

## ОЦЕНКА ВЗАИМОВЛИЯНИЯ ИЗМЕНЕНИЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ДВИГАТЕЛЕЙ РУДНИЧНОГО ЭЛЕКТРОВОЗА И ПИТАЮЩЕЙ КОНТАКТНОЙ СЕТИ

*Синчук О.Н., д.т.н., проф., Юрченко О.Н., д.т.н.,*

*Синчук И.О., инженер, Ключка А.С., инженер,*

*Лозовой Д.Ю., инженер*

*Кременчугский государственный университет имени Михаила Остроградского*

*ул. Первомайская, 20, г. Кременчуг, 39614*

*E-mail: [seem@polytech.poltava.ua](mailto:seem@polytech.poltava.ua)*

**Введение.** Условия и режимы функционирования тяговых электротехнических комплексов рудничных контактных электровозов имеют весьма существенную специфику, удовлетворение или неудовлетворение которой является определяющим моментом в комплексе эффективности функционирования электрифицированной подвижной единицы в подземных условиях [1].

**Цель исследования.** Оценка уровня влияния изменения параметров тяговых электрических двигателей постоянного тока рудничных электровозов на протекание электромагнитных процессов в питающей контактной сети.

**Актуальность исследования.** Анализ проблемы электромагнитной совместимости питающей контактной сети (ПКС) и тягового электрического привода (ТЭП) с контурами импульсного преобразования электрической энергии не может быть полным без оценки уровня влияния на протекание электромагнитных процессов изменений параметров тяговых электрических двигателей. Анализ известных авторам изысканий в данном направлении лишь в очередной раз подтвердил необходимость проведения таких исследований [1, 2, 3].

Вместе с тем, своей оценки ждет факт влияния изменяющихся в результате псевдоаварийных режимов или после ремонта параметров ТЭД на режимы работы всего комплекса ТЭП и на электрические параметры ПКС.

**Материалы и результаты исследования.** Проанализируем процессы: питающая контактная сеть – тяговые электродвигатели постоянного тока (рис. 1).

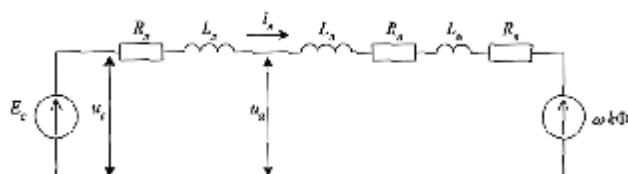


Рисунок 1 – Схема замещения системы “питающая контактная сеть – двигатель постоянного тока”

Известно, что ТЭД постоянного тока с

последовательным возбуждением описывается следующей системой уравнений [1]:

$$\begin{cases} u_{я} = i_{я}(R_{я} + R_{в}) + \frac{di_{я}}{dt}(L_{я} + L_{в}) + \kappa\Phi(i_{я})\omega, \\ i_{я}\kappa\Phi(i_{я}) - (M_{см} + M_{хх}) = J_{\Sigma} \frac{d\omega}{dt}, \end{cases} \quad (1)$$

где  $u_{я}$  - напряжение питания двигателя;  $i_{я}$  - ток якорной цепи двигателя;  $R_{я}, R_{в}$  - активные сопротивления обмоток якоря и возбуждения;  $L_{я}, L_{в}$  - индуктивности обмоток якоря и возбуждения;  $\kappa\Phi$  - коэффициент потока;  $M_{см}$  - момент сопротивления на валу;  $M_{хх}$  - момент холостого хода.

Питающую сеть для данных условий можно представить как линию с сосредоточенными параметрами – активными сопротивлением и индуктивностью. Тогда величина напряжения ПКС определится уравнением:

$$u_c = u_{я} + i_{я}R_l + L_l \frac{di_{я}}{dt}, \quad (2)$$

где  $R_l$  - активное сопротивление питающей линии;  $L_l$  - индуктивность питающей линии.

Структурная схема ТЭД постоянного тока представлена на рис. 2.

