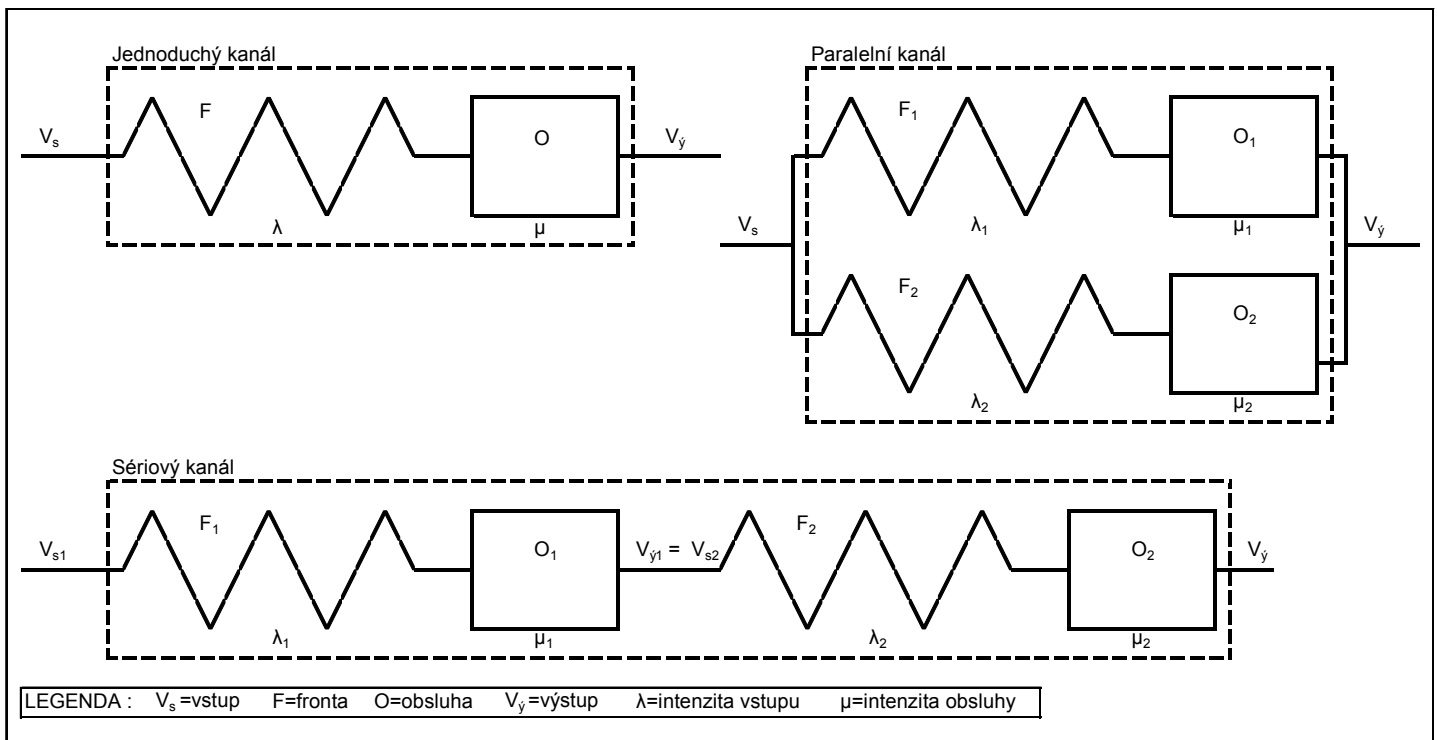


Posouzení struktury strojní sestavy pomocí teorie hromadných obsluh

1 Základní údaje

Ve stavební praxi se velmi často vyskytuje požadavek rychle a objektivně posoudit strukturu strojní soustavy. U některých mechanizovaných stavebních procesů obsahují strojní sestavy velmi rozsáhlé dopravní systémy. Ty zajišťují transport zpracovávaného materiálu nebo polotovarů od místa nakládky k místu vyložení. Při jejich předimenzování bude docházet k hromadění prvků, zajišťujících dopravu materiálu před hlavním strojem, a tím vzniknou zbytečné časové ztráty během jejich práce. Navrhne-li dopravní systém příliš malý, dojde sice k jeho dobrému časovému využití, ale prostože budou naopak vznikat u hlavního stroje strojní sestavy.

