УДК 621.313

О.І. ТОЛОЧКО (д-р техн.наук, проф.)**, Д.В. БАЖУТІН**
Донецький національний технічний університет
toi@elf.dgtu.donetsk.ua

АЛГОРИТМ РОЗРАХУНКУ БАГАТОЕТАПНОГО ЗАКОНУ КЕРУВАННЯ ДЛЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДА ВІЗКА МОСТОВОГО КРАНУ

Наведено алгоритм розрахунку закону керування для електропривода візка мостового крану при триетапному розгоні із врахуванням можливості обмеження швидкості. Наведено методику оцінки можливості перевищення швидкістю рівня обмеження під час розгону.

Вступ. Кранові установки, виконуючи транспортувальну функцію, є невід'ємною частиною багатьох сучасних виробничих процесів. Суттєвою проблемою при переміщенні вантажів за допомогою крану є виникнення коливань вантажу, які погіршують енергетичні показники, час транспортування і надійність приводу та можуть призводити до аварійних ситуацій. Тому необхідно передбачувати міри щодо гасіння цих коливань.

Одним із засобів гасіння коливань вантажу є застосовування специфічних тахограм пересування візка з розгоном у три етапи (розгін, підгальмовування, розгін до усталеної швидкості) та відповідним триетапним гальмуванням [1, 2, 3]. В більшості літературних джерел, присвячених керуванню електроприводами горизонтального переміщення мостових кранів, описується діаграма розгону, при якій абсолютні величини прискорень на всіх ділянках є однаковими. Такий закон забезпечує гасіння коливань вантажу при мінімальній тривалості розгону приводу до усталеної швидкості, тобто він є оптимальним за швидкодією.

Якщо до кранової установки встановлено вимоги максимальної швидкодії, то зазвичай застосовують саме таку тахограму триетапного розгону. Суттєвим недоліком такого закону керування є можливість перевищення швидкістю рівня усталеного значення протягом першого та другого етапів розгону. Це спостерігається у тих випадках, коли час лінійного розгону привода від нульової до заданої швидкості є достатньо малим у порівнянні із періодом власних коливань вантажу. Вихід швидкості за рівень заданого значення в такому випадку є необхідним, щоб повністю погасити енергію коливань вантажу із одночасним виходом на задану швидкість по закінченні розгону. Але в такому разі необхідно реалізовувати двозонне регулювання приводом (що значно ускладнює систему регулювання і погіршує її динамічні властивості), або обирати двигун із запасом за напругою та потужністю, що є неефективним з економічної точки зору. Саме тому необхідно вводити обмеження рівня швидкості на першій та другій ділянках розгону, наприклад, шляхом модифікації закону керування [4].

Метою роботи є розробка загального алгоритму для розрахунку закону керування електроприводом візка мостового крану, який би забезпечив ефективне гасіння коливань вантажу з урахуванням можливості досягнення швидкістю рівня обмеження на проміжних ділянках розгону.

Першим етапом алгоритму є визначення параметрів технологічного процесу: максимальних рівнів швидкості із умов безпеки, максимальних значень прискорення із умов відсутності буксування, значень довжини канату, за яких здійснюється пересування візка із вантажем.

Другим етапом безпосередньо є розрахунок самого закону керування, який у випадку триетапного закону зводиться до визначення тривалостей окремих етапів розгону.

Для виводу закону керування використаємо спрощені рівняння руху, отримані за допомогою рівняння Лагранжа другого роду [2]:

$$\begin{cases} a(t) = F(t)/(M+m), \\ L\varepsilon(t) + g\varphi(t) = a(t). \end{cases} \tag{1}$$

Умови повного гасіння коливань по закінченні процесу розгону $\omega(t_\text{р}) = 0$, $\varphi(t_\text{р}) = 0$, $v(t_\text{р}) = v_\text{з}$ для математичному опису (1) при триетапному розгоні матимуть вигляд:

$$\begin{cases} -\dfrac{a_0}{\Omega_0^2 L}\left(\cos(\Omega_0 t_\text{р}) - 2\cos(\Omega_0(t_1+t_2)) + 2\cos(\Omega_0 t_3) - 1\right) = 0, \\ \dfrac{a_0}{\Omega_0 L}\left(\sin(\Omega_0 t_\text{р}) - 2\sin(\Omega_0(t_1+t_2)) + 2\sin(\Omega_0 t_3)\right) = 0, \\ a_0(t_1+t_3) - a_0 t_2 = v_\text{з}, \end{cases} \tag{2}$$

де $\Omega_0 = \sqrt{g/L}$ - кутова частота коливань математичного маятнику довжиною L, g – прискорення сил тяжіння, $t_\text{р}$ - загальний час розгону.

