

УДК 621.313.333.2

## **АНАЛИТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАСХОДА РЕСУРСА ИЗОЛЯЦИИ АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ В ПОСЛЕПУСКОВОЙ ПЕРИОД**

Овчаров С.В., к.т.н.,

Стребков А.А., инженер\*.

*Таврический государственный агротехнологический университет*

Тел. (0619)42-32-63

***Аннотация*** – исследован расход ресурса изоляции асинхронного электродвигателя в послепусковой период в условиях соизмеримой мощности.

***Ключевые слова*** – механическая характеристика, пусковой переходный процесс, момент инерции, электромеханическая постоянная времени, время пуска, скорость теплового износа изоляции, расход ресурса.

*Постановка проблемы.* В условиях агропромышленного комплекса из-за совместного электропитания бытовой и производственной нагрузок, большой протяженности линий электропередачи часто возникают случаи, когда асинхронные электродвигатели привода рабочих машин сельскохозяйственного производства оказываются в условиях соизмеримой мощности.

Эти условия, характеризуются, прежде всего, значительным понижением напряжения при пуске, что может привести к затяжным или несостоявшимся пускам. Кроме этого, часто наблюдается асимметрия приложенного напряжения, что еще более усугубляет пусковые режимы. Поэтому исследование расхода ресурса изоляции в послепусковой период при пониженном напряжении представляет как теоретический, так и практический интерес.

*Анализ последних достижений.* В работах в основном исследованы тепловые переходные электромеханические процессы как при номинальном напряжении, так и при пониженном [1]. Однако практически отсутствуют исследования дополнительного расхода ресурса изоляции в послепусковой период.

---

\* Научный руководитель – к.т.н. Овчаров С.В.

© к.т.н. Овчаров С.В., инженер Стребков А.А.

*Формулировка целей статьи.* Целью статьи является исследование расхода ресурса изоляции асинхронного электродвигателя в полупериод в условиях соизмеримой мощности.

*Основная часть.* Асинхронные двигатели работают в паре с рабочими машинами, которые обладают различными механическими характеристиками, описываемыми эмпирической формулой [1]

$$M_c = M_o + (M_{сн} - M_o) \left( \frac{\omega}{\omega_n} \right)^x, \quad (1)$$

где  $M_c$  – текущий момент сопротивления на валу рабочей машины, Н·м;

$M_{сн}$  – номинальный момент сопротивления на валу рабочей машины при номинальной угловой скорости, Н·м;

$M_o$  – момент сопротивления трения в движущихся частях рабочей машины, приведенный к ее валу, Н·м;

$\omega_n$  – номинальная угловая скорость вала рабочей машины, рад/с;

$\omega$  – текущая угловая скорость вала рабочей машины, рад/с;

$x$  – коэффициент, характеризующий изменение момента сопротивления при изменении угловой скорости вала рабочей машины.

Механическую характеристику электродвигателя представим, линеаризовав ее отдельные участки (рис. 1).

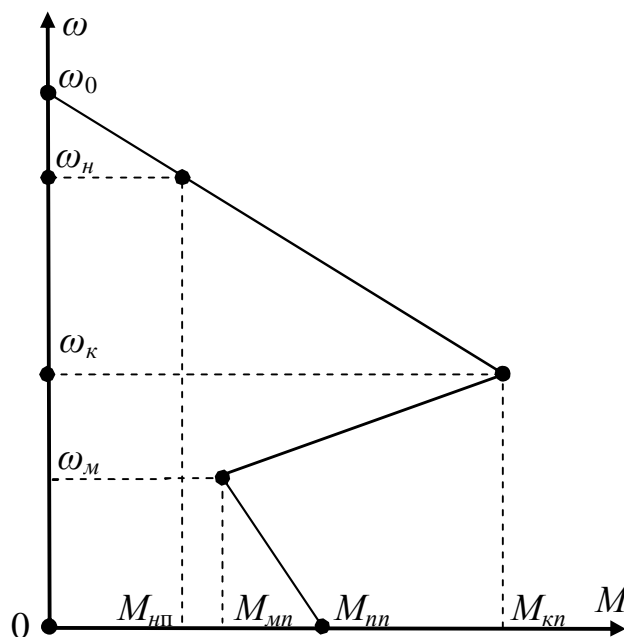


Рис. 1.