Objektivní posouzení těchto problémů umožňuje teorie hromadných obsluh. Pomocí této teorie lze posuzovat chování jednoduchého, případně paralelního kanálu hromadné obsluhy (viz. Obrázek 1). Není však možné pomocí ní zkoumat pohyb obsluhovaných prvků mimo systém obsluhy a systémy složitější (sériové, smíšené), které se v praxi vyskytují. Pro tyto případy se používají metody simulace chování mechanizovaných výrobních procesů.



Obrázek 1

Při studiu systémů hromadné obsluhy sledujeme vstup obsluhovaných prvků do systému obsluhy, frontu před kanálem obsluhy, kanál obsluhy a výstup ze systému obsluhy (viz. **Obrázek 1**).

Zdroj obsluhovaných prvků je buď neomezený, nebo je počet prvků, který má být obsloužen,

omezen. Při vstupu obsluhovaných prvků do systému obsluhy sledujeme tzv. intenzitu vstupu.

$$\lambda = \frac{1}{TV}$$

Vzorec 1

kde **TV** je průměrná délka intervalů mezi vstupy obsluhovaných prvků do systému obsluhy.

Časové intervaly mezi vstupy mají v teorii hromadných obsluh náhodnou velikost a rozdělení pravděpodobnosti jejich výskytu popisujeme obvykle Poissonovým experimentálním rozdělením. To udává, jaká je pravděpodobnost, že v časovém intervalu t vstoupí do systému obsluhy n prvků.

$$P_n(t) = \frac{(\lambda * t)^n}{n!} * e^{-\lambda t}$$

Vzorec 2

Někdy se doporučuje použít i jiných typů rozdělení pravděpodobnosti - např. Erlangova, a to zejména tehdy, má-li obsluha výrazně cyklický charakter (**viz. Vzorec 4**). Použijeme-li však exponenciálního Poissonova rozdělení, podstatně se zjednoduší výpočty.

Vlastní obsluha probíhá v kanálu obsluhy a může být jedno či vícekanálová. Obsluhu charakterizujeme intenzitou obsluhy

$$\mu = \frac{1}{TN}$$

Vzorec 3

kde **TN** je průměrná délka obsluhy.

Délka obsluhy má opět náhodnou velikost a můžeme ji popsat vhodným typem rozdělení pravděpodobnosti. Pokud jsme ale pro vstupní proud požadavků použili exponenciálního rozdělení, lze dokázat, že i výskyt různých délek obsluhy se bude řídit exponenciálním rozdělením. To vyjadřuje pravděpodobnost, že délka obsluhy **T** bude menší než t :

$$P\{T \leq t\} = 1 - e^{-\mu t}$$

Vzorec 4

Jako celek lze systém hromadné obsluhy charakterizovat intenzitou provozu systému

$$\rho = \frac{\lambda}{\mu} = \frac{TN}{TV}$$

Vzorec 5

Na výstupu nepřipouštíme hromadění jednotek, protože by to mohlo způsobit zastavení provozu systému hromadné obsluhy. Někdy je však výstup z kanálu obsluhy vstupem do další fronty před kanál následující, pokud je obsluha vícekanalová a kanály jsou řazeny sériově (**viz. Obrázek 1**). U systémů tohoto druhu však teorii hromadných obsluh použít nemůžeme a musíme je zkoumat pomocí simulace. Ta je značně pracná a u rozsáhlejších systémů vyžaduje použití počítačů.

2 Strojní sestavy s omezeným počtem strojů zajišťujících dopravu materiálu

Velmi často nasazujeme za hlavní stroj strojní sestavy (může jím být třeba nakladač, betonárka apod.) omezený počet obsluhovaných - vedlejších - strojů PV (nákladní vozidla, domíchávače apod.). Při posuzování takovýchto systémů musíme vycházet ze vztahů platných pro exponenciální kanál obsluhy s omezeným počtem obsluhovaných prvků. Pravděpodobnost, že se v systému obsluhy nalézá n prvků, můžeme vyjádřit jako:

$$p_n = \frac{PV!}{(PV - n)!} * \rho^n * p_0 \quad (1 \leq n \leq PV)$$

Vzorec 6

kde p_0 je pravděpodobnost, že systém obsluhy je volný.