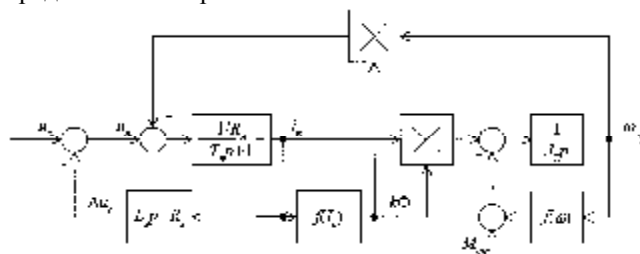


Рисунок 2 – Структурная схема тягового электрического двигателя постоянного тока последовательного возбуждения

Влияние изменения параметров электрической машины на напряжение якоря рассмотрим двумя способами:

1) с использованием функции чувствительности:

$$S_b^Y = \frac{\partial Y}{\partial b} \frac{b}{Y}, \quad (3)$$

где  $b$  - параметр, влияние которого определяется;  $\Psi$  - функция, для которой определяется степень влияния параметра  $b$ .

2) по оценке чувствительности исходного состояния:

$$S_Y = \frac{Y - Y_{\text{баз}}}{Y_{\text{баз}}}, \quad (4)$$

где  $Y$  - значение функции при текущем значении параметра  $b$ ;  $Y_{\text{баз}}$  - значение функции при базовом (номинальном) значении параметра  $b$ .

Определение степени влияния изменения параметров на выходные параметры необходимо выполнить как в статическом режиме, так и в динамическом.

В статическом режиме чувствительность может быть определена на основе уравнений механической и электромеханической характеристик.

В динамическом режиме  $U_{\text{я}}$ ,  $I_{\text{я}}$ ,  $w$  определяются на основе решения уравнений (3), (4). При этом в качестве функционала принимается максимальное значение выходных параметров:

$$Y_U = \max(U_{\text{я}}(t)); Y_I = \max(i_{\text{я}}(t)); Y_w = \max(w(t)).$$

В динамическом режиме функция чувствительности вычисляется следующим образом:

- задаем диапазон изменения параметра, например,  $R_{\text{я}} = \{R_{\text{я}0}, R_{\text{я}1}, \dots, R_{\text{я}i}, R_{\text{я}N}\}$ ;
- находим решение системы уравнений (1) в численном виде  $u_{\text{я}}(t)$ ,  $i_{\text{я}}(t)$ ,  $w(t)$  и определяем максимальное значение  $U_{\text{я} \max i}$ ,  $i_{\text{я} \max i}$ ,  $w_{\max i}$  при каждом значении параметра, например,  $R_{\text{я}i}$ ;
- по формулам (3), (4) вычисляем значение функции чувствительности при каждом значении параметра, например,  $R_{\text{я}i}$ :

$$S_{bi}^Y = \frac{\partial Y}{\partial b} \frac{b}{Y} = \frac{(Y_i - Y_{i-1})b_i}{(b_i - b_{i-1})Y_i}, \quad \text{например, при}$$

оценке изменения напряжения якоря при изменении сопротивления якоря

$$S_{R,i}^U = \frac{(U_{\text{я} \max i} - U_{\text{я} \max i-1})R_{\text{я}i}}{(R_{\text{я}i} - R_{\text{я}i-1})U_{\text{я} \max i}}$$

в  $i$ -той точке;

$$S_Y = \frac{Y - Y_{\text{баз}}}{Y_{\text{баз}}}, \quad \text{например, при оценке}$$

изменения напряжения якоря

$$S_{U,i} = \frac{U_{\text{я} \max i} - U_{\text{я} \text{баз}}}{U_{\text{я} \text{баз}}}.$$

Функции чувствительны для статического режима:

а) к изменению сопротивления якоря

$$S_R^U = \frac{\partial U_{\text{я}}}{\partial R} \frac{R}{U_{\text{я}}} = \frac{I_{\text{я}}(R_{\text{я}} + R_{\text{г}})}{I_{\text{я}}(R_{\text{я}} + R_{\text{г}}) + \kappa \Phi w};$$

$$S_R^I = \frac{\partial I_{\text{я}}}{\partial R} \frac{R}{I_{\text{я}}} = \frac{-U_{\text{я}} + \kappa \Phi w}{(R_{\text{я}} + R_{\text{г}})^2} \cdot \frac{R_{\text{я}} + R_{\text{г}}}{U - \kappa \Phi w} = -1;$$

$$S_R^w = \frac{\partial w}{\partial R} \frac{R}{w} = \frac{-I_{\text{я}}(R_{\text{я}} + R_{\text{г}})\kappa \Phi}{U_{\text{я}} - I_{\text{я}}(R_{\text{я}} + R_{\text{г}})};$$

б) к изменению коэффициента потока

$$S_K^U = \frac{\partial U_{\text{я}}}{\partial \kappa \Phi} \frac{\kappa \Phi}{U_{\text{я}}} = \frac{\kappa \Phi w}{I_{\text{я}}(R_{\text{я}} + R_{\text{г}}) + \kappa \Phi w};$$

$$S_K^I = \frac{\partial I_{\text{я}}}{\partial \kappa \Phi} \frac{\kappa \Phi}{I_{\text{я}}} = \frac{\kappa \Phi w}{U - \kappa \Phi w};$$

$$S_K^w = \frac{\partial w}{\partial \kappa \Phi} \frac{\kappa \Phi}{w} = -\kappa \Phi.$$

Для примера рассмотрим влияние изменения параметров реального для вагона метрополитена ТЭД последовательного возбуждения ДК-117 с параметрами: номинальная мощность 110 кВт; номинальный ток 330 А; номинальное напряжение 375 В; номинальная частота вращения 1480 об/мин; сопротивление обмотки якоря 0,028 Ом; сопротивление обмотки возбуждения 0,312 Ом.

Расчетные параметры ТЭД:

$$\text{- коэффициент потока } \kappa \Phi = \frac{U_{\text{я}} - I_{\text{я}} R_{\text{я}}}{w} = 2,293$$

$B \cdot c$ ;

$$\text{- номинальный момент } M = \kappa \Phi I_{\text{я}} = 756,69 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Параметры питающей линии: материал – медь; длина – 1 км; удельная проводимость меди – 31,7 м/(Ом·мм<sup>2</sup>); погонного метра – индуктивность 1,3 мГн/км; сечение проводников 240 мм<sup>2</sup>; расчетное сопротивление линии  $R_{\text{л}} = 0,131$  Ом.

Принимаем два случая питания линии: прямой пуск при ступенчатом изменении напряжения

$$u_c(t) = \begin{cases} 0, & t \leq 0 \\ E_c, & t > 0 \end{cases} \quad \text{и пуск с линейным заданием}$$

$$\text{напряжения } u_c(t) = \begin{cases} 0, & t \leq 0 \\ \frac{E_c}{0,5} \cdot t, & t > 0 \end{cases}$$

Результаты исследований при изменении параметров приведены на рис. 3 – 8, где а) - функция чувствительности в динамическом режиме; б) - функция чувствительности в статическом режиме; в) - относительное изменение в динамическом режиме; г) - относительное изменение в статическом режиме. На рисунках обозначены — частота вращения; ..... - ток якоря; - - - - - напряжение якоря.

