

11 ИНТЕГРАЛЬНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ

11.1 Общие положения

После расчета нагрузочных диаграмм переходных процессов по любому из трех путей (по аналитическим выражениям, анализом ЛАЧХ, интегрированием дифференциальных уравнений) необходимо выполнить ряд дополнительных расчетов с целью получения ответов на вопросы технического задания на проектирование – соответствие результатов расчетов выданному заданию и современному состоянию электропривода, в том числе и мировому.

Источником информации по проекту являются нагрузочные диаграммы электропривода. К примеру, получены нагрузочные диаграммы пуска и торможения двигателя в системе ПЧ – АД (рис. 11.1).

В п.9.1 поставлены задачи:

- рассчитать механические и электромеханические переходные процессы момента $M(t)$, скорости $\omega(t)$, скорости идеального холостого хода $\omega_0(t)$, угла поворота вала двигателя $\alpha(t)$ за время цикла;
- проверить двигатель и преобразователь на перегрузочную способность;
- проверить электропривод на заданную производительность;
- расчета среднеквадратичного значения тока (момента) за цикл и проверки на нагрев двигателя, преобразователя и резисторов;
- расчета энергетических показателей электропривода (механической работы, активной и реактивной энергии из сети за цикл, цикловых КПД и коэффициента мощности $\cos\varphi$).

На рисунке 11.1 приведены нагрузочные диаграммы пуска и торможения момента $M(t)$, скорости $\omega(t)$, тока статора $I(t)$ скорости идеального холостого хода $\omega_0(t)$, $kpd(t)$ и $\cos\varphi(t)$ за время движения рабочего органа в одну сторону. Для оценки работы электропривода следует рассмотреть все нагрузочные диаграммы за время цикла.

11.2 Проверка на перегрузочную способность

В процессе изучения нагрузочных диаграмм отмечают максимальные значения тока и момента двигателя и сравнивают эти значения с допустимыми для выбранного двигателя и преобразователя. Прошедшими **проверку на перегрузочную способность** считается двигатель постоянного тока, если максимальный ток нагрузочной диаграммы меньше предельно допустимого тока двигателя по условиям коммутации; асинхронный двигатель, если максимальный момент двигателя нагрузочной диаграммы (на рисунке 11.1 – $M_{\text{МАКС}} = 2,2 \cdot M_{\text{Н}}$) меньше максимального (критического) момента двигателя, тиристорный (транзисторный) преобразователь напряжения (частоты), если максимальный ток двигателя (на рисунке 11.1 – $I_{\text{МАКС}} = 1,8 \cdot I_{\text{Н}}$) не превышает максимально допустимый ток, который указан в паспорте преобразователя.