Hodnotu p_0 můžeme určit úpravou předchozí rovnice do tvaru

$$\frac{p_n}{p_0} = \frac{PV!}{(PV - n)!} * \rho^n \quad \text{a z podmínky} \quad \sum_{n=0}^{PV} p_n = 1$$

Pro praktické posouzení systému hromadné obsluhy pomocí těchto výrazů můžeme použít postup (**viz. Vzorec 8**), který je vhodný i pro "ruční" výpočet a při kterém se hodnota výrazu

$$S(n, \rho) = \sum_{n=0}^{PV} \frac{PV!}{(PV - n)!} * \rho^n$$

Vzorec 7

postupně zjišťuje určováním hodnoty výrazu :

$$S(n, \rho) = 1 + n * \rho * S(n - 1, \rho)$$

Vzorec 8

Jak lze zjistit dosazením pro $n=0$ je hodnota $S(n, \rho) = 1$

Vlastní výpočet provádíme tak, že postupně zvyšujeme počet obsluhovaných prvků n o 1 a určíme všechny charakteristiky systému (v textu očíslované 1 – 13):

č.1 - Průměrný stupeň využití obsluhovaných prvků v kanálu obsluhy :

$$V = \frac{S(n-1, \rho)}{S(n, \rho)}$$

Charakteristika 1 Vzorec 9

č.2 – Průměrný počet prvků mimo systém obsluhy je pak analogicky:

$$L = n * V$$

Charakteristika 2 Vzorec 10

č.3 - Průměrný počet prvků vyžadujících obsluhu:

$$M = n(1 - V)$$

Charakteristika 3 Vzorec 11

č.4 - Průměrný stupeň využití kanálu obsluhy:

$$I = \rho * L$$

Charakteristika 4 Vzorec 12

č.5 - Průměrný počet prvků ve frontě:

$$N = M - I$$

Charakteristika 5 Vzorec 13

č.6 - Trvání fronty, tj. čas, který stráví jednotka čekáním na obsluhu:

$$TF = \frac{TJ + TY + TM}{L} * N$$

Charakteristika 6 Vzorec 14

č.7 - Trvání pracovního cyklu obsluhovaných prvků:

Výpočet trvání jízdy

$$TJ = \frac{2 * DV}{PR}$$

kde **DV** je dopravní vzdálenost

PR je průměrná rychlost

Výpočet trvání nakládání

$$TN = \frac{O}{P}$$

kde **O** je objem dopravované zeminy
P je výkon rypadla

Z uvedeného plyne :

$$TC = TJ + TY + TM + TF + TN$$

Charakteristika 7 Vzorec 15

kde **TJ** je trvání jízdy,
TY je trvání vykládky,
TM je trvání manévrování,
TF je trvání fronty,
TN je trvání nakládky

Zvyšováním počtu obsluhovaných prvků se budou zvyšovat ztráty čekáním ve frontě a bude se zkracovat celková dráha **D**, ujetá obsluhovaným prvkem za pracovní směnu. Pro posouzení systému nás zajímá zejména dráha ujetá s nákladem - většinou předpokládáme, že je to **D/2**. Další charakteristikou je tedy:

č.8 - Délka trasy, ujetá obsluhovaným prvkem s nákladem:

$$\frac{D}{2} = DV * \frac{TS}{TC}$$

Charakteristika 8 Vzorec 16

kde **DV** je vzdálenost od místa nakládky k místu vykládky,
TS je trvání pracovní směny,
TC je trvání pracovního cyklu obsluhovaného prvku.

Při návrhu struktury strojní sestavy musíme vycházet zejména z požadavků na její výkonnost. Ta vyplývá z požadovaného objemu práce a délky času na její provedení. Vztah mezi těmito veličinami udává charakteristika:

č.9 - Trvání práce požadovaného objemu, je-li počet obsluhovaných prvků

$$T = \frac{Q * TC}{O * n}$$

Charakteristika 9 Vzorec 17

kde **G** je požadovaný objem práce.

Úpravou této rovnice lze získat další charakteristiku:

č.10 - Objem práce provedený v požadovaném čase, je-li počet obsluhovaných prvků :

$$Q = \frac{O * T}{TC} * n$$

Charakteristika 10 Vzorec 18

kde **T** je požadovaná délka trvání práce,
TC je trvání pracovního cyklu obsluhovaných prvků,
O je velikost dávky materiálu dopravovaného obsluhovaným prvkem,
n je počet obsluhovaných prvků.

