

## ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСАХ С IGBT- ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯМИ ДВУХОСНЫХ ПРОМЫШЛЕННЫХ ЭЛЕКТРОВЗОВ

*Синчук О.Н., д.т.н., проф., Якимец С.Н., инж., Скапа Е.И. студ.*

*Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского*

*ул. Первомайская, 20, 39600, г. Кременчуг, Украина*

*E-mail: [seem@kdu.edu.ua](mailto:seem@kdu.edu.ua)*

*Захаров В.Ю., к.т.н.*

*Учебно-консультационный центр Национального транспортного университета*

*ул. Отчизны 9, г. Кривой Рог, 50000, Украина*

*Синчук И.О., к.т.н.*

*Криворожский технический университет*

*ул. XXII Партсъезда 11, г. Кривой Рог, 50027, Украина*

Приведены результаты исследований электромагнитных переходных процессов в тяговых электротехнических комплексах постоянного тока с IGBT-преобразователями промышленных двухосных электровозов. Дана оценка ходу протекания процессов в функции параметров тяговых двигателей и фильтрокомпенсирующего устройства.

**Ключевые слова:** двухосный электровоз, электротехнический комплекс, тяговый электропривод, IGBT-преобразователь.

**Введение.** Электрифицированный транспорт Украины, и особенно его промышленные виды из года в год повышают объемы потребления электрической энергии [1]. Одиозной и требующей своего разрешения является эта проблема для горнометаллургической отрасли страны [2].

**Анализ предыдущих исследований.** Электрифицированные виды транспорта горнометаллургического комплекса страны, потребляют до 18% от всей электрической энергии, потребляемой технологическим циклом производства этих предприятий. При этом, в силу неэффективности эксплуатируемых образцов электровозов с энергонезаконочными видами тяговых электротехнических комплексов (ТЭТК), потребление электрической энергии этими видами транспорта ежегодно увеличивается [2].

В последние 5–10 лет созданы экспериментальные образцы новых перспективных типов электровозов с современными энергоэффективными системами управления ТЭТК [3, 4].

Вместе с тем, объективно существующие специфические условия эксплуатации электровозов требуют, в свою очередь, разрешения, в частности, проблем устойчивости работы всего тягового комплекса при несанкционированном исчезновении напряжения питания тяговых двигателей, в том числе при разрыве контакта: контактный провод – пантограф (токоъемник) электровоза [3]. Последний факт отрицательно влияет на устойчивость, надежность работы и тяговые координаты электровозов, т.е. без принятия соответствующих мер требуемой эффективности функционирования ТЭТК, а значит и электровоза в целом, не достичь.

**Цель работы.** Анализ электромагнитных переходных процессов в тяговых электротехнических комплексах промышленных двухосных электровозов при локальном исчезновении напряжения питания на зажимах электрических двигателей (ТЭД).

**Материал и результаты исследования.** Как показывают результаты исследований в условиях состояния контактных сетей систем электровозного транспорта горнометаллургических предприятий процесс ухудшения контакта между контактным проводом (КП) и пантографом электровоза носит хаотический сложноподчиненный характер по времени и частоте отрывов [3, 4]. Вместе с тем, анализ свидетельствует о том, что максимальной по количеству частотой отрывов можно считать частоту с продолжительностью 7–8 с [4].

Все те же исследования [4] убеждают в факте, что данные одиозные моменты, приводя к появлению импульсов наднапряжений, провоцируют также комплекс псевдоаварийных и аварийных режимов функционирования ТЭТК.

Последние, в свою очередь, вызывают к необходимости значительной вариации возможных значений времени настройки системы защиты ТЭТК для обеспечения оптимально-возможной бесперебойности функционирования тягового комплекса в конкретном (адресном) случае псевдоаварийного режима. Безусловно, это в свою очередь, не может не влиять отрицательно на необходимость усложнения структуры системы управления (СУ) и микропроцессорной программы ее управления, что усложняет схемотехнику всего комплекса и снижает его надежность.