© Толочко О.І., Бажутін Д.В., 2011

У [2] наведено розв'язок цієї системи у вигляді:

$$t_1 = \left(\frac{t_p}{2} - \beta\right)\frac{1}{\Omega_0}, \quad t_2 = \frac{2\beta}{\Omega_0}, \quad t_3 = \left(\frac{t_p}{2} - \beta\right)\frac{1}{\Omega_0}, \quad t_p = \frac{v_з}{a_0} + 4\beta, \tag{3}$$

де $\beta = \arcsin\left[\frac{1}{2}\sin\left(\frac{t_p}{2}\right)\right]$. Значення тривалості загального часу розгону розраховується чисельними методами.

При розрахунку законів керування за цими формулами вдається гасити коливання вантажу достатньо ефективно лише за умови, що швидкість візка під час процесу розгону не вийде на рівень обмеження. В протилежному випадку, як це показано на рис.1, по закінченні процесу розгону спостерігаємо суттєві залишкові коливання вантажу та похибку у значенні усталеної швидкості.

Таким чином, у алгоритмі має бути передбачена оцінка можливості виходу швидкості на рівень обмеження та перераховано тривалість окремих ділянок розгону (в тому числі, і тривалість руху на усталеній швидкості) з умов гасіння коливань.

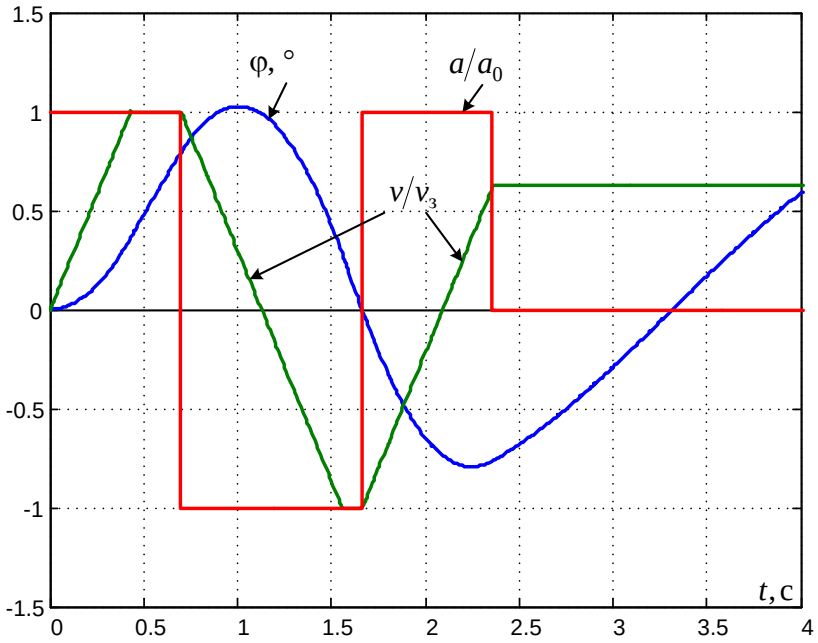

Рисунок 1 – Результати моделювання при штучному обмеженні швидкості візка

Одним з варіантів такого рішення є модифікація закону керування шляхом введення додаткових (однієї чи двох) ділянок розгону, що характеризуються рухом із усталеною швидкістю. При наявності однієї додаткової ділянки (див. рис.2) розрахунки необхідно проводити виходячи з системи рівнянь [4]

$$\begin{cases} 2\sin\left(\Omega_0\left(t_2 + t_3 + t_4 + t_1/2\right)\right)\sin\left(\frac{\Omega_0 t_1}{2}\right) = -\cos\left(\Omega_0\left(t_4 + t_3\right)\right) + 2\cos\Omega_0 t_4 - 1, \\ 2\cos\left(\Omega_0\left(t_2 + t_3 + t_4 + t_1/2\right)\right)\sin\left(\frac{\Omega_0 t_1}{2}\right) = \sin\left(\Omega_0\left(t_4 + t_3\right)\right) - 2\sin\Omega_0 t_4, \end{cases} \tag{4}$$

де $t_4 = t_3$, $t_1 = v_з/a_0$, яку необхідно розв'язувати чисельними методами. Такий закон керування дозволяє обмежити максимальне значення швидкості у додатному напрямку.

