje dálkově ovládat citlivost vstupů a díky tomu může být umístěn v technické místnosti bez přímého přístupu obsluhy. Nachází se na něm celkem osm analogových vstupů.

Do přepínače v technologické místnosti se připojují i sluchátkové zesilovače. Pro možnost variability zapojení a jednoduchosti pro obsluhu byly zvoleny Dante zesilovače firmy Focusrite RedNet AM2. Jedná se o stereo sluchátkové zesilovače, které jsou připojeny přímo do sítě Dante. Napájeny jsou pomocí PoE. Díky tomu je možné zapojit je pouze jedním ethernetovým kabelem, přes který je přenášěn jak signál, tak i napájení. Díky tomu je možné velmi jednoduše zařízení zapojit a provozovat. Výhodou Dante sluchátkových zesilovačů je i to, že zařízení může být zapojeno do kteréhokoli ethernetového portu v rámci sítě Dante a vždy bude správně identifikováno. To umožňuje (na rozdíl od analogové technologie) v průběhu nahrávání jednoduše identifikovat jednotlivé zesilovače (nezávisle na přípojném místě), a tak pokud např. zpěvák využívá RedNet AM2 číslo 1, tak i v případě např. po přestavbě nebo dalším nahrávání opět využije stejný zesilovač a ten již zůstává nastaven na správný výstup. [58]

Pro náročnější tělesa, kdy je nahráván velký soubor nebo je třeba využívat dva akusticky oddělené prostory, je možné při nahrávání využít prostor zkušebny vedle postprodukční režie. K tomuto účelu může být využito třetí přepínač Cisco SG300-10P. Ten je mobilně uložen v přenosném racku společně s vstupním a výstupním zařízením Yamaha Rio-1608-D. Ten podobně jako Ri8-D umožňuje dálkově ovládat citlivost předzesilovačů. Celkem obsahuje 16 analogových vstupů a 8 analogových výstupů. Je tak využitelný pro připojení např. mikrofonů. Díky zapojení společně

s přepínačem Cisco, který umožňuje napájet přes ethernetové porty pomocí PoE další např. Dante sluchátkové zesilovače, je možné do něj připojit i další Dante zařízení, a tak nahrávání přizpůsobit aktuálním potřebám a požadavkům.

## 7.2 Provoz sítě

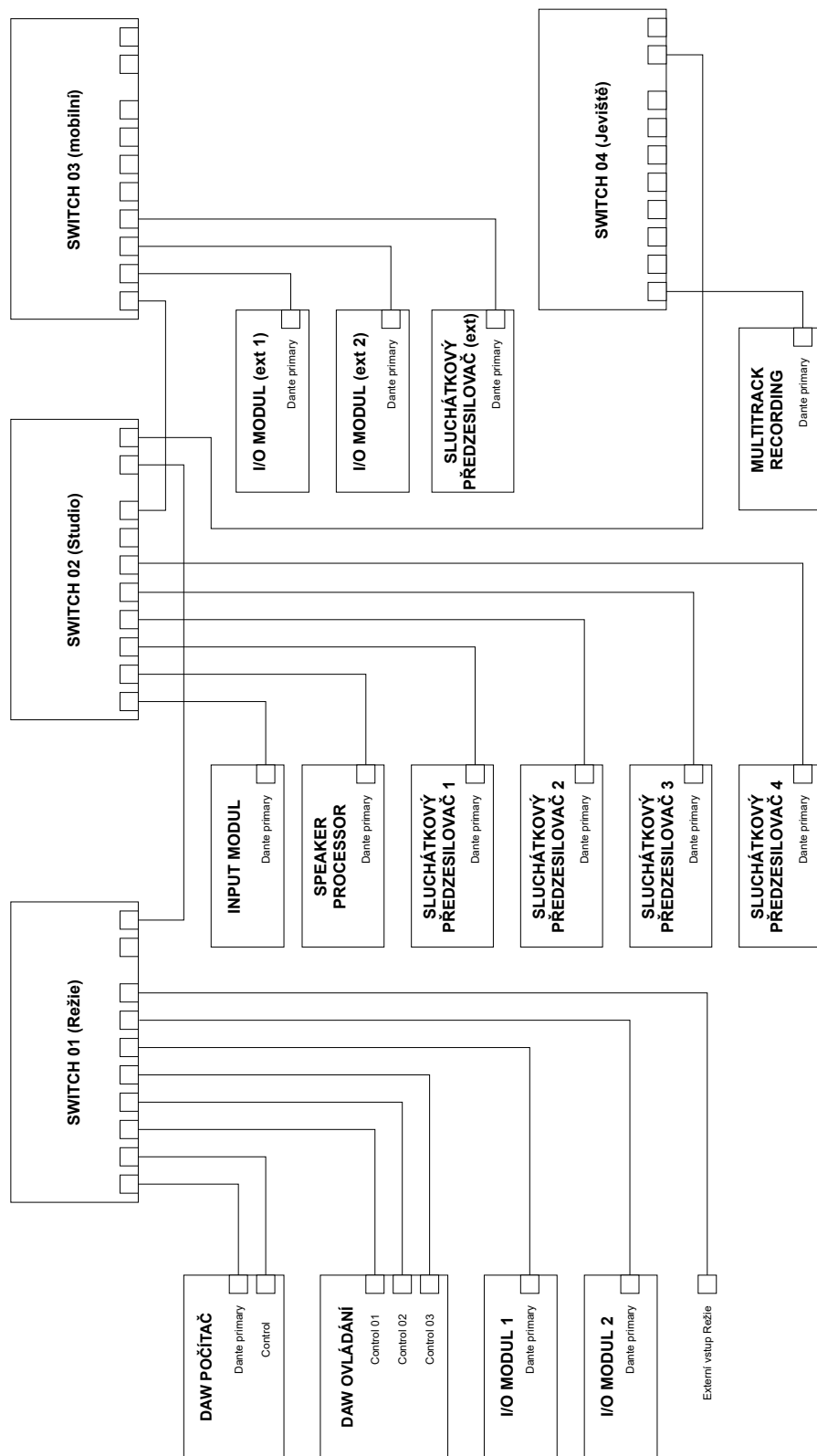
Pro záznam, následné zpracování a i přehrávání audio záznamu je v režii využíván počítač s DAW softwarem. Veškerý audio signál z pracovní stanice i zpět je přenášen přes zvukovou kartu Yamaha AIC 128-D. Je tedy třeba, aby bylo možné veškeré signály, které je třeba zaznamenat, naroutovat v Dante síti na vstupy této karty. Jako vstupy je tedy možné využívat Dante převodníky Yamaha Ri8-D a Rio-1608-D. Pokud jsou využity analogové předzesilovače, channel stripy či další analogový hardware, je tento signál z těchto převodníků přiveden do Nuage I/O, ve kterém je zdigitalizován, a dále přes Dante síť přiveden na rozhraní karty AIC 128-D.

Pro přehrávání audiosignálu z počítače je opět využita karta AIC 128-D. Signál je v rámci sítě Dante veden z karty do procesoru Yamaha MMP1. V něm probíhá processing signálu. Ten je přiveden do speaker matrixu a odtud je veden na jednotlivé výstupy procesoru. Odtud je signál veden pomocí analogových nebo AES/EBU výstupů do reproboxů v režii a do sluchátkového zesilovače v režii. Díky propojení systému Nuage s procesorem MMP1 to umožňuje přímo z hlavní konzole ovládat hlasitosti a nastavení jednotlivých výstupů, volit výstupní monitory a vybírat z různých vstupů.

