

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ СВЯЗЕЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ ПРИ СОЗДАНИИ ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЙ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ, ИСПОЛЬЗУЮЩИХ МЕХАНОАКТИВАЦИЮ И ТРЕНИЕ

В.М. Коротких

*В статье рассмотрены методы определения функциональных связей энергетических воздействий для создания многокритериальных управляемых электротехнологий, использующих механоактивацию и трение с инициализацией самораспространяющегося высокотемпературного синтеза на восстанавливаемой рабочей поверхности сельскохозяйственного инструмента.*

*Ключевые слова: трение, активная мощность, механоактивация, самораспространяющийся высокотемпературный синтез (СВС), функциональная связь.*

В условиях современного развития эффективных электротехнологий большую роль играет определение энергетических характеристик переходных процессов электромеханических систем вызванных трением. Тепловые воздействия в трибологических системах определяют не только надёжность работы силовых установок, агрегатов, отдельных узлов, но и ход технологических циклов. Для исследования, эволюции развития и динамики протекания физических процессов, необходимы новые методы регистрации, контроля и управления. Такими методами являются электрические измерения неэлектрических величин, обладающие высоким быстродействием и точностью, способными в реальном масштабе времени исследовать динамику любого физического процесса, включающего износ, разрушение, а также восстановление рабочей поверхности.

Требуемые технические прочностные и антифрикционные свойства, а также сохранение этих свойств, при различных энергетических воздействиях в зоне контакта, обеспечивает применение соответственно продуктов самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС) [1]. Это – интерметаллиды, бориды, карбиды, силициды и т. д. Спектр их использования в качестве износостойких покрытий очень широк: от атомной энергетики до сельхозмашиностроения [2]. Рабочие участки должны выдерживать высокие удельные давления при значительных разогревах. Вот почему восстановление рабочих поверхностей оборудования и инструмента одновременно с экзотермическим взаимодействием СВС даёт возможность создания новых энергоэффективных электро-

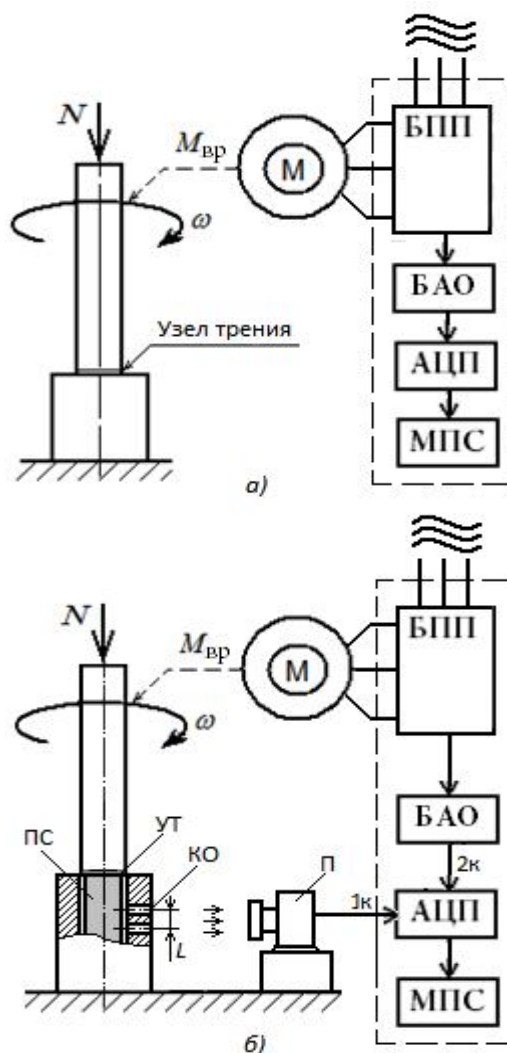


Рисунок 1 – Схема экспериментальной электроустановки

технологий использующих трение, в том числе агропромышленного назначения (АПН).

