

ТЕХНИКА, ЭНЕРГООБЕСПЕЧЕНИЕ И ЭНЕРГОТЕХНОЛОГИИ

УДК 631.371

B.N. Коршун

ОБОСНОВАНИЕ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИХ ПАРАМЕТРОВ МАШИННЫХ АГРЕГАТОВ С ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ

Рассматривается методика обоснования параметров и режимов функционирования машинных агрегатов с электроприводом, разработанная на основе методов теоретической механики и компьютерного моделирования.

Ключевые слова: энергосбережение, машинный агрегат, структура, энергия, режимы функционирования, дифференциальные уравнения движения, компьютерное моделирование.

V.N. Korshun

THE ENERGY CONSERVATION PARAMETERS DEVELOPMENT OF THE ELECTRIC MACHINE

The substantiation methodology of energy-efficient parameters and operation modes of machine aggregates with electric drive which is developed on the basis of theoretical mechanics methods and computer modeling is considered.

Key words: energy efficiency, machine aggregate, structure, energy, operation modes, differential equations of motion, computer modeling.

Введение. Энергосбережение является приоритетным направлением развития науки и техники. По данным зарубежных источников, энергоемкость производства сельскохозяйственной продукции в России в пять раз больше, чем в Европе. Значительная доля энергопотребления приходится на эксплуатацию машин и оборудования. В Государственной программе Российской Федерации «Энергосбережение и повышение энергетической эффективности на период до 2020 года» одним из направлений выделено использование для привода машинных агрегатов частотно-регулируемого электропривода.

Цель исследований. Обоснование энергосберегающих параметров и режимов функционирования роторных машинных агрегатов с электроприводом при переходных режимах.

Задачи исследований:

- разработать динамическую модель машинного агрегата, включающего рабочий орган, электропривод и упругодиссипативную муфту;
- составить математическую модель машинного агрегата;
- реализовать модель в компьютерных программах;
- выполнить компьютерный эксперимент при варьировании механических параметров динамической системы;
- обосновать энергосберегающие параметры и режимы функционирования машинных агрегатов.

Методы исследований. Методы теоретической механики и компьютерного моделирования.

Машинный агрегат, рабочий орган которого создает механическое воздействие на предмет труда, включает в себя, как минимум, три технические подсистемы (рис.1): 1 – привод; 2 – роторный рабочий орган (РО); 3 – соединительный или передаточный механизм. В системе выделяют два жестких элемента, обладающих моментом инерции (1 и 2), и безынерционную упругодиссипативную муфту 3. Механическая энергия передается от привода рабочему органу. Движущей силой является врачающий момент. Поскольку

механическая работа при вращательном движении определяется как интеграл от произведения вращающего момента на угол поворота, а мощность – вращающего момента на угловую скорость, то параметры агрегата и режимы функционирования будут энергосберегающими при минимизации указанных величин. Поскольку энергия, работа и мощность – величины скалярные, то динамику функционирования энергии в машинном агрегате обосновуем по динамике функционирования вращающихся масс, параметров движения и силе. Составим динамическую модель агрегата на основе методов теоретической механики. Механическая система имеет две степени свободы, определяемыми двумя обобщенными координатами q_1 и q_2 . Рассмотрим привод машинного агрегата от электродвигателя.

Входным управляющим воздействием для рассматриваемой системы является напряжение на якоре электродвигателя $U(t)$, В. Основными характеристиками привода являются: $i(t)$ – ток в якорной цепи электродвигателя, А; $q_1(t)$ – угол поворота вала электродвигателя, рад; $q_2(t)$ – угол поворота вала рабочего органа, рад; $\dot{q}_1(t)$ – угловая скорость вращения вала электродвигателя, рад·с⁻¹; $\dot{q}_2(t)$ – угловая скорость вращения вала рабочего органа, рад·с⁻¹. Параметры динамической системы приведены на рисунке 1: J_d – момент инерции ротора электродвигателя, кг·м²; J_{po} – момент инерции рабочего органа, кг·м²; c_y – приведенный коэффициент жесткости системы, пропорциональный углу поворота, Н·м·рад⁻¹; k_d – приведенный коэффициент конструктивного демпфирования, пропорциональный угловой скорости, Н·м·с·рад⁻¹; M_{td} – момент внешних сил трения в электродвигателе, Н·м; M_{po} – момент внешних сил трения в опорах рабочего органа, Н·м.

