

Особенности разгона сельскохозяйственного машинно-тракторного агрегата на электрической тяге

**Д-р техн. наук П. А. АМЕЛЬЧЕНКО, инж. И. Н. ЖУКОВСКИЙ (ОИМ НАН Беларуси),
канд. техн. наук Н. Н. ГУРСКИЙ (Белорусский НТУ), инж. А. В. КЛЮЧНИКОВ (ОАО "МТЗ"),
канд. техн. наук А. В. ВАЩУЛА (Белорусская МИС)**

Аннотация. Рассмотрен процесс трогания с места и разгона с.-х. машинно-тракторного агрегата (МТА) на электрической тяге.
Ключевые слова: трактор, электрическая тяга, машинно-тракторный агрегат, тяговый асинхронный двигатель (ТАД), разгон.

Features of acceleration of agricultural machine-tractor unit with electric traction

**P. A. AMELCHENKO, I. N. ZHUKOVSKIY (Joint Institute of Mechanical Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus), N. N. GURSKIY (Belarusian National Technical University),
A. V. KLYUCHNIKOV (Minsk Tractor Works, PLC), A. V. VASCHULA (Belarus Machine-Testing Station)**

Summary. The paper considers the processes of breakaway and acceleration of agricultural machine-tractor unit with electric traction.
Keywords: tractor, electric traction, machine-tractor unit, asynchronous traction motor, acceleration.

Способность трактора оперативно тронуться с места и разогнать МТА до необходимой технологической скорости движения — одно из его основных эксплуатационных

свойств. Закономерность формирования этого свойства особенно важна при применении на с.-х. тракторе полнопоточной электро-механической трансмиссии и пере-

воде трактора и МТА на электрическую тягу.

Разгон МТА с механическими и гидромеханическими трансмиссиями изучен достаточно полно, и к на-

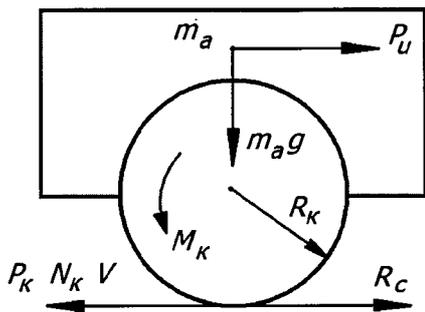


Рис. 1. Одномассовая динамическая модель МТА

стоящему времени все связанные с ним вопросы практически разрешены. Принципиальное различие трогания и разгона тракторов с механической и электромеханической трансмиссиями кроется в разной физической природе их силовых потоков и разных начальных условиях процесса трогания и разгона.

В первом случае разгон осуществляется силовым потоком дизельного двигателя, предварительно разогнанного до максимальной частоты вращения его вала на холостом ходу, и при максимально накопленной кинетической энергии его вращающихся масс и масс деталей, кинематически соединенных с валом дизеля. Во втором случае разгон осуществляется силовым потоком только тягового двигателя (ТД) в соответствии с его механической характеристикой при его пуске и при отсутствии накопленной энергии. Своим силовым потоком ТД разгоняет не только инерционные массы МТА, но и инерционную массу своего ротора. Дизельный двигатель не участвует непосредственно в скоростном регулировании трактора, а служит первичным двигателем передвижной электростанции, работающей на стационарном скоростном режиме в зоне минимального расхода топлива $g_{e \min}$ [1, 2].

Основные закономерности разгона МТА на электрической тяге можно определить, анализируя движение упрощенной одномассовой динамической модели МТА на горизонтальном участке пути на конкретной i -й ступени механической части трансмиссии под действием приложенных к ведущим колесам касательной силы тяги P_{ki} и тяговой мощности N_{ki} при преодолении сум-

марного сопротивления R_c и инерционного сопротивления R_i (рис. 1).

