

ские системы и комплексы: межвуз. сб. науч. трудов. Магнитогорск: МГТУ, 2007. Вып. 14. С. 108-113.

5. Хромов И.С. Исследование и разработка регулирующего устройства высокооборотного вентильного двигателя с возбуждением от постоянных магнитов: автореф. дис. ...

канд. техн. наук. М.: МЭИ, 2011. 20 с.

6. Суворкова Е.Е., Дементьев Ю.Н., Бурулько Л.К. Характеристики гибридной синхронной машины // Известия Томского политехнического университета. Томск: ТПУ, 2013. С. 170-172.

INFORMATION IN ENGLISH

ANALYSIS OF SYNCHRONOUS ELECTRIC DRIVE CONTROL SYSTEMS

Linkov S.A., Sarvarov A.S., Bachurin I.V.

The analysis of modern control systems via synchronous electric circuit of the stator and rotor was carried out. The advantages and disadvantages of control systems providing damping of load angle for a synchronous machine in dynamic operation modes were considered.

**Keywords:** synchronous motor control system, load angle, positive feedback, synchronous motor, stator, rotor.

REFERENCES

1. Lapin A.A. *Razrabotka mnogofaznogo sinhronnogo reguliruemogo elektroprivoda dlya mobilnykh ustanovok* [Development of a multiphase synchronous controlled drive for mobile applications]. Abstract of Ph.D. thesis. Ivanovo GOU VPO «IGEU», 2007. 16 p.  
 2. Stepanov S.E. *Sistema возбуждения синхронных двигателей турбокомпрессоров с идентификатором угла нагрузки* [Excitation system of synchronous motors with turbochargers identifier load angle]ю Abstract of Ph.D. thesis. N. Novgorod State Technical University, 2012. 18 p.  
 3. Fomin D.V., Kosmatov V.I., Merzljakov Y.A., Tolmachev G.G. *Issledovanie rezhimov raboty sinhronnogo dvigatelya s avtomaticheskim regulirovaniem возбуждения v funktsii vnutrennego ugla* [Study of synchronous motor modes

with automatic control of the excitation function in the inner corner] // *Elektrotehnicheskie sistemi i kompleksi* [Electrical systems and complexes]. Collection of scientific papers. Magnitogorsk: NMSTU, 2004, issue 9, pp. 168-174.

4. Kornilov G.P., Khramshin R.R., Murzikov A.A., Hamitov D.F. *Adaptatsiya preobrazovatelya Simoreg dlya возбуждения moschnykh sinhronnykh dvigatelei* [Adaptation of Simoreg converter for powerful synchronous motors driving] // *Elektrotehnicheskie sistemi i kompleksi* [Electrical systems and complexes]. Collection of scientific papers. Magnitogorsk: NMSTU, 2007, issue 14, pp. 108-113.

5. Hromov I.S. *Issledovanie i razrabotka reguliruyushego ustroystva vysokooborotnogo ventilynogo dvigatelya s возбуждением от postoyannykh magnitov* [Research and development of a control device for a high-speed valve engine with permanent magnets]. Abstract of Ph.D. thesis. Moscow: MPEI, 2011. 20 p.

6. Suvorkova E.E., Dementyev Y.N., Burulko L.K. *Kharakteristiki gibridnoi sinhronnoi mashiny* [Features of hybrid synchronous machine]. *Izvestiya Tomskogo politehnicheskogo universiteta* [Bulletin of Tomsk Polytechnical University]. Tomsk Polytechnical University, 2013, pp. 170-172.

УДК 621.31

Греков Э.Л., Филимонов С.И.

**ВЛИЯНИЕ ФИЛЬТРОКОМПЕНСИРУЮЩЕГО УСТРОЙСТВА НА АВАРИЙНЫЕ РЕЖИМЫ РАБОТЫ ТИРИСТОРНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ В КАРЬЕРНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЭКСКАВАТОРАХ**

Рассмотрены процессы, происходящие в системе тиристорный преобразователь–двигатель при отключении электрической сети. Показано, что наличие фильтрокомпенсирующих устройств приводит к прерыванию тока якоря в инверторном режиме работы. Продление генерирования импульсов управления тиристорами после отключения сети способствует увеличению напряжения на конденсаторах и улучшению условий принудительной коммутации.