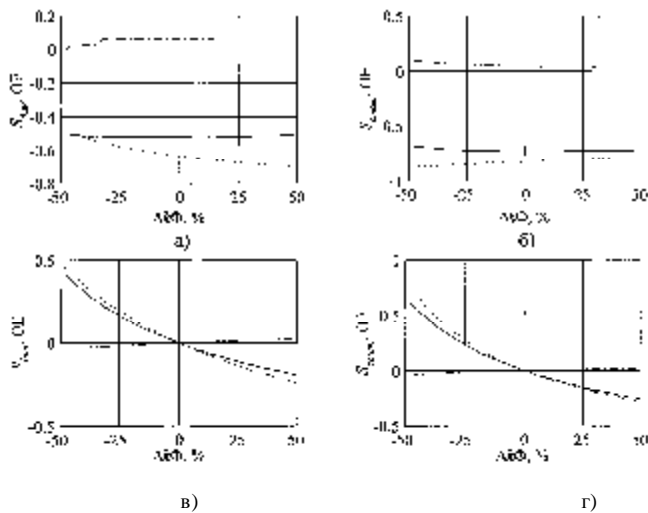


Рисунок 3 – Влияние изменения потока при ступенчатом задании напряжения

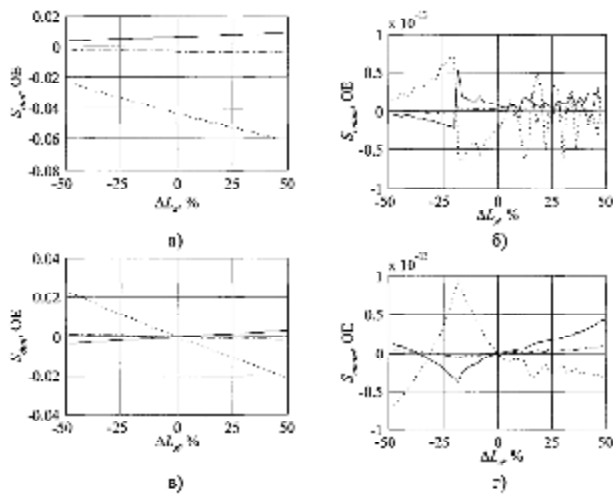


Рисунок 4 – Влияние изменения индуктивности при ступенчатом задании напряжения

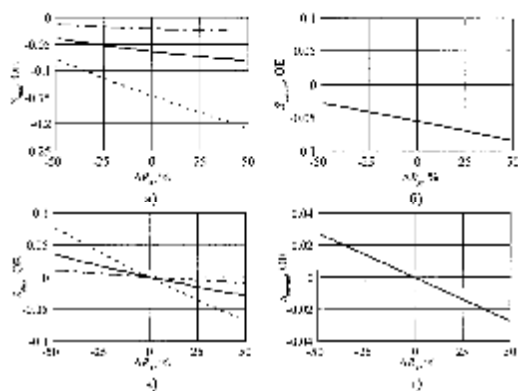


Рисунок 5 – Влияние изменения сопротивления якоря при ступенчатом задании напряжения

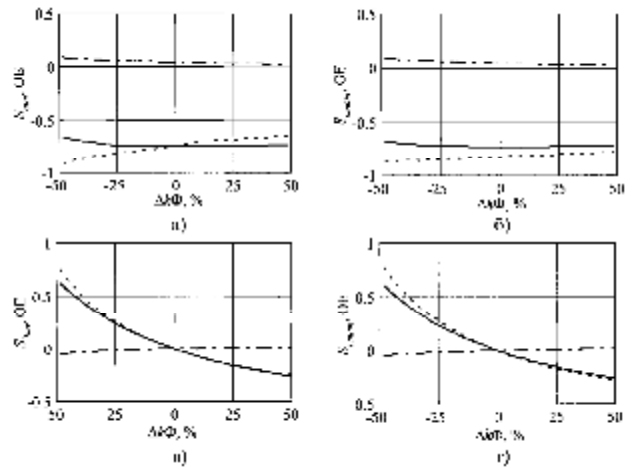


Рисунок 6 – Влияние изменения потока при линейном задании напряжения

Анализ полученных зависимостей и выполненные вычислительные эксперименты свидетельствуют о следующем:

- изменение индуктивности обмотки якоря  $\pm 50\%$  от номинального значения, что весьма нереально, приводит к изменению напряжения якоря и скорости вращения до 1%; а тока якоря до 6...3% в динамических режимах;