Исследовав электромеханический переходный процесс на первом участке разгона электродвигателя (от  $\omega = 0$  до  $\omega = \omega_m$ ), получено выражение времени разгона электродвигателя на этом участке:

$$t_1 = T_1 \ln \frac{\kappa_{U1}^2 \mu_{nn} - \kappa_{U2}^2 \mu_{no} - \kappa_3}{\kappa_{U1}^2 \mu_{mn} - \kappa_{U2}^2 \mu_{mo} - \kappa_3}; \quad (2)$$

$$T_1 = \frac{I \omega_m}{M_n (\kappa_{U1}^2 (\mu_{nn} - \mu_{mn}) - \kappa_{U2}^2 (\mu_{no} - \mu_{mo}))}, \quad (3)$$

где  $\kappa_{U1}$ ,  $\kappa_{U2}$  – кратности напряжений прямой и обратной симметричных составляющих;

$\kappa_3$  – коэффициент загрузки рабочей машины;

$\mu_{nn}$  и  $\mu_{no}$  – кратности пускового момента от действия симметричных составляющих напряжения прямой и обратной последовательностей;

$\mu_{mn}$  и  $\mu_{mo}$  – кратности минимального момента от действия симметричных составляющих напряжения прямой и обратной последовательностей;

$I$  – момент инерции системы «электродвигатель – рабочая машина», кг·м<sup>2</sup>;

$M_n$  – номинальный момент электродвигателя, Н·м;

$\omega_m$  – минимальная угловая скорость электродвигателя, рад/с.

Исследовав электромеханический переходный процесс на втором участке разгона электродвигателя (от  $\omega = \omega_m$  до  $\omega = \omega_k$ ), получено выражение времени разгона электродвигателя на этом участке:

$$t_2 = T_2 \ln \frac{\kappa_{U1}^2 \mu_{kn} - \kappa_{U2}^2 \mu_{ko} - \kappa_3}{\kappa_{U1}^2 \mu_{mn} - \kappa_{U2}^2 \mu_{mo} - \kappa_3}; \quad (4)$$

$$T_2 = \frac{I (\omega_k - \omega_m)}{M_n (\kappa_{U1}^2 (\mu_{kn} - \mu_{mn}) - \kappa_{U2}^2 (\mu_{ko} - \mu_{mo}))}, \quad (5)$$

где  $\mu_{kn}$  и  $\mu_{ko}$  – кратности критического момента от действия симметричных составляющих напряжения прямой и обратной последовательностей;

$\omega_k$  – критическая угловая скорость электродвигателя, рад/с.

Исследовав электромеханический переходный процесс на третьем участке разгона электродвигателя (от  $\omega = \omega_k$  до  $\omega = \kappa \omega_n$ ), получено выражение времени разгона электродвигателя на этом участке:

$$t_3 = T_3 \ln \frac{1}{1 - \frac{(\kappa \omega_n - \omega_k) (\kappa_{U1}^2 \mu_{kn} - \kappa_{U2}^2 \mu_{ko} - \kappa_{U1}^2 + \kappa_{U2}^2)}{(\omega_n - \omega_k) (\kappa_{U1}^2 \mu_{kn} - \kappa_{U2}^2 \mu_{ko} - \kappa_3)}}}; \quad (6)$$

$$T_3 = \frac{I(\omega_n - \omega_k)}{M_n \left( \kappa_{U1}^2 \mu_{kn} - \kappa_{U2}^2 \mu_{ko} - \kappa_{U1}^2 + \kappa_{U2}^2 \right)}, \quad (7)$$

где  $\kappa$  – кратность угловой скорости, до которой разгоняется электродвигатель на рабочем участке механической характеристики;

$\omega_n$  – номинальная угловая скорость электродвигателя, рад/с.