**Ключевые слова:** электропривод, карьерный экскаватор, система тиристорный преобразователь-двигатель.

ВВЕДЕНИЕ

Опрокидывание тиристорного инвертора, ведомого сетью, является одной из тяжелых аварий. Это происходит вследствие пропадания импульса управления тиристором или при внезапном пропадании питающей сети. Если первый случай связан с надежностью работы системы управления, то отключение питающей сети может происходить и в процессе нормальной работы преобразователя. Особенно это актуально для электрооборудования карьерных экскаваторов с электроприводами основных механизмов, выполненных по системе «тиристорный преобразователь-двигатель» (ТП-Д).

Для обеспечения электромагнитной совмести-

сти таких систем электропривода наличие фильтрокомпенсирующего устройства обязательно [1]. Однолинейная силовая схема главных приводов карьерного экскаватора ЭКГ-12К показана на **рис. 1**.

Электрооборудование данного экскаватора разработано и изготовлено фирмой ОАО «Рудоавтоматика». Питание экскаватора осуществляется от двух трансформаторов TV3 и TV4 с установленной мощностью 400 кВА (см. **рис. 1**), каждый по схемам «звезда-звезда» и «треугольник-звезда». К вторичным обмоткам подключается ТП главных приводов подъема, поворота и поворота. Каждый преобразователь работает по шестипульсной схеме, причем два двигателя наиболее мощного привода подъема питаются независимо от

двух ТП, подключенных отдельно к двум трансформаторам. Вторичные напряжения трансформаторов сдвинуты друг относительно друга на 30°. Соответственно такая схема включения двух преобразователей представляет собой, со стороны питающей сети, эквивалентно–двенадцатипульсную.

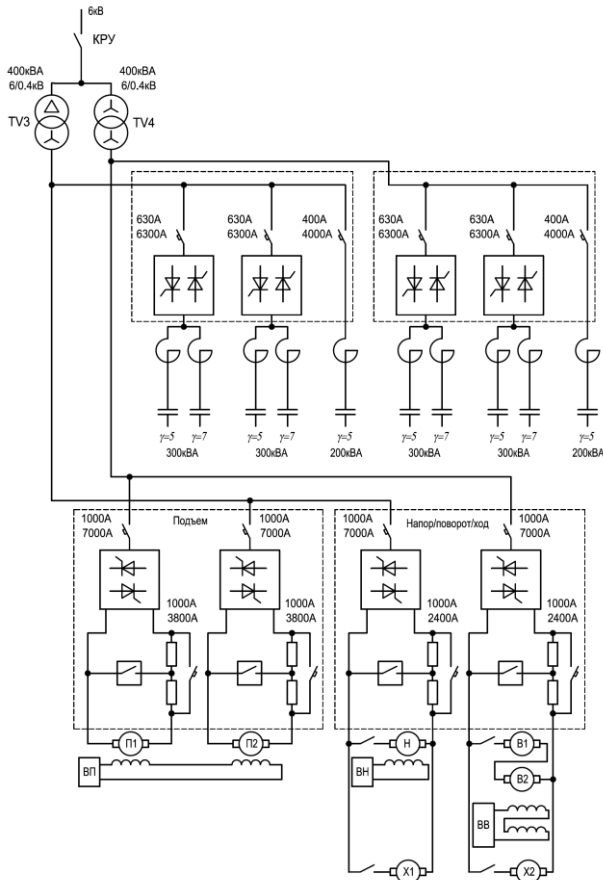


Рис. 1

ФКУ состоит из двух частей, которые имеют две подключаемые через тиристорные ключи (ТК) ступени и одну не отключаемую «глухую» ступень.

Не отключаемая ступень облегчает процесс включения силового трансформатора без нагрузки и на несколько периодов обеспечивает поддержание собственной сети при отключениях внешней [2].