### Моделирование энергетических воздействий

«Идеальную» трибологическую систему (рисунок 1, а), в которой износ отсутствует, химические реакции в зоне трения не протекают, а коэффициент трения  $\mu$  в исследуемом интервале времени остается неизменным представим в виде силы трения  $F_{тр}$ . выраженной классическим уравнением (1)

$$F_{тр} = \mu \cdot N, \quad (1)$$

где  $N$  – нормальное давление,  $\mu$  – коэффициент трения.

Энергетической характеристикой будет мощность трения

$$P_{мех} = \mu \cdot N \cdot u, \quad (2)$$

где  $u$  – скорость относительного скольжения.

Для вращающейся системы мощность трения определится формулой

$$P_{мех} = \mu \cdot M_{тр} \cdot \omega \quad (3)$$

где  $\omega$  – угловая скорость относительного скольжения;  $M_{тр}$  – момент силы трения.

Если вся механическая энергия при трении превращается в тепло, тогда справедливо

$$P_{мех} = \frac{dQ}{dt}, \quad (4)$$

где  $Q$  – количество теплоты, выделяемое в узле трения;  $\frac{dQ}{dt}$  – скорость тепловыделения.

С другой стороны, момент  $M_{тр}$  силы трения уравновешивается в процессе вращающимся моментом  $M_{вр}$ , который создаётся технической системой электромотора  $M$ , в качестве которого используется трёхфазный асинхронный двигатель (рисунок 1, а, б).

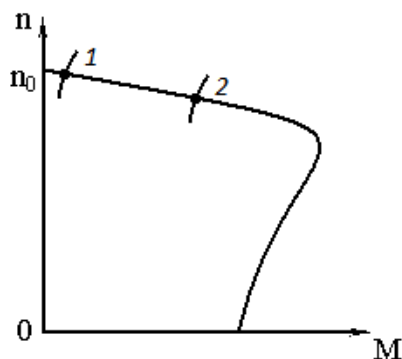


Рисунок 2 – Механическая характеристика

При изменении нагрузки на валу изменяется частота вращения ротора (рисунок 2),

что приводит к изменению скольжения (при  $S=1$  – пуск; при  $S \leq 1$  – разгон), тока, индуктивного сопротивления и коэффициента мощности  $\cos \varphi$  (рисунок 3).

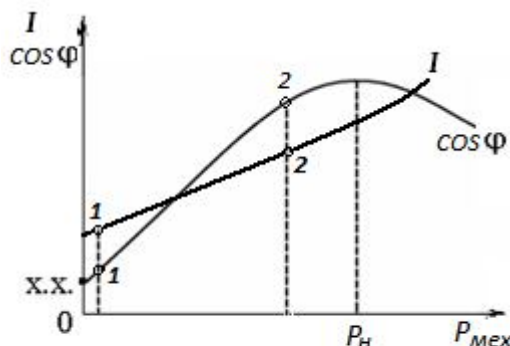


Рисунок 3 – Зависимость коэффициента мощности от нагрузки на валу

В компоненте активной мощности при увеличении механической нагрузки меняется ток и фазовый сдвиг. Коэффициент мощности определяется соотношением

$$\cos \varphi = \frac{P}{S} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}},$$

где  $P$ ,  $Q$ ,  $S$  – активная, реактивная и полная мощность двигателя соответственно. Активная мощность  $P = P_{мех} + \Delta P$ , где  $P_{мех}$  – мощность на валу (полезная мощность);  $\Delta P$  – мощность потерь равная

$$\Delta P = \Delta P_{эл} + \Delta P_{ст} + \Delta P_{мех},$$

где  $\Delta P_{эл}$  – электрические потери (потери на нагрев обмоток);

$\Delta P_{ст}$  – потери в стали (потери на нагрев сердечника);

$\Delta P_{мех}$  – механические потери.

Электрические потери  $\Delta P_{эл}$  зависят от токов в обмотках и возрастают при увеличении нагрузки на валу. Потери в стали не зависят от нагрузки на валу, а зависят от подведенного к обмотке статора напряжения. В номинальном режиме  $P_H$ ,  $\cos \varphi = 0,85 \pm 0,95$ , при холостом ходе (Х.Х.)  $\cos \varphi_{хх} = 0,08 \pm 0,12$ , участок 1–2 (рисунок 3) соответствует квазилинейной зависимости, так как реактивная мощность  $Q$  остается неизменной на всём режиме механического нагружения.