Do vstupů procesoru MMP1 jsou také přivedeny signály z mikrofونů určených ke zpětné komunikaci mezi režii a interprety. Ty mohou být v rámci MMP1 routovány do kterýkoliv výstupů.

Pro potřeby nahrávání a komunikace jsou v režii využity sluchátkové zesilovače Focusrite RedNet AM2. Ty jsou připojeny v Dante síti a napájeny pomocí PoE. Slouží i pro potřebu odposlechu, kdy je při nahrávání třeba, aby interpret slyšel nejen svůj hlas či nástroj, ale i ostatní interprety. Zároveň může být vyžadováno přehrát již dříve nahrané audio stopy ze softwaru DAW zpětně do sluchátek. To je možné udělat několika způsoby. Sluchátkové zesilovače jsou v rámci Dante sítě naroutovány na Dante výstupy procesoru MMP1. Díky tomu je možné stejně jako výstupy pro monitory provádět jejich základní nastavení přímo z hlavní konzole. Pro přivedení signálu z různých zdrojů do sluchátek je opět možné využít matrixový mixér v rámci MMP1. Jedním z přivedených signálů do procesoru je signál ze softwaru DAW na pracovním počítači. Ten umožňuje přehrávat již nahraný signál z počítače zpět do interpretových sluchátek.

V rámci softwaru DAW je možné posílat i přímo vstupní signál na výstup. Díky tomu by bylo možné řešit i odposlech vstupních signálů během nahrávání. Ovšem



Obr. 7.1: Blokové schéma zapojení postprodukční režie

nevýhodou tohoto řešení je poměrně vysoká latence. Signál totiž musí zpracovat počítač, a dle výkonu a nastavení bufferu na zvukové kartě, může značně zvýšit latenci. Ta může vzrůst i na několik desítek milisekund, což už je pro sluchátková velmi vysoká hodnota, která může způsobovat problém nejen při nahrávání hudby, ale i mluveného slova.

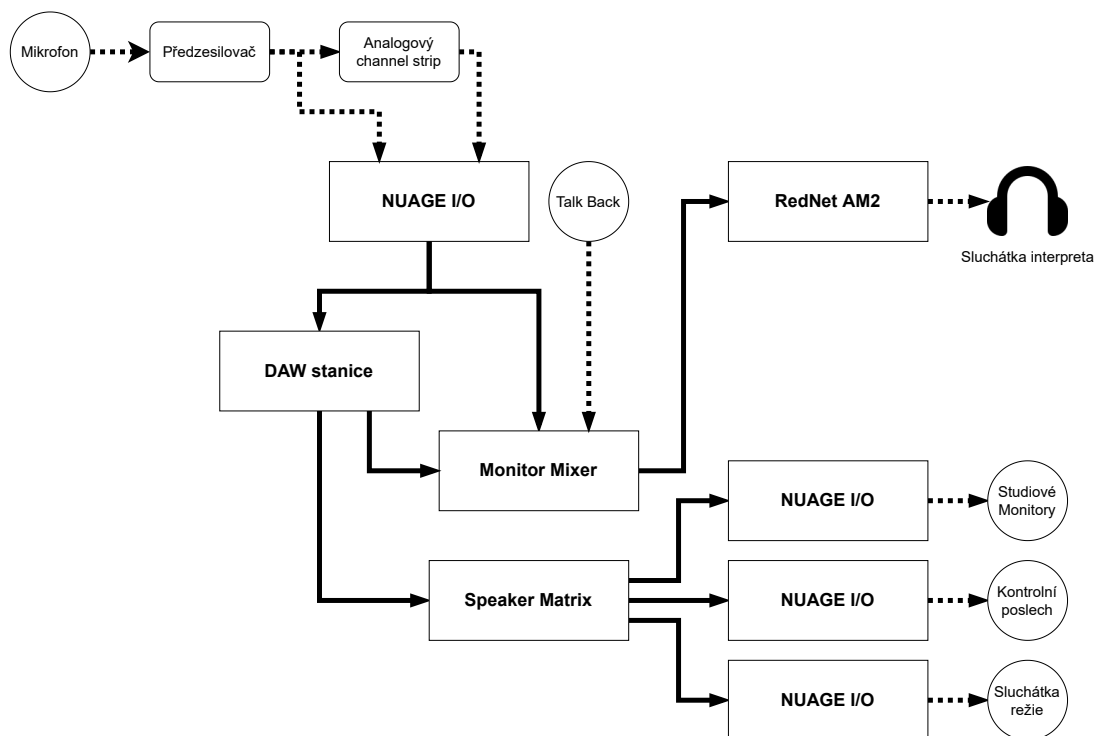
Proto je vhodné nevyužívat pro přímý odposlech cestu přes počítač, který je jednoznačně nejproblematictější součástí řetězce, pokud jde o zvyšování hodnoty latence. V rámci systému Nuage je možné využít funkci direct monitoring, která umožňuje v rámci zařízení Nuage I/O přivést vstupní signál např. z mikrofону přímo na výstup v rámci stejného nebo jiného zařízení Nuage I/O. Díky tomu je možné „obejít“ cestu přes počítač a dosáhnout tak velkého snížení latence. Nevýhodou tohoto řešení je, že všechny vstupní i výstupní zařízení musí být zapojeny přímo v analogových nebo AES/EBU vstupech a výstupech na Yamaha Nuage I/O a zároveň musí být tato zařízení propojena ještě druhou sběrnicí – Cascade. Nevýhodou ovšem je, že pak nelze v rámci Direct Monitoringu využít jiná zařízení než zařízení s jeho podporou a není jej proto možné využít na např. sluchátkových zesilovačích připojených přes Dante nebo z mikrofonních předzesilovačů Yamaha Rio. [59]

Abychom mohli dosáhnout nízkých latencí při odposlechu během nahrávání a zároveň mohli využívat libovolné zařízení v rámci sítě Dante, nabízí se řešení využít pro odposlech jiné výpočetní zařízení. K tomu může být využito opět procesor Yamaha MMP1. V Dante síti je tak možné naroutovat vstupní signál nejen do karty AIC 128-D, ale také na Dante vstupy MMP1. V rámci MMP1 je možné využít 8 channel stripů včetně ekvalizace a dynamického kompresoru. Dále je možné využít pro směrování signálu využít monitor matrix v rámci MMP1. Díky tomu je signál ze vstupních předzesilovačů přímo v rámci Dante doveden do procesoru a zde je zpracován a poslán zpět po Dante do sluchátkových předzesilovačů. Ovšem takto získáme jen omezené možnosti nastavení signálu pro sluchátkový odposlech. Výhodou ovšem je velmi nízká latence přenosu. Ta je závislá převážně na latenci sítě Dante a době zpracování signálu v rámci MMP1. Je tak umožněna nenáročná obsluha odposlechových cest pro potřeby nahrávání. [57]

V případě náročnějších potřeb a složitějšího monitoringu, kdy je zároveň třeba zachovat nízké zpoždění při zpracování signálu, je vhodné využít např. externí mixážní konzoli pro monitoring. V tomto případě se projeví výhoda přenosu zvuku po digitální síti, kdy v rámci Dante je možné přivést jeden vstup na několik výstupů. Díky tomu je možné signál z mikrofonního vstupu přivést zároveň do zvukové karty AIC 128-D a zároveň do mixážní konzole připojené v síti Dante i procesoru Yamaha MMP1. Díky tomu je možné mít signál přivedený do více zařízení zároveň a dle potřeby využít dané zařízení. Signály z těchto zařízení je poté možné přivést do pro-

cesoru MMP1 a v rámci monitorového matrixu je spojit do výstupu do sluchátkového Dante zesilovače.

