

Синчук О.Н. д-р техн. наук, Якимец С.Н., Скапа Е.И.

(Украина, Кременчугский национальный университет им. Михаила Остроградского)

Захаров В.Ю. канд. техн. наук,

(Украина, Кривой Рог, Учебно-консультационный центр Национального транспортного университета)

Синчук И.О. канд. техн. наук

(Украина, Криворожский технический университет)

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

ВВЕДЕНИЕ

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

АКТУАЛЬНОСТЬ ИССЛЕДОВАНИЙ

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

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

Вместе с тем, существующие объективно специфические условия эксплуатации этих комплексов 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 (токосъемник) электровоза [3]. Последний факт отрицательно влияет на устойчивость и надежности работы тягового комплекса, его тяговые координаты. То есть без принятия соответствующих мер требуемой эффективности функционирования ТЭТК не достичь.

ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЙ

Анализ электромагнитных процессов в тяговом электротехническом комплексе электровозов при локальном исчезновении напряжения на зажимах тяговых электрических двигателей.

МАТЕРИАЛЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Как показывают результаты исследований в условиях состояния контактных сетей систем электровозного транспорта горно-металлургических предприятий процесс ухудшения контакта между 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 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 его функционирования. Безусловно, это в свою очередь, не может не влиять отрицательно на необходимость усложнения структуры 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 электровозов это не всегда эффективно, а в большинстве случаев вообще неприемлемо по причине ограниченности массогабаритных показателей самого электровоза. Однако новый виток исследований [4] открывает возможность превентивного устранения последствий анализируемого несанкционированного и непродолжительного во времени исчезновения напряжения питания 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).

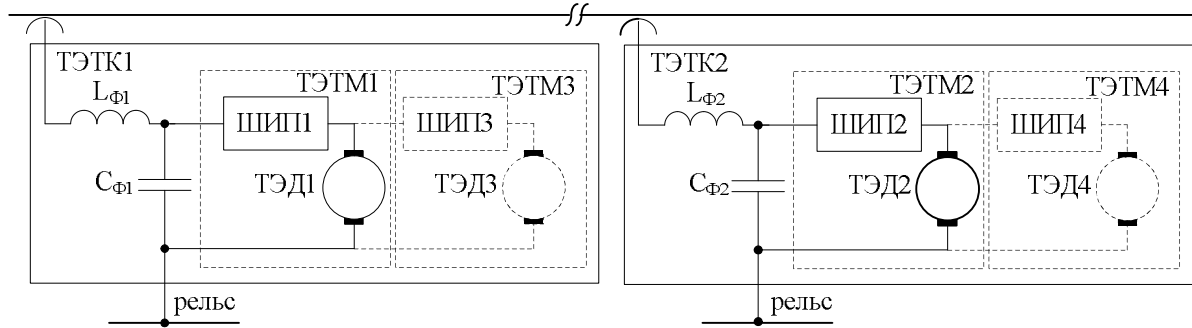


Рис. 1. Упрощенная электрическая схема тягового электротехнического комплекса двухосных электровозов с управлением по системе многих единиц

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.