При наявності двох додаткових ділянок руху із усталеною швидкістю (див. рис.3) тривалість окремих етапів знаходиться розв'язком системи рівнянь [4]:

$$\begin{cases} \cos\left(\Omega_0\left(T_\Sigma - t_1\right)\right) - \cos\Omega_0 T_\Sigma = 2\sin\left(\Omega_0\left(t_4 + 3t_1\right)\right)\sin\Omega_0 t_1 + \cos 2\Omega_0 t_1 - 1, \\ \sin\Omega_0 T_\Sigma - \sin\left(\Omega_0\left(T_\Sigma - t_1\right)\right) = 2\sin\left(\Omega_0\left(t_4 + 3t_1\right)\right)\cos\Omega_0 t_1 - \cos 2\Omega_0 t_1, \end{cases} \tag{5}$$

де $t_1 = v_з/a_0$, $t_3 = t_5 = 2t_1$, $T_\Sigma = t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + t_5$.

Отже, маємо три варіанти закону керування. Тепер постає питання у визначенні, в якому випадку слід використовувати той чи інший закон. Для цього використаємо таку методику.

Визначимо граничні умови виникнення явища перевищення швидкості рівня усталеного значення. Очевидно, що в такому випадку швидкість буде досягати рівня обмеження на першій ділянці розгону, але не перевищуватиме її. При цьому тривалість усіх трьох ділянок буде однаковою і становитиме:

$$t_i = v_з/a_0. \tag{6}$$

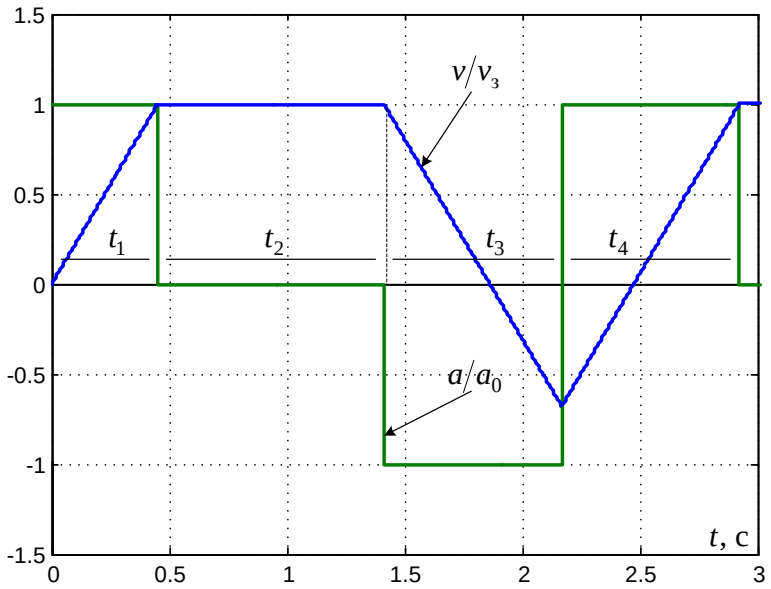

Рисунок 2 – Закон керування із обмеженням швидкості у додатному напрямку

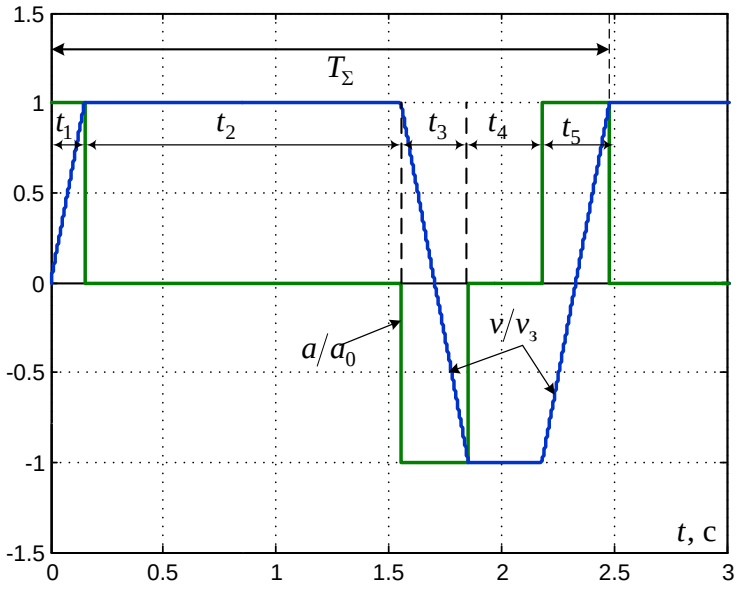

Рисунок 3 – Закон керування із обмеженням швидкості в обох напрямках

Задане значення усталеної швидкості, для якої виконується ця умова, позначимо як граничну швидкість $v_{\text{гр1}}$. На рис.4 зображено процес розгону за умови $v_з = v_{\text{гр1}}$.

Для оцінки можливості виходу швидкості за рівень обмеження необхідно розрахувати граничну швидкість для заданої довжини канату та заданого прискорення. Для цього скористаємося першими двома рівняннями системи (2) після підстановки в них граничної умови

$$t_1 = t_2 = t_3 = v_{\text{гр1}}/a_0, \tag{7}$$

яка випливає з третього рівняння цієї ж системи. Тоді отримуємо систему двох рівнянь з одним невідомим:

$$\begin{cases} -\cos(3\Omega_0 t_1) + 2\cos(2\Omega_0 t_1) - 2\cos(\Omega_0 t_1) + 1 = 0, \\ \sin(3\Omega_0 t_1) - 2\sin(2\Omega_0 t_1) + 2\sin(\Omega_0 t_1) = 0. \end{cases} \tag{8}$$

Її аналіз показує, що обидва рівняння дають один і той же розв'язок $\Omega_0 t_1 = \pi/3$, після підстановки якого в (7) отримуємо:

$$v_{\text{гр1}} = \frac{\pi a_0}{3\Omega_0} = \sqrt{\frac{L}{g}}\frac{\pi a_0}{3}. \tag{9}$$

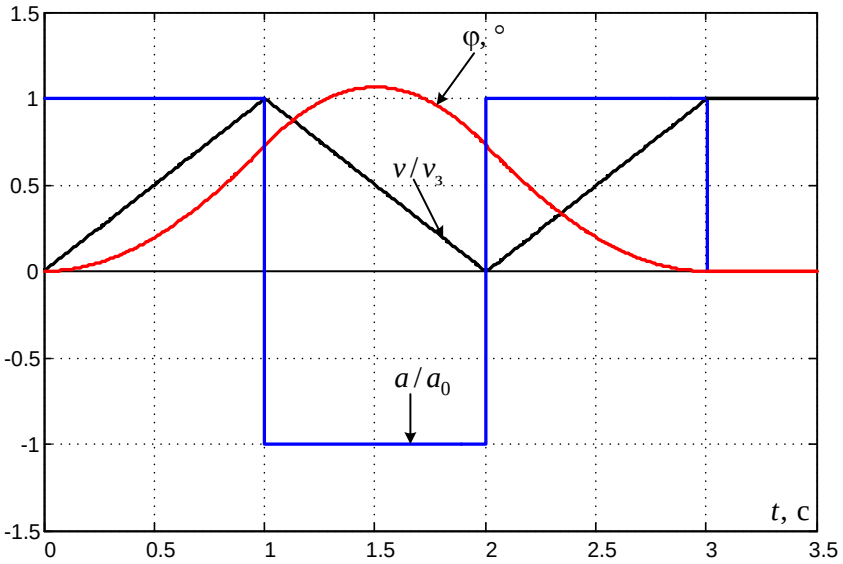

Рисунок 4 – Тахограма розгону для граничного випадку для обмеження у додатному напрямку

Якщо для обраної довжини канату та заданого значення прискорення виконується умова $v_з \geq v_{гр1}$, швидкість на першій та другій ділянках розгону не перевищить рівень обмеження. У протилежному випадку при розрахунках необхідно застосовувати чотирьох- або п'ятиетапний закони керування, що розраховуються за формулами (4) або (5). Для вибору між цими законами керування необхідно розрахувати ще одну граничну швидкість, яка визначатиме мінімальне завдання, при якому швидкість на третій ділянці розгону не перевищує рівень обмеження у від'ємному напрямку.