Рассмотрим влияние ФКУ на процессы, происходящие при отключении питающего напряжения. При отсутствии ФКУ, если в этот момент ТП работал в инверторном режиме (например, при опускании ковша), развивается аварийное опрокидывание инвертора. ЭДС двигателя через открытые тиристоры и вторичные обмотки трансформатора создает ток, значительно превышающий предельно-допустимое значение для двигателя.

Однако наличие предварительно заряженных конденсаторов ФКУ значительно изменяют процессы, проходящие в силовых цепях. На рис. 2 показаны (сверху вниз) осциллограммы напряжения с блок-контакта вакуумного выключателя, тока якоря, напряжения на якоре двигателя и линейного напряжения на выходе силового трансформатора. Видно, что после отключения напряжения на ФКУ продолжает формироваться переменное напряжение. Ток якоря при этом быстро и безаварийно заканчивается. Очевидно, что

заряженные конденсаторы ФКУ работают в качестве узла принудительной коммутации. Следует рассмотреть работу ТП в момент отключения питания более подробно.

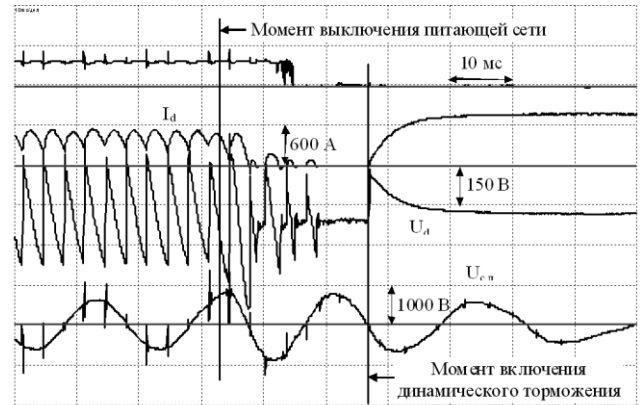


Рис. 2

На рис. 3 представлена упрощенная силовая схема привода. Рассмотрим момент времени, когда при работе тиристоры VT3 и VT2 в инверторном режиме отключается питающее напряжение 6 кВ. Образуются два контура, по которым протекает ток двигателя. Один образован ЭДС двигателя, якорной цепью, тиристорами и вторичными обмотками трансформатора. Другой образован якорной цепью двигателя, индуктивностью и емкостью ФКУ. В первом контуре образуется возрастающий под воздействием ЭДС ток, во втором – возникают колебания тока.

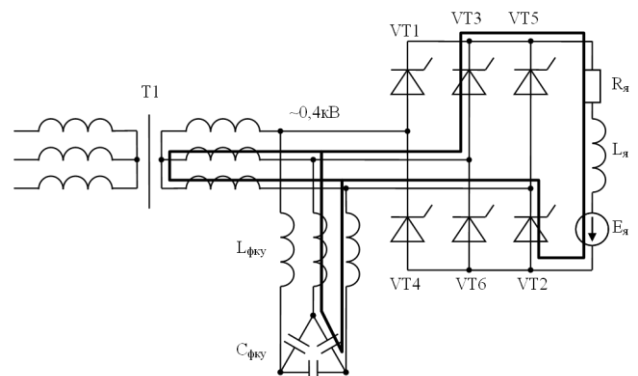


Рис. 3

Упрощенно эти контуры можно представить, как на рис. 4. При исследовании примем следующие допущения:

- активные сопротивления силовой цепи равны нулю;
- отсутствие насыщения магнитных цепей трансформатора и дросселей двигателя;
- импульсы управления тиристорами снимаются одновременно с пропаданием сети;
- отключение фаз первичной обмотки трансформатора происходит одновременно.