### 7.3 Routing síť



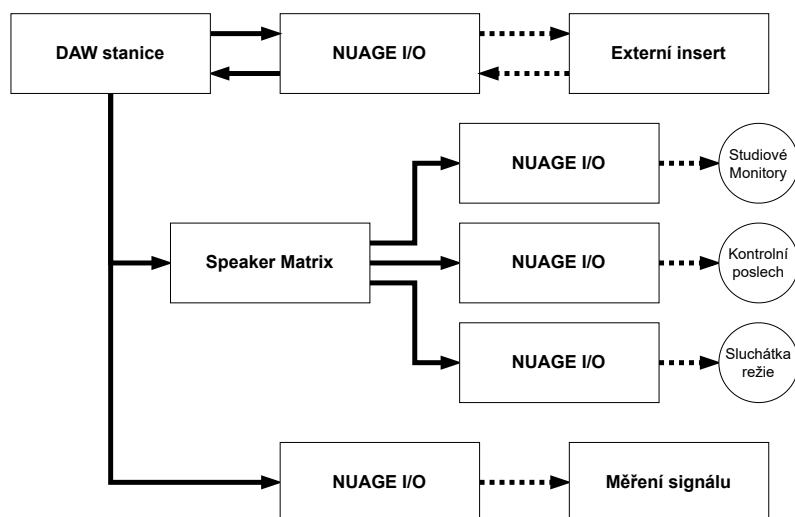
Obr. 7.2: Ukázka Dante routingu pro nahrávání interpreta

Část principu routingu sítě v rámci nahrávací režie je zobrazena na obrázku 7.2. Pro vedení signálu v rámci sítě Dante jsou použity plné čáry. Přerušované čáry pak symbolizují vedení signálu pomocí analogové či AES/EBU technologie. V daném příkladu je zobrazena jen malá část sítě s jedním účinkujícím. Ve skutečnosti je těchto spojů a výstupů nastaveno i několik desítek.

Analogový signál z mikrofonu je přiveden do předzesilovače. Dále je signál z předzesilovače zpracováván analogovým channel stripem. Do převodníku z analogového do digitálního signálu v Dante síti je přiveden jak vstup před channel stripem, tak i zpracovaný signál za ním. To může být výhodné v případě, kdy je málo času při nahrávání a je tak zaznamenán i nezměněný signál pro případ, kdy by se nastavení channel stripu ukázalo jako nevhodné. Signál je v Nuage I/O převeden do sítě Dante. Dále je tento signál v rámci Dante sítě routován do dvou zařízení. Jedná se o DAW stanici, tedy na vstup zvukové karty Yamaha AIC 128-D a dále do Monitorového Matrixu. V DAW softwaru je signál nahráván.

Z DAW softwaru je dále odeslán signál do monitor matrixu a speaker matrixu. Obě tyto funkce obstarává procesor Yamaha MMP1. V monitor matrixu je zpracován a signál z mikrofonního vstupu – dále zde mohou být přimíchány i signály z dalších vstupů, aby se interpreti navzájem slyšeli ve sluchátkách – a společně smíchán se signálem z DAW softwaru pro daný výstup. Může se jednat např. o již nahrané části, podkresovou hudbu apod. Dále může být do sluchátek poslán i signál z komunikace, aby režisér nebo zvukový technik mohl komunikovat s interpretem. Signál je z monitorového matrixu dále veden pomocí sítě Dante do sluchátkového zesilovače RedNet AM2.

Kromě toho je z DAW softwaru pomocí sítě Dante ještě poslán signál do speaker matrixu. Ten jen také součástí procesoru MMP1. Ten je určen pro poslech v režii. Umožňuje tak obsluze kontrolovat nahrávaný nebo zpracovávaný signál. V rámci speaker matrixu může být využito nastavení pro frekvenční a případně časové zpoždění jednotlivých reproduktorů. Hlavně ale umožňuje ovládat celkovou hlasitost poslechu v režii a přepínat mezi jednotlivými monitory – konkrétně hlavními monitory a monitory nebo sluchátky pro kontrolní poslech.



Obr. 7.3: Ukázka Dante routingu pro mixing a mastering

Obrázek 7.3 dále ukazuje část routingu pro primární potřeby postprodukce. V tomto případě je signál z DAW softwaru v rámci Dante sítě přiveden nejen do speaker matrixu, z něj jsou pak vedeny výstupy do monitorů stejně jako v předchozím příkladě. Je zde ale naroutován i výstup od Nuage I/O zařízení, z kterého je signál dále pomocí AES/EBU přiveden do audio meteru TC Electronic Clarity M pro měření výstupního signálu. K DAW stanici je také připojen externí efekt. V případě, že je třeba připojit externí hardwarové zařízení – může jím být například dozvučkový procesor, kompresor, limiter či jiná zařízení – musíme zajistit, aby bylo možné

z DAW softwaru poslat audiosignál do daného zařízení, ve kterém bude zpracován a poté jej opět přivést zpět do DAW softwaru. To je opět provedeno pomocí sítě Dante, kdy je signál ze zvukové karty AIC 128-D naroutován do zařízení Nuage I/O. Odtud je signál analogově nebo pomocí AES/EBU přiveden do externího zařízení. Např. kompresoru. Poté je opět analogový nebo AES/EBU signál přiveden zpět na vstup Nuage I/O. a tento signál je v rámci Dante sítě naroutován do vstupu AIC 128-D zvukové karty.

V uvedených případech jsem se snažil popsat princip routingu Dante sítě v rámci nahrávací a postprodukční režie. Je třeba dodat, že v daných případech je signál vždy popisován jako jeden a je zobrazen jednou čarou. Ve skutečnosti se při nahrávání častěji pracuje se stereo nebo i vícekanálovým zvukem. Zatímco signál z mikrofону bude ve většině případů přiveden ve formě mono signálu, většina výstupů do sluchátek nebo studiových monitorů je realizována jako stereo, tedy jedná se o dva různé audio kanály pro každé zařízení. Stejně tak ve stereo konfiguraci jsou nejčastěji prováděny i externí inserty. V tomto případě by tedy byly z DAW stanice odeslány dva kanály a dva kanály přijaty.

Hlavní monitory jsou pak v postprodukční a nahrávací režii realizovány ve formátu 7.1, tedy celkem 7 prostorových audiokanáľů a jeden efektový nízkofrekvenční označován jako LFE. Celkem je v tomto případě vedeno z DAW stanice do speaker matrixu 8 audio kanálů.

Také je třeba uvést, že v daných situacích popisují situaci vždy jen pro jedno zařízení. Ve skutečnosti není v instalaci pouze jeden předzesilovač pro mikrofón. Celkově je tedy v rámci postprodukční režie větší množství pevných i mobilních zařízení, které jsou naroutovány v síti Dante.