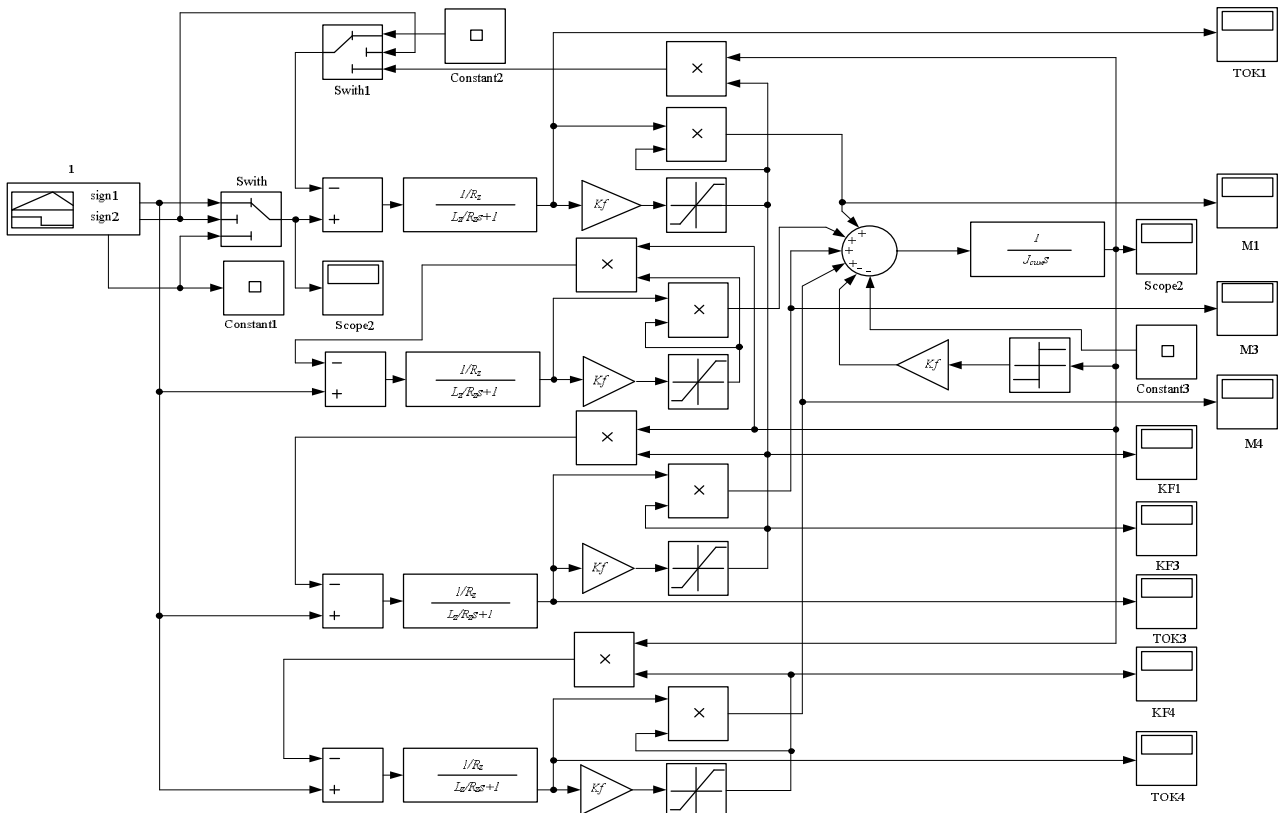


Рис. 2. Компьютерная модель тягового электротехнического комплекса

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: $U = 0$;

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

Контролируется значение электромагнитного момента (M), значение тока (i), частоты вращения (ω) ТЭД и потока (Φ). Все значения, которые определялись 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 ($V_{сост}$) рассчитывалась в функции частоты вращения работающих тяговых двигателей ($\omega_{дв}$), диаметра колес ($d_{кол}$) и передаточного числа редуктора ($i_{ред}$).

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.

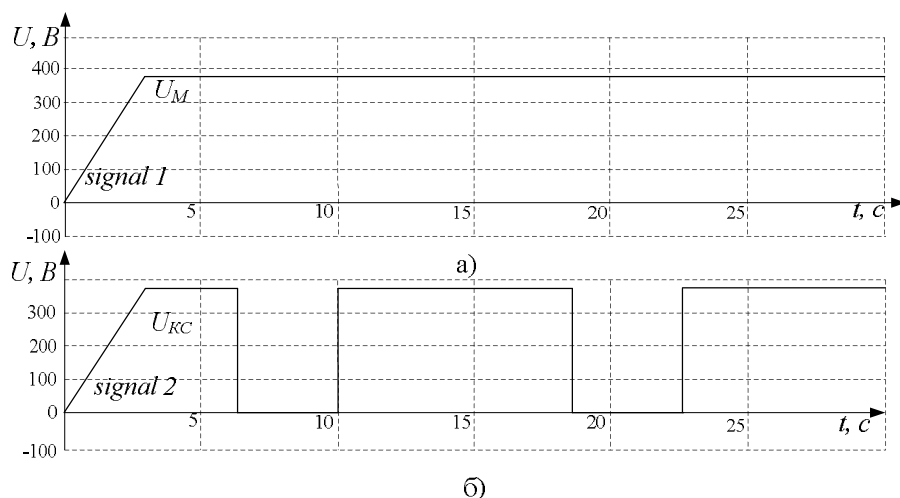


Рис. 3. Машинограммы уровней напряжения питания на тяговых электрических двигателях тягового комплекса:

- а – имитация присутствия напряжения питания на тяговых электрических двигателях;
- б – имитация исчезновения напряжения питания на тяговых электрических двигателях

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 с - 10 с и 19 с – 23 с. (рис. 3).