Для определения P_{ki} и N_{ki} механическую характеристику ТД (рис. 2) $M_{ТАД}(n_{ТАД})$ и $N_{ТАД}(n_{ТАД})$ приведем на конкретной ступени трансмиссии к ведущим колесам и получим скоростную характеристику трактора как зависимость от теоретической скорости движения V касательной силы тяги $P_{ki}(V)$ и тяговой мощности $N_{ki}(V)$ на ведущих колесах (рис. 3) [2, 3].

Скоростная характеристика трактора с электротягой (см. рис. 3) на каждой ступени механической части трансмиссии имеет два характерных участка, эквивалентных участкам характеристики ТД (см. рис. 2). На

участке постоянной тяги $P_{ki \text{ const}}$ трактор трогается с места и осуществляет разгон до минимальной скорости $V_{i \text{ min}}$ рабочего участка скоростной характеристики. На участке постоянной мощности $N_{ki \text{ const}}$ трактор завершает разгон до необходимой скорости вплоть до максимальной $V_{i \text{ max}}$ и выполняет свои основные тягово-скоростные функции. Значения параметров скоростной характеристики (см. рис. 3) определяются по выражениям, приведенным в работе [3].

Разгон трактора на электротяге осуществляется в два этапа, которые соответствуют упомянутым участкам скоростной характеристики. Движение одномассовой модели МТА,

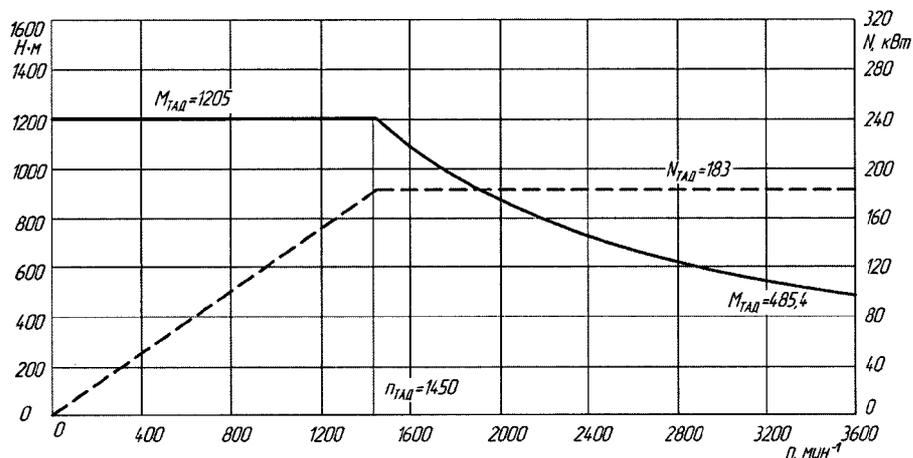


Рис. 2. Механическая характеристика ТАД трактора "Беларус-3023"

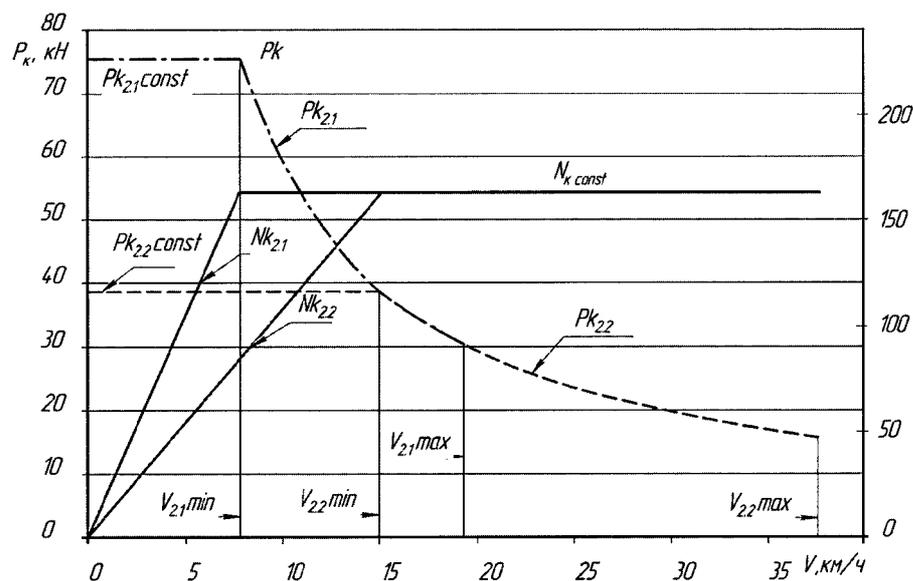


Рис. 3. Скоростная характеристика трактора "Беларус-3023" в режиме "дорога"