## Závěr

Využívání IP sítí pro přenos audiosignálu přináší celou řadu výhod. S poklesem ceny síťové infrastruktury je možné využívat IP protokol pro nejrůznější škálu aplikací. Od malých instalací v klubech či pro živé zvučení, ve kterých se využívá jen malé množství zařízení. Zde je možno využít např. současnou kabeláž pro běžnou ethernetovou síť, či je možná její jednoduchá instalace. Je tak výhodou nenáročný provoz a možnost využití nízké latence. Tu lze využít i např. pro potřeby nahrávacích studií, kde v případě zapojení zařízení do hvězdy s použitím pouze jednoho switche (dvou pro redundatní vedení) lze dosáhnout u sítě Dante latence pouhých 0,25 ms.

Tyto sítě pro přenos audiosignálu ale mohou dosahovat i velkých rozměrů a mohou se v nich nacházet i stovky zařízení. Příkladem užití větší IP sítě pro přenos zvukového signálu může být použití pro velký koncert, kdy kromě mixážních pultů, stageboxů mohou být do sítě přímo zapojeny i audio zesilovače celého zvukového aparátu, díky čemuž může být signál do nich jednoduše distribuován, a ty mohou být v rámci této sítě i řízeny a nastavovány.

Využití těchto technologií ale nemusí být pouze v oblasti profesionální zvukové techniky. Díky jejich rozvoji se rozšiřuje spektrum produktů, které je možné využít i v dalších oblastech. Typickým příkladem mohou být například instalační reproduktory určené pro síť Dante. Ty mohou umožňovat napájení pomocí technologie PoE.

Pokrytí prostoru pomocí reproduktorů zapojených do ethernetové sítě může umožnit směřování audiosignálu do jednotlivých reproduktorů, nezávisle na jejich zapojení, díky čemuž může výrazně zvýšit variabilitu a univerzálnost oproti běžným stovoltovým systémům. Pokud pro daný provoz není vyžadována nízká latence, je možné mít v síti i několik desítek nebo i více switchů, a můžou tak být do sítě připojeny i stovky zařízení.

V současné době se velké množství výuky, školení, porad a dalších činností odehrává z bezpečnostních důvodů v online prostoru. Je pravděpodobné, že i do budoucna bude komunikace ve velké míře probíhat dálkově. I zde můžou sítě Dante, Ravenna a jim podobné najít užití.

Díky možnosti využít stávající síťovou infrastrukturu může být jejich implementace do sítí v různých firmách či školním prostředí velmi jednoduchá a nemusí vyžadovat velké náklady na úpravu sítě. Díky velkému množství produktů, jako jsou mikrofony, mixážní pulty a další převodníky, které je možné zapojit přímo např. do Dante sítě, je tak možné přenášet zvuk nebo i obraz přednášejícího či lektora do dalších místností či je zaznamenávat pro další užití nebo streaming přes internet. Variabilita a jednoduchost zapojení navíc umožňují tato zařízení lehce přenášet a využívat je v různých prostorách v rámci sítě.

I když je sítí, které umožňují přenos zvuku pomocí IP protokolu, velké množství, v praxi se s možnostmi využití různých výrobků od většího množství výrobců setkáváme jen u několika z nich.

Jedním z větších hráčů na trhu je formát AVB. Ten umožňuje díky rezervačnímu protokolu zajistit kapacitu sítě tak, aby nemohlo docházet k přehlcení sítě a výpadkům provozu. Ovšem tento protokol i typ PTP protokolu, který AVB využívá pro synchronizaci, vyžaduje přímou podporu AVB na všech zařízeních v síti, kudy AVB signál prochází. Tím se výrazně omezuje možnost, které switche je možné použít se sítí AVB. Z toho důvodu je i možnost využít AVB na již užívaných IP sítích velmi limitovaná a omezuje se na několik málo typů kompatibilních zařízení. I pro nové sítě je ale cena síťových prvků pro AVB výrazně vyšší než cena běžně dostupných ethernetových switchů, na kterých je možné provozovat další sítě.

V současnosti je, co se do počtu podporovaných zařízení, které je možné v síti provozovat, největším hráčem na trhu systém Dante. Pro systém Dante je k dispozici více než 2000 různých produktů. [60] Dalším protokolem pro přenos audiosignálu je Ravenna. V poslední době velmi narůstá mezi výrobci zařízení pro tyto IP sítě podpora protokolu AES67, který umožňuje přenášet data mezi jednotlivými protokoly, a propojit tak v jeden systém více systémů pro přenos zvuku. Díky tomu se variabilita a možnosti jejich užití ještě zvětšují.

Tyto protokoly na rozdíl od AVB využívají třetí síťovou vrstvu a jsou tak schopny s omezením využívat téměř jakýkoli switch pro běžný ethernet. Omezení nastává pouze u funkce úspory energie – EEE. V případě větších sítí se složitějším provozem, případně v situaci, kdy dochází ke kombinaci více přenosových rychlostí v Dante, jsou vyšší nároky na síťové prvky. Přesto je možné tyto sítě provozovat na výrazně levnějších zařízeních než AVB.

V praktické části jsem se již nadále zabýval pouze protokolem Dante, který byl taky využit při praktické realizaci postprodukční a nahrávací režie. Pro správný provoz sítě pro přenos audiosignálu při nízkých latencích je nutné speciální nastavení přepínačů určených pro provoz sítě nebo speciální zařízení, která jsou výrobcem přímo určena pro tyto účely. Přímo pro provoz na síti Dante jsou určeny přepínače od firmy Yamaha, např. Yamaha SWP1. [34] V rámci práce bylo základní nastavení demonstrováno na dvou řadách běžně dostupných manageable switchů od výrobců D-Link a Cisco. Tyto switche byly také použity v rámci laboratorně provedené sítě za účelem otestování chování Dante v různých podmínkách.

To bylo provedeno na uměle vytvořené síti se čtyřmi switchi a čtyřmi zařízeními. Dvěma stageboxy od firmy Yamaha s označením Rio 1608-D a dvěma počítači se softwarem Audinate Dante Virtual Soundcard. V rámci této sítě byly zkoušeny různé varianty zapojení a zatížení sítě pro ověření vlastností sítě Dante a správnosti nastavení switchů.

Při přenosu 72 audiokanáľů po gigabitové lince přes čtyři switche, kdy datový tok dosahoval 100 Mbit/s, bylo možné provozovat spojení mezi stageboxy s nastavenou latencí 250  $\mu$ s bez jediného problému. Protože v rámci laboratorních podmínek nebylo možné dosáhnout tak vysokého datového toku v rámci přenosu dat v Dante síti, aby mohla být výrazně zatížena nebo přetížena gigabitová linka, byla při následujících pokusech snížena propustnost mezi jednotlivými switchi na rychlost 100 Mbit/s. Při zatížení stomegabitové linky přibližně 20 % její kapacity začalo docházet k růstu latence přenosu dat měřených v rámci Dante Controlleru. Při narůstajícím datovém toku bylo třeba pro bezchybný provoz zvýšit nastavenou latenci na 500  $\mu$ s. Při dalším zvyšování množství přenášených dat rostla i latence přicházejících paketů. Při překročení úrovně přibližně 80 % vytížení linky bylo již třeba zvýšit nastavenou latenci na hodnotu 1 ms. To odpovídá údajům od firmy Audinate, která uvádí, že pro Dante síť by měly být jednotlivé linky zatíženy pro bezpečný provoz na maximálně 70 % jejich celkové kapacity.

V případě dalšího růstu až k úrovni plného vytížení linky začalo docházet k výraznému zpomalení ovládacích signálů softwaru Dante Controlleru, až se software nebyl schopen spojit se žádným ze zařízení, které bylo přístupné v síti pouze přes „úzké hrdlo“. Při tomto stavu byl ale stále zvuk přenášen bez výpadků a zařízení po celou dobu přijímalo synchronizační signál. Při snaze zvýšit zatížení ještě víc, již nebylo možné v rámci Dante Controlleru provést routování spojení.