Согласно графику (рис. 3) имитировалось, что в одном (с 4-х) или нескольких ТЭД исчезает напряжение питания.

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

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

Переходные процессы в системе ТЭТК ШИП описываются уравнениями:

$$\begin{aligned}
 U_d &= f(U_{fc}, \gamma, f_{BG}); \quad K_f = f(I_d); \\
 \frac{dI_d}{dt} &= \frac{U_d - I_d \cdot R_d - \omega \cdot K_f}{L_d}; \\
 \frac{d\omega}{dt} &= \frac{I_d \cdot K_f - M_C}{J}; \\
 \frac{dI_{fl}}{dt} &= \frac{U_C - I_{fc} \cdot R_f - U_{fl}}{L_{fl}}; \\
 \frac{dU_{fc}}{dt} &= \frac{I_{fl} - I_d}{C_f}.
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

где γ – скважность ШИП; $T = \frac{1}{f_{ШИП}}$ – период ШИП; K_f – магнитный поток тягового двигателя.

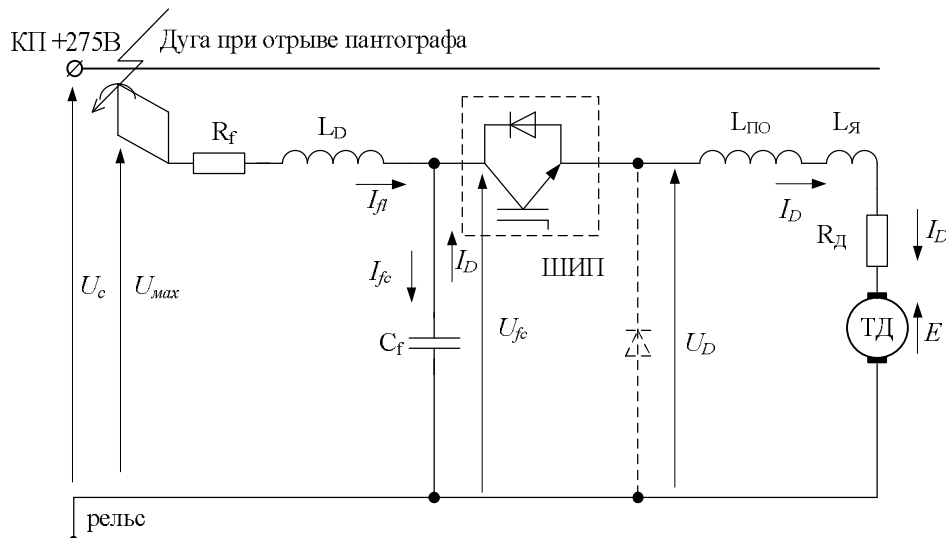


Рис. 4. Расчетная схема тягового электротехнического модуля электротехнического комплекса двухосного электровоза

Результаты моделирования представлены на рис. 5 – 9.

На рис. 5 приведены переходные процессы по току I_d и частоте вращения ω . Варианты параметров сетевого фильтра приведены в таблице 1.

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

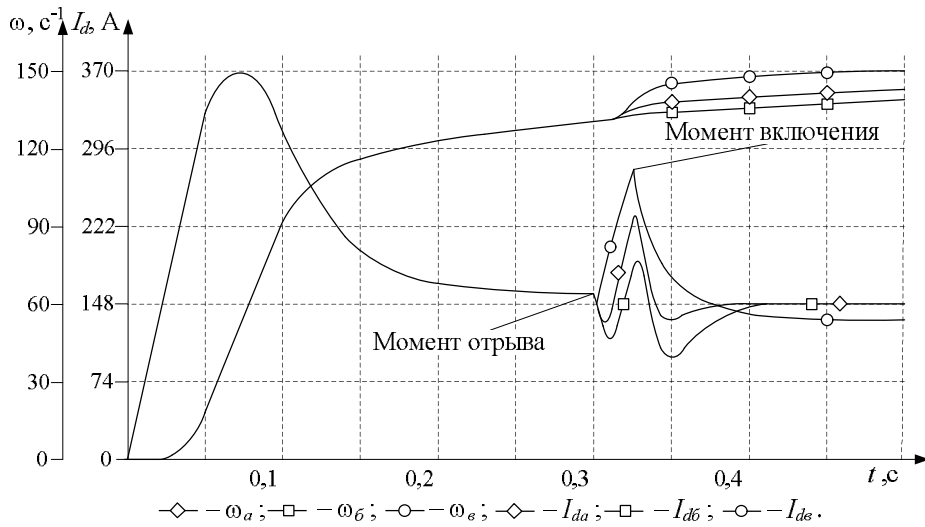


Рис. 5. Переходный процесс в тяговом двигателе (ТЭД-1) по току и частоте вращения