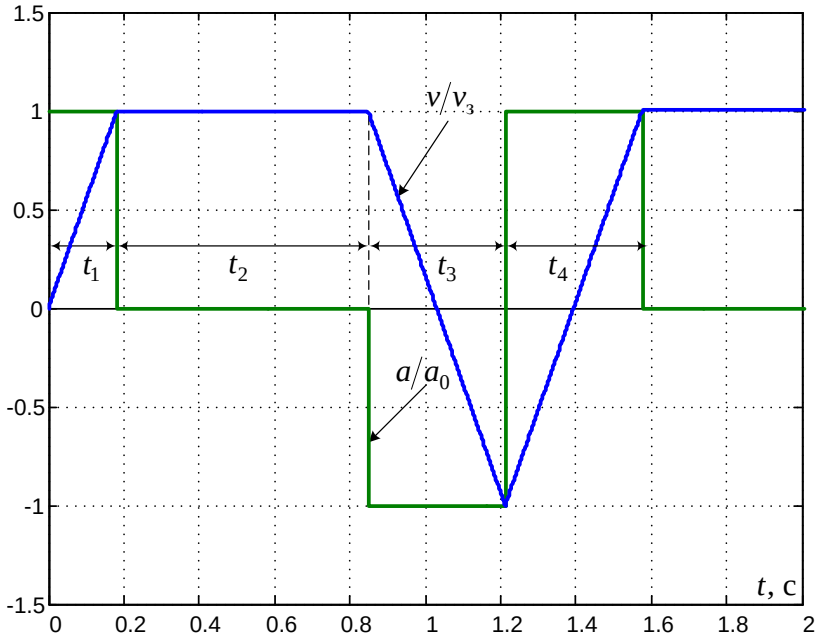

Рисунок 5 – Тахограма розгону для граничного випадку для обмеження у від'ємному напрямку

З рис.5 видно, що для досліджуваної діаграми справедливо таке співвідношення:

$$t_3 = t_4 = 2t_1 = 2\frac{v_{гр2}}{a_0}. \qquad (10)$$

Після підстановки (10) в систему рівнянь (3) отримаємо:

$$\begin{cases} 2\sin\left(\Omega_0\left(t_2 + 9t_1/2\right)\right)\sin\left(\dfrac{\Omega_0 t_1}{2}\right) = -\cos\left(4\Omega_0 t_1\right) + 2\cos\left(2\Omega_0 t_1\right) - 1, \\ 2\cos\left(\Omega_0\left(t_2 + 9t_1/2\right)\right)\sin\left(\dfrac{\Omega_0 t_1}{2}\right) = \sin\left(4\Omega_0 t_1\right) - 2\sin\left(2\Omega_0 t_1\right). \end{cases} \qquad (11)$$

Можна показати, що цій системі рівнянь задовольняє розв'язок $\Omega_0 t_1 = 0.51$, при якому значення

граничної швидкості можна розрахувати за формулою:

$$v_{\text{гр2}} = \frac{0.51a_0}{2\Omega_0} = \sqrt{\frac{L}{g}}\frac{0.51a_0}{2}. \quad (12)$$

На підставі результатів виконаних досліджень можна скласти алгоритм вибору і розрахунку узагальненого закону керування. Блок схема алгоритму зображена на рис.6.