Tak bylo ověřeno, že se podařilo správně nastavit switche. V rámci konfigurace switchů se nejvyšší priorita nastavuje synchronizačnímu signálu, poté samotnému přenosu audiosignálu a nízká priorita je pak poskytnuta dalším datům pro konfiguraci a monitoring Dante zařízení. Nejnižší je pak nastavena ostatnímu provozu.

V reálné situaci tak při velkém zatížení sítě došlo nejprve k zahození paketů s nejnižší prioritou, tedy kontrolní a konfigurační data. Při nastavení menší latence při plném vytížení sítě, v daném případě při plném zatížení a latenci 250  $\mu$ s se kvůli pozdě přichozícím paketům objevovaly výpadky zvuku z důvodu paketů s audiosignálem, které přišly do zařízení s větším než nastaveným zpožděním.

Při nastavené latenci na 1 ms a téměř plném vytížení sítě s rychlostí 100 Mbit/s byl zvuk přenášen bez jediného problému a výpadku.

Další částí bylo zjištění, jaký vliv má zvyšování nebo snižování počtu switchů mezi jednotlivými zařízeními na zpoždění. Toto měření již proběhlo při plné rychlosti 1 Gbit/s. Výsledky jsou zobrazeny v tabulce 5.2. Vidíme, že každý přeskok v rámci gigabitové sítě přidává pro přenos dat přibližně 5 až 10  $\mu$ s. Jak jsme si ale ověřili v předchozím případě, daleko větší vliv na zpoždění dat může mít množství dat, které je přes síť posíláno, a délka fronty v přepínači. Při měření se nijak neprojevovala změna konfigurace zařízení mezi switched a redundantním módem.

Dále bylo provedeno měření skutečného zpoždění signálu v rámci Dante sítě.

Toto měření bylo prováděno i v části s velkým zatížením sítě. Údaje měření se ale při různých zatíženích sítě nijak nelišily. Změřené hodnoty jsou zobrazeny v tabulce 5.3. Hodnoty zpoždění se pohybovaly při přenosu mezi dvěma stageboxy Rio 1608-D mezi 1,9 ms až 6,65 ms. Nepřesnost měření byla způsobena využitím pro vstup i výstup do a z Dante sítě analogového rozhraní na stageboxu Yamaha Rio 1608-D. Měřený signál se tedy musel nejprve převést z analogové podoby do formy digitální a zpátky. Předpokladem při tomto měření bylo, že samotný AD a DA převod způsobuje v signálu konstantní zpoždění, a lze jej tedy od měřených hodnot odečíst. V rámci měření tak bylo zjišťováno zpoždění mezi signálem přímým a signálem, který byl převeden přes síť Dante. Dle výsledků naměřené hodnoty velmi přesně odpovídají úrovni nastavené v Dante Controlleru. Drobná odchylka u jedné hodnoty oproti předpokládanému výsledku může být způsobena nepřesností zařízení používaného pro měření latence. Při nastavené vzorkovací frekvenci 48 kHz je doba mezi jednotlivými vzorky přibližně 0,02 ms – odpovídá i rozdílu při měření.

V rámci měření latence při přenosu přes síť Dante bylo určeno zpoždění velmi stabilní a neměnilo se ani při delším provozu a velkém zatížení sítě. Síť tak i v extrémních podmínkách, které by pravděpodobně v reálném provozu nikdy nenastaly, funguje velmi spolehlivě. Celkově mě osobně překvapilo, jak stabilně a dobře síť funguje. Dokázala přenášet zvuk bez zásadních problémů i při velkém zatížení a při pokusech se mi nepodařilo dostat při správně nakonfigurovaných přepínačích do situace, že by docházelo k zásadním výpadkům, kolísání latence či jiným problémům při přenosu.

Je ovšem potřeba poznamenat, že v případě špatně nebo zcela vůbec nakonfigurovaných switchů může docházet k zahazování synchronizačních paketů, a to může v síti způsobit velké problémy včetně zkresleného či vůbec žádného přenosu zvuku.

Kromě chování přenosu Dante v rámci umělé sítě bylo součástí práce i navržení reálné sítě pro možnost skutečného využití v praxi. V rámci práce bylo uvedeno několik modelových příkladů, ve kterých je možné využít síť Dante pro přenos audiosignálu. Na závěr pak popisují řešení zapojení a realizace sítě pro postprodukční a nahrávací režii v jednom z brněnských divadel.

Dante síť je dnes poměrně běžně využívána především jako technologie v profesionálních instalacích a ve firmách zajišťujících ozvučení koncertů a dalších kulturních akcí. Přesto je Dante v současnosti využíváno primárně pro profesionální užití, a to pro přenos mezi mixážními konzolami, stageboxy a dalšími zařízeními zvukových technologií.

Velkou výhodou této sítě ale může být i její využití v rozsáhlých instalacích s menším počtem zařízení nebo pro přenos signálu přímo mezi koncovými zařízeními. Takovým příkladem může být např. přímé zapojení mikrofonu a reproduktoru do Dante sítě bez potřeby využití jiných technologií pro přenos mezi různými zařízeními.

Těmi by mohl být například analogový signál, AES/EBU, MADI a podobně.

Uvádím proto několik příkladů, ve kterých se dnes Dante využívá – mezi ty se může počítat malý koncert, kde jsou v rámci sítě propojena pouze dvě zařízení. Zde může být využito nízké latence a jednoduchosti. V případě většího koncertu s dvěma mixážními pulty je již síť většího rozsahu. V případě, že jednotlivé kabelové trasy jsou v délkách do 100 metrů, může být síť vedena pouze pomocí kroucených kabelů. V případě rozsáhlejší instalace, např. v divadle, může být využito vedení tras pomocí optických kabelů. Zde již jsou do sítě Dante zakomponovány i menší zařízení jako Neutrik NA2-IO-DPRO, které umožňují připojit jen dva mikrofonní vstupy. Ty je tak možné prakticky využívat v instalacích, kde je třeba připojit zařízení v různých prostorách bez potřeby vést např. analogový signál z mikrofonů na dlouhou vzdálenost nebo přivádět externí zdroj díky napájení pomocí PoE.

Tyto možnosti jsou nejvýraznější v posledních dvou příkladech, kde uvádím možnosti realizovat pomocí Dante plošné ozvučení a konferenční nebo přednáškové místnosti. Výhoda napájení zařízení pomocí PoE totiž přináší možnost pro celou škálu zařízení pro přenos zvuku. Příkladem může být například plošné ozvučení, kdy v rámci instalace není třeba uvažovat jednotlivé okruhy, do kterých budou zařízení připojena. Navíc, díky napájení pomocí PoE, může být například ke každému reproduktoru přiveden jen jeden kroucený kabel, přes který je možné poté zařízení napájet, ovládat a přijímat přes něj i zvuk. Zvuk pak může být v rámci sítě směrován do libovolných zařízení nezávisle na topologii sítě. Díky tomu může být zvuk pouštěn jen z konkrétního reproduktoru nebo ze všech současně.