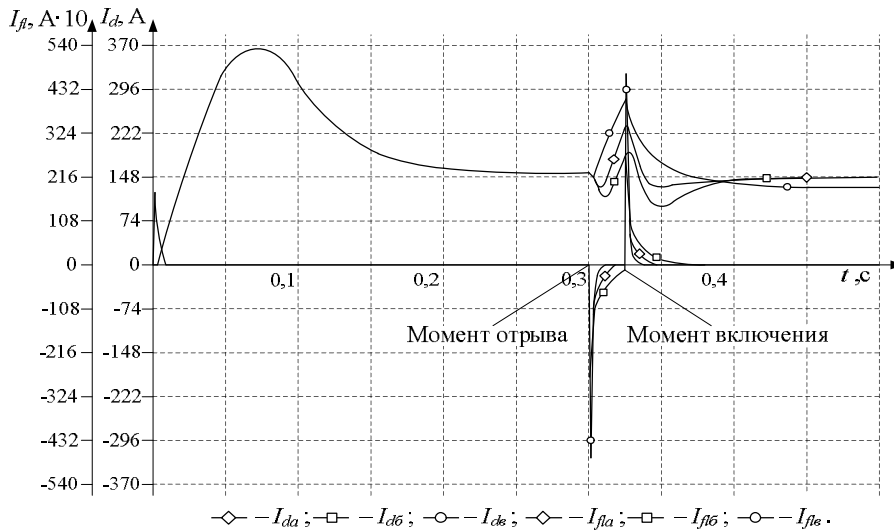


Рис. 6. Переходный процесс по токам тягового двигателя I_d и дросселе фильтра I_f

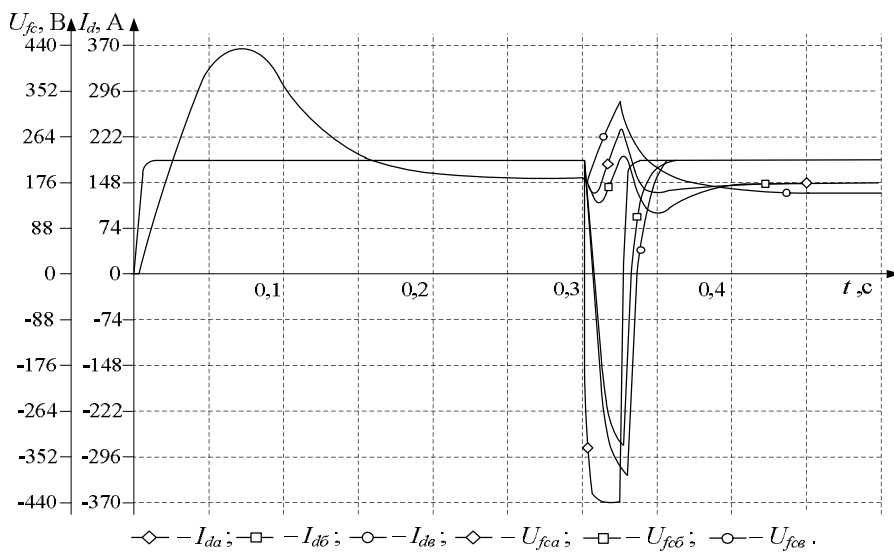


Рис. 7. Переходный процесс по току тягового двигателя I_d и напряжению на конденсаторе фильтра U_{fc}