Pomocí charakteristik č.9 a č.10 lze zjistit, jaký počet obsluhovaných prvků nám, za předpokladu **Q = konstanta**, splní požadovaný čas trvání práce anebo, je-li délka provádění práce neměnná (**T = konstanta**), jak se nám při zvyšování počtu obsluhovaných prvků bude zvyšovat objem zpracovaného a přepraveného materiálu.

3 Optimalizace struktury navrhovaného systému hromadné obsluhy z hlediska nákladů na jednotku zpracovaného a přepraveného materiálu

Volba výkonnosti obslužného zařízení a množství obsluhovaných prvků, která by vycházela pouze z daného objemu přepravovaného a zpracovaného materiálu **Q** a celkové délky prováděných prací **T**, nebere ohled na oblast provozních nákladů. Ta je však pro stavbu velice důležitá, neboť musí za stroje platit nájemné. Celkové náklady na provoz strojní sestavy, které musí stavba hradit, jsou:

$$K = KH * T + KV * T * n$$

Vzorec 19

kde **KH** jsou náklady na hlavní stroj za jednotku času,
T je požadované trvání práce,
KV jsou náklady na obsluhovaný prvek za jednotku času,
n je počet obsluhovaných jednotek.

Při porovnání různých struktur strojních sestav je však vhodnější zjistit náklady na jednotkové množství zpracovaného a dopraveného materiálu. Po vydělení předchozí rovnice **Q** zjistíme další významnou charakteristiku:

č. 11 - Náklady na zpracování a přepravu jednotkového množství materiálu

$$KJ = \frac{K}{Q} = KH * \frac{T}{Q} + KV * \frac{T}{Q} * n$$

Charakteristika 11 Vzorec 20

Dosadíme-li ještě do této rovnice za **T** charakteristiku č.9, dostaneme konečný tvar

$$KJ = KH * \frac{TC}{O * n} + KV * \frac{TC}{O * n} * n = KH * \frac{TC}{O * n} + KV * \frac{TC}{O}$$

Náklady na hlavní stroj jsou většinou udávány v závislosti na době provozu. U prvků zajišťujících dopravu je však nutno často vycházet z délky trvání ložných operací a z délky trasy ujeté s nákladem. Abychom tedy mohli vypočítat hodnotu charakteristiky č. 11, musíme nejprve určit hodnotu pomocné charakteristiky:

č. 12 - Náklady na provoz obsluhovaného prvku za jednotku času

$$KV = \left[SJU * \frac{D}{2} + SZS * \frac{TS}{TC} * (TF + TN) + PJM * 2 * \frac{D}{2} + PO * \frac{TS}{TC} \right] * TS$$

Charakteristika 12 Vzorec 22

Kde **SJU** je sazba za jízdu upravená (s nákladem),
D/2 je délka trasy ujetá s nákladem během směny,
TS/TC je počet přepravních obrátek za směnu,
SZS je sazba za stání,
(TF + TN) je doba setrvání obsluhovaného prvku v kanálu obsluhy, (někdy se započítává (TV + TM))
PJM je příplatek: za jízdu v městě,
PO je příplatek za jednu obrátku.

Sazby jsou udány v tarifu a jeho doplňcích.

Výčet charakteristik uzavírá poslední, která určuje velikost dopravního systému:

č. 13 - Celkový počet obsluhovaných prvků PV (n)

Charakteristika 13

4 Návrh optimální struktury a provozního režimu strojní sestavy s ohledem na minimální spotřebu pohonných hmot.

Pod pojmem strojní sestava rozumíme systém hlavních a pomocných strojů určených zpravidla k provedení komplexního pracovního procesu.

Stroje ve strojní sestavě mají určitou hierarchii a jsou mezi sebou provázány výkonností, spolehlivostí a jinými vazbami, které zajišťují provedení požadovaného objemu prací ve stanoveném termínu, žádoucí kvalitě, bezpečně a při dodržení určených ekonomických ukazatelů.