V rámci dalšího užití je výhodou jednoduché připojení počítače do sítě pomocí Dante Virtual Soundcard nebo převodníku AVIO USB. Díky tomu je možné jednoduše se připojit do sítě a z počítače přehrávat nebo do něj nahrávat zvuk jednoduše a v digitální kvalitě. Díky tomu je například možné v rámci jedné sítě propojit několik místností i budov například pro potřeby konferencí či vzdělávání. Přednášející tak může mluvit v jedné místnosti, přičemž zvuk je zaznamenáván pomocí instalovaných mikrofonů připojených do Dante sítě. Tento zvuk je pak souběžně přenášen pomocí Dante do jiné místnosti nebo budovy, zaznamenáván nebo streamován pro vzdáleně připojené účastníky.

V poslední části pak již popisují samotnou realizaci. V rámci rekonstrukce postprodukční a nahrávací režie v Mahenově divadle se jednalo o především o výběr zařízení, která budou v rámci sítě využita. Návrh zapojení, jeho realizace a poté nastavení zařízení a konfigurace sítě Dante včetně uvedení do provozu. Síť je z velké části realizována pomocí kroucených kabelů Cat6. Většina jednotlivých propojů byla realizována hotovými patch kabely, protože síť je realizována z velké části na poměrně malé ploše. Jedinou výjimkou je propojení s divadelním sálem, které je realizováno pomocí současného optického kabelu. Celá síť je realizována pomocí switchů

Cisco SG300-10P. V současnosti je síť provozována s nastavenou latencí 1 ms. Průměrné zpoždění při přenosu dat se pohybuje v síti mezi zařízeními okolo 300  $\mu$ s a bylo by tak možné síť provozovat i s nižší nastavenou latencí, tedy 500  $\mu$ s. Z důvodu, že některá zařízení, např. Focusrite RedNet AM2 umožňují pracovat s nejnižší možnou latencí 1 ms, a že samotná latence Dante má menší vliv na zpoždění, než je doba, po kterou trvá AD a DA převod nebo samotné zpracování signálu pro monitoring, tak by se v praktickém provozu snížení latence příliš neprojevalo.

Celkovou výhodou pro využití Dante sítě v režii je možnost velké variability provozu bez nutnosti fyzického přepojování zařízení obsluhou. To umožňuje v případě potřeby vracet se k dřívějším projektům nebo střídat využití prostoru pro různé účely jednoduše měnit nastavení dle aktuálních potřeb. Dalším pozitivem je i možnost bezproblémového rozšiřování sítě se současným vybavením. Největším omezením by v tomto případě byla zvuková karta v pracovní stanici. Ta ale umožňuje přenášet celkem 128 vstupních a 128 výstupních kanálů. V současné konfiguraci je využito jen přibližně 40 vstupních a výstupních kanálů, a tak je prostor pro rozšiřování veliký.

# Literatura

- [1] BOSI, Marina a Richard E. GOLDBERG. *Introduction to Digital Audio Coding and Standards*. Ilustrované vydání. USA: Springer Science & Business Media, 2012. ISBN 9781461503279.
- [2] IFEACHOR, Emmanuel C. a Barrie W. JERVIS. *Digital Signal Processing: A Practical Approach*. 2, ilustrované vydání, dotisk. USA: Addison-Wesley, 1993. ISBN 9780201544138.
- [3] Better Sound for Commercial Installations: The Merits of Digital Sound. *Yamaha* [online]. USA: Yamaha Corporation of America and Yamaha Corporation, 2020 [cit. 2020-12-06]. Dostupné z: [https://usa.yamaha.com/products/contents/proaudio/docs/better\\_sound/part1\\_06.html](https://usa.yamaha.com/products/contents/proaudio/docs/better_sound/part1_06.html)
- [4] VRBKA, Jan. *DIGITÁLNÍ REVOLUCE JEVIŠTNÍHO ZVUKU*. Brno, 2011. Bakalářská. JANÁČKOVA AKADEMIE MÚZICKÝCH UMĚNÍ V BRNĚ. Vedoucí práce Mgr. Radomír Kos.
- [5] Belden AES/EBU Digital Audio Cable. *AWC* [online]. USA: ALLIED WIRE & CABLE, 2020 [cit. 2020-12-06]. Dostupné z: <https://www.awcwire.com/mfg/belden/category/belden-aes-ebu-digital-audio-cables>
- [6] YONGE, Mark. MADI: 20 years old and feeling fit. In: *Audio Engineering Society* [online]. USA: Audio Engineering Society, 2011 [cit. 2020-12-06]. Dostupné z: [http://www.aes-media.org/sections/uk/Conf2011/Presentation\\_PDFs/11%20-%20MADI%20-%2020%20years%20old%20and%20feeling%20fit.pdf](http://www.aes-media.org/sections/uk/Conf2011/Presentation_PDFs/11%20-%20MADI%20-%2020%20years%20old%20and%20feeling%20fit.pdf)
- [7] AES Recommended Practice for Digital Audio Engineering - Serial Multichannel Audio Digital Interface (MADI). In: *Urban Communications* [online]. USA: Audio Engineering Society, 1991 [cit. 2020-12-07]. Dostupné z: <http://www.urbancom.us/aes10-1991.pdf>
- [8] WALKER, Al. AES50 — Applications in Live Concert Sound. In: *Music Group* [online]. UK: MUSIC Group Research UK, 2011 [cit. 2020-11-06]. Dostupné z: [http://www.snotechnique.com/image/data/Produit/Sonorisation/Mixage/Pro2/Norme\\_AES50.pdf](http://www.snotechnique.com/image/data/Produit/Sonorisation/Mixage/Pro2/Norme_AES50.pdf)
- [9] Ether Sound setup guide. In: *Yamaha Commercial Audio* [online]. USA: Yamaha Commercial Audio, 2013 [cit. 2020-12-08]. Dostupné z:

[https://uk.yamaha.com/files/download/other\\_assets/3/322423/ethersound\\_setup\\_guide\\_en\\_v1.2.pdf](https://uk.yamaha.com/files/download/other_assets/3/322423/ethersound_setup_guide_en_v1.2.pdf)