Запишем уравнение теплового баланса для обмотки статора, принимая тепловой процесс при пуске электродвигателя адиабатическим

$$Cd\tau = P_0(1 + \alpha\tau)dt, \quad (8)$$

где  $C$  – теплоемкость обмотки, Дж/°С;

$P_0$  – потери активной мощности в обмотке статора при температуре окружающей среды, Вт;

$\alpha$  – температурный коэффициент сопротивления материала проводника обмотки, 1/°С;

$\tau$  – превышение температуры обмотки над температурой окружающей среды, °С;

$t$  – текущее время, с.

Перепишем уравнение в следующем виде:

$$T_n \frac{d\tau}{dt} - \tau - \frac{1}{\alpha} = 0; \quad (9)$$

$$T_n = \frac{C}{3\alpha r_0 P}, \quad (10)$$

где  $P$  – импульс квадрата пускового тока, А<sup>2</sup>·с;

$r_0$  – активное сопротивление обмотки статора при температуре окружающей среды, Ом.

Решив уравнение (9), находим выражение текущего превышения температуры обмотки над температурой окружающей среды и выражение скорости нарастания температуры обмотки

$$\tau = \left( \frac{1}{\alpha} + \tau_{нач} \right) e^{\frac{t}{T_n}} - \frac{1}{\alpha}, \quad (11)$$

где  $\tau_{нач}$  – начальное превышение температуры обмотки над температурой окружающей среды, °С.

Запишем выражение текущей угловой скорости электродвигателя на первом участке разгона через скольжение электродвигателя, принимая напряжение пониженным, но симметричным

$$s = 1 - \frac{\kappa_{U1}^2 \mu_{nn} - \kappa_3}{\kappa_{U1}^2 (\mu_{nn} - \mu_{mn})} \cdot \frac{\omega_m}{\omega_o} \left( 1 - e^{-\frac{t}{T_1}} \right), \quad (12)$$

где  $\omega_o$  – синхронная угловая скорость электродвигателя, рад/с.

Максимальное превышение температуры обмотки статора в конце первого участка разгона электродвигателя

$$\tau_{m1} = \left( \frac{1}{\alpha} + \tau_{нач} \right) e^{\frac{3\alpha r_0 \Pi_1}{C}} - \frac{1}{\alpha}, \quad (13)$$

Импульс квадрата действующего значения пускового электрического тока на первом участке:

$$\Pi_1 = \int_0^{t_1} I_{\Pi 1}^2 dt \approx \frac{I_{n0}^2 + I_{n1}^2}{2} t_1, \quad (14)$$

где  $I_{\Pi 1}$  – действующее значение пускового электрического тока в конце первого участка, А.

$$I_{\Pi} = \frac{U}{z}; \quad (15)$$

$$z = \sqrt{(R_1' + R_2''/s)^2 + (X_1' + X_2'')^2}. \quad (16)$$

Запишем выражение текущей угловой скорости электродвигателя на втором участке разгона через скольжение электродвигателя при тех же условиях

$$s = 1 - \frac{\omega_m}{\omega_0} + \frac{\kappa_3 - \kappa_{U1}^2 \mu_{mn}}{\kappa_{U1}^2 (\mu_{kn} - \mu_{mn})} \cdot \frac{\omega_k - \omega_m}{\omega_0} \cdot \left( 1 - e^{-\frac{t}{T_2}} \right). \quad (17)$$

Максимальное превышение температуры обмотки статора в конце второго участка разгона электродвигателя

$$\tau_{m2} = \left( \frac{1}{\alpha} + \tau_{m1} \right) e^{\frac{3\alpha r_0 \Pi_2}{C}} - \frac{1}{\alpha}. \quad (18)$$

Импульс квадрата действующего значения пускового электрического тока на втором участке

$$\Pi_2 = \int_{t_1}^{t_2} I_{\Pi 2}^2 dt \approx \frac{I_{n1}^2 + I_{n2}^2}{2} t_2, \quad (19)$$

где  $I_{\Pi 2}$  – действующее значение пускового электрического тока в конце второго участка, А.