представленной на рис. 1, в режиме трогания и разгона описывается выражением:

$$P_k - R_c - m_a \frac{dv}{dt} = 0, \quad (1)$$

где $R_c = P_{kp} + P_f$ — суммарная сила сопротивления движению, приведенная к ведущим колесам; $m_a = m_{\text{э}} + m_{\text{сх}} + m_{\text{вм}}$ — суммарная инерционная масса МТА; P_{kp} — сила тяги на крюке; P_f — сила сопротивления движению трактора; $m_{\text{э}}$ — эксплуатационная масса трактора; $m_{\text{сх}}$ — масса агрегируемой машины (прицепа); $m_{\text{вм}}$ — масса, эквивалентная вращающимся массам трансмиссии и колес трактора.

Анализ разгона по выражению (1) и модели, представленной на рис. 1, осуществлялся при допущении, что крутящий момент ТД при его пуске мгновенно нарастает от нуля до номинального значения $M_{\text{ТДн}}$, а вместе с ним мгновенно нарастает и касательная сила тяги до значения $P_{ki \text{ const}}$. При этом буксование колес не учитывается. Процесс разгона трактора оценивается временем разгона t_p , за которое трактор разгоняется от нулевой скорости до скорости установившегося движения, и максимальным поступательным ускорением $a_{i \text{ max}}$.

На первом этапе разгона $P_{ki \text{ const}}$ для определения t_p необходимо в выражении (1) разделить переменные и проинтегрировать его от $V = 0$ до $V = V_{\text{min}}$:

$$t_1 = \frac{m_a V_{i \text{ min}}}{P_k - R_c}. \quad (2)$$

Максимальное ускорение имеет место только на этом участке и определяется выражением:

$$a_{i \text{ max}} = \frac{V_{i \text{ min}}}{t_1} = \frac{P_{ki \text{ const}} - R_c}{m_a}. \quad (3)$$

На втором этапе разгона (участок $N_{k \text{ const}}$) касательная сила тяги описывается выражением:

$$P_{ki} = \frac{N_{k \text{ const}}}{v_i}, \quad (4)$$

а уравнение движения МТА принимает вид:

$$\frac{N_{k \text{ const}}}{v_i} - R_c - m_a \frac{dv}{dt} = 0. \quad (5)$$

После преобразований уравнение (5) приводится к табличному интегралу вида:

$$y = \int \frac{x dx}{ax + b} = \frac{1}{a^2} (ax - b \ln(ax + b)), \quad (6)$$

где $y = t$; $x = v$; $a = -R_c$; $b = N_{k \text{ const}}$.

Взяв определенный интеграл по выражению (6) от V_{min} до V_{max} , определим время t_2 разгона МТА на втором этапе:

$$t_2 = \frac{m_a}{R_c^2} \{ [-R_c V_{\text{max}} - N_{k \text{ const}} \times \ln(-R_c V_{\text{max}} + N_{k \text{ const}})] - [-R_c V_{\text{min}} - N_{k \text{ const}} \times \ln(-R_c V_{\text{min}} + N_{k \text{ const}})] \}. \quad (7)$$