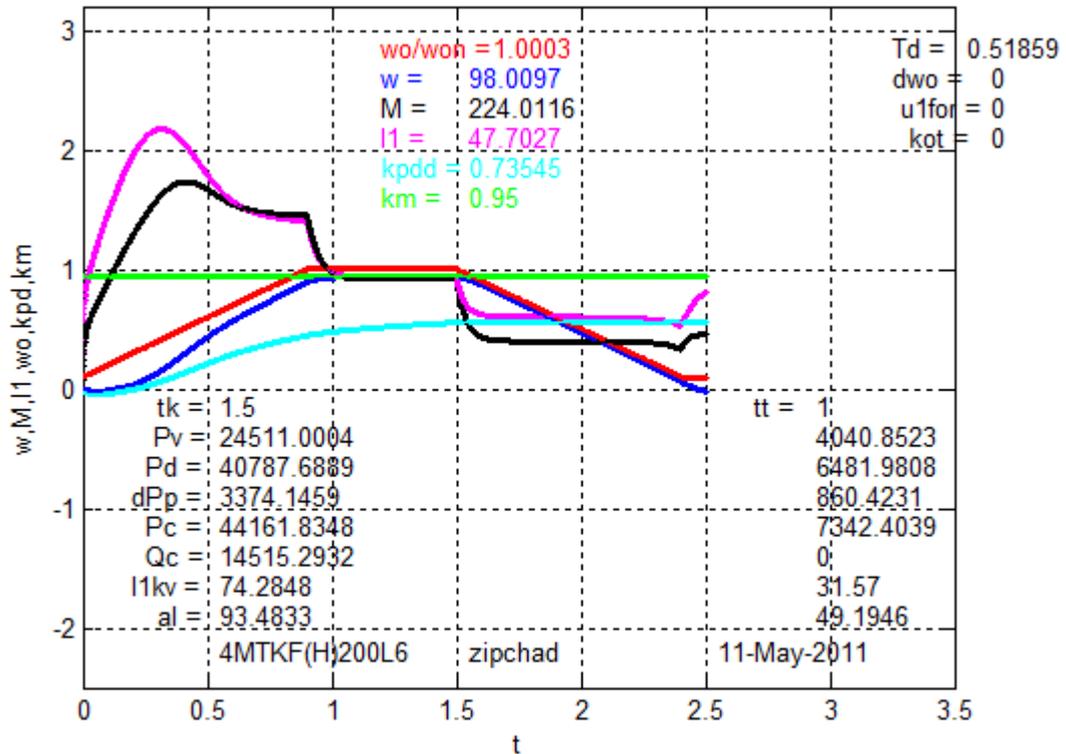


Рис. 11.1 Нагрузочные диаграммы пуска и торможения двигателя в системе ПЧ – АД

Остальные данные о работе электропривода получают в виде интегральных показателей.

11.3 Угол поворота вала двигателя и проверка на заданную производительность

Угол поворота вала двигателя

$$\alpha(t) = \int_0^t \omega(t) dt. \quad (11.1)$$

показан на рисунке 11.1 в виде интегрального показателя α_l для каждого участка расчета (α_{II} – за время пуска t_k , α_T – за время торможения t_t)

Время работы в установившемся режиме определяют по соотношению

$$t_y = \frac{\alpha_{\Sigma} - (\alpha_n + \alpha_m)}{\omega_c}, \quad (11.2)$$

где $\alpha_{\Sigma} = i_{ПЕР} \cdot \alpha_{РО} = i_{ПЕР} \cdot 2L/D$ – угловой путь, проходимый валом двигателя на участке движения, рад;

D, L – диаметр шестерни и длина перемещения рабочего органа, м;

ω_c – скорость вращения двигателя в установившемся режиме, соответствующая статическому моменту на участке движения, рад/с.

При небольших α_{Σ} может оказаться, что $\alpha_{\Sigma} < \alpha_n + \alpha_m$ и по формуле (11.2) получится, что $t_y < 0$. Это означает, что при заданном пути α_{Σ} и приня-

тых значениях пускового и тормозного моментов двигатель должен переключаться на торможение, не достигнув установившегося режима работы. В этом случае приходится определять скорость, при которой двигатель должен быть переключен на торможение, чтобы к моменту времени, когда закончилось торможение и двигатель остановится, был бы пройден заданный путь α_{Σ} . Скорость переключения обычно определяют графически, как точку пересечения заданного пути α_{Σ} с кривой $(\alpha_n + \alpha_m) = f(\omega)$, представляющую собой суммарный путь, проходимый двигателем при разгоне и торможении в зависимости от скорости вращения двигателя.

После расчета времени переходных процессов на всех участках движения и расчета времени установившегося движения в течение цикла работы определяется фактическое время работы электропривода в цикле

$$t_{P\Phi AKT} = \Sigma (tk + tt + ty)$$

Проверка на заданную производительность состоит в сравнении рассчитанного времени работы электропривода $t_{P\Phi AKT}$ в цикле с временем t_P , заданным в техническом задании на проектирование

$$t_{P\Phi AKT} \leq t_P. \quad (11.3)$$

Если электропривод не прошел проверку, следует пересмотреть его режимы работы с целью повышения быстродействия в переходных процессах и увеличения скорости установившихся режимов работы.

11.4 Проверка по нагреву двигателя, преобразователя, резисторов

11.4.1 Проверку выбранного двигателя по нагреву следует выполнять, как правило, **методом эквивалентного тока:**

$$I_{\Theta} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n I_i^2 \cdot \Delta t_i}{\sum_{i=1}^n \beta_i \cdot \Delta t_i}} \leq I_{доп}, \quad (11.4)$$

где I_i – среднеквадратичное значение тока на i -м участке;

Δt_i – длительность i -го участка работы;

β_i – коэффициент ухудшения теплоотдачи двигателя;

$I_{доп}$ – допустимый по нагреву ток.