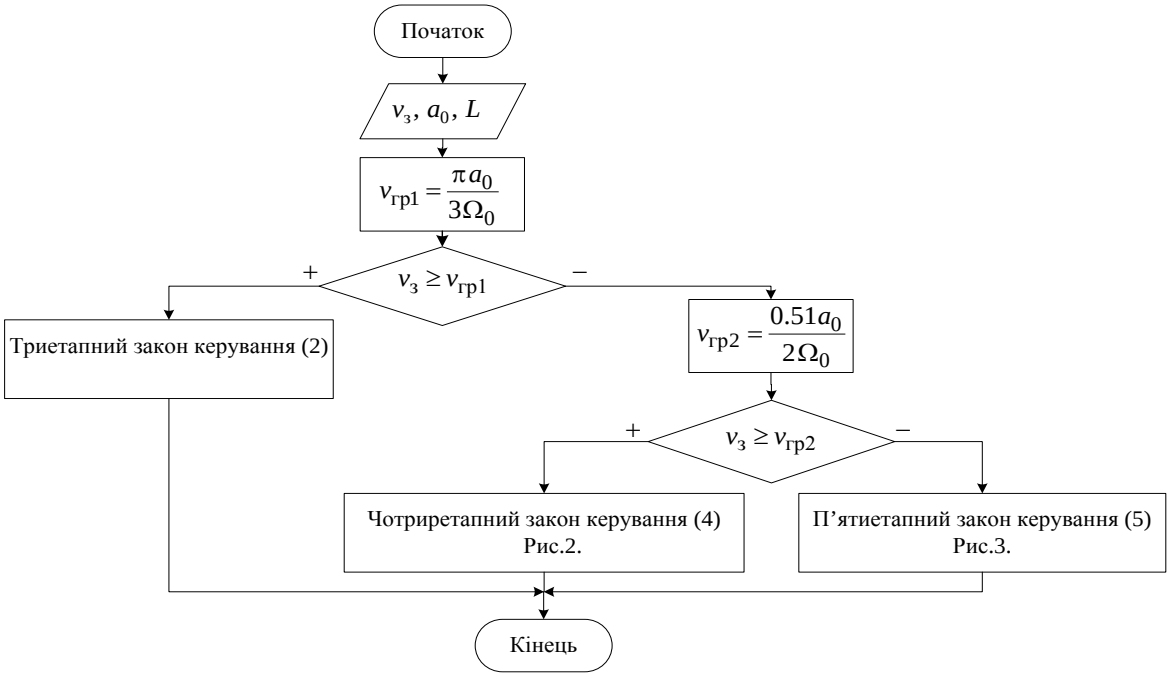

Рисунок 6 –Алгоритм розрахунку закону керування

Висновки:

1. Для гасіння коливань вантажу, підвішеного до візка мостового крану, в деяких випадках треба використовувати не триетапний, а чотирьох- або п'ятиетапний закон керування при розгоні (гальмуванні) електроприводу візка, який складається з ділянок розгону, підгальмовування та руху з усталеною швидкістю.

2. Для вибору одного із трьох перелічених вище законів керування можна застосовувати алгоритм, наведений на рис.6, побудований на базі виведених у роботі граничних умов існування етапів руху з усталеною швидкістю в додатному та від'ємному напрямках (див. формули (9), (12)).

ЛІТЕРАТУРА

1. Герасимяк Р.П. Анализ и синтез крановых электромеханических систем / Р.П. Герасимяк. – Одесса: СМИЛ, 2008. – 191 с.

2. A. Buch. Optimale Bewegungssteuerung von schwingungsfähigen mechatronischen Systemen mit zwei Freiheitsgraden am Beispiel eines Krans mit Pendelnder Last und elastischer Mechanik – Magdeburg, 1999. – 250 S.

3. Толочко О.И. Сравнительный анализ методов гашения колебаний груза, подвешенного к механизму поступательного движения мостового крана / О.И. Толочко, Д.В. Бажутин // Міжвідомчий науково-технічний журнал «Електромашинобудування та електрообладнання». – 2010. – №75 – С.22-28.

4. Толочко О.І. Обмеження швидкості електропривода візка мостового крану при розгоні у три етапи / О.І. Толочко, Д.В. Бажутін // Вісник Кременчуцького державного університету імені Михайла Остроградського – 2010. – Вип. 4/2010 (63). – Ч. 1. – С. 24-27.

Надійшла до редколегії 16.11.2010 *Рецензент: О.П.Чорний*

О.И. ТОЛОЧКО, Д.В. БАЖУТИН
Донецкий национальный технический университет

Алгоритм расчета многоэтапного закона управления для электропривода тележки мостового крана. Приведен алгоритм расчета закона управления для электропривода тележки мостового крана при трехэтапном разгоне с учетом возможности ограничения скорости. Приведена методика оценки возможности превышения скорости уровня ограничения во время разгона.

O. TOLOCHKO, D. BAZHUTIN
Donetsk National Technical University

Evaluation Algorithm of a Multistage Control Law for an Overhead Crane Trolley Drive. The algorithm for evaluation of a control algorithm for an overhead trolley drive while accelerating in three stages taking into account possible velocity limitations is presented. An estimation technique for the possibility of the velocity to exceed the limitation level is presented.