С целью предотвращения данного явления большинство разработчиков идут по пути усложнения схемотехнических решений в направлении поддержания на заданном уровне напряжения питания ТЭТК. Для условий промышленных двухосных электровозов с их минимальными конструктивными габаритными показателями это не всегда эффективно, а в большинстве случаев вообще неприемлемо. Однако новый виток исследований [4] открывает возможность превентивного устранения последствий анализируемого несанкционированного и не-

продолжительного во времени исчезновения напряжения питания тяговых модулей (ТЭТМ) путем выбора соответственно необходимых параметров емкости фильтрокомпенсирующего устройства.

Однако незащищенность ТЭТК от последствий исчезновения напряжения питания в отдельно взятых блоках многодвигательного тягового комплекса сказывается как на обобщенных тяговых координатах электровозосостава в целом, так и на отдельных слагаемых блоках в частности. Структурно управление по системе многих единиц состоит из двух тяговых электротехнических комплексов (ТЭТК-1, ТЭТК-2) (рис. 1).

В свою очередь, каждый ТЭТК состоит из двух тяговых электротехнических модулей (ТЭТМ-1,2 – ТЭТМ-3,4), содержащих индивидуальные преобразователи напряжения (ШИП-1 – ШИП-4), общую на каждый модуль систему управления (СУ1 – СУ2), и четырех тяговых электрических двигателей (ТЭД-1

– ТЭД-4).

На основе вышеприведенной структуры ТЭТК с управлением по системе многих единиц построена компьютерная модель (рис. 2), на которой моделировалось поведение комплекса при различных возможных ситуациях, связанных с исчезновением питания.

При этом принимались следующие допущения:

- скорость электровозосостава увеличивается плавно по линейному закону регулирования и изменяется пропорционально частоте вращения тяговых двигателей;
- масса состава постоянна и неизменна на этапах исследований;
- параметры тяговых электрических двигателей остаются неизменными;
- питания тяговых двигателей начинается с уровня напряжения:  $U = 0$ ;

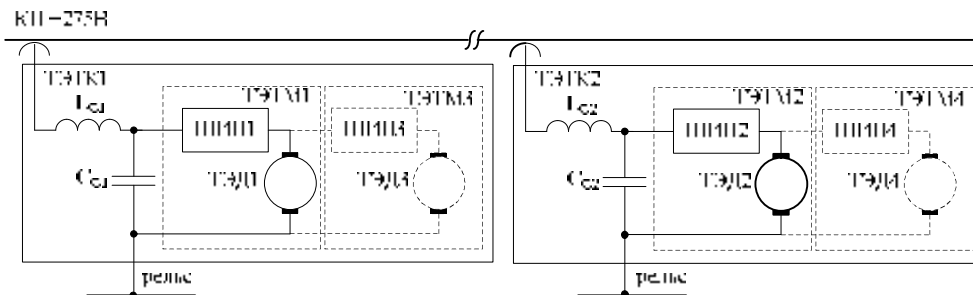


Рисунок 1 – Упрощенная электрическая схема тягового электротехнического комплекса двухосных электровазов с управлением по системе многих единиц