Запишем выражение текущей угловой скорости электродвигателя на третьем участке разгона через скольжение электродвигателя при тех же условиях

$$s = 1 - \frac{\omega_k}{\omega_0} + \frac{\kappa_{U1}^2 \mu_{kn} - \kappa_3}{\kappa_{U1}^2 \mu_{kn} - 1} \left( \frac{\omega_n - \omega_k}{\omega_0} \right) \left( 1 - e^{-\frac{t}{T_3}} \right). \quad (20)$$

Максимальное превышение температуры обмотки статора в конце третьего участка разгона электродвигателя

$$\tau_{m3} = \left( \frac{1}{\alpha} + \tau_{m2} \right) e^{\frac{3\alpha r_0 P_3}{c}} - \frac{1}{\alpha}. \quad (21)$$

Импульс квадрата действующего значения пускового электрического тока на третьем участке

$$P_3 = \int_{t_2}^{t_3} I_{ПЗ}^2 dt \approx \frac{I_{n2}^2 + I_{n3}^2}{2} t_3, \quad (22)$$

где  $I_{ПЗ}$  – действующее значение пускового электрического тока в конце третьего участка, А.

Скорость теплового износа изоляции в послепусковой период опишется выражением

$$\varepsilon = \varepsilon_n e^{\left( \frac{1}{\Theta_n} - \frac{1}{\tau_n (1 - e^{-t/T}) + \tau_m e^{-t/T} + \vartheta_{cp} + 273} \right)}, \quad (23)$$

где  $\varepsilon$  – текущая скорость теплового износа изоляции, бч/ч;

$\varepsilon_n$  – номинальная скорость теплового износа изоляции, бч/ч;

$B$  – параметр, характеризующий класс изоляции, К;

$T$  – постоянная времени нагрева электродвигателя, с;

$\Theta_n$  – абсолютная номинальная температура изоляции, К;

$\vartheta_{cp}$  – температура окружающей среды, °С.

Представим графики остывания обмотки электродвигателя (рис.2) и скорости теплового износа изоляции в послепусковой период (рис.3).

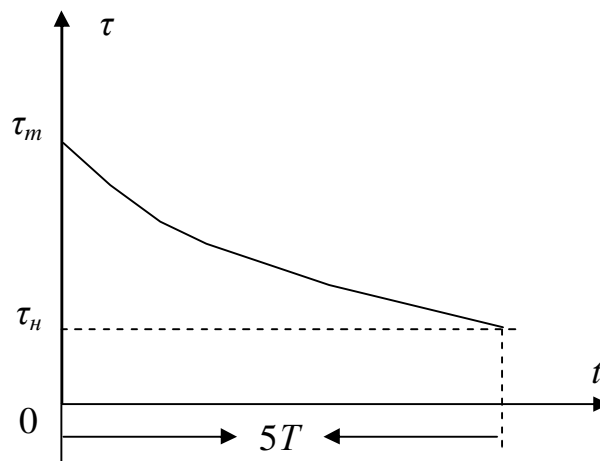


Рис. 2.

Дополнительный тепловой износ изоляции в послепусковой период происходит на интервале времени от нуля до  $5T$  и может быть найден по выражению

$$E_{\text{дон}} = \int_0^{5T} \varepsilon dt - 5T \varepsilon_n, \quad (24)$$

где  $\varepsilon$  – описывается (23).

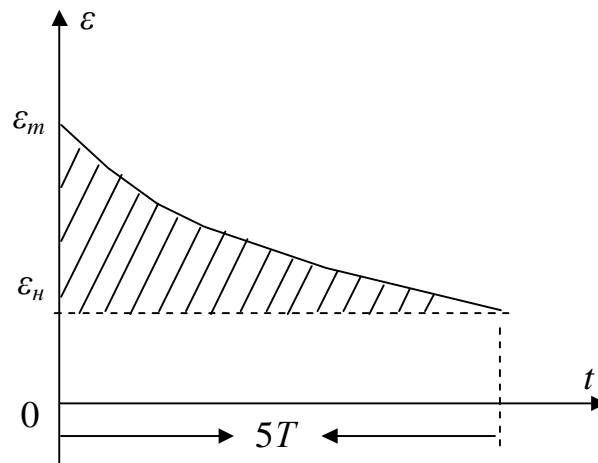


Рис. 3.