Если пренебречь потерями из-за их малости и скольжением  $S$ , которое на участке нагружения не превышает 0,02 (рисунок 2), то зависимость активной мощности  $P_{эл}$  (электрической) от механической мощности трения  $P_{мех}$  можно считать равными, с относительной погрешностью, не превышающей 3–4 %.

Для получения функциональной зависимости электрических параметров от механических воздействий и выделения управляю-

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ СВЯЗЕЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ  
ПРИ СОЗДАНИИ ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЙ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ,  
ИСПОЛЬЗУЮЩИХ МЕХАНОАКТИВАЦИЮ И ТРЕНИЕ**

щих сигналов используется экспериментальная установка (рисунок 1). Узел трения (УТ) задаёт механические воздействия, момент вращения обеспечивает асинхронный двигатель переменного тока (М), а необходимую силу трения задаёт сила давления  $N$  (1).

**Измерение активной мощности, модели электрических сигналов**

Электрическая часть содержит аналоговый блок первичного преобразования (БПП), блок аналоговой обработки сигналов (БАО), аналого-цифровой преобразователь (АЦП) с USB-портом и микропроцессорная система (МПС).

Работа предполагаемого устройства основана на измерении меняющейся активной мощности [3] в цепи питания электродвигателя и сравнении её с заданным значением механических воздействий.

Первичное преобразование мгновенных значений напряжения и тока в пропорциональные сигналы  $U_x(t)$  и  $U_y(t)$  соответственно осуществляется в блоке первичных преобразований (БПП) (рисунки 1, 4).

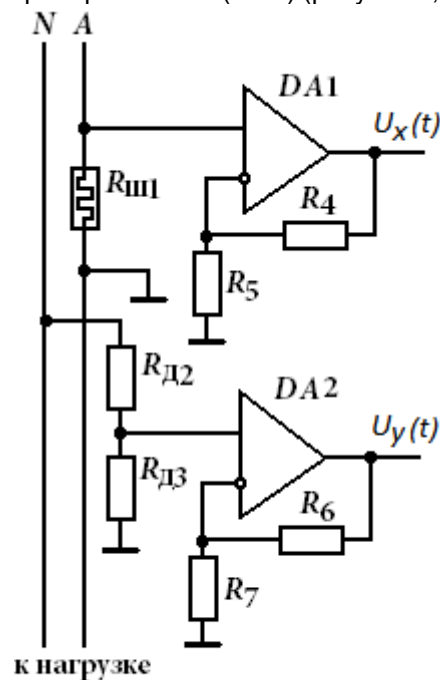


Рисунок 4 – Аналоговый блок первичных преобразований (БПП)

Сигнал  $U_x(t)$  формируется падением напряжения на сопротивлении шунта  $R_{ш}$ , фаза которого совпадает с фазой тока. На делителе, состоящего из резисторов  $R_{д1}$  и  $R_{д2}$  формируется сигнал  $U_y(t)$ , совпадающий с фазой напряжения. Операционные усилите-

ли DA1 и DA2 (рисунок 4) имеют коэффициенты усиления по напряжению:

$$k_{U1} = \frac{1}{\gamma_1},$$

и

$$k_{U2} = \frac{1}{\gamma_2},$$

где  $\gamma_1 = \frac{R_4}{R_4 + R_5}$  – коэффициент обратной связи DA1;  $\gamma_2 = \frac{R_6}{R_6 + R_7}$  – коэффициент обратной связи DA2.

