Записки Ленинградского орденов Ленина и Трудового Красного Знамени горного института им. Г. В. Плеханова,
т. LIV, вып. 1, 1967 г.

УДК 622.611

ВЫБОР ЭЛЕКТРОПРИВОДА ТРЕХФАЗНОГО ТОКА ДЛЯ ПНЕВМОКОЛЕСНЫХ САМОХОДНЫХ ВАГОНОВ

И. И. Марголин

Параметры короткозамкнутого электродвигателя для привода ходовой части и конструктивные параметры рудничных самоходных вагонов на пневмоколесном ходу находятся в следующей зависимости *:

$$\frac{R}{c} = \frac{p + \sqrt{p^2 - 4\alpha^2}}{\alpha s_к} - 1,$$

где R — радиус поворота точки самоходного вагона, лежащей на его продольной оси; $2c$ — ширина колеи; p — перегрузочная способность электродвигателя; $s_к$ — критическое скольжение электродвигателя; α — коэффициент, учитывающий загрузку привода на кривой (отношение момента сопротивления к суммарному поминальному моменту обоих двигателей).

Иностранные самоходные вагоны, например вагоны фирмы Джой $10SC$ имеют согласно технической характеристике отношение $\frac{R}{c} \approx 3$. Для достижения такой маневренности при $p = 2{,}5$ и двукратной перегрузке двигателя внутреннего борта при поворотах ($\alpha = 1$) необходимо иметь $s_к = 100\%$.

В СССР взрывобезопасные короткозамкнутые двигатели с таким $s_к$ не выпускаются, поэтому самоходные вагоны изготовляют только с приводом постоянного тока. Привод ходовой части самоходных вагонов на переменном токе с использованием серийных электродвигателей можно создать на основе последовательного включения обмоток статора звездой или треугольником. Как известно, система последовательно включенных электродвигателей, работающих на индивидуальную нагрузку, неустойчива. Однако в данном случае скорости вращения колес взаимозависимы и их соотношение определяется радиусом поворота вагона.

Найдем механическую характеристику системы последовательно включенных короткозамкнутых электродвигателей с жесткой связью скоростей вращения. Исходить будем из формулы Клосса для асинхронного двигателя и, следовательно, примем те же допущения, которые приняты при выводе этой формулы (крутящий момент двигателя пропорционален квадрату напряжения, а ток статора пропорционален напряжению).

Крутящие моменты, развиваемые соответственно двигателями наружного и внутреннего бортов,

$$M_н = 2M_к \left(\frac{u_п}{u_{ном}}\right)^2 \frac{s_к s_н}{s_к^2 + s_н^2}; \qquad (1)$$

$$M_в = 2M_к \left(\frac{u_в}{u_{ном}}\right)^2 \frac{s_к s_в}{s_к^2 + s_в^2}, \qquad (2)$$

где $M_к$ — критический момент двигателя при номинальном напряжении $u_{ном}$; $s_к$ — критическое скольжение двигателей; $u_н$, $u_в$ — напряжение

* О. В. Дыков, И. И. Марголин. Анализ работы колесных самоходных машин с асинхронным приводом. Горные машины и автоматика, вып. 45, 1964.

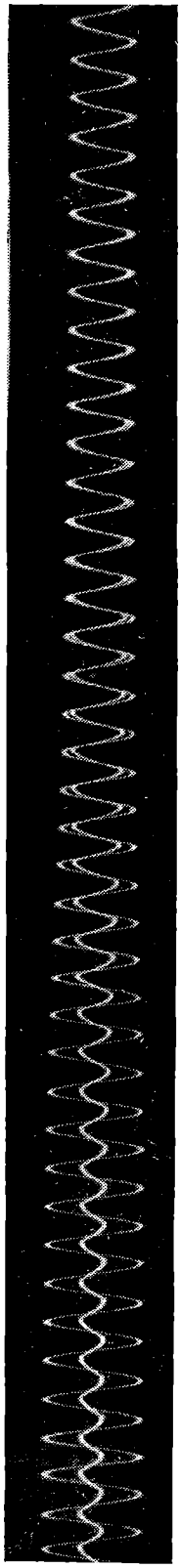


Рис. 1. Участок осциллограммы напряжений (m 4,4) на зажимах двигателей типа АО-51-6 (N = 2,8 *квт*, n = 950 *об/мин*), включенных по схеме звезды при пуске.