- [10] AES WHITE PAPER: Best Practices in Network Audio. In: *Audio Engineering Society* [online]. USA: Audio Engineering Society, 2009 [cit. 2020-12-08]. Dostupné z: <https://www.aes.org/technical/documents/AESTD1003V1.pdf>
- [11] Dante Advanced Configuration. In: *Audinate.com* [online]. Austrálie: Audinate, 2015 [cit. 2020-11-13]. Dostupné z: <https://my.audinate.com/sites/default/files/PDF/advanced-dante-networking-avnw-2015-audinate.pdf>
- [12] HYNČICA, Ondřej a František ZEŽULKA. Synchronizace v distribuovaných řídicích systémech: Precision Time Protocol (PTP) podle IEEE 1588. *Časopis Automa* [online]. Brno: Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií VUT v Brně [cit. 2020-10-25]. Dostupné z: [https://automa.cz/cz/casopis-clanky/synchronizace-v-distribuovanych-ridicich-systemech-precision-time-protocol-ptp-podle-ieee-1588-2010\\_02\\_40557\\_5798/](https://automa.cz/cz/casopis-clanky/synchronizace-v-distribuovanych-ridicich-systemech-precision-time-protocol-ptp-podle-ieee-1588-2010_02_40557_5798/)
- [13] Precision Time Protocol Software Configuration Guide for IE 2000U and Connected Grid Switches. *Cisco Systems, Inc.* [online]. USA: Cisco Systems, 2019 [cit. 2020-12-06]. Dostupné z: [https://www.cisco.com/c/en/us/td/docs/switches/connectedgrid/cg-switch-sw-master/software/configuration/guide/ptp/b\\_ptp\\_ie2ku.html](https://www.cisco.com/c/en/us/td/docs/switches/connectedgrid/cg-switch-sw-master/software/configuration/guide/ptp/b_ptp_ie2ku.html)
- [14] Green Ethernet. *Internet Archive* [online]. Green Ethernet, 2009 [cit. 2020-12-09]. Dostupné z: <https://web.archive.org/web/20090618035001/http://greenethernet.com/>
- [15] QoS v datových sítích, IntServ a DiffServ. In: *Západočeská univerzita v Plzni* [online]. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni [cit. 2020-12-09]. Dostupné z: [http://www.kiv.zcu.cz/ledvina/vyuka/PSI/lekcce/QOS\\_text.pdf](http://www.kiv.zcu.cz/ledvina/vyuka/PSI/lekcce/QOS_text.pdf) *Cisco* [online]. USA: Cisco, 2019 [cit. 2020-11-14]. Dostupné z: [https://www.cisco.com/c/en/us/td/docs/switches/connectedgrid/cg-switch-sw-master/software/configuration/guide/ptp/b\\_ptp\\_ie2ku.html](https://www.cisco.com/c/en/us/td/docs/switches/connectedgrid/cg-switch-sw-master/software/configuration/guide/ptp/b_ptp_ie2ku.html)
- [16] Yamaha adopts Audinate-s Dante AV technology. In: *Yamaha Commercial Audio* [online]. Shizuoka, Japan: Yamaha Commercial Audio, 2019 [cit. 2020-12-13]. Dostupné z: [https://usa.yamaha.com/news\\_events/2019/0610\\_50\\_dante\\_av.html](https://usa.yamaha.com/news_events/2019/0610_50_dante_av.html)

- [17] Guide to Solutions for Manufacturers. *Audinate* [online]. Austrálie: Audinate [cit. 2020-12-06]. Dostupné z: <https://www.audinate.com/products/solutions-for-manufacturers-guide>
- [18] Software. *Audinate.com* [online]. Austrálie: Audinate [cit. 2020-12-06]. Dostupné z: <https://www.audinate.com/products/software>
- [19] EPiC Series in Computing: A Simulation Model of IEEE 802.1AS gPTP for Clock Synchronization in OMNeT++. *EasyChair* [online]. Německo: University of Rostock, Institute of Applied Microelectronics and Computer Engineering, Germany, 2018 [cit. 2020-12-07]. Dostupné z: <https://easychair.org/publications/open/Q4kL>
- [20] Audio Video Bridging (AVB). In: *Software Driven Cloud Networking - Arista* [online]. USA: Arista Networks, 2016 [cit. 2020-12-06]. Dostupné z: [https://www.arista.com/assets/data/pdf/Whitepapers/Arista\\_Audio\\_Video\\_Bridging\\_WhitePaper.pdf](https://www.arista.com/assets/data/pdf/Whitepapers/Arista_Audio_Video_Bridging_WhitePaper.pdf)
- [21] Audio Video Bridging. In: *Cisco Systems, Inc.* [online]. U.S.: Cisco Systems, 2020, s. 2 [cit. 2020-11-28]. Dostupné z: <https://www.cisco.com/c/dam/en/us/products/collateral/switches/q-and-a-c67-737896.pdf>
- [22] GigaCore switche. *Pro Music* [online]. ČR: PRO MUSIC, 2020 [cit. 2020-11-28]. Dostupné z: <https://www.promusic.cz/znacky/gigacore-switche>
- [23] Enterprise-Class AVB Switching for Pro AV. In: *Extreme Networks* [online]. USA: Extreme Networks, 2020 [cit. 2020-11-28]. Dostupné z: [https://kapost-files-prod.s3.amazonaws.com/kapost/55ba7c9e07003d9aab000394/studio/content/58229f5183e0dca1af001e27/revisions/1597263015-36f01810-7620-4e40-b669-e959848a49ba/1894-AVB-SB\\_v6.pdf](https://kapost-files-prod.s3.amazonaws.com/kapost/55ba7c9e07003d9aab000394/studio/content/58229f5183e0dca1af001e27/revisions/1597263015-36f01810-7620-4e40-b669-e959848a49ba/1894-AVB-SB_v6.pdf)
- [24] Tesira Expanders. *BiAmp* [online]. USA: Biamp Systems, 2020 [cit. 2020-11-28]. Dostupné z: <https://www.biamp.com/products/tesira-expanders>
- [25] LS10 AVB Switch. In: *L-Acoustics* [online]. Francie: L-Acoustics, 2019 [cit. 2020-11-28]. Dostupné z: [https://www.l-acoustics.com/wp-content/uploads/2020/01/ls10\\_sp\\_en\\_1-3.pdf](https://www.l-acoustics.com/wp-content/uploads/2020/01/ls10_sp_en_1-3.pdf)
- [26] MOTU AVB Switch. *MOTU* [online]. USA: MOTU, 2020 [cit. 2020-11-28]. Dostupné z: <https://motu.com/products/avb/avb-switch/specs.html>
- [27] SW5E | PreSonus. *PreSonus* [online]. USA: PreSonus, 2020 [cit. 2020-11-28]. Dostupné z: <https://www.presonus.com/products/SW5E>

- [28] List of AVB-capable Ethernet switches. *BiAmp* [online]. USA: BiAmp, 2020, 29.11.2020 [cit. 2020-11-28]. Dostupné z: [https://support.biamp.com/Tesira/AVB/List\\_of\\_AVB-capable\\_Ethernet\\_switches](https://support.biamp.com/Tesira/AVB/List_of_AVB-capable_Ethernet_switches)
- [29] Our Members. *Avnu Alliance* [online]. USA: Avnu Alliance, 2020 [cit. 2020-11-28]. Dostupné z: <https://avnu.org/our-members/>
- [30] PTPv2 Timing protocol in AV networks. *Luminex* [online]. Belgie: Luminex LCE, 2017 [cit. 2020-12-06]. Dostupné z: <https://www.luminex.be/improve-your-timekeeping-with-ptpv2/>
- [31] Technology. *ALC NetworX GmbH* [online]. Německo: ALC NetworX [cit. 2020-12-06]. Dostupné z: <https://www.ravenna-network.com/using-ravenna/technology/>
- [32] STURMEL, NICOLAS. AES67 Standard For Network Interoperability. *Sound & Communications: Commercial AV Technology and Application* [online]. Velká Británie: Sound & Communications, 2018 [cit. 2020-12-07]. Dostupné z: <https://www.soundandcommunications.com/aes67-standard-network-interoperability/>
- [33] AES67 Products by Category: June 2020. In: *AIMS: Alliance for IP Media* [online]. USA: AIMS Alliance, 2020 [cit. 2020-12-08]. Dostupné z: <https://bit.ly/2U65dJC>
- [34] SWP1. *Yamaha* [online]. [cit. 2021-4-28]. Dostupné z: [https://cz.yamaha.com/cs/products/proaudio/network\\_switches/swp1/index.html](https://cz.yamaha.com/cs/products/proaudio/network_switches/swp1/index.html)
- [35] LA4X AMPLIFIED CONTROLLER. *L-Acoustics* [online]. [cit. 2021-5-10]. Dostupné z: [https://www.l-acoustics.com/documentation/ELECTRONICS/LA4X/EN/System%20Spec%20Sheet/LA4X\\_SPS\\_EN\\_4.1.pdf](https://www.l-acoustics.com/documentation/ELECTRONICS/LA4X/EN/System%20Spec%20Sheet/LA4X_SPS_EN_4.1.pdf)
- [36] NXAMPMK2: Powered TDControllers. *Nexo* [online]. [cit. 2021-3-12]. Dostupné z: <https://nexo-sa.com/wp-content/uploads/NXAMP-MKII-Brochure-V6-5-1.pdf>
- [37] SD12: The go-to multi-application console. *DiGiCo* [online]. [cit. 2021-5-1]. Dostupné z: <https://digico.biz/wp-content/uploads/2020/03/DiGiCo-SD12-Data-Sheet.pdf>