Далее сигналы  $U_x(t)$  и  $U_y(t)$  подаются на входы четырехквadrантного перемножителя, реализующего передаточную функцию

$$U = k \cdot U_x(t) \cdot U_y(t) \quad (5)$$

где  $k$  – коэффициент пропорциональности.

$$U_x(t) = R_{ш} \cdot i \cdot k_{U1} = k_{U1} \cdot R_{ш} \cdot I_m \sin(\omega t + \varphi) = U_{xm} \sin(\omega t + \varphi),$$

$$U_y(t) = k_D \cdot k_{U2} \cdot U_m \sin \omega t = U_{ym} \sin \omega t, \quad (6)$$

где  $\varphi$  – угол сдвига фаз напряжения и тока,  $R_{ш}$  – сопротивление шунта

$$k_D = \frac{R_{д3}}{R_{д2} + R_{д3}} \text{ – коэффициент деления}$$

входного напряжения. Тогда формулу (5) на основании (6) можно переписать

$$U = U_{ym} \sin \omega t \cdot U_{xm} \sin(\omega t + \varphi)$$

или

$$U = \frac{1}{2} U_{xm} \cdot U_{ym} \cos \varphi + \frac{1}{2} U_{xm} \cdot U_{ym} \cos(2\omega t + \varphi) \quad (7)$$

Первое слагаемое в формуле (7) – низкочастотная составляющая, при неизменности амплитуд представляет постоянную величину, пропорциональную активной мощности  $P$ , а второе – высокочастотная составляющая, равная мгновенной величине реактивной мощности, частота которой вдвое больше частоты питающего напряжения.

Подав сигнал  $U = U_1$

$$U_1 = \frac{1}{2} U_{xm} \cdot U_{ym} \cos \varphi + \frac{1}{2} U_{xm} \cdot U_{ym} \cos(2\omega t + \varphi)$$

с выхода четырехквadrантного перемножителя DA1 на неинвертирующий вход операционного усилителя DA1 (рисунок 5), имеющего коэффициент усиления  $k_U = 2$ , а через разделительный конденсатор  $C$  на инвертирующий вход сигнал

$$U_2 = \frac{1}{2} U_{xm} \cdot U_{ym} \cos(2\omega t + \varphi)$$

будем иметь на выходе усилителя DA1, работающего в режиме фильтра нижних частот, сигнал

$$U_{вых(р)} = k_U (U_1 - U_2). \quad (8)$$

Подставив значения  $U_1$  и  $U_2$  в уравнение (8) получим

$$U_{\text{вых}(p)} = 2 \left[ \frac{1}{2} U_{xm} \cdot U_{ym} \cos \varphi + \frac{1}{2} U_{xm} \cdot U_{ym} \cos(2\omega t + \varphi) - \frac{1}{2} U_{xm} \cdot U_{ym} \cos(2\omega t + \varphi) \right]$$

или

$$U_{\text{вых}(p)} = U_{xm} \cdot U_{ym} \cos \varphi \quad (9)$$

т. е. выражение активной мощности.

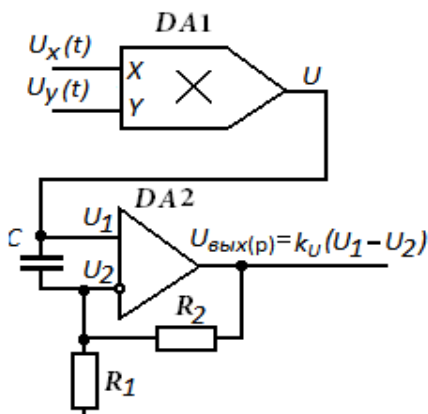


Рисунок 5 – Блок аналоговой обработки сигнала (БАО)

Измерение активной мощности и её динамики в процессе исследования определяют функциональные связи в реальном масштабе времени не только с коэффициентом трения, нагрузкой, но и температурой в зоне трения для рассматриваемой триботехнической схемы. Это дает возможность активно управлять тепловым воздействием в ходе технологического процесса.

### Моделирование тепловых процессов при инициализации СВС трением

Для определения количества тепла, прошедшего через поверхность трения в единицу времени в направлении перпендикулярном плоскости трения, можно воспользоваться законом Фурье [4], согласно которому

$$q = -\lambda \frac{\partial t}{\partial x}. \quad (10)$$

Учитывая, что  $\frac{\partial t}{\partial x} = -\frac{1}{\delta} (T_1 - T_2)$  после подстановки в выражение (10) получим:

$$q = \frac{\lambda}{\delta} (T_1 - T_2), \text{ Вт/м}^2, \quad (11)$$

где отношение  $\frac{\lambda}{\delta}$  – тепловая проводимость;  $T_1$  – температура поверхности трения;  $T_2$  – температура реакционного слоя;  $\lambda$  – теплопроводность;  $\delta$  – толщина реакционного слоя.