Návrh struktur strojních sestav je tvůrčí inženýrská činnost založená nejen na praktických zkušenostech, ale i na hlubokých odborně teoretických znalostech o možnosti použití jednotlivých strojů pro různé druhy prací v závislosti na daných pracovních podmínkách. Často požadujeme tvorbu optimálních struktur strojních sestav. Tato činnost je úzce spjata s vytyčením hledisek optimalizace při jejich sestavování. Nejčastěji se snažíme o dosažení minimálních nákladů na jednotkové množství zpracovávaného materiálu. Při zdůraznění nutnosti dosahovat úspor pohonných hmot (PHM) se do popředí dostává požadavek minimalizace spotřeby PHM na jednotkové množství zpracovávaného materiálu.

4.1 Provozní režim strojí sestavy

Provozní režim strojí sestavy charakterizujeme jako souhrn provozních režimů jejich jednotlivých strojů. Spotřeba PHM strojí sestavy na jednotkové množství zpracovávaného materiálu (označovaná v dalším textu jako měrná spotřeba HJ) je součtem HJ u jednotlivých strojů strojí sestavy. Tato měrná spotřeba je pak závislá na provozním režimu stroje. Stroj během provozního režimu buď čeká, dopravuje materiál nebo jej zpracovává.

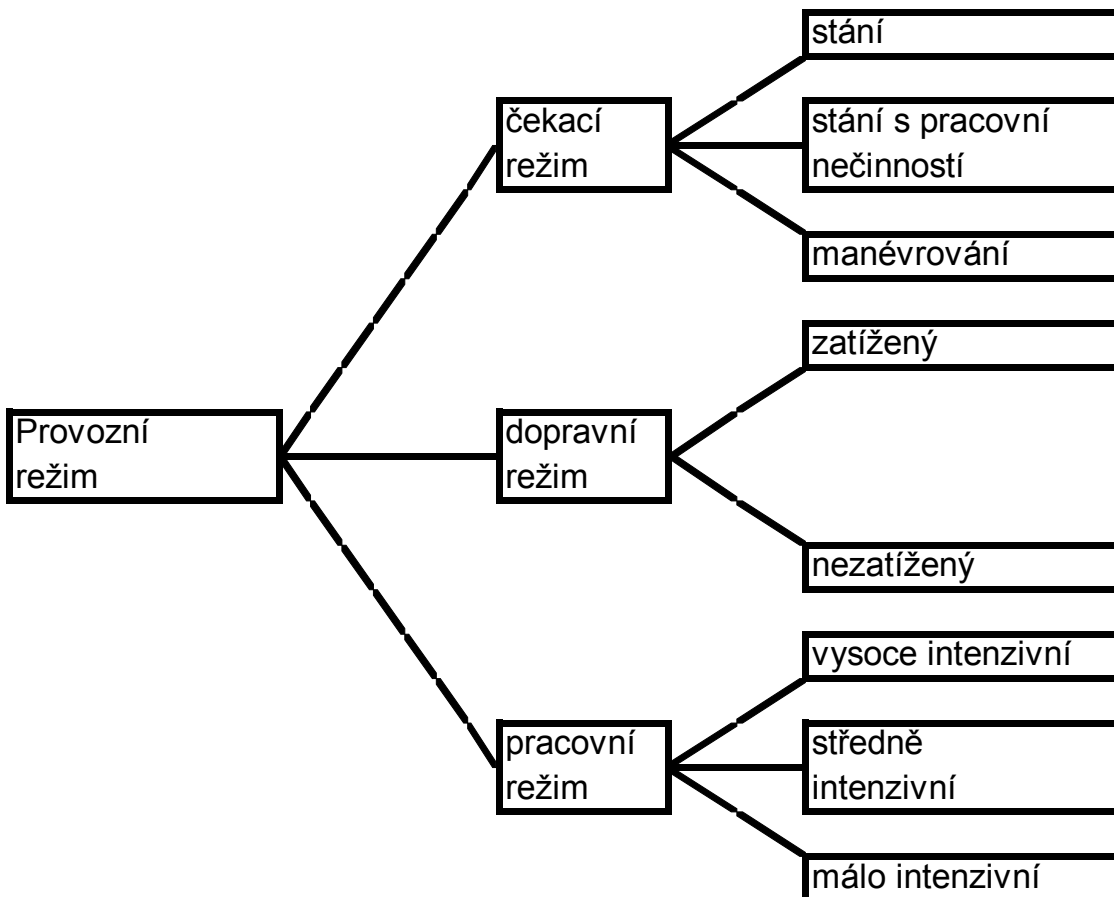
Čekací režim je charakterizován nízkou spotřebou PHM, závislou na seřizení otáček volnoběhu motoru stroje. Do čekacího režimu se ale zařazuje i manévrovací režim, při kterém se stroj buď velmi pomalu pohybuje (couvání, otáčení, popojíždění), nebo stojí a provádí činnost, při které se nezpracovává materiál (vykládání). Spotřeba PHM je pochopitelně zvýšena.