Суммарное время разгона:

$$t_p = t_1 + t_2. \quad (8)$$

Максимальное ускорение разгона, м/с^2 , сравнивается с рекомендуемыми значениями [4]:

$$a_{\text{max}} = (0,2...0,27)g = 1,96...2,65.$$

По полученным зависимостям выполнены расчеты параметров разгона транспортного МТА на электротяге и проведено их сравнение с параметрами разгона этого же МТА, полученными на предварительных испытаниях трактора "Беларус-3023" на разгон. Транспортный МТА общей массой $m_a = 55,1$ т состоял из опытного трактора "Беларус-3023" с электромеханической трансмиссией [1] и груженого прицепа. Расчеты и испытания выполнены для условий движения МТА по горизонтальному участку пути сухой асфальтированной дороги. Суммарное сопротивление движению при расчетах и испытаниях составило $R_c = m_a g f = 10,81$ кН при коэффициенте сопротивления движению $f = 0,02$. Результаты испытаний и расчета приведены в таблице и на рис. 4.

Из приведенных результатов испытаний видно, что расчетная и экспериментальные диаграммы разгона МТА на электротяге качественно не отличаются. Каждая из них имеет заметные линейные участки и участки, изменяющиеся по логарифмической функции. Отличаются диаграммы только количественно. Так, при расчете касательная сила тяги P_{ki} и мощность на ведущих колесах $N_{k \text{ const}}$ задавались из расчета стопроцентной загрузки ТАД, а при испытаниях они определялись по

Результаты испытаний и расчета транспортного МТА на разгон на сухом асфальте

Режим, ступень редуктора	Скорость установившегося движения, км/ч (м/с)	Время разгона до установившегося движения, с	Движение с постоянной тягой			Максимальная инерционная сила, кН	Максимальная реализуемая касательная сила тяги, кН	Максимальная реализуемая мощность ТАД, кВт
			Максимальная скорость, км/ч (м/с)	Время разгона, с	Максимальное ускорение, м/с^2			
Дорога, 1 (испытания)	17,915 (4,976)	13	10 (2,778)	6,5	0,427	23,528	34,338	81,955
	18 (5)	16	10 (2,778)	7,5	0,3704	20,409	31,219	74,51
	18,714 (5,198)	16	10 (2,778)	8,4	0,3307	18,222	29,032	69,29
Дорога, 1 (расчет)	19,006 (5,279)	7,145	7,655 (2,126)	1,782	1,193	65,734	76,544	183
Дорога, 2 (испытания)	34,414 (9,559)	36	20 (5,555)	13,3	0,418	23,032	33,84	157,51
	33,444 (9,29)	34	20 (5,555)	13,4	0,4145	22,839	33,649	156,62
	36,022 (10,006)	44	15 (4,167)	8,9	0,468	25,787	36,597	170,3
Дорога, 2 (расчет)	37,06 (10,294)	39,7	14,93 (4,147)	7,045	0,5886	32,432	43,242	183

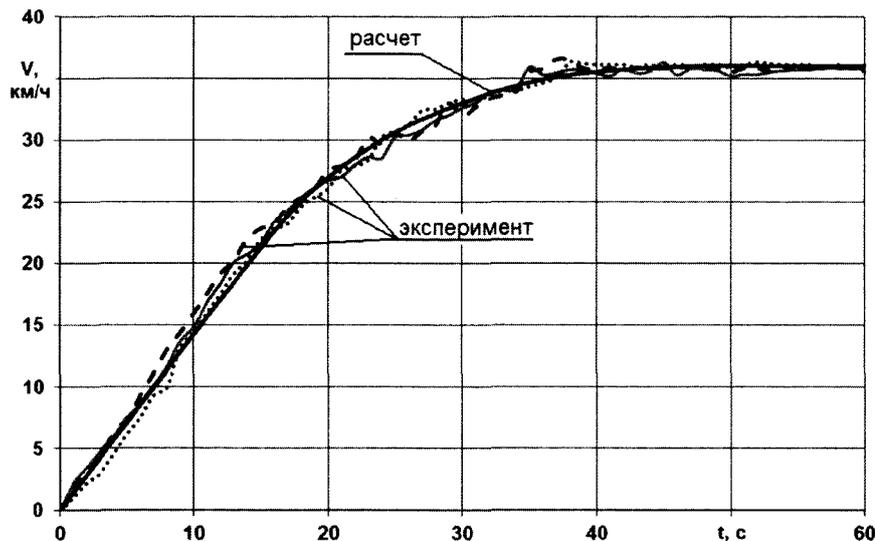


Рис. 4. Расчетная и экспериментальные диаграммы разгона транспортного МТА на электротяге