Количество тепла, выделившееся и прошедшее в единицу времени через изотермическую поверхность равную площади трения  $F$ , есть мощность трения. Тогда

$$P_{\text{мех}} = \frac{dQ}{dt} = \int_{F1}^{F2} q dF, \quad (12)$$

где  $dF$  – элемент изотермической поверхности, или при равномерном распределении тепла по поверхности и равенстве  $P_{\text{мех}} = P_{\text{эл}}$ ,

$$P_{\text{эл}} = \frac{\lambda}{\delta} (T_1 - T_2) \cdot F,$$

где  $F$  – площадь трения.

Полное количество тепла, определяющее пропорционально энергию активации и выделившееся за время  $\tau$  на изотермической поверхности трения  $F$  для разогрева реакционной смеси до характерной температуры  $T^*$  – температуры начала реакции, будет равно:

$$Q_{\tau} = c_m \cdot m \cdot (T^* - T_1) = \int_0^{\tau} P_{\text{эл}} dt \text{ Дж}, \quad (13)$$

где  $c_m$  – удельная теплоёмкость реакционной смеси;  $m$  – масса реакционной смеси в слое  $\delta$ .

Если произведение  $c_m \cdot m$  и характерная температура  $T^*$  для определённого стехиометрического состава величины постоянные, то температура на поверхности трения находится из выражения (13) и будет равна

$$T_1 = (c_m \cdot m)^{-1} \cdot \int_0^{\tau} P_{\text{эл}} dt - T^*. \quad (14)$$

Энергия активации взаимодействия конденсированной среды в режиме фронтального горения СВС находится оптоэлектронным методом с измерением максимальной температуры  $T_m$  [5] во фронте горения и скорости  $V_{\phi}$  фронта горения по формуле

$$E = -2R \left\{ \frac{\Delta \ln \frac{V_{\phi}}{T_m}}{\Delta \frac{1}{T_m}} \right\},$$

где  $R$  – постоянная.

Далее строится график зависимости в координатах

$$1_{\Pi}(V_{\phi}/T_m) - 1/T_m,$$

об энергии активации взаимодействия компонентов конденсированной среды в волне горения фронтального СВС судят по наклону касательной в заданной точке [6].

Скорость фронта горения  $V_{\phi}$  определяется по времени  $\Delta t$ , т. е. времени появления температурных максимумов, на базовом расстоянии  $L$  (рисунок 6) и равна  $V_{\phi} = L/\Delta t$ .

При инициализации СВС трением реактор (Р) с порошковой смесью (ПС) размещают под узлом трения (УТ), а пирометр (П) устанавливают напротив кварцевых окон (КО), имеющих базовое расстояние  $L$  (рисунки 1, б, 6). Для получения температурного профиля и временной диаграммы электрической мощности  $P_{\text{эл}}$  применён двух канальный аналогоцифровой преобразователь (АЦП) VM8020, работающий в одном из режимов виртуального измерительного прибора. Это – USB осциллограф или самописец, управляемый микро ЭВМ. Его технические характери-



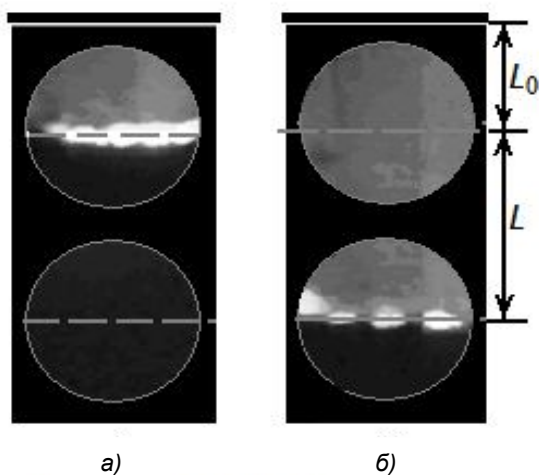
**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ СВЯЗЕЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ  
ПРИ СОЗДАНИИ ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЙ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ,  
ИСПОЛЬЗУЮЩИХ МЕХАНОАКТИВАЦИЮ И ТРЕНИЕ**

ки на различных режимах приведены в таблице 1.