Контурный ток  $I_2$ , протекающий по вторичной обмотке трансформатора и якорной цепи двигателя, имеет нарастающий характер (примем, что ток в начальный момент времени равен нулю):

$$I_2(t) = \frac{E_{\text{я}}}{2L_2 + 2L_m + L_{\text{я}}} \cdot t. \quad (1)$$

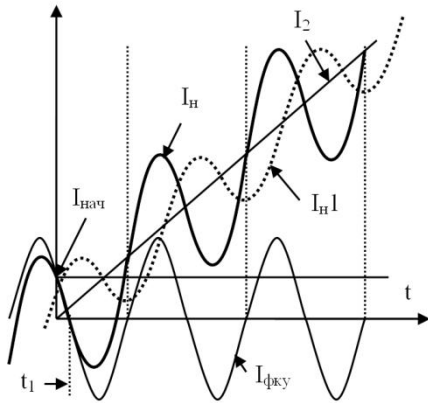
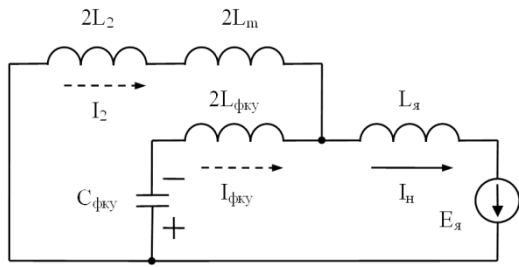


Рис. 4

Контурный ток  $I_{\text{фкy}}$  имеет колебательный характер. Пусть в начальный момент времени емкость  $C_{\text{фкy}}$  заряжена до напряжения  $U_{\text{нач}}$ , а начальный ток в цепи нагрузки и ФКУ равен  $I_{\text{нач}}$ . Тогда на основании сохранения суммарной энергии, запасенной в индуктивности и в емкости, имеем:

$$I_{\text{фкy}}(t) = I_{\text{max}} \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi), \quad (2)$$

где  $I_{\text{max}}$  – амплитуда колебаний тока в контуре;  $\varphi$  – фазовый сдвиг колебаний тока;  $\omega$  – частота колебаний тока;  $L_{\Sigma}$  – суммарная индуктивность контура.

$$I_{\text{max}} = \sqrt{2 \frac{\frac{C_{\text{фкy}}(E_{\text{я}} - U_{\text{нач}})^2}{2} + \frac{L_{\Sigma} I_{\text{нач}}^2}{2}}{L_{\Sigma}}} =$$

$$= \sqrt{\frac{C_{\text{фкy}}(E_{\text{я}} - U_{\text{нач}})^2 + L_{\Sigma} I_{\text{нач}}^2}{L_{\Sigma}}};$$

$$\varphi = \begin{cases} \pi - \arcsin\left(\frac{I_{\text{нач}}}{I_{\text{max}}}\right), & \text{если } E_{\text{я}} < U_{\text{нач}}; \\ \arcsin\left(\frac{I_{\text{нач}}}{I_{\text{max}}}\right), & \text{если } E_{\text{я}} > U_{\text{нач}}; \end{cases}$$

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{L_{\Sigma} \cdot C_{\text{фкy}}}};$$

$$L_{\Sigma} = 2 \cdot L_{\text{фкy}} + L_{\text{я}}.$$

При расчетах значение  $C_{\text{фкy}}$  необходимо брать с коэффициентом 1,5, который учитывает наличие других двух емкостей ФКУ, включенных последовательно (при схеме включения – треугольник).

Сумма токов  $I_2$  и  $I_{\text{фкy}}$  протекает в нагрузке и через тиристорный преобразователь (кривая  $I_{\text{н}}$  на рис. 4, б):

$$I_{\text{н}}(t) = I_2(t) + I_{\text{фкy}}(t). \quad (3)$$

Если в некоторый момент времени ( $t_1$  на рис. 4, б) суммарный ток становится отрицательным, то силовые тиристоры запираются и ток в якорной цепи прекращается. Однако при других сочетаниях  $I_{\text{нач}}$  и  $U_{\text{нач}}$  суммарный ток может и не пересечь нулевое значение, следовательно, развивается аварийная ситуация опрокидывания инвертора (ток  $I_{\text{н1}}$  на рис. 4, б). Без учета насыщения магнитной цепи трансформатора контурным током  $I_2$  можно пренебречь, так как в цепи находится индуктивность намагничивания трансформатора, имеющая значительную величину. Следовательно, в этом случае колебательный характер изменения тока в нагрузке вызовет принудительное запираение открытых тиристоров и прекращение тока в нагрузке.