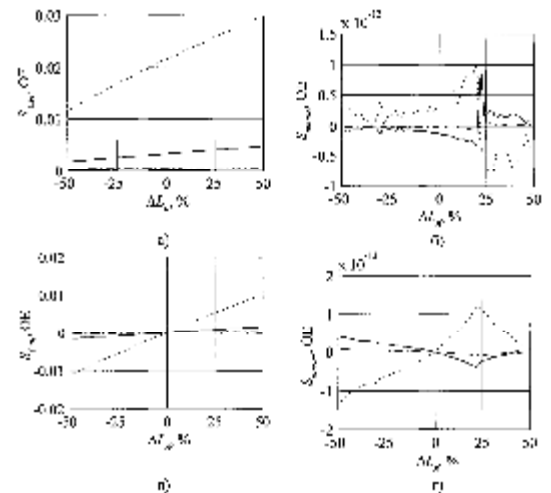


Рисунок 7 – Влияние изменения индуктивности якоря при линейном задании напряжения

- в статическом режиме изменение индуктивности в анализируемых пределах не влияет на напряжение и ток якоря, а также скорость вращения;

- изменение сопротивления обмотки якоря  $\pm 10\%$  от номинального значения в динамическом режиме приводит к изменению тока якоря – 20...10%; скорости  $\pm 5\%$ , изменение напряжения составляет не менее 1%;

- в статическом режиме изменение сопротивления приводит к изменению скорости  $\pm 5\%$ , остальные параметры не изменяются;

- изменение коэффициента потока  $\pm 50\%$  от номинального значения приводит к изменению напряжения якоря на  $\pm 1,5\%$  как в статическом,

так и в динамическом режимах, а изменение тока якоря и частоты вращения находится в диапазоне  $\pm 50\%$ .

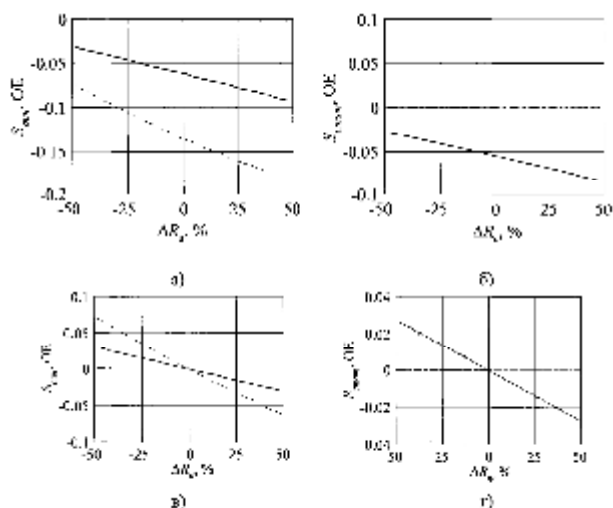


Рисунок 8 – Влияние изменения сопротивления якоря при линейном задании напряжения

**Выводы.** Из комплекса изменяемых параметров ТЭД в результате псевдоаварийного или послеремонтного изменения параметров последнего, наиболее существенные влияния на ПКС оказывает изменение коэффициента потока ТЭД.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Синчук О.Н., Борисов Б.П., Беридзе Т.М., Серебренников В.М. Математическое моделирование помехообразования в каналах шахтной высокочастотной связи. – К.: Наукова думка. – 1993. – 194 с.
2. Полупроводниковые преобразователи электрической энергии в структурах электроприводов. Схемотехника и принципы управления: Учебное пособие / [Синчук И.О., Чернышев А.А., Киба И.И., Пасько О.В., Ключка О.Е., Мельник О.Е.]; под ред. Синчук О.Н. – Кременчуг: ПП Щербатых О.В., 2008. – 88 с.
3. Синчук О.Н. Проблемы и пути их преодоления по защите каналов связи и автоматики от радиопомех, генерируемых ШИП тягового электропривода / Синчук О.Н., Лозовой Д.Ю., Мельник О.Е., Сушко Д.Л. // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету імені Михайла Остроградського. – 2008(48). - №1. Ч. 1. – С. 16-18.