результатам обработки диаграмм, исходя из максимального ускорения a_{\max} и скорости V_{\min} в конце линейного участка:

— касательная сила тяги

$$P_{ki \text{ const}} = P_{i \text{ max}} + P_f = m_a a_{\max} + m_a g f; \quad (9)$$

— максимальная мощность на ведущих колесах

$$N_{k \text{ max}} = V_{\min} P_{ki \text{ const}}; \quad (10)$$

— загрузка ТАД по мощности

$$\eta_{\text{ТАД}} = \frac{N_{k \text{ max}}}{\eta_{\text{МТ}} N_{\text{ТАДн}}}, \quad (11)$$

где $P_{i \text{ max}}$ — инерционное сопротивление движению МТА при максимальном ускорении; $\eta_{\text{МТ}}$ — КПД механической части трансмиссии; $N_{\text{ТАДн}} = 183 \text{ кВт}$ — номинальная мощность ТАД.

При расчете разгон трактора задавался до максимальных значений теоретических скоростей V_{\min} и V_{\max} , а при испытаниях скорости задавались трактористом, и их недобор до теоретических значений составлял от 1 до 4 км/ч. Максимальные ускорения, полученные при расчете: на 1-й ступени — $1,192 \text{ м/с}^2$, на 2-й ступени — $0,589 \text{ м/с}^2$; при испытаниях: на 1-й ступени — $0,33\text{--}0,427 \text{ м/с}^2$; на 2-й ступени — $0,414\text{--}0,468 \text{ м/с}^2$. Значения ускорений оказались в 4–6 раз ниже минимальных рекомендуемых значений $a_{\text{рек}} = (0,2\text{--}0,27)g = 1,96\text{--}2,65 \text{ м/с}^2$ [4].

Принятая при испытаниях и расчете масса агрегата $m_a = 55,1 \text{ т}$ завышена как минимум на 10 %. В концепции системы машин Республики Беларусь до 2020 года для агрегатирования с тракторами тяговых классов 5 и 6 рекомендованы прицепы грузоподъемностью от 17 до 25 т. Учитывая, что полная масса груженого прицепа примерно в 1,5 раза больше массы груза, можно определить максимальную массу транспортного агрегата, т:

$$m_a = m_3 + 1,5m_r = 50, \quad (9)$$

где $m_3 = 12,5 \text{ т}$ — эксплуатационная масса трактора "Беларус-3023".

Полученные зависимости позволяют по условиям разгона определить необходимые значения касательной силы тяги и номинальной мощности ТАД:

тальной силы тяги и номинальной мощности ТАД:

$$P_{ki \text{ const}} = a_i \text{ max} m_a + R_c; \quad (10)$$

$$N_{\text{ТАДн}} = \frac{P_{ki \text{ const}} \pi n_{\text{ТАДн}} R_k}{30 \eta_{\text{МТ}} u_i}, \quad (11)$$

где $n_{\text{ТАДн}}$ — номинальная частота вращения вала ТАД; R_k — радиус качения задних ведущих колес; u_i — передаточное число механической части трансмиссии на i -й ступени.

Верхние значения касательной силы тяги ограничиваются сцепными свойствами ведущих колес трактора:

$$P_{ki \text{ const}} = m_3 g \varphi_{\text{max}}. \quad (12)$$

Заменяв в выражении (11) касательную силу тяги $P_{ki \text{ const}}$, максимальное ускорение $a_i \text{ max}$, массу агрегата m_a и сопротивление R_c на их безразмерные (относительные) величины соответственно φ_{max} , $j_i \text{ max}$, k_m , $\varphi_{\text{кр}}$ и f , получим взаимосвязь параметров разгона с массой агрегата, сцепными свойствами и сопротивлением движению в относительных единицах:

— для транспортного агрегата

$$j_{\text{max}} = \frac{\varphi - k_m g}{k_m}; \quad (13)$$

— для полевого агрегата

$$j_{\text{max}} = \frac{\varphi - (\varphi_{\text{кр}} - f)}{k_m}, \quad (14)$$

где $j_{\text{max}} = a_i \text{ max}/g$; $k_m = m_a/m_3$.