Среднеквадратичный ток на участке интегрирования за время Δt_k .

$$I_{kv} = \sqrt{\int_0^{tk} I_i^2 \cdot dt} = \sqrt{\sum_{k=1}^i I_i^2 \cdot \Delta t_k}, \quad (11.5)$$

На рисунке 11.1 приведены значения среднеквадратичного тока статора I_{kv} за время пуска tk , за время торможения tt и за время установившегося режима ty для одного участка движения. Время работы в установившемся режиме рассчитано по (11.2). Рассчитав переходные процессы и уста-

новившиеся режимы для всех участков работы электропривода в цикле, можно получить аналогичные рассмотренным выше значения среднеквадратичных токов и времен работы и вернуться в числитель формулы (11.4).

Коэффициент ухудшения теплоотдачи **остановленного** двигателя β_0 зависит от его конструктивного исполнения и условий вентиляции. Примерные значения коэффициента β_0 для двигателей различного конструктивного исполнения приведены ниже.

Исполнение двигателя	β_0
Закрытый с независимой вентиляцией	1
Закрытый без принудительного охлаждения	0,95...0,98
Закрытый с самовентиляцией	0,45...0,55
Защищенный с самовентиляцией	0,25...0,35

Ухудшение условий охлаждения двигателя в переходных режимах учитывают коэффициентом ухудшения теплоотдачи β_i , которому в зависимости от скорости вращения можно присвоить значения (см таблицу 16.1).

Нагрузочные диаграммы скорости $\omega(t)$ каждого из вариантов работы в цикле разбиваются на участки движения с разными скоростями по таблице 11.1, рассчитываются времена t_{02}, t_{08}, t_{10} работы в цикле с такими скоростями и подставляются в знаменатель формулы (11.4).

Таблица 11.1

Рекомендуемые значения коэффициента ухудшение условий охлаждения двигателя

ω	$\leq 0,2 \cdot \omega_H$	$0,2 \cdot \omega_H \leq \omega \leq 0,8 \cdot \omega_H$	$\omega \geq 0,8 \cdot \omega_H$
β_i	β_0	$(1 + \beta_0)/2$	1
t	t_{02}	t_{08}	t_{10}

Эквивалентный ток двигателя, предназначенного для повторно-кратковременного режима работы, рассчитывают только за время работы, полученное по результатам расчета нагрузочных диаграмм

$$ПВ_{факт} = t_{рфакт} / t_{ц}$$

Время паузы в формулу (16.4) не включается.

Допустимый по нагреву ток двигателя рассчитывают через каталожный ток $I_{кат}$ при каталожной $ПВ_{кат}$, ближайшей к фактической

$$I_{доп} = I_{кат} \cdot \sqrt{\frac{ПВ_{кат}}{ПВ_{факт}}} \quad (11.6)$$

При проверке двигателя по нагреву эквивалентный ток $I_{э}$ сравнивают с допустимым током $I_{доп}$

$$I_{э} = (0,85 \dots 0,9) I_{доп}$$

Превышение эквивалентного тока над допустимым является неприемлемым, а недогрузка двигателя в пределах 10...15% считается нормальной.

Для двигателей, у которых момент и ток пропорциональны (двигатели постоянного тока параллельного и независимого возбуждения, асинхронные двигатели – при небольших отклонениях нагрузки от номинальной), проверку по нагреву можно производить методом эквивалентного момента.

Если выбранный двигатель не проходит по условиям нагрева, т.е. $I_{\Sigma} > I_{доп}$ или $I_{\Sigma} \ll I_{доп}$, то производят ориентировочный выбор другого двигателя, используя соотношение

$$P_n \cong P_{нвыб} \cdot \frac{I_{\Sigma}}{I_{доп}}, \quad (11.7)$$

где $P_{нвыб}$ – номинальная мощность первоначально выбранного двигателя.

В этом случае расчёт проекта выполняют заново (по согласованию с руководителем проекта). Аналогично поступают, если первоначально выбранный двигатель не проходит по условиям кратковременной перегрузки.