на зажимах двигателей соответственно наружного и внутреннего бортов.

Так как двигатели работают на общую нагрузку, их суммарный момент равен моменту сопротивления:

$$M = M_{\text{н}} + M_{\text{в}}. \tag{3}$$

Подставляя в выражение (3) формулы (1) и (2), получим

$$u_2^{\text{н}} \frac{s_{\text{к}} s_{\text{н}}}{s_{\text{к}}^2 + s_{\text{н}}^2} + u_{\text{в}}^2 \frac{s_{\text{к}} s_{\text{в}}}{s_{\text{к}}^2 + s_{\text{в}}^2} = \frac{M}{2M_{\text{к}}} u_{\text{ном}}^2. \tag{4}$$

Согласно Л. Б. Гейлеру *, ток статора асинхронного двигателя при активном сопротивлении, равном нулю, выражается через скольжение для двигателей наружного борта:

$$I_{\text{н}} = I_{\text{к}} \frac{u_{\text{н}}}{u_{\text{ном}}} \sqrt{\frac{i_0 s_{\text{к}}^2 + (2 - i_0^2) s_{\text{н}}^2}{s_{\text{к}}^2 + s_{\text{н}}^2}}$$

и внутреннего борта

$$I_{\text{в}} = I_{\text{к}} \frac{u_{\text{в}}}{u_{\text{ном}}} \sqrt{\frac{i_0 s_{\text{к}}^2 + (2 - i_0^2) s_{\text{в}}^2}{s_{\text{к}}^2 + s_{\text{в}}^2}},$$

где $I_{\text{к}}$ — ток статора в точке опрокидывания при номинальном напряжении; i_0 — относительный ток холостого хода, доли тока статора в точке опрокидывания.

Так как двигатели соединены последовательно, то $I_{\text{н}} = I_{\text{в}}$, или

$$u_{\text{н}}^2 \frac{i_0 s_{\text{к}}^2 + (2 - i_0^2) s_{\text{н}}^2}{s_{\text{к}}^2 + s_{\text{н}}^2} = u_{\text{в}}^2 \frac{i_0 s_{\text{к}} + (2 - i_0^2) s_{\text{в}}}{s_{\text{к}}^2 + s_{\text{в}}^2}. \tag{5}$$

Геометрическая сумма напряжений на зажимах двигателей, очевидно, равна напряжению питающей сети:

$$\bar{u}_{\text{н}} + \bar{u}_{\text{в}} = \bar{u}_{\text{сети}}.$$

Участок осциллограммы на рис. 1 дан с момента, когда можно заметить некоторый сдвиг по фазе, до момента полного разгона системы вхолостую. Во всех режимах работы сдвиг по фазе между $u_{\text{н}}$ и $u_{\text{в}}$ не превышает 20°, достигая максимального значения при отсутствии нагрузки и установившемся режиме работы. Погрешность при этом не превышает 10%. С увеличением мощности двигателей сдвиг по фазе между этими напряжениями будет уменьшаться с уменьшением активных сопротивлений роторов и статоров. Если выбрать двигатели системы таким образом, чтобы их номинальные напряжения равнялись половине напряжения сети, то геометрическую сумму напряжений с достаточной степенью точности, учитывая сказанное выше, можно заменить алгебраической

$$u_{\text{н}} + u_{\text{в}} = 2u_{\text{ном}}. \tag{6}$$

* Л. Б. Гейлер. Электропривод в тяжелом машиностроении. Машгиз, 1958.

Решая систему уравнений (4), (5), (6) относительно M, получим механическую характеристику системы в зависимости от $s_н$ и $s_в$:

$$M = 8 s_к M_к \frac{s_н (1 + A s_в^2) + s_в (1 + A s_н^2)}{[\sqrt{(s_к^2 + s_н^2)(1 + A s_в^2)} + \sqrt{(s_к^2 + s_в^2)(1 + A s_н^2)}]^2}, \qquad (7)$$

где A — конструктивный параметр электродвигателя, $A = \frac{2 - i_0^2}{i_0^2 s_к^2}$.