Предложенные зависимости позволяют выявить общие закономерности разгона МТА на электрической тяге и с приемлемой точностью определить показатели разгона на ранних стадиях проектирования.

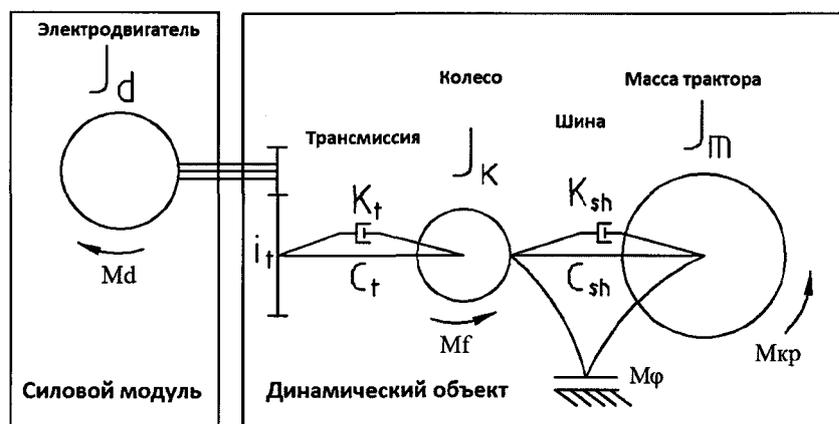


Рис. 5. Расчетная схема крутильных колебаний системы "двигатель — колесо — поступательно движущаяся масса трактора"