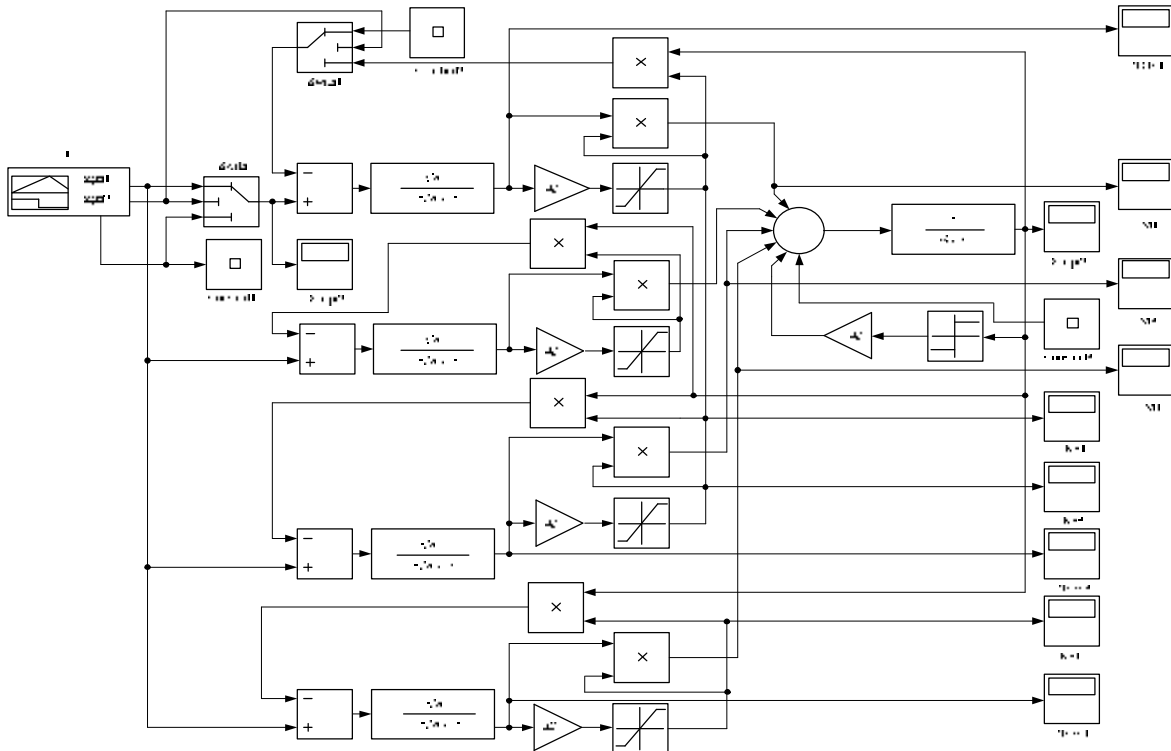


Рисунок 2 – Компьютерная модель тягового электротехнического комплекса

– параметры каждого ТЭД и ТЭТМ принимаются неизменными от уровня нагрузки.

Контролируется значение электромагнитного момента ( $M$ ), значение тока ( $i$ ), частоты вращения ( $\omega$ ) ТЭД и потока ( $\Phi$ ). Все значения, которые опре-

делялись в процессе моделирования, представлены на графиках (машинограммах) в относительных единицах.

Коэффициент сцепления колес с рельсами принимался постоянным в соответствии с известными рекомендациями [4]. Скорость движения электровозосостава ( $V_{\text{сост}}$ ) рассчитывалась в функции частоты вращения работающих тяговых двигателей ( $\omega_{\text{дв}}$ ), диаметра колес ( $d_{\text{кол}}$ ) и передаточного числа редуктора ( $i_{\text{ред}}$ ).

График имитации напряжения питания  $U_M$  и моментов его исчезновения показан на рис. 3,а. Анализировался процесс движения электровозосостава с момента разгона, который осуществляется плавно, как показано на рис. 3,б.

С помощью блока 1 в компьютерной модели ТЭТК имитировалось исчезновение (появление) напряжения питания на отдельно взятых тяговых двигателях (ТЭД-1–ТЭД-4) с продолжительностью 6–10 с и 19–23 с (рис. 3).

Согласно графику (рис. 3) имитировалось, что в одном (из четырех) или нескольких ТЭД исчезает напряжение питания.

Переходные процессы в ТЭТМ анализировались во время пуска при одиозно скачкообразном – 20% задании частоты вращения, т.к. это один из самых тяжелых и показательных режимов. Среднее время расчета переходных процессов – 0,5 с.

Время отрыва пантографа от контактного провода 0,3 с. Время подключения пантографа к троллею после отрыва 0,325 с. Расчет проводится в именованных единицах, например  $.22000E+03 = 220$ .