Однако в реальном трансформаторе магнитная цепь может насытиться, что вызовет значительное уменьшение эквивалентной индуктивности намагничивания  $L_m$ . Рассмотрим предельный случай, когда  $L_m = 0$ . Тогда обмотки трансформатора будут также участвовать в колебательном процессе тока, так как индуктивность  $L_2$  меньше либо сравнима с индуктивностью нагрузки и дросселей ФКУ. Следовательно, предыдущие уравнения необходимо изменить, объединив ветки на рис. 4, а с нагрузкой и с обмотками трансформатора:

$$I_{\text{н}}(t) = \frac{E_{\text{я}}}{2L_2 + L_{\text{я}}} \cdot t +$$

$$+ I_{\text{max1}} \cdot \sin(\omega_1 \cdot t + \varphi_1) + I_{\text{нач}} - I_{\text{max1}} \cdot \sin(\varphi_1),$$

где  $I_{\text{max1}}$  – амплитуда колебаний тока нагрузки;  $\varphi_1$  – фазовый сдвиг колебаний тока;  $\omega_1$  – частота колебаний тока нагрузки.

$$I_{\text{max1}} = \sqrt{2 \frac{\frac{C_{\text{фкy}}(E_{\text{я}} - U_{\text{нач}})^2}{2} + \frac{L_{\Sigma} I_{\text{нач}}^2}{2}}{\frac{L_{\Sigma}}{L_{\text{я}} + 2L_2}}} =$$

$$= \frac{2L_2}{L_{\text{я}} + 2L_2} \sqrt{\frac{C_{\text{фкy}}(E_{\text{я}} - U_{\text{нач}})^2 + L_{\Sigma} I_{\text{нач}}^2}{L_{\Sigma}}};$$

$$\varphi_1 = \begin{cases} \pi - \arcsin\left(\frac{I_{\text{нач}}}{I_{\text{max1}}} \frac{2L_2}{L_{\text{я}} + 2L_2}\right), & \text{если } E_{\text{я}} < U_{\text{нач}}; \\ \arcsin\left(\frac{I_{\text{нач}}}{I_{\text{max1}}} \frac{2L_2}{L_{\text{я}} + 2L_2}\right), & \text{если } E_{\text{я}} > U_{\text{нач}}; \end{cases}$$

$$\omega_1 = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{2L_2 L_{\text{я}}}{2L_2 + L_{\text{я}}} + 2L_{\text{фкy}}\right) \cdot C_{\text{фкy}}}}.$$

Из уравнений видно, что скорость линейного нарастания тока нагрузки значительно увеличивается с одновременным значительным уменьшением амплитуды колебаний. Поэтому в режиме насыщения трансформатора кривая тока может и не достичь нулевого значения, что вызовет развитие аварийной ситуации опрокидывания инвертора. В табл. приведены некоторые параметры двигателя постоянного тока привода

подъема и силового трансформатора, а также расчетные значения, характеризующие переходные процессы тока.

Параметр	Ед. измерения	Значение
Двигатель ДПЭ350		
$L_{я}$	Гн	0,000682
$I_{н}/I_{стоп}$	А / А	855 / 1750
ФКУ (5-я гармоника, 200 кВАр)		
$L_{фку}$	Гн	0,0001
$C_{фку}$	Ф	0,00138
Трансформатор ТМЭ-400/6		
$L_2$	Гн	0,00004
$L_m$	Гн	16
Расчет без учета насыщения ( $I_{нач}=1500$ А)		
$I_{max}$	А	1528
$dI_2/dt$	А/с	10,3
$F$ (частота колебаний)	Гц	83
Расчет с учетом насыщения ( $I_{нач}=1500$ А)		
$I_{max1}$	А	110
$dI_2/dt$	А/с	300000
$F_1$ (частота колебаний)	Гц	221

Как видно из табл. при глубоком насыщении трансформатора амплитуда колебаний не позволяет осуществить принудительное выключение тиристоров.