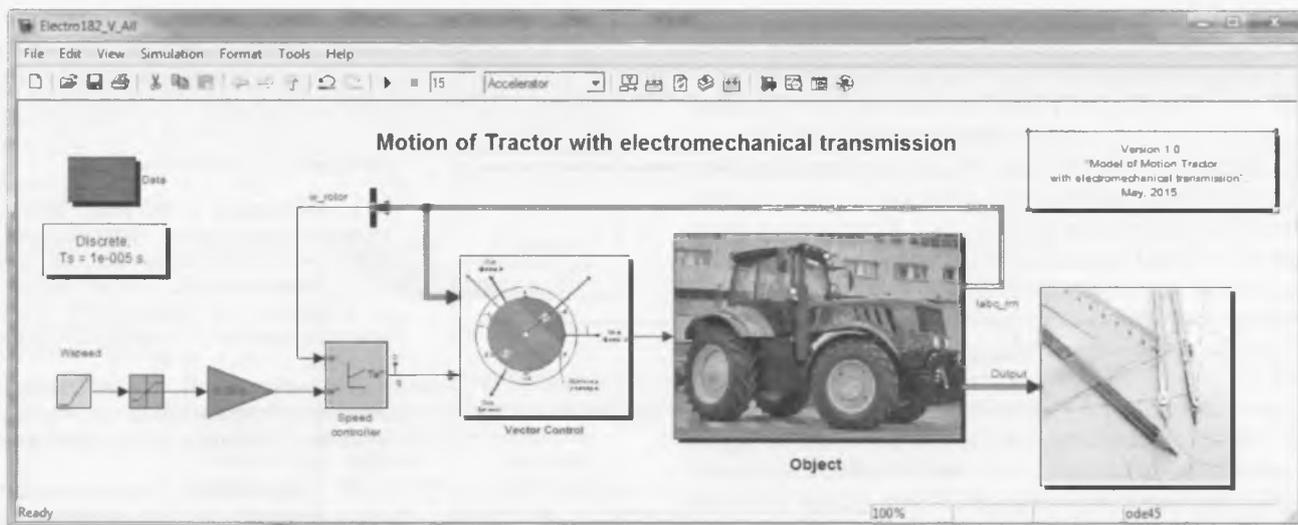


Рис. 6. Компьютерная модель управления движением трактора

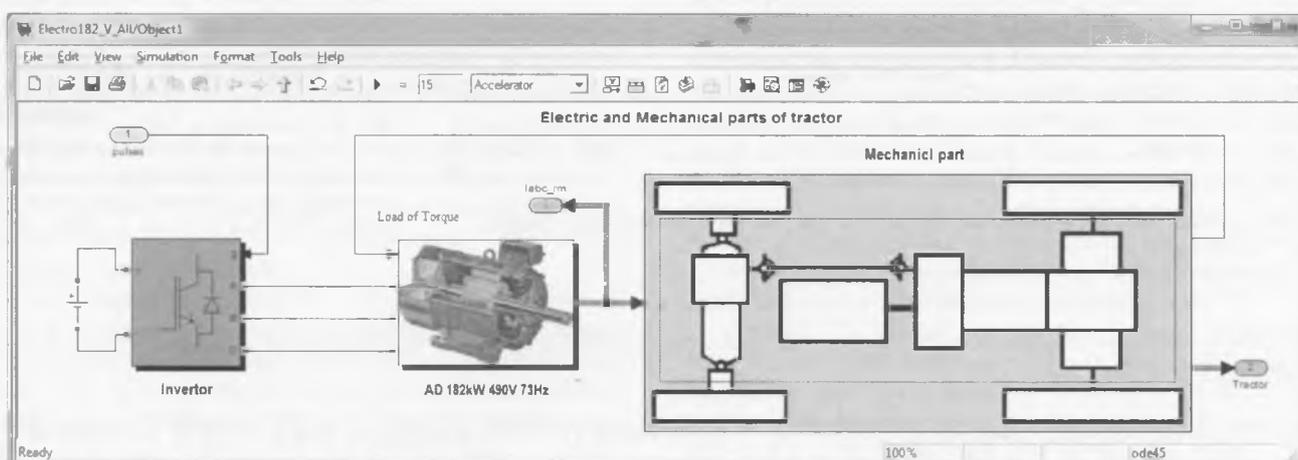


Рис. 7. Модель блока Object "асинхронный двигатель — динамический объект"

Однако для более точного анализа разгонных свойств необходимы более достоверные математические модели МТА с обязательным моделированием буксования ведущих колес, податливостей и демпфирования механических звеньев и моделированием электромагнитных процессов в тяговом электроприводе (ТЭП).

Для этой цели Белорусским НТУ совместно с ОИМ НАН Беларуси и Минским тракторным заводом разработана методика моделирования процессов управления электромеханическим тяговым приводом колесного трактора [7].

В основу методики положены система дифференциальных уравнений "двигатель — ведущее колесо — поступательно движущаяся масса", трехмассовая динамическая модель МТА (рис. 5), модель управления

движением трактора с помощью частотно управляемого ТАД и компьютерная модель системы "асинхронный двигатель — динамический объект", реализуемая в среде Matlab—Simulink (рис. 6, 7).

Методика позволяет исследовать разгон трактора на электротяге в составе различного вида МТА, а также динамические процессы как в механических, так и в электрических силовых потоках. На рис. 8 приведена временная диаграмма колебательных процессов различных физических величин, наблюдаемых в компьютерном эксперименте [7].

Первые результаты исследований, выполненных упомянутыми средствами (расчет, испытания, компьютерное моделирование), выявили неудовлетворительные разгонные свойства опытного трактора "Беларус-3023", особенно в составе транс-

портного МТА, и вызывающие их причины. Основные из этих причин:

- отсутствие в силовой системе электропривода накопителя электроэнергии, что не позволяет реализовать в момент трогания и разгона перегрузочные возможности тягового электродвигателя;

- недостаточная мощность ТЭП, величина которой, приведенная к ведущим колесам, из-за отбора электроэнергии на охлаждение на 9—20 % ниже аналогичной тяговой мощности серийных тракторов "Беларус-3022/3522" с механическими трансмиссиями.