Количественный анализ проведем на примере электродвигателя типоразмера 4А100S2У3 со следующими каталожными данными [2]:  $P_{2н} = 4$  кВт;  $\eta_n = 0,865$ ;  $\cos\varphi_n = 0,89$ ;  $R'_1 = 1,509$  Ом;  $X'_1 = 1,537$  Ом;  $R''_2 = 1,006$  Ом;  $X''_2 = 2,767$  Ом;  $R_1 = 1,485$  Ом;  $X_1 = 1,513$  Ом;  $X_\mu = 95$  Ом;  $U_n = 220$  В;  $s_n = 0,033$ ;  $s_k = 0,28$ ;  $s_m = 0,8$ ;  $\mu_{mn} = 2,0$ ;  $\mu_{mn} = 1,6$ ;  $\mu_{kn} = 2,5$ ;  $r_{1(20)} = 1,19$  Ом;  $G_m = 3,78$  кг;  $\frac{I}{M_n} = 0,015$ .

Зависимость дополнительного теплового износа изоляции асинхронного электродвигателя в послепусковой период в функции импульса квадрата пускового тока представлена на рис. 4.

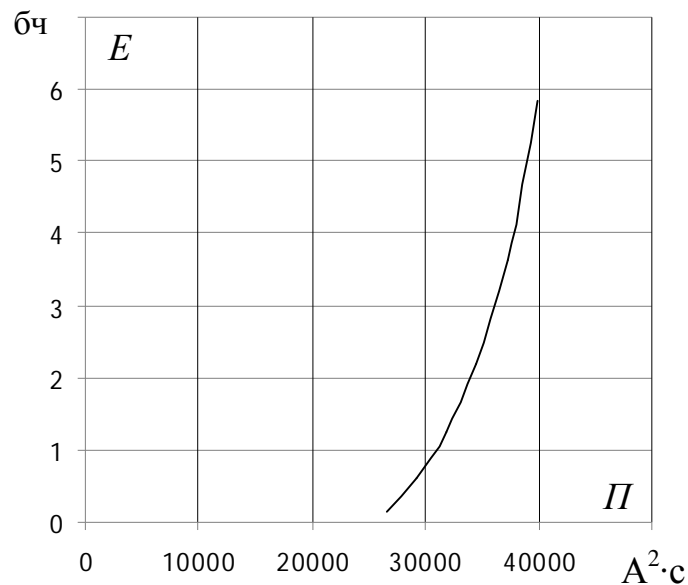


Рис. 4.

*Выводы:*

1. В послепусковой период наблюдается значительный дополнительный тепловой износ изоляции.
2. Полученная зависимость позволяет выбрать уставку импульса квадрата пускового тока предполагаемого устройства, облегчающего пусковой режим электродвигателя.

## Литература

1. *Овчаров В.В.* Эксплуатационные режимы работы и непрерывная диагностика электрических машин в сельскохозяйственном производстве / *В.В. Овчаров.* – К.: Изд-во УСХА, 1990. – 168 с.
2. Асинхронные двигатели серии 4А; Справочник / [А.Э. Кравчик, М.М. Шлаф, В.И. Афонин, Е.А. Соболенская]. – М.: Агропромиздат, 1982. – 504 с.

**АНАЛИТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАСХОДА РЕСУРСА  
ИЗОЛЯЦИИ АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ В  
ПОСЛЕПУСКОВОЙ ПЕРИОД**

Овчаров С.В., Стребков А.А.

*Анотація*

Досліджені витрати ресурсу ізоляції асинхронного електродвигуна в післяпусковий період в умовах порівнянної потужності.

**ANALYTICAL INVESTIGATION OF RESOURCE ISOLATION  
EXPENSE OF ASYNCHRONOUS MOTOR IN AFTERSTARTING  
PERIOD**

*S. Ovcharov, A. Strebkov*

*Summary*

Expense of resource isolation of asynchronous motor in afterstarting period with conditions of commensurate power is investigated.