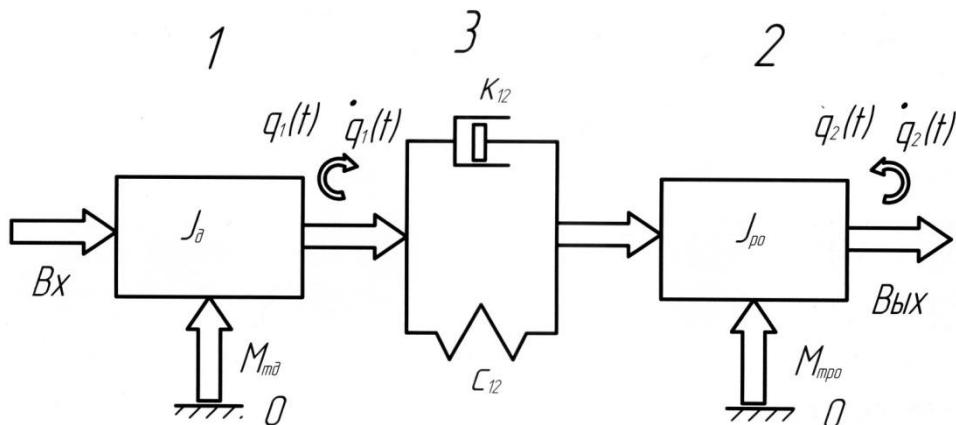


Рис. 1. Структурная модель машинного агрегата

Динамическая модель системы будет включать в себя динамическую модель электродвигателя (Bx) и модель момента сопротивления на валу рабочего органа ($B_{vых}$). Выберем динамическую модель электродвигателя постоянного тока в виде [1]

$$U(t) = R \cdot i(t) + H \cdot \frac{di}{dt} + C_d \cdot \dot{q}_1, \quad (1)$$

где R – активное сопротивление якорной цепи электродвигателя, Ом;

L – индуктивность якорной цепи электродвигателя, Гн;

C_d – конструктивный (моментный) коэффициент электродвигателя, В·с·рад⁻¹.

Момент, развиваемый электродвигателем, определяется по формуле $M_d = C_d \cdot i(t)$; момент в упругой ветви системы $M_y = c_y \cdot (q_1 - q_2)$; момент в диссипативной ветви системы $M_e = k_d \cdot [\dot{q}_1 - \dot{q}_2]$. В соответствии со структурной схемой момент на выходе из динамической системы 1 (на валу электродвигателя) будет складываться

$$C_d \cdot i(t) = M_{ld} + \kappa_d \cdot [\dot{q}_1 - \dot{q}_2] + c_y \cdot (q_1 - q_2) + J_d \frac{d\dot{q}_1}{dt}. \quad (2)$$

Момент на входе в систему 2 равен сумме моментов на РО

$$\kappa_d \cdot [\dot{q}_1 - \dot{q}_2] + c_y \cdot (q_1 - q_2) = M_{po} + J_{po} \frac{d\dot{q}_2}{dt}. \quad (3)$$

Таким образом, динамическая система при пуске без нагрузки описывается системой из трех уравнений (1)–(3). Системы уравнений следует дополнить тривиальными уравнениями вида: $\frac{d\dot{q}_1}{dt} = \dot{q}_1$, $\frac{d\dot{q}_2}{dt} = \dot{q}_2$. В рабочих режимах систему следует дополнить моделью рабочих сопротивлений [2].

$$M_c = M_0 + a \cdot \varphi + \left[b \cdot |\dot{\varphi}| + c \cdot (\dot{\varphi})^2 \right] \text{Sign } \varphi, \quad (a, b, c > 0), \quad (4)$$

где M_0 – постоянная составляющая сил сопротивления, независящая от параметров движения РО;
 a – коэффициент, зависящий от конструктивных параметров РО и отражающий влияние сил сопротивления, зависящих от угла поворота РО, например, силы резания;

φ – угол поворота ротора;

$\dot{\varphi}$ – угловая скорость ротора;

b – величина, отражающая влияние сил, зависящих от угловой скорости, например, силы сухого трения в опорах;

c – коэффициент, отражающий влияние сил сопротивления, зависящих от квадрата угловой скорости, например, силы аэродинамического или вязкого сопротивления;

$\text{Sign } \varphi$ – функция, учитывающая направление вращения РО. При любом законе движения РО работа активных сил, определяемых выражением (4), является отрицательной. Отрицательность работы активных сил означает то, что без постоянного подвода энергии к РО технологическая операция на РО выполняться не будет.