В то же время экспериментальные и имитационные исследования показывают, что насыщение трансформатора наступает в кратковременные моменты времени. На рис. 5 приведены экспериментальные осциллограммы тока и напряжения ФКУ при внезапном отключении питания. На осциллограмме показаны сверху вниз – напряжение на блок-контакте вакуумного выключателя, линейное напряжение на выходе трансформатора, ток тиристорного преобразователя по фазе А, ток ФКУ по фазе А. На кривых заметны резкие изменения напряжения вторичной обмотки трансформатора и вызывающие их пики тока ФКУ. Следовательно, если до наступления момента насыщения трансформатора ток в ТП не закончится, далее будет развиваться аварийная ситуация.

На рис. 6, а приведены осциллограммы, полученные имитационной компьютерной моделью в системе *Matlab Simulink* (модель одного привода подъема ЭКГ-12К). Представлены сверху вниз графики тока якоря, тока и напряжения ФКУ. Видно, что после отключения питания ток якоря достаточно быстро спадает, но не достигает нулевого значения. После этого под действием ЭДС ток увеличивается до значений значительно выше стопорных.

Рассмотрим процесс выключения питания, если импульсы управления будут генерироваться системой управления еще некоторое время (1-2 периода сетевого напряжения). При реализации системы на базе микропроцессорной техники такое возможно путем экстраполяции формирования импульсов даже при отсутствии синхронизирующего напряжения. На рис. 6, б показаны осциллограммы для такого режима. Видно, что ТП продолжает работать, коммутация тиристоров происходит за счет переменного напряжения на ФКУ. Это объясняется тем, что при отсутствии питающей сети ТП следует рассматривать как тиристорный автономный инвертор напряжения (АИН) с принудительной

коммутацией вентиляей. Источником энергии при этом является ЭДС тормозящегося двигателя, а приемником – ФКУ и силовой трансформатор. Однако из-за отсутствия значительных диссипативных сил (нагрузки АИН) напряжение на конденсаторах ФКУ значительно увеличиваются (см. рис. 6, б). Вследствие этого при прекращении генерирования импульсов тиристоры закрываются за счет большего заряда конденсатора. При технической реализации системы управления ЭКГ-12К импульсы управления продолжают генерироваться на протяжении 1-2 периода, что в большинстве случаев оказывается достаточным для принудительного прерывания тока якоря.

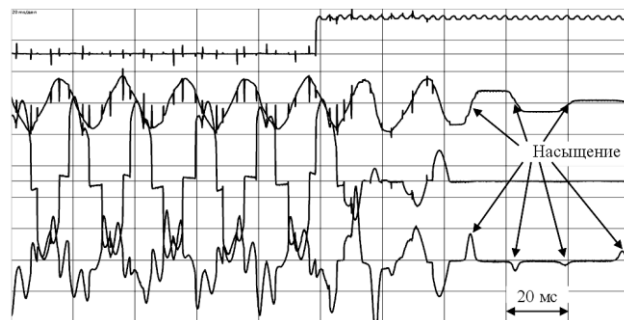


Рис. 5

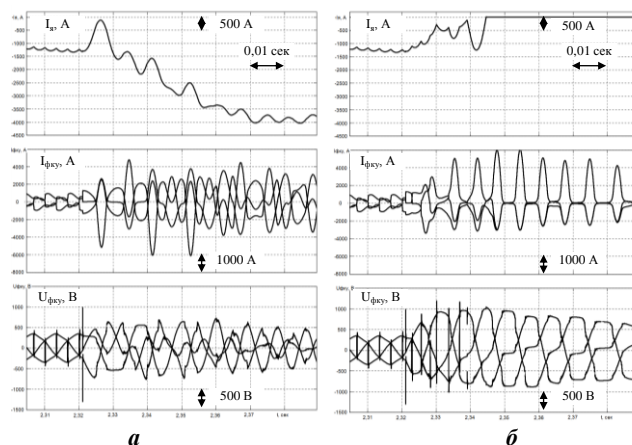


Рис. 6

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

- 1) наличие ФКУ обеспечивает колебательный характер протекания тока в силовых цепях ТП при отключении питающего напряжения;
- 2) в момент перехода через ноль тока якоря происходит закрытие работающих тиристоров в инверторном режиме