11.4.2 Проверка по нагреву преобразователя выполняется сравнением среднеквадратичного тока двигателя за время работы

$$I_{сркв} = \sqrt{\frac{1}{tp} \cdot \sum_{i=1}^n I_i^2 \cdot \Delta t_i} \leq I_{нпр} \quad (11.8)$$

с номинальным выходным током преобразователя. На рисунке 11.1 приведены значения среднеквадратичного тока статора $I_{кв}$ за время пуска t_k , за время торможения t_t и за время установившегося режима $I_{у}$ для одного участка движения.

Время работы в установившемся режиме рассчитано по (11.2). Для расчета $I_{сркв}$ за цикл в формулу (16.8) нужно включить значения среднеквадратичных токов и времена всех участков работы.

11.4.3 Выбор резисторов и проверка их по нагреву

11.4.3.1 Выбор резисторов для реостатных схем включения двигателей производится на основе данных электрического расчёта их величин (см. п.10.1) и расчета нагрузочных диаграмм токов.

Добавочные сопротивления пусковых ступеней и тормозных цепей рассчитаны в п. 10. На рисунке 11.2 построены нагрузочные диаграммы пуска в четыре ступени асинхронного электропривода, получены кривые токов ротора через сопротивления и времена работы $t_1...t_4$ каждой ступени при пуске и торможения t_5 .

Тепловой расчет резисторов сводится к определению для них неизменного длительного тока, вызывающего такое же превышение температуры выше окружающей, как и реальный меняющийся ток [3].

Из рисунка 11.2 видно, что наиболее нагруженной ступенью является четвертая, работающая полное время пуска $t_{п} = t_1+t_2+t_3+t_4$. Необходимо от-

метить, что четвертая ступень участвует и в режиме торможения, обтекается тормозным током время торможения t_t . Время работы четвертой ступени при одном включении электропривода (в одном направлении)

$$t_{1BKЛ} = t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + t_t.$$

Во время работы резисторов включаются все их подключения в цикле $t_p = t_{1BKЛ} + t_{2BKЛ} + t_{3BKЛ} + \dots$.

Относительная продолжительность включения резисторов за время цикла $t_{ц}$

$$\varepsilon = t_p / t_{ц}.$$

Среднеквадратичные токи I_{KV} и работе ступеней остаются примерно постоянными (при правильно отстроенной пусковой диаграмме) и для каждой ступени могут рассчитываться аналитически (см. Приложение К).

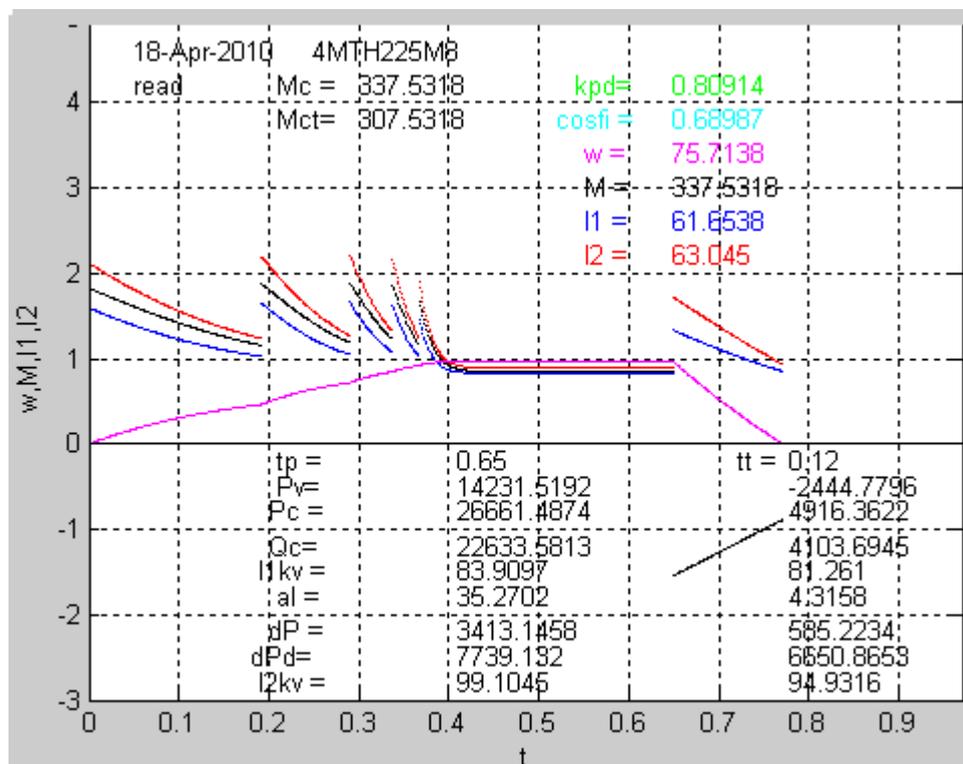


Рис. 11.2 Нагрузочные диаграммы пуска и торможения противовключением асинхронного двигателя