- [38] 21 DIGITAL MIXING CONSOLE. *DiGiCo* [online]. [cit. 2021-5-2]. Dostupné z: <https://digico.biz/consoles/s21/>
- [39] DMI-DANTE. *DiGiCo* [online]. [cit. 2021-5-21]. Dostupné z: [https://digico.biz/dmi\\_cards/dmi-dante/](https://digico.biz/dmi_cards/dmi-dante/)
- [40] DQ-Rack. *DiGiCo* [online]. [cit. 2021-5-28]. Dostupné z: <https://digico.biz/racks/dq-rack/>
- [41] NXDT104 MK2. *Nexo* [online]. [cit. 2021-5-28]. Dostupné z: <https://www.nexo-sa.com/products/nxdt104/>
- [42] R Series (SLOT): I/O Rack. *Yamaha* [online]. [cit. 2021-5-28]. Dostupné z: <https://cz.yamaha.com/cs/products/proaudio/interfaces/rsio64-d/index.html>
- [43] MRX7-D. *Yamaha* [online]. [cit. 2021-5-28]. Dostupné z: <https://cz.yamaha.com/cs/products/proaudio/processors/mrx7-d/index.html>
- [44] XMV Series: Power Amplifiers. *Yamaha* [online]. [cit. 2021-5-23]. Dostupné z: [https://cz.yamaha.com/cs/products/proaudio/power\\_amps/xmv/index.html](https://cz.yamaha.com/cs/products/proaudio/power_amps/xmv/index.html)
- [45] NA2-IO-DPRO. *Neutrik* [online]. [cit. 2021-3-26]. Dostupné z: <https://www.neutrik.com/en/na2-io-dpro>
- [46] EM 9046: Wireless Microphone Sound System. *Sennheiser* [online]. [cit. 2021-3-26]. Dostupné z: <https://en-de.sennheiser.com/wireless-microphone-sound-system-receiver-em-9046>
- [47] R Series (AD/DA): 2nd-generation. *Yamaha* [online]. [cit. 2021-5-28]. Dostupné z: [https://usa.yamaha.com/products/proaudio/interfaces/r\\_series\\_adda\\_2/index.html](https://usa.yamaha.com/products/proaudio/interfaces/r_series_adda_2/index.html)
- [48] D800 & D800-Dante: A-Net Distributors. *Aviom* [online]. [cit. 2021-5-23]. Dostupné z: <https://www.aviom.com/AviomProducts/D800-and-D800-Dante.php>
- [49] RIVAGE PM Series. *Yamaha* [online]. [cit. 2021-3-11]. Dostupné z: [https://usa.yamaha.com/products/proaudio/mixers/rivage\\_pm/index.html](https://usa.yamaha.com/products/proaudio/mixers/rivage_pm/index.html)
- [50] Dante-enabled Products. *Audinate* [online]. [cit. 2021-5-26]. Dostupné z: <https://www.audinate.com/products/dante-enabled>
- [51] INTELLIMIX P300. *Shure* [online]. [cit. 2021-5-28]. Dostupné z: <https://www.shure.com/en-MEA/products/mixers/p300>

- [52] Dante AVIO Adapters. *Audinate* [online]. [cit. 2021-3-13]. Dostupné z: <https://www.audinate.com/products/devices/dante-avio>
- [53] MICROFLEX MXN5W-C: Networked Loudspeaker. *Shure* [online]. [cit. 2021-5-12]. Dostupné z: <https://www.shure.com/en-MEA/products/loudspeakers/mxn5>
- [54] Smart IP. *Genelec* [online]. [cit. 2021-2-12]. Dostupné z: <https://www.genelec.com/smart-ip>
- [55] RSX SERIES. *EAW* [online]. [cit. 2021-5-16]. Dostupné z: <https://eaw.com/products-series/radius-series/>
- [56] DANTE ACCELERATOR: AIC128-D. *Yamaha* [online]. 2013 [cit. 2021-1-29]. Dostupné z: [https://usa.yamaha.com/files/download/other\\_assets/6/328936/aic128-d\\_en\\_gs\\_b0.pdf](https://usa.yamaha.com/files/download/other_assets/6/328936/aic128-d_en_gs_b0.pdf)
- [57] MMP1. *Yamaha* [online]. [cit. 2021-3-29]. Dostupné z: <https://uk.yamaha.com/en/products/proaudio/processors/mmp1/index.html>
- [58] RedNet AM2. *Focusrite* [online]. [cit. 2021-4-18]. Dostupné z: <https://pro.focusrite.com/category/audiooverip/item/rednet-am2>
- [59] NUAGE I/O: Operation Manual. *Yamaha* [online]. [cit. 2021-5-28]. Dostupné z: [https://usa.yamaha.com/files/download/other\\_assets/4/328934/nio500\\_en\\_om\\_d0.pdf](https://usa.yamaha.com/files/download/other_assets/4/328934/nio500_en_om_d0.pdf)
- [60] Products. *Audinate.com* [online]. Austrálie: Audinate [cit. 2020-12-10]. Dostupné z: <https://www.audinate.com/products/>

## Seznam symbolů, veličin a zkratek

<b>AES</b>	Audio Engineering Society
<b>AES/EBU</b>	Audio Engineering Society a European Broadcasting Union standard pro přenos digitálního zvuku, označován také AES3
<b>AVB</b>	Audio Video Bridging
<b>DAW</b>	Digital Audio Workstation
<b>DHCP</b>	Dynamic Host Configuration Protocol
<b>diffserv</b>	Differentiated services
<b>DSP</b>	číslicové zpracování signálů – Digital Signal Processing
<b>EEE</b>	Energy-Efficient Ethernet
<b>FOH</b>	Front of house
<b>Gbit/s</b>	1 000 000 000 bitů za sekundu
<b>Hz</b>	Hertz – jednotka kmitočtu, počet period za sekundu
<b>I/O</b>	Input/output
<b>Mbit/s</b>	1 000 000 bitů za sekundu
<b>MSRP</b>	Multiple Stream Reservation Protocol
<b>PA</b>	Public address system – označení pro zvukový systém určený pro diváky
<b>PoE</b>	Power over Ethernet – druh napájení, který využívá datový síťový kabel a není tak nutno k tomu přístroji přivést napájecí napětí dalším samostatným přívodem
<b>PTP</b>	Precision Time Protocol
<b>QoS</b>	Quality of Service
<b>RTP</b>	Real Time Transport Protocol
<b>RTSP</b>	Real Time Streaming Protocol
<b>SDP</b>	Session Description Protocol

<b>STP</b>	stíněná kroucená dvojlinka
$f_{vz}$	vzorkovací kmitočet
<b>UDP</b>	User Datagram Protocol – protokol transportní vrstvy, který neposkytuje záruku doručení
<b>UTP</b>	nestíněná kroucená dvojlinka