*Таблица 1 – Технические характеристики  
USB – осциллографа, самописца*

Количество каналов	2
Частота дискретизации	100 Гц ... 200 КГц 0,01 Гц ... 200 КГц (самописец)
Глубина памяти чтение через буфер:	1126 отсчетов/канал (1 канал), 563 отсчетов/канал (2 канала)
Потоковое чтение	64К отсчетов/канал (1 или 2 канала)
Входное напряжение	-20 ... +20 В (аппаратно 2 поддиапазона)
Разрядность АЦП	10 бит
Синхронизация	абсолютная (по нарастающему /спадающему фронту),

Если определено время появления первого максимума  $t$ , то время предела интегрирования (13, 14) будет:  $\tau = t - t_0$ , где  $t_0 = L_0 / V_{\phi}$ ,  $L_0$  – расстояние от поверхности трения до центра первого оптического канала (рисунок 6). Тогда энергия активации  $E$  и температура поверхности трения  $T_1$  будут определены активной мощностью.



*Рисунок 6 – Оптические сигналы:  
а) температурный максимум через время  $t$ ;  
б) тоже через время  $t + \Delta t$*

**Выводы**

Экспериментально подтверждено соответствие механической модели энергетиче-

ского воздействия электрической мощности.

В рамках применяемых моделей выявлены функциональные связи механического воздействия с характерной температурой начала реакции СВС, максимальной температурой во фронте горения, а также со скоростью фронта горения и энергией активации.

При восстановлении рабочих поверхностей оборудования и инструмента сельскохозяйственного назначения данная методика даёт возможность управлять качеством изделия и параметрами технологического процесса в реальном масштабе времени.

Область применения рассмотренной методики может быть распространена на аналогичные задачи в управляемых электротехнологиях, использующих механоактивацию и трение, для инициализации СВС на восстанавливаемой поверхности.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Мержанов, А.Г. Самораспространяющийся высокотемпературный синтез / А.Г. Мержанов. – Физ. Химия. Современные проблемы.- М.: Химия, 1983. – 5 с.
2. Евстигнеев, В.В. Интегральные технологии самораспространяющегося высокотемпературного синтеза / В.В. Евстигнеев, Б.М. Вольпе, И.В. Милюкова, Г.В. Сайгутин. – М.: Высшая школа, 1996. – 273 с.
3. Коротких, В.М., Четырехквadrантные перемножители в датчиках преобразования активной мощности в частоту // Датчики электрических и неэлектрических величин; доклады Второй Международной конференции / В.М. Коротких, М.А. Гумиров. – Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 1995.
4. Лыков, А.В. Теория теплопроводности / А.В. Лыков. – М.: Высшая школа, 1967. – с. 421–427.
5. Патент №2099674 РФ, Способ измерения яркостной температуры объекта / В.М. Коротких, П.Ю. Гуляев, М.А. Гумиров, А.В. Еськов, В.В. Евстигнеев. – № 96113418, заяв.1996.07.01; опубл. 1997.12.20.
6. Патент № 2189032 РФ, Способ определения энергии активации взаимодействия компонентов конденсированной электропроводной среды в волне горения фронтального самораспространяющегося высокотемпературного синтеза / В.В. Евстигнеев, П.Ю. Гуляев, В.М. Коротких, С.П. Рябов. – № 2000123119, заявл. 05.09.00; опубл. 10.09.02.

*Коротких В.М., проф., доц., зам. зав. каф.  
«Общая электротехника», АлтГТУ им. И.И. Ползунова, тел. 8(3852) 29-07-78,  
E-mail: vkorot@mail.ru*