Для компьютерного моделирования в большинстве математических пакетов, таких как MATLAB, Mathematica, Maple, MathCAD, следует уравнения (1)–(3) разрешить относительно первых производных параметров моделирования и представить в форме Коши [3]. Получим систему пяти дифференциальных уравнений первого порядка

$$\begin{cases} \frac{di}{dt} = \frac{1}{H} \cdot [U(t) - R \cdot i - C_d \cdot \dot{q}_1]; & \frac{d\dot{q}_1}{dt} = \dot{q}_1; \\ \frac{d\dot{q}_1}{dt} = \frac{1}{J_d} \cdot [C_d \cdot i - M_{ld} - \kappa_d \cdot (\dot{q}_1 - \dot{q}_2) - c_y \cdot (q_1 - q_2)]; & \frac{d\dot{q}_2}{dt} = \dot{q}_2; \\ \frac{d\dot{q}_2}{dt} = \frac{1}{J_{po}} \cdot [c_y \cdot (q_1 - q_2) + \kappa_d \cdot (\dot{q}_1 - \dot{q}_2) - M_{po}]. & \end{cases} \quad (5)$$

Очередность расположения уравнений в системе (5) имеет значение, поскольку при компьютерном моделировании должна соблюдаться топология модели по потоку движущей силы (1–3–2). Закон изменения входного параметра (параметра управления) $U(t)$ должен быть задан перед началом моделирования. t – независимый параметр (время). Имеем систему из пяти дифференциальных уравнений. Можно исследовать пять параметров энергосбережения. Примем в качестве параметров энергосбережения, которые необходимо исследовать: $i(t)=i_1$ – ток в якорной цепи двигателя постоянного тока; $q_1(t)=\varphi_1$ – угол поворота вала электродвигателя; $q_1(t)=\omega_1$ – угловую скорость вращения вала электродвигателя; $q_1(t)=\varphi_2$ – угол поворота РО; $q_2(t)=\omega_2$ – угловая скорость РО. Все исследуемые параметры зависят от времени.

Исследуем систему уравнений (5) в CAD-системе MathCAD с помощью численного метода Рунге–Кутты с фиксированным шагом [3]. Для удобства записи обозначим вектор исследуемых параметров через $x = [x_1; x_2; x_3; x_4; x_5]$, где x_1 – ток в якорной цепи электродвигателя; x_2 – угол поворота электродвигателя; x_3 – угловая скорость вала электродвигателя; x_4 – угол поворота РО; x_5 – угловая скорость РО. Порядок расположения параметров в векторе x имеет значение. Примем вектор начальных условий при $t=0$ в виде $x_0 = [0; 0; 0; 0; 0]$, интервал интегрирования уравнений (5) выберем таким, чтобы угловая скорость РО стала постоянной в конце отрезка интегрирования.

Для этого зададим вектор начальных условий и укажем неизменяемые в процессе моделирования параметры электродвигателя применительно к электродвигателю постоянного тока с независимым возбуждением ПО2ПМ160S (ток – 23 А; напряжение – 220 В; число оборотов – 1070; мощность – 4,3 кВт; момент инерции – 0,15 кг·м²; конструктивный коэффициент – 3,2 В·с·рад⁻¹; индуктивность якорной цепи – 0,05 Гн; активное сопротивление якорной цепи – 5,8 Ом; масса – 145 кг; изготовитель – завод «Элдин» г. Ярославль) (данные взяты из справочной CAD-системы КОМПАС (АСКОН)). Параметры РО примем применительно к РО измельчителя древесной зелени [4] (момент инерции ротора – 3,47 кг·м²), параметры упругости и демпфирования системы примем, как для муфты МУВТ 63-128- 93 (ГОСТ 21424-93) (жесткость – 1500 Н·м·рад⁻¹, демпфирование – 0,02 Н·м·с·рад⁻¹). Закон изменения входного параметра зададим из следующих соображений. Пусть при пуске машинного агрегата напряжение в питающей электросети резко падает на 20%, а затем в течение переходного периода плавно восстанавливается до номинальных значений.