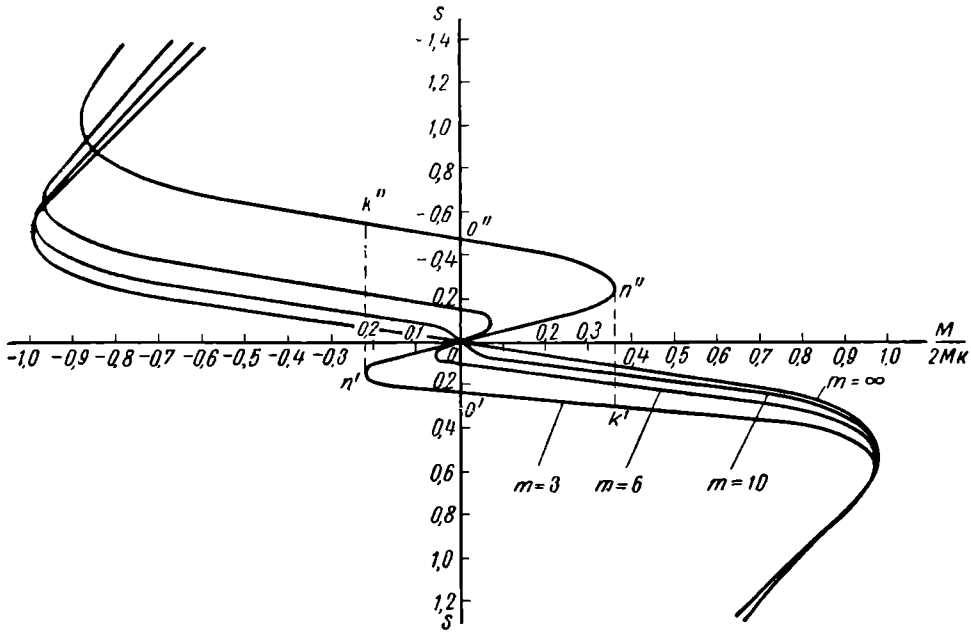


Рис. 2. Характеристики системы последовательно включенных асинхронных электродвигателей при равных $M_к$ в генераторном и двигательном режимах ($R_1 = 0$).

Скольжения $s_н$ и $s_в$ жестко связаны между собой. Их можно выразить через скольжение s электродвигателя, приводящее во вращение условное колесо, расположенное на продольной оси вагона,

$$s_н = s - \frac{1 - s}{m};$$
$$s_в = s + \frac{1 - s}{m}.$$

где $m = \frac{R}{c}$.

Таким образом, вид механической характеристики системы последовательно включенных асинхронных электродвигателей с жесткой зависимостью между их скоростями вращения определяется характеристиками электродвигателей и соотношением их скоростей вращения.

Как видно из рис. 2, при поворотах самоходного вагона и работе привода в двигательном режиме общая перегрузочная способность привода практически не изменяется; при поворотах на значительных уклонах, когда привод работает в генераторном режиме, перегрузочная способность его значительно уменьшается и при $m = 3$ снижается до 87% от перегрузочной способности при движении по прямой.

При сложных трассах движение вагона на уклонах, близких к равновесному, при малых радиусах поворота может происходить с двумя различными скоростями. При некотором малом положительном статическом сопротивлении привод вагона может работать на участках характеристики

$o'k'$ или $o''n''$, при отрицательном статическом сопротивлении — на участках $o'n'$ или $o''k''$ Участок характеристики, на котором будет работать привод, определяется предыдущим режимом работы. Так, например, если привод работал в двигательном режиме, то при уменьшении нагрузки работа будет происходить на участке $o'k'$ при работе в генераторном режиме изменение знака нагрузки приведет к работе на участке $o''n''$ Однако в последнем случае при увеличении сопротивления движению свыше некоторого максимального значения, определяемого точкой n'', произойдет переход в точку k', т. е. скорость движения будет быстро уменьшаться. Аналогичное явление будет наблюдаться при переходе от двигательного режима к генераторному. В этом случае произойдет скачок от точки n' к k', т. е. увеличение скорости движения.

Как видно из характеристики системы, дополнительные экстремальные точки кривой момента имеют место лишь при малых значениях m. При этом необходимым и достаточным условием наличия дополнительных экстремумов является прохождение кривой момента через нулевое значение при $s \neq 0$. Для нахождения этих точек приравняем числитель выражения (7) нулю и после необходимых преобразований получим квадратное уравнение относительно s:

$$A(m^2-1)s^2+2As+(m^2-A)=0,$$

откуда

$$s=\frac{-A\pm\sqrt{A^2-A(m^2-1)(m^2-A)}}{A(m^2-1)}.$$

Для самоходных вагонов $m>1$, поэтому подкоренное выражение действительно только при

$$A^2-A(m^2-1)(m^2-A)>0,$$

т. е. условием существования дополнительных экстремальных точек является

$$\frac{2-i_0^2}{i_0^2 s_к^2}>m^2-1.$$

Таким образом, во избежание резких изменений скорости самоходного вагона, для его привода желателен электродвигатель с повышенным скольжением и увеличенным током холостого хода. Такие параметры имеют крановые двигатели.