Переходные процессы в системе ТЭТК ШИП описываются уравнениями:

$$U_d = f(U_{fc}, \gamma, f_{IBG}); \quad (1)$$

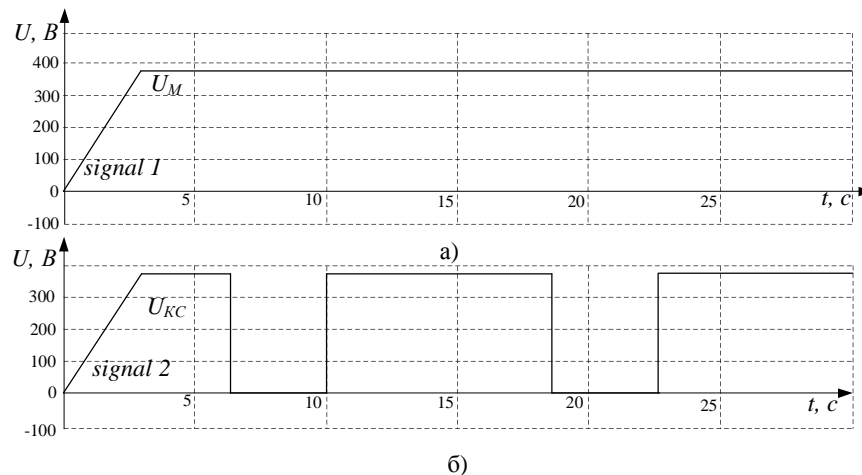


Рисунок 3 – Машинограммы уровней напряжения питания на тяговых электрических двигателях тягового комплекса: а – имитация присутствия напряжения питания; б – имитация исчезновения напряжения питания на тяговых электрических двигателях

$$K_f = f(I_d);$$

$$\frac{dI_d}{dt} = \frac{U_d - I_d \cdot R_d - \omega \cdot K_f}{L_d};$$

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{I_d \cdot K_f - M_C}{J};$$

$$\frac{dI_{fl}}{dt} = \frac{U_C - I_{fc} \cdot R_f - U_{fl}}{L_{fl}};$$

$$\frac{dU_{fc}}{dt} = \frac{I_{fl} - I_d}{C_f}.$$

где  $\gamma$  – скважность ШИП;  $T = \frac{1}{f_{\text{ШИП}}}$  – период

ШИП;  $K_f$  – магнитный поток тягового двигателя.

Результаты моделирования представлены на рис. 5 – 9.

На рис. 5 приведены переходные процессы по току  $I_d$  и частоте вращения  $\omega$ .

Варианты параметров сетевого фильтра приведены в табл. 1.

Применение фильтра варианта «а»; показывает, что токи  $I_{da}$ ,  $I_{db}$ ,  $I_{d6}$  при пуске имеют экспоненциальный характер с перерегулированием и достигают значения 370 А. Частота вращения  $\omega_a$  при пуске имеет экспоненциальный характер и стремится к величине  $\omega = 140 \text{ с}^{-1}$ . При отрыве пантографа от контактной сети (в момент времени 0,3 с) имеет место кратковременное снижение тока до 100 А, затем увеличение его значения до 222 А, при этом наблюдается увеличение частоты вращения  $\omega$  после подключения пантографа к сети.



Рисунок 4 – Расчетная схема тягового электротехнического модуля электротехнического комплекса двухосного электровоза

Таблица 1 - Параметры сетевого фильтра

Вариант	Индуктивность, $L_D$ , (мкГн)	Емкость, $C_f$ , (нФ)	Сопротивление, $R_f$ , (мкОм)
«а»	25	10	35
«б»	60	30	25
«в»	80	10	10

Применение фильтра варианта «б» (табл.1) приводит к изменению характера переходного процесса по току: увеличивается просадка тока до 100 А, снижается его величина при отрыве пантографа 170 А. Увеличивается колебательность переходного процесса после подключения к тяговой сети и снижения тока до 100 А.