Выявленные недостатки можно устранить путем рационального выбора типа, структуры и параметров ТЭП. Обязательным элементом структуры ТЭП должен быть бортовой накопитель электроэнергии, параметры которого, как и параметры

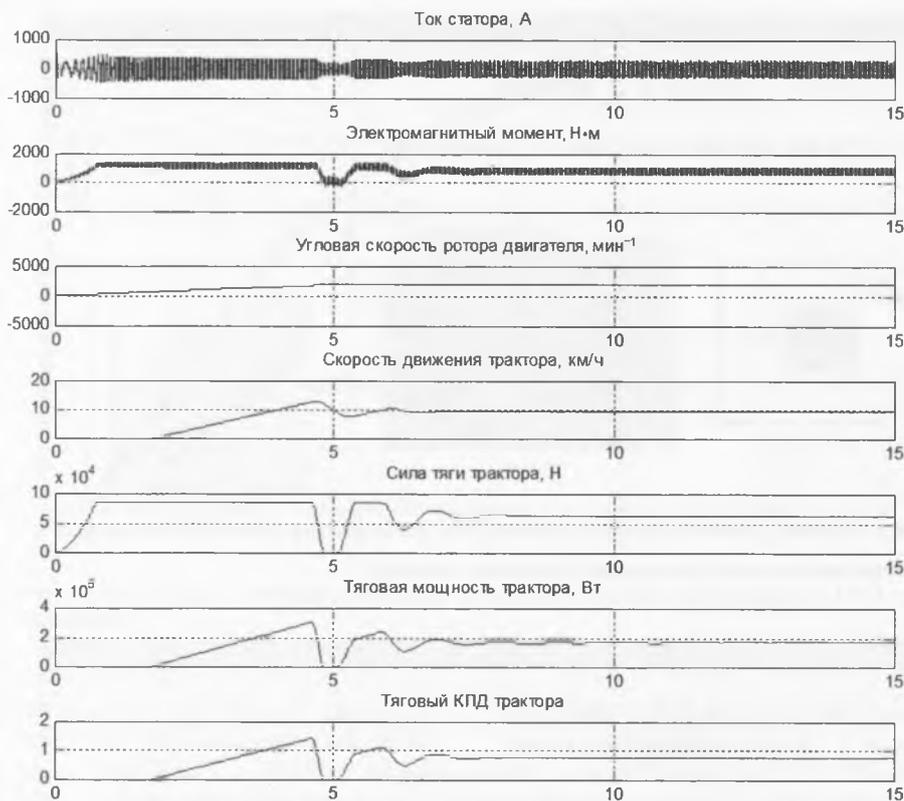


Рис. 8. Диаграмма колебательных процессов при разгоне трактора при вспашке

тягового двигателя, должны выбираться с учетом обеспечения необходимых разгонных свойств трактора и МТА.

Литература и источники

1. **Флоренцев С. Н.** и др. Трактор с электромеханической трансмиссией // Тракторы и сельхозмашины. — 2010, № 7.
2. **Амельченко П. А.** и др. Выбор типа и параметров современной тракторной трансмиссии // Тракторы и сельхозмашины. — 2013, № 8.
3. **Амельченко П. А.** и др. Электрическая тяга и электроотбор мощности с.-х. трактора // Тракторы и сельхозмашины. — 2014, № 9.
4. **Рабинков Б. И.** Исследование процесса плавного разгона машинно-тракторного агрегата: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. — М., 1972.
5. **Гурский Н. Н., Фурунжиев Р. И.** Моделирование и оптимизация колебаний многоопорных машин. — Минск: БНТУ, 2008.
6. **Копылов И. П.** Математическое моделирование электрических машин. — М.: Высшая школа, 2001.
7. **Гурский Н. Н.** и др. Моделирование процессов управления электромеханической трансмиссией колесного трактора // Наука и техника. — 2014, № 2.