Исследуем распределение нагрузок между двигателями привода. Найдем отношение крутящих моментов $\frac{M_в}{M_н}=\alpha$ в зависимости от скольжения s.

Из выражений (1) и (2) получим

$$\alpha=\left(\frac{u_в}{u_н}\right)^2\frac{s_в(s_к^2+s_н^2)}{s_н(s_к^2+s_в^2)}.$$

Определив из формулы (5) величину $\left(\frac{u_в}{u_н}\right)^2$ и подставив ее в предыдущее равенство, получим

$$\alpha=\frac{s_в}{s_н}\cdot\frac{1+\frac{2-i_0^2}{i_0^2 s_к^2}s_н^2}{1+\frac{2-i_0^2}{i_0^2 s_к^2}s_в^2},$$

или, применяя ранее введенные обозначения,

$$\alpha=\frac{s+\frac{1-s}{m}}{s-\frac{1-s}{m}}\cdot\frac{1+A\left(s-\frac{1-s}{m}\right)^2}{1+A\left(s+\frac{1-s}{m}\right)^2}. \qquad (8)$$

При прямолинейном движении ($m=\infty$) любому скольжению соответствует $\alpha=1$ (рис. 3), т. е. во всех режимах работы крутящие моменты обоих

двигателей равны. При криволинейном движении распределение нагрузок между двигателями зависит от s. В момент включения привода ($s = 1$) пусковые моменты двигателей одинаковы, т. е. $\alpha = 1$. Это обстоятельство позволяет привести в движение вагон при отсутствии сцепления с почвой одного из колес путем повторных пусков. По мере разгона системы α уменьшается и достигает минимального значения при некотором s. Такое изменение α объясняется неравномерностью распределения напряжения на зажимах двигателей: на зажимы двигателя наружного борта приходится большее напряжение и он развивает больший момент. При дальнейшем увеличении скорости вращения момент $M_н$ начинает уменьшаться ($s_н$ приближается к нулю). При этом из-за наличия у асинхронных двигателей достаточно большого тока холостого хода начинает преобладать $M_в$. При $s = \frac{1}{m+1}$, когда

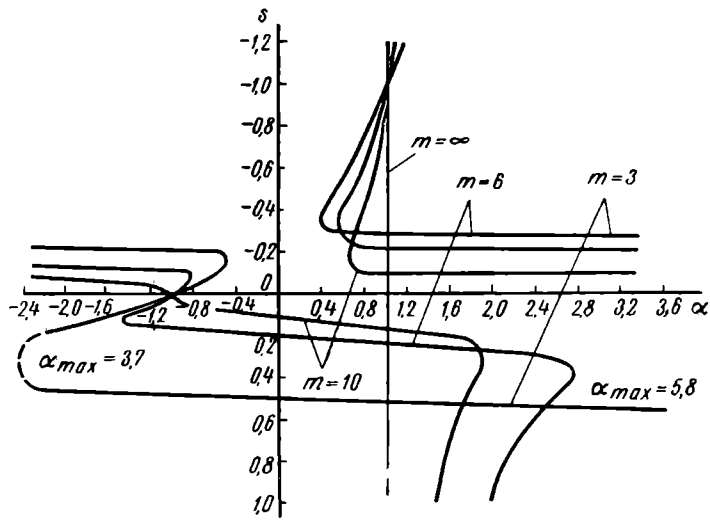


Рис. 3. График функции (8).

$s_н = 0$, момент двигателя наружного борта $M_н = 0$, момент двигателя внутреннего борта $M_в > 0$, поэтому $\alpha = \pm\infty$. Такой режим возможен только при достаточно малом сопротивлении движению, когда вагон движется по уклону, близкому к равновесному. При $s = -\frac{1}{m-1}$ двигатель внутреннего борта имеет синхронную скорость; при этом $s_в = 0$, $s_н < 0$ и, следовательно, $\alpha = 0$. Таким образом, в интервале от $s = \frac{1}{m+1}$ до $s = -\frac{1}{m-1}$ двигатель наружного борта работает в генераторном режиме, а двигатель внутреннего — в двигательном и, следовательно, $-\infty < \alpha < 0$.