Dopravní režim může být buď zatížený (s nákladem) či bez zatížení. Při něm je spotřeba PHM výrazně ovlivněna stavem pojížděného povrchu terénu, rychlosti i způsobem jízdy a pochopitelně i velikostí zatížení stroje od nákladu.

Pracovní režim stroje je charakterizován podmínkami, ve kterých stroj pracuje. Tak např. firma Caterpillar charakterizuje pracovní režimy nakládačů následovně:

- těžký, vysoce intenzivní - plynulé nakládání bez přestávek;
- střední, průměrně intenzivní - nakládání s občasnými přestávkami v činnosti nebo práce na skládce s přepravou materiálu;
- lehký, málo intenzivní - práce přerušovaná dlouhými přestávkami.

Je zřejmé, že některé stroje mohou pracovat ve všech výše uvedených režimech (skrejpr, nakládač), jiné nemají např. pracovní režim (stroje pro dopravu). U jiných některé režimy probíhají současně (domíchávání betonové směsi v bubnu domíchávače za jízdy). Je proto nutné všechny tyto činnosti při zkoumání provozního režimu strojí sestavy rozlišit, abychom je mohli zahrnout do podrobného rozboru, ze kterého vyjdeme při návrhu její optimální struktury. Uvedme nyní přehledně podrobné rozčlenění provozního režimu stavebních strojů (**viz. Obrázek 2**):



Obrázek 2

4.2 Určení celkové a specifické spotřeby pohonných hmot strojní sestavy

Obecně lze konstatovat, že pro objektivní posouzení spotřeby PHM strojních sestav schází celá řada důležitých údajů.

V prospektové literatuře se běžně neudává spotřeba motorů stavebních strojů při volnoběhu. Obdobně chybí i údaje o spotřebě při manévrování. Pokud vycházíme z údajů uváděných u dopravních prostředků, lze odhadnout, že tato spotřeba bude 1/10 až 1/8 spotřeby při pracovním režimu nebo při jízdě se zatížením.

Poněkud lepší situace je při určování spotřeby PHM při dopravním režimu. Někteří výrobci udávají závislost spotřeby na rychlosti pohybu u zatíženého a někdy i nezatíženého stroje v litrech / 100 km. Většinou však tyto údaje platí pro průměrné provozní podmínky a bylo by je třeba doplnit údaji o spotřebě v závislosti na sklonu dopravní trasy nebo na druhu a kvalitě jejího povrchu.

Pro pracovní režim pouze výjimečně uvádějí někteří výrobci spotřebu v závislosti na provozních podmínkách. Většinou a ne vždy se uvádí pouze průměrná spotřeba v litrech / hod., což je z technologického hlediska údaj nedostatečný. Pro určení spotřeby PHM vybraných strojů používaných ve stavebnictví lze vycházet z normativů.

Výpočet spotřeby se provádí z výrazu:

$$SHP_N = SHP_T * k_o * k_t * k_e$$

Vzorec 23

kde SHP_N je normová spotřeba pohonných hmot při práci stroje
 SHP_T je tabulková spotřeba pohonných hmot při práci stroje
 k_o je koeficient vlivu provozních hodin motoru stroje
 k_t je koeficient vlivu klimatických podmínek
 k_e je koeficient plnění výkonové normy

Celková spotřeba PHM strojní sestavy se určí jako součet spotřeby PHM jednotlivých strojů při všech fázích provozního režimu. Lze postupovat tak, že provedeme rozbor činnosti strojní sestavy během jedné pracovní směny a za předpokladu, že provozní režim bude v následujících dnech zhruba obdobný, zjištěné hodnoty vynásobíme počtem směn S , nezbytných k provedení práce celkového objemu Q .

$$SHC = S \left(\sum_{n=1}^N TCR * SHC + \sum_{n=1}^N TPR * SHP + \sum_{n=1}^N TJR * SHJ \right)$$