Использование фильтра варианта «в» (табл.1) приводит к апериодическому процессу по току  $I_{дф}$  и частоте вращения  $\omega_e$  с увеличением уровня тока до 250 А при отрыве пантографа и апериодическому его снижению до установившегося значения 140 А. Приращение частоты вращения при подключении пантографа больше, чем в случаях вариантов «а» и «б».

На рис. 6 приведены переходные процессы по току  $I_d$  и току фильтра  $I_{дф}$ . Характер переходных процессов токов фильтров вариантов «а», «б» и «в» идентичен. Различие заключается в амплитуде бросков тока при включении привода, при отрыве пантографа и подключении пантографа к тяговой сети. При использовании фильтра варианта «а» максима-

льное значение тока достигает величины – 1750 А, в фильтре варианта «б» – 1150 А, в фильтре варианта «в» бросок тока достигает – 5400 А.

На рис. 7 приведен переходный процесс по току  $I_d$  и напряжению  $U_{fc}$  на характеристики фильтров по вариантам «а», «б» и «в». Во время отрыва пантографа от сети максимальные значения напряжения на емкости достигают значений для фильтра варианта «а»  $U_{fca}=425$  В, для фильтра варианта «б»  $U_{fca}=380$  В, для фильтра варианта «в»  $U_{fca}=440$  В.

На рис. 8 отображены переходные процессы по напряжению  $U_d$  и напряжению  $U_{fc}$  фильтров, построенных по вариантам «а», «б», «в». На рис. 9 приведены переходные процессы по напряжению  $U_{max}$  и напряжению  $U_{fc}$  фильтра, построенного по варианту «б».

Значения расчетных переменных координат анализируемого тягового электропривода с ШИМ уровня напряжения на тяговых двигателях сведены в табл.2.

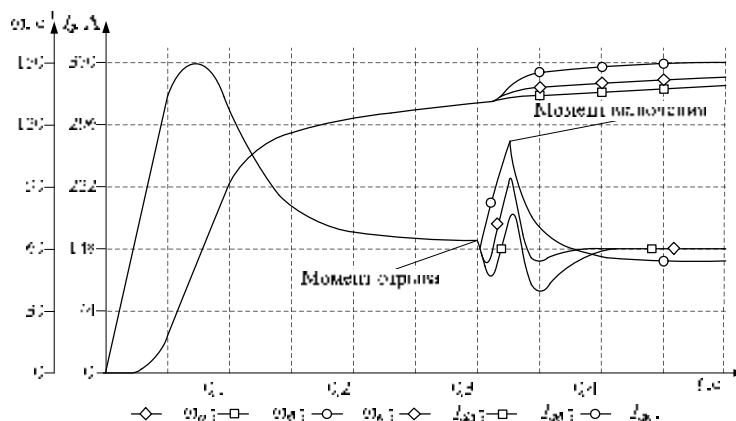


Рисунок 5 – Переходный процесс в тяговом двигателе (ТЭД-1) по току и частоте вращения