Монотонность изменения α в этом интервале нарушается по тем же причинам, что и появление дополнительных экстремальных точек на характеристике системы. Интересно отметить, что и здесь условием появления дополнительных экстремальных точек является $m^2 - 1 < A$. При переходе в генераторный режим обоих двигателей α становится положительным, достигая максимума при каком-то s, и затем, вследствие перехода двигателя наружного борта на неустойчивую часть характеристики, начинает уменьшаться, асимптотически приближаясь при дальнейшем возрастании скорости к установившемуся значению. К этому же значению стремится α и при работе в режиме противотока.

Действительно, при $s = \pm\infty$, раскрывая неопределенность в равенстве (8), получим

$$\alpha = \frac{m-1}{m+1}.$$

Экспериментальное исследование системы последовательно включенных электродвигателей с жесткой связью скоростей вращения производилось на стенде, представляющем собой два агрегата, состоящих из асинхронных двигателей типа АО-51-6 и нагрузочных генераторов типа П-42. Агрегаты связаны между собой ступенчатой клиноременной передачей с передаточным отношением i, равным 1, 1,29; 1,59. Соответствующие значения m можно вычислить по формуле $m = \frac{i+1}{i-1}$

Крутящие моменты измеряли по реакции статоров асинхронных двигателей. Для измерения скорости вращения использовались тахогенераторы МЭТ-8/55.

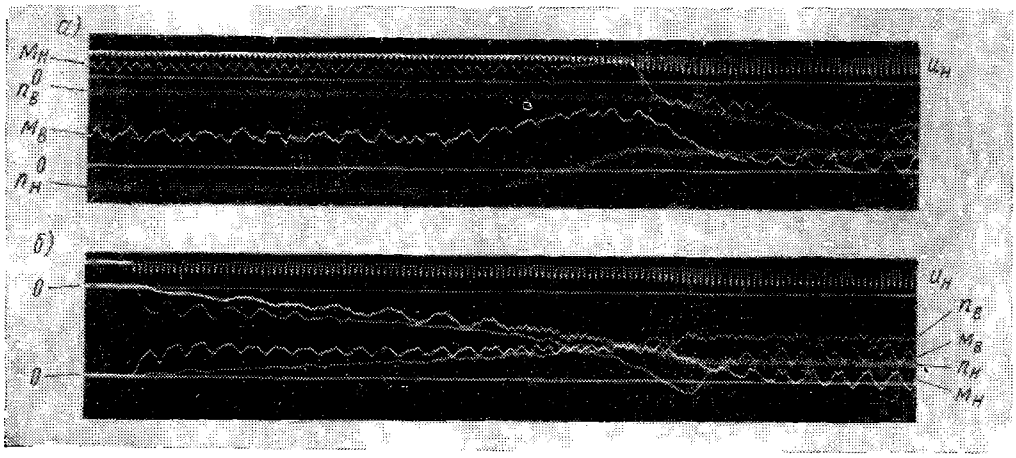


Рис. Осциллограмма изменения крутящих моментов двигателей в зависимости от времени разгона системы.

Как видно из осциллограмм рис. 4, *а*, в момент включения крутящие моменты обоих двигателей равны. По мере разгона системы на неустойчивой части характеристики эти моменты растут. При выходе на устойчивую часть характеристики момент двигателя с большой скоростью вращения продолжает увеличиваться, а момент другого двигателя начинает уменьшаться. В установившемся режиме отношение моментов зависит от нагрузки. На рис. 4, *б*, показан случай работы на части характеристики $o''n''$ и переход в точку k' при возрастании нагрузки.

Заключение

Привод ходовой части шахтных самоходных вагонов можно выполнить на переменном токе путем последовательного включения короткозамкнутых электродвигателей. При таком включении асинхронных электродвигателей наиболее целесообразны крановые электродвигатели. Обладая относительно мягкой характеристикой, они исключают резкое изменение скорости при движении по кривым малого радиуса и обеспечивают равномерное распределение нагрузки между бортовыми двигателями.

Для достижения плавного пуска целесообразно иметь двухскоростные двигатели и включать в цепь статор дополнительных сопротивлений, позволяющий осуществить пуск при пониженном напряжении.