Vzorec 24

kde S je počet pracovních směn
 N je celkový počet strojů strojní sestavy
 TCR trvání čekacího režimu
 SHC spotřeba PHM při čekání
 TPR trvání pracovního režimu
 SHP spotřeba PHM při práci
 TJR trvání dopravního režimu
 SHJ spotřeba PHM při dopravě

Měrná spotřeba PHM se pak určí :

$$HJ = \frac{SHC}{Q} = \frac{S}{Q} \sum_{n=1}^N (TCR * SHC + TPR * SHP + TJR * SHJ)$$

Vzorec 25

kde Q je celkový objem zpracovávaného materiálu

Obtíže při praktickém výpočtu vyplývají z toho, že musíme určit délku trvání a počet jednotlivých režimů u všech strojů strojní sestavy během směny a z těchto hodnot pak vypočítat spotřebu pohonných hmot strojní sestavy. Odvozené vztahy pro výpočet jsou značně rozsáhlé a výpočet podle nich zdlouhavý. Jako příklad si uveďme výraz pro zjištění měrné spotřeby **HJ** jednoduché strojní sestavy, která se skládá z hlavního stroje obsluhujícího dopravní systém složený z **PV** vedlejších strojů.

$$HJ = \frac{SHC}{Q} = \frac{S}{Q} \left[\{ TCR * SHC + TPR * SHP \} + \left\{ (TF + TN + TY + TM) * \frac{TS}{TC} * SHP + \frac{D}{2} * SHZ + \frac{D}{2} * SHN \right\} * PV \right]$$

Vzorec 26

kde TCH je trvání čekacího režimu hlavního stroje
 SHC je spotřeba PHM při čekání hlavního stroje
 TPH je trvání pracovního režimu hlavního stroje
 SHP je spotřeba PHM při práci hlavního stroje
 (TF+TN+TY+TM) je trvání čekacího režimu vedlejších strojů
 (fronta, nakládání, vykládání, manévrování)
 SHF je spotřeba PHM při čekání vedlejších strojů
 D/2 trasa ujetá vedlejšími stroji s nákladem (bez nákladu)
 SHZ je spotřeba PHM při jízdě vedlejších strojů zatížených
 SHN je spotřeba PHM při jízdě vedlejších strojů nezatížených
 PV počet vedlejších strojů zajišťujících dopravu materiálu

Trvání čekacího a pracovního režimu hlavního stroje lze vyjádřit takto :

$$TCH = TS * (1 - I)$$

Vzorec 27

$$TPH = TS * I$$

Vzorec 28

kde TS je délka směny
 I je stupeň využití hlavního stroje během směny

Po dosazení **Vzorce 27**, **Vzorce 28** do **Vzorce 26** dostáváme výsledný výraz pro měrnou spotřebu:

$$HJ = \frac{SHC}{Q} = \frac{S}{Q} \left[\{TS * (1 - I) * SHC + TS * I * SHP\} + \right. \\ \left. + \left\{ (TF + TN + TY + TM) * \frac{TS}{TC} * SHP + \frac{D}{2} * SHZ + \frac{D}{2} * SHN \right\} * PV \right]$$

Vzorec 29

4.3 Optimalizace struktury a provozního režimu strojní sestavy a ohledem na minimální spotřebu PHM

Chceme-li určit optimální strukturu a provozní režim strojní sestavy s ohledem na uvedené hledisko, musíme zkoumat všechny možné druhy uspořádání strojní sestavy, způsoby provozu jednotlivých prvků a zjišťovat měrnou spotřebu HJ u všech variant. Přitom hledáme takovou strukturu a provozní režim, při nichž bude HJ minimální.

Při hledání vhodné struktury měníme počet strojů v jednotlivých člancích strojní sestavy, případně i jejich typorozměr. Při hledání vhodného provozního režimu měníme způsob práce při provozním režimu, rychlost a způsob pohybu při dopravním režimu.

Na provozní režim strojní sestavy má značný vliv provozní režim strojů zajišťujících dopravu zpracovávaného materiálu. Proto je někdy možno se omezit na zkoumání vlivu různých typů režimů této části strojní sestavy, která pak ovlivní i režimy strojů ostatních.

Na tuto část navazuje program pro automatizovaný výpočet