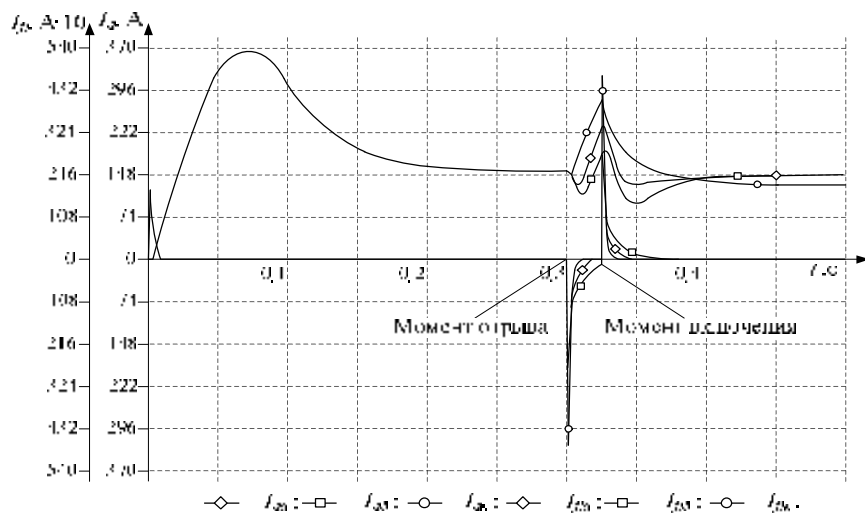


Рисунок 6 – Переходный процесс по токам тягового двигателя  $I_d$  и дросселе фильтра  $I_f$

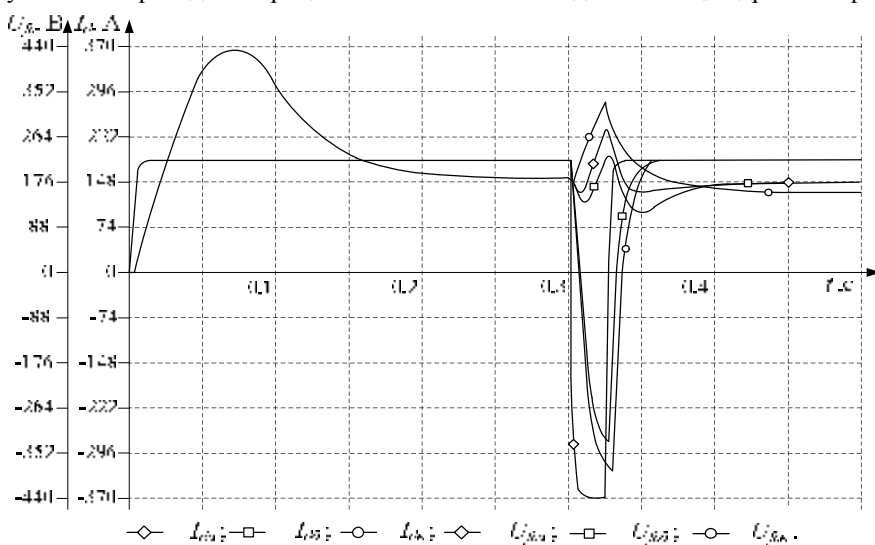


Рисунок 7 – Переходный процесс по току тягового двигателя  $I_d$  и напряжению на конденсаторе фильтра  $U_{fc}$

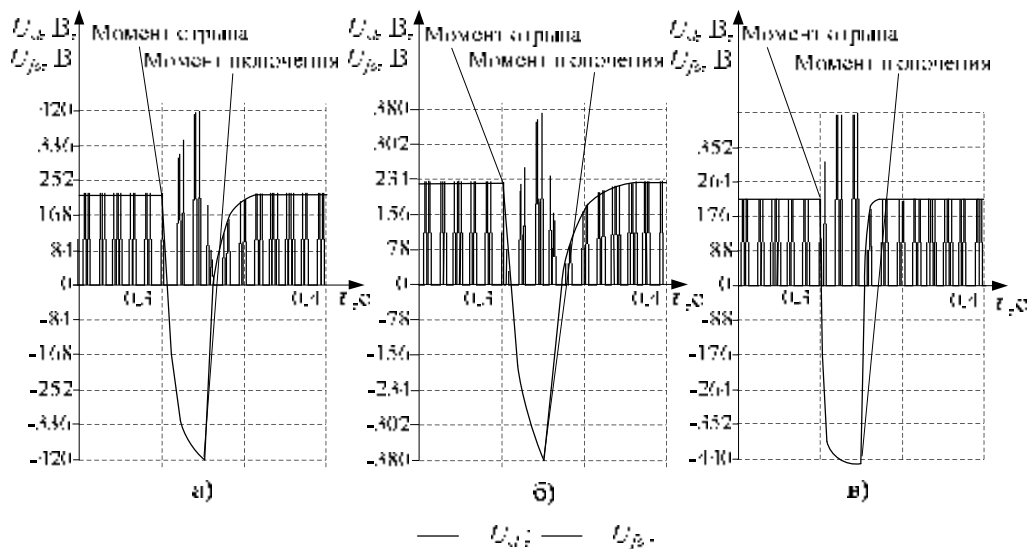


Рисунок 8 – Переходные процессы по напряжению тягового двигателя  $U_d$  и напряжению на конденсаторе фильтра  $U_{fc}$

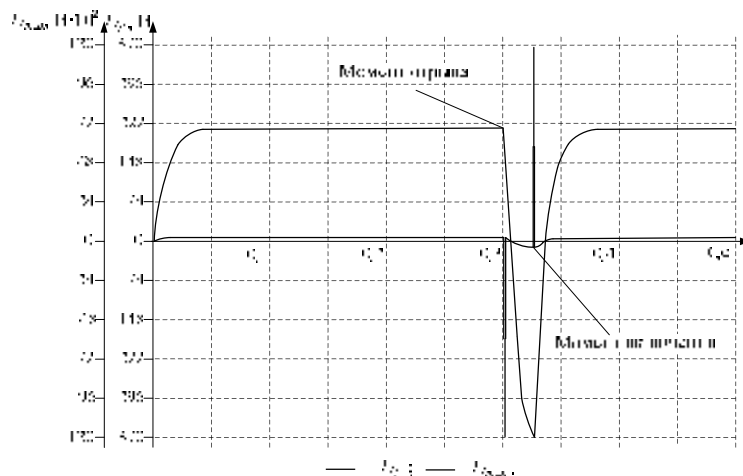


Рисунок 9 – Переходные процессы по напряжению тягового двигателя  $U_d$  и напряжению на конденсаторе фильтра  $U_{fc}$

Таблица 2 - Расчетные переменные координаты

Координата	Фильтр		
	Вариант «а»	Вариант «б»	Вариант «в»
Переходный процесс	колебательный	колебательный с перерегулированием	апериодический
Амплитуда тока $I_d$ , А	74	45	149
Частота вращения $\omega$	140	135	150
Ток конденсатора $I_{fc}$ , А	178	115	540
Напряжение на конденсаторе $U_{fc}$ , В	425	380	440
Перенапряжение на конденсаторе $U_{max}$ , В	12000	12000	12000
Перенапряжение на ШИП, В	420	370	435

**Выводы.** 1. Параметры фильтра, определяемые согласно приведенных исследований, в значительной мере влияют на переходные процессы в системе ШИП-ТЭД при отрыве и обратном подключении пантографа электровоза к контактному проводу.

2. Во время переходных процессов при отрыве пантографа броски тока достигают значений: 74 А с фильтром по варианту «а»; 45 А с фильтром по варианту «б»; 149 А с фильтром по варианту «в». Броски тока в конденсаторе достигают значений: 178 А с фильтром по варианту «а»; 115 А с фильтром по варианту «б»; 540 А с фильтром по варианту «в». Напряжение на конденсаторе достигает значений: 425 В с фильтром по варианту «а»; 380 В с фильтром по варианту «б»; 440 В с фильтром по варианту «в». Максимальное значение напряжения в системе для всех фильтров 12000 В.

С учетом влияния коммутационных процессов максимальная частота вращения двигателя достигает значений: 140  $s^{-1}$  с фильтром по варианту «а»; 135  $s^{-1}$  с фильтром по варианту «б»; 150  $s^{-1}$  с фильтром по варианту «в».