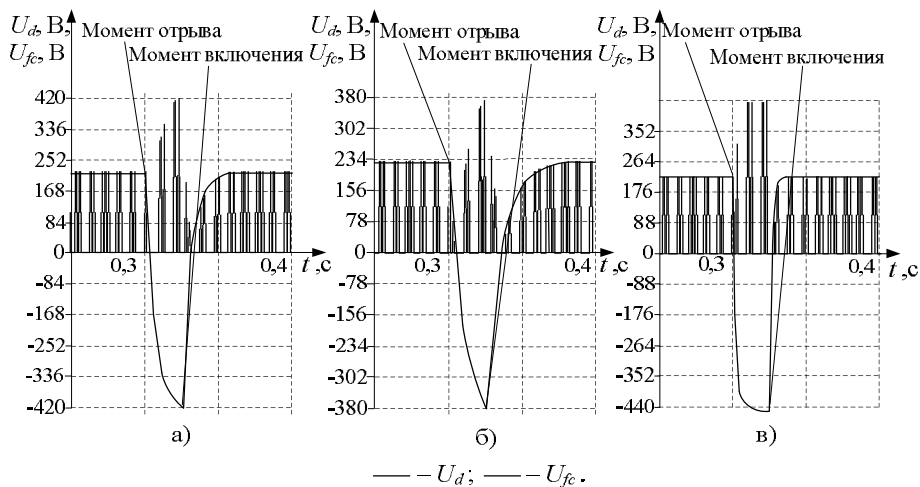


Рис. 8. Переходные процессы по напряжению тягового двигателя U_d и напряжению на конденсаторе фильтра U_{fc}

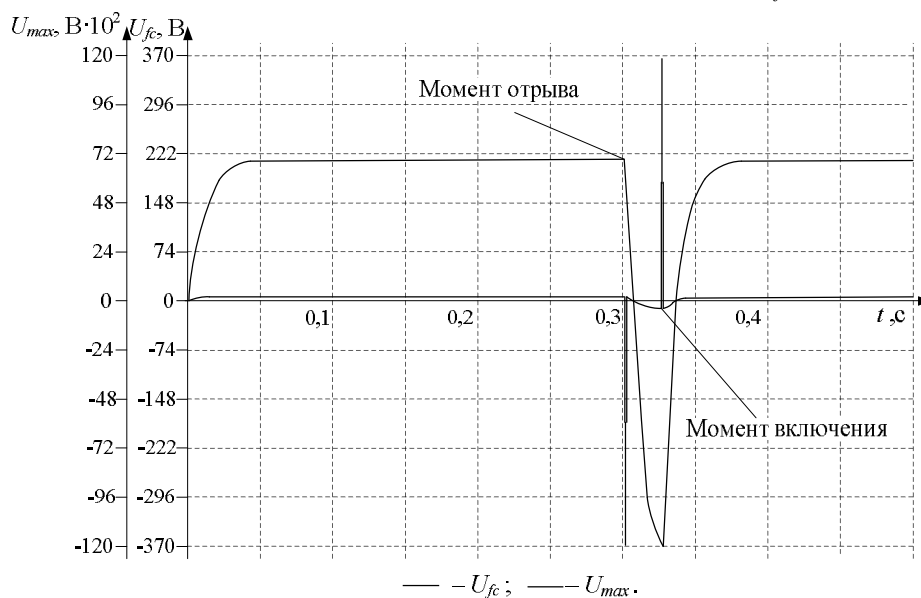


Рис. 9. Переходные процессы по напряжению тягового двигателя U_d и напряжению на конденсаторе фильтра U_{fc}

Применение фильтра варианта «а»; показывает, что токи I_{da} , $I_{dб}$, $I_{dв}$ при пуске имеют экспоненциальный характер с перерегулированием и достигают значения 370 А. Частота вращения ω_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 ω . После подключения пантографа к сети. Применение фильтра варианта «б» (таблица 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» (таблица 1) приводит к аperiodическому процессу по току $I_{dв}$ и частоте вращения $\omega_в$ 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_{fl} . Характер переходных процессов токов фильтров вариантов «а», «б» и «в» идентичен. Различие заключается и амплитуде бросков тока при включении привода, при отрыве пантографа и подключении пантографа к тяговой сети. При использовании фильтра варианта «а» максимальное 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 таблицу 2.

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 ω	140	135	150
Ток конденсатора I_{fl} , 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 с⁻¹ с фильтром по варианту «а»; 135 с⁻¹ с фильтром по варианту «б»; 150 с⁻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.

Список литературы

1. Енергоефективність 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., Синчук И.О., Удовенко О.А., Пасько О.В., Гузов Э.С. Комбинаторика преобразователей напряжения современных тяговых электроприводов рудничных электровозов. // Под редакцией доктора технических наук 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.

Рекомендовано до друку: професором Казачковським М.М.