Среднеквадратичный ток I_p за время работы резисторов

$$I_p = \sqrt{\frac{\sum I_{kv}^2 t_i}{t_p}}. \quad (11.9)$$

Эквивалентный по нагреву резисторов (его еще называют длительно протекающий, продолжительный и т.п.) ток при отношении $t_p / T_H \cong 0$ времени работы резисторов t_p к постоянной времени T_H их нагрева

$$I_{э.н} = I_p \sqrt{\varepsilon}. \quad (11.10)$$

Резисторы выбираются по эквивалентному по нагреву току $I_{\text{Э.П.}}$.

На рис. 11.2 для анализа работы резисторов в колонке интегральных показателей выводится энергия потерь в добавочных сопротивлениях отдельно за время пуска и за время торможения

$$dPd = dPd + I^2 \cdot R_{\text{ДОБ}} \cdot \Delta t_i$$

в которой выполняется расчет энергии потерь при $R_{\text{ДОБ}} \neq 0$. Добавочные сопротивления выводятся при переходе на следующую позицию, поэтому для расчета среднеквадратичного тока приходится учитывать время работы t на ступени и величину сопротивления $R_{\text{ДОБ}}$.

Используя значение dPd , можно рассчитать среднеквадратичный ток I_{KV} за время пуска

$$I_{kv} = \sqrt{\frac{dPd}{R_{\text{ДОБ1}} t_1 + R_{\text{ДОБ2}} (t_1 + t_2) + R_{\text{ДОБ3}} (t_1 + t_2 + t_3) + R_{\text{ДОБ4}} (t_1 + t_2 + t_3 + t_4)}}$$

Зная I_{KV} на каждом участке движения, по (11.9) рассчитывают среднеквадратичный ток I_P за время работы резисторов, а по (11.10) – эквивалентный по нагреву ток резисторов $I_{\text{Э.П.}}$.

По продолжительному току резистора $I_{\text{ПР}} \geq I_{\text{Э.П.}}$ и величинам сопротивлений пусковых и тормозных резисторов (см. п.10.1) выбираются конкретные ящики резисторов, как правило, с фехралевыми ленточными или проволочными элементами [3,16].

Составляется схема соединения элементов ящика, обеспечивающая требуемую величину сопротивления каждой ступени резисторов. Затем производится проверка выбранных резисторов по нагреву, которая сводится к определению эквивалентного тока и сравнению его с допустимым продолжительным током. Проверка может быть выполнена не для каждого, а лишь для наиболее загруженного по эквивалентному току элемента в каждой секции.

Превышение среднеквадратичного тока над продолжительным недопустимо. Однако чрезмерный запас выбранных резисторов по нагреву также недопустим, так как влечёт за собой неоправданное завышение числа ящиков резисторов и стоимости установки.

Для каждой ступени пусковой и тормозной схемы в проекте должны быть приведены значения требуемых и выбранных сопротивлений резисторов и указаны различия между ними.

11.4.3.2 Выбор блоков тормозных резисторов ПЧ – АД выполняется по методике, описанной в Приложении Г.

Для проверки тормозных резисторов по нагреву из интегральных показателей торможения (см. рис. 11.1) определяется избыточная электрическая энергия при торможении dPd . Когда энергия сети $Pc = 0$, а энергия двигателя Pd больше потерь dPp в преобразователе, избыточная энергия $dPd = Pd - dPp > 0$ и идет на нагрев резисторов (на рис. 11.1 двигатель тормозится в двигательном режиме и $dPd = 0$).

По известным тормозному сопротивлению R_T , времени торможения t_t и энергии dPd можно определить среднеквадратичный I_{kv} ток резистора за од-

но торможение. Далее при известном времени работы в цикле по (11.9) рассчитывают среднеквадратичный ток I_p за время работы резисторов, а по (11.10) – эквивалентный по нагреву ток резисторов $I_{\Sigma,П}$.