3. Для тяговых модулей с IGBT-преобразователями и типовыми серийными двигателями типа ДТН-45 которые применяются на 14-ти тонных двухосных электровозах оптимальным следует считать фильтр варианта «б», с параметрами: индуктивность – 60 мкГн; емкость – 30 нФ; сопротивление – 25 мкОм поскольку он обеспечивает минимальные перегрузки по току и перенапряжения.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Энергоефективність та відновлювальні джерела енергії/ Під заг. ред. А.К. Шидловського. – К.: Українські енциклопедичні знання, 2007. – 560 с.
2. Азарян А.А., Вілкул Ю.Г., Капленко Ю.П., Караманиць Ф.І та ін. Комплекс ресурсо- і енергозберігаючих геотехнологій видобутку та переробки інеральної сировини, технічних засобів їх моніторингу із системою управління і оптимізації гірничорудних виробництв. – Кривий Ріг: Мінерал, 2006. – 219 с.
3. Синчук О.Н., Юрченко Н.Н., Чернышев А.А. и др. Комбинаторика преобразователей напряжения современных тяговых электроприводов рудничных электровозов/ Под ред. д.т.н. О.Н. Синчука. Научное издание НАН Украины. Институт электродинамики.– К.: 2006. – 250 с.
4. Синчук И.О., Пасько О.В. Исследование переходных процессов электромагнитных процессов в тяговом электроприводе переменного тока// Збірник наукових праць Дніпродзержинського державного політехнічного університету (технічні науки). Тематичний випуск «Проблеми автоматизованого електроприводу». Теорія і практика. – Дніпродзержинськ: ДДТУ, 2007. – С. 171–174.

Стаття надійшла 17.01.2011 р.  
Рекомендовано до друку к.т.н., доц.  
Некрасовим А.В.

## ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ ПЕРЕХІДНІ ПРОЦЕСИ У ТЯГОВИХ ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНИХ КОМПЛЕКСАХ ІЗ IGBT-ПЕРЕТВОРЮВАЧАМИ ДВООС- НИХ ПРОМИСЛОВИХ ЕЛЕКТРОВОЗІВ

*Сінчук О.Н., д.т.н., проф., Якимець С.М., інж., Скапа Є.І., студ.*

*Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського*

*вул. Первомайська, 20, 39600, м. Кременчук, Україна*

*E-mail: [seem@kdu.edu.ua](mailto:seem@kdu.edu.ua)*

*Захаров В.Ю., к.т.н.*

*Навчально-консультаційний центр Національного транспортного університету*

*вул. Вітчизни, 9, м. Кривий Ріг, 50000, Україна*

*Сінчук І.О., к.т.н.*

*Криворізький технічний університет*

*вул. XXII Партз'їзду, 11, м. Кривий Ріг, 50027, Україна*

Приведені результати досліджень електромагнітних перехідних процесів у тягових електротехнічних комплексах постійного струму IGBT-перетворювачами промислових двоосних електровозів. Дана оцінка ходу протікання процесів у функції параметрів тягових двигунів і фільтрокомпенсуючого пристрою.

**Ключові слова:** двоосний електровоз, електротехнічний комплекс, тяговий електропривод, IGBT-перетворювач.

## ELECTROMAGNETIC TRANSITIONAL PROCESSES IN ELECTROTECHNICAL COMPLEXES WITH IGBT-CONVERTERS OF BIAXIAL INDUSTRIAL ELECTRIC LO- COMOTIVES

*Sinchuk O., Doc. Sc. (Tech.), Prof., Yakimets S., Sen. Lect., Skapa E., stud.*

*Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyy National University*

*vil. Pershotravneva, 20, 39600, Kremenchuk, Ukraine*

*E-mail: [seem@kdu.edu.ua](mailto:seem@kdu.edu.ua)*

*Zaharov V., Cand. of Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*

*Teaching and consultation centre of National transport university*

*Vul. Vitchyzny, 9, 50000, Krivoi Rog, Ukraine*

*Sinchuk I., Cand. of Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*

*Krivorozhsky technical university*

*vil. XXII Partzjizdu, 11, 50027, Krivoi Rog, Ukraine*

The paper shows results of researches of electromagnetic in the direct current electrotechnical complexes with IGBT-converters of biaxial industrial electric locomotives. The estimation of a course of processes in the parametres function of traction motors and filter-compensative devices is given.

**Key words:** biaxial electric locomotive, electrotechnical complex, traction electric drive, IGBT-converter.