На рисунке 2 показаны результаты моделирования. Доказано, что процессы, протекающие в электро-приводе и в рабочем органе при указанных параметрах, протекают различно. Упругодиссипативные элементы оказывают существенное влияние на динамику машинного агрегата. Время пуска занимает ориентировочно 3 с. При обосновании энергосберегающих режимов управляемыми конструктивными параметрами являются: c_y – коэффициент упругости, k_d – коэффициент демпфирования (задаются выбором упругодиссипативной муфты) и инерционные параметры электродвигателя и рабочего органа. Неуправляемые параметры указаны на рисунке 1.

Проведенный численный анализ показывает, что увеличение коэффициента жесткости и коэффициента демпфирования приводит к сглаживанию колебательных процессов в электродвигателе при пуске машинного агрегата. На параметры движения рабочего органа указанные конструктивные параметры практически не влияют. При значительном превалировании момента инерции ротора электродвигателя над моментом инерции рабочего органа время пускового режима практически не изменяется, ток в электродвигателе скачкообразно возрастает до максимального значения, а затем плавно уменьшается до установившегося значения на более высоком уровне, чем в случае превышения массы рабочего органа над массой ротора электродвигателя. Угловая скорость рабочего органа приобретает колебательный характер с небольшим значением амплитуды. Такой режим нельзя назвать рациональным, поскольку приводит к циркуляции энергии. Таким образом, на основании проведенных численных исследований динамики машинного агрегата в режиме пуска, можно сделать вывод, что энергосберегающим является режим пуска электродвигателя с отключенным рабочим органом, а затем подключение РО. В данном случае время пуска минимально, пусковой ток в электродвигателе также является наименьшим. Колебательных процессов в системе не происходит.

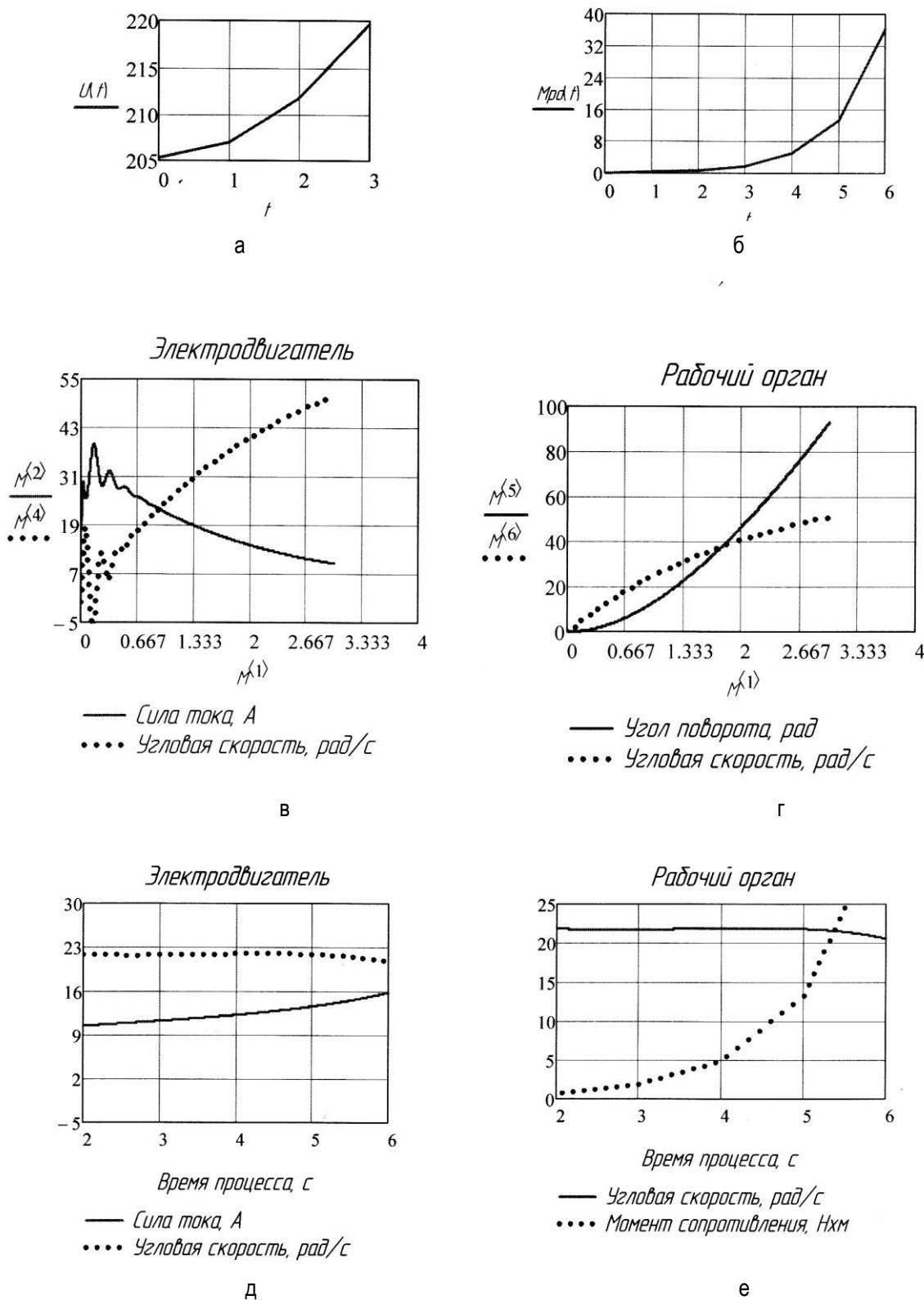


Рис. 2. Графики процессов во времени: а, б – входного воздействия и рабочей нагрузки; в, г – пуск агрегата без рабочей нагрузки; д, е – пуск агрегата при приложенном моменте сопротивления

В режиме пуска при приложенном рабочем моменте M_c рабочее сопротивление на РО задается в форме (4). Результаты показывают, что пуск данного машинного агрегата при рабочей нагрузке, приложенной в начальный момент времени, является нерациональным режимом. Численное моделирование показывает, что только при постоянной составляющей момента сопротивления не более 10 Н·м возможен выход агрегата на рабочий режим, причем угловая скорость устанавливается на уровне 22 рад·с⁻¹, при номинальном значении угловой скорости электродвигателя 60 рад·с⁻¹. Сила тока устанавливается на уровне номинальных значений 23 А. При больших значениях момента сопротивления машинный агрегат не выходит на рабочий режим. Для асинхронных электродвигателей данный режим является абсолютно неприемлемым.

Результаты компьютерного моделирования показали, режим функционирования, при котором момент нагрузки на рабочий орган прикладывается плавно (график приложения нагрузки показан на рис. 2,б), является приемлемым. Угловая скорость вала электродвигателя и рабочего органа уменьшились незначительно, а ток в обмотке якоря электродвигателя плавно увеличился от значений 10 до 16 А и установился на допустимом уровне.

В результате исследований было установлено, что потери мощности в машинном агрегате зависят от нагрузки и пропорциональны квадрату амплитуды колебаний движущего момента, могут составлять значения от 3 до 6%.

Выводы

1. Разработанная динамическая модель машинного агрегата (рис. 1) адекватно отражает процессы функционирования энергии в машинном агрегате.
2. Энергосберегающим является режим пуска машинного агрегата без приложения рабочей нагрузки, а при достижении устойчивого значения угловой скорости плавно прикладывается момент сопротивления.
3. Технически энергосберегающий режим для почвообрабатывающих машин можно обеспечить пуском вала отбора мощности при поднятых рабочих органах, а затем рабочие органы следует плавно заглублять в почву.
4. Для стационарных машинных агрегатов пуск выполняется при отключенной муфте (если муфта отключаемая) либо посредством плавного включения устройств подачи обрабатываемого материала.

Литература

1. Чернилевский Д.В. Основы проектирования машин. – М.: УМ и ИЦ, 1998. – 470 с.
2. Коршун В.Н. Проектирование роторных рабочих органов с учетом параметров привода // Тракторы и с.-х. машины. – 2008. – № 8. – С. 34–36.
3. Бенкович Е.С., Колесов Ю.Б., Сениченков Ю.Б. Практическое моделирование динамических систем. – СПб.: БХВ-Петербург, 2002 – 464 с.
4. Коршун В.Н. Роторные рабочие органы лесохозяйственных машин. Механика взаимодействия с предметом труда. – Красноярск: Изд-во СибГТУ, 2005. – 272 с.