Проверка по нагреву выполняется сравнением эквивалентного по нагреву ток резисторов $I_{\Sigma,П}$ с продолжительным током резистора $I_{ПР} \geq I_{\Sigma,П}$.

В графической части проекта приводится схема соединения элементов резисторов между собой во всех выбранных ящиках, схема соединения с обмотками двигателя и подключения к коммутирующим аппаратам.

11.5 Расчёт энергетических показателей электропривода

Энергетические показатели электропривода характеризуют экономичность преобразования энергии системой электропривода (коэффициент полезного действия) и экономичность потребления энергии от сети (коэффициент мощности).

Для электропривода, работающего в повторно-кратковременном режиме работы, универсальной оценкой энергетических показателей является их средневзвешенные значения за цикл работы (цикловые значения). Мгновенные значения КПД и $\cos\phi$ могут характеризовать экономичность работы электропривода только в установившихся режимах работы.

Цикловый КПД представляет собой отношение произведенной механической работы за цикл P_v к потребленной за это время электроэнергии (активной энергии) из сети P_c [7]

$$\eta_{ц} = \frac{P_v}{P_c} = \frac{\int_0^{t_{ц}} M_{po}(t) \cdot \omega_{po}(t) dt}{\int_0^{t_{ц}} P_c dt} \quad (11.11)$$

Для оценки циклового КПД следует брать отрезки времени, началу и концу которых соответствует одинаковая энергия, запасенная в элементах привода. Для механизмов, приведенных в данном пособии, таким отрезком является цикл работы, когда механизм возвращается в исходное положение.

Для расчета энергетических показателей в данном проекте могут быть использованы результаты расчета переходных процессов на ЭВМ в тех программах, где выводятся значения механической P_v , активной P_c и реактивной Q_c энергий. [13].

Механическая энергия за время переходного процесса определяется по соотношению

$$P_v = \int_0^t M(t) \cdot \omega(t) \cdot dt \cong \sum_{i=1}^n M_{pi} \cdot \omega_{2i} \cdot \Delta t_i \quad (11.12)$$

Активная энергия из сети

$$P_c = \int_0^t 3 \cdot U(t) \cdot (I \cos \phi(t)) dt \cong \sum_{i=0}^n 3 \cdot U_i \cdot (I \cos \phi)_i \cdot \Delta t_i \quad (11.13)$$

Реактивная энергия из сети

$$Q_c = \int_0^t 3 \cdot U(t) \cdot (I \sin \varphi(t)) dt \cong \sum_{i=0}^n 3 \cdot U_i \cdot (I \sin \varphi_i) \cdot \Delta t. \quad (11.14)$$

Энергия за время цикла складывается из суммы энергий за время переходных процессов (2 пуска и 2 торможения) и за время работы в установившихся режимах.

Значения КПД и $\cos \varphi$ в установившемся режиме можно получить непосредственно (там, где эти показатели рассчитываются по программе) или расчётом по координатам и параметрам установившихся режимов.

Механическая энергия за цикл

$$P_{v\text{ц}} = \sum_{\kappa=1}^4 P_{v\kappa} + \sum_{m=1}^2 P_{v\text{уст.}m}. \quad (11.15)$$

Активная энергия из сети за цикл

$$P_{c\text{ц}} = \sum_{\kappa=1}^4 P_{c\kappa} + \sum_{m=1}^2 P_{c\text{уст.}m}. \quad (11.16)$$

Реактивная энергия за цикл

$$Q_{c\text{ц}} = \sum_{\kappa=1}^4 Q_{c\kappa} + \sum_{m=1}^2 Q_{c\text{уст.}m}. \quad (11.17)$$

Цикловые значения КПД и $\cos \varphi$ определяются по формулам:

$$\eta_{\text{ц}} = \frac{P_{v\text{ц}}}{P_{c\text{ц}}}; \quad (11.18)$$

$$(\cos \varphi)_{\text{ц}} = \frac{P_{c\text{ц}}}{\sqrt{P_{c\text{ц}}^2 + Q_{c\text{ц}}^2}}. \quad (11.19)$$

Пример расчета интегральных показателей для одного участка передвижения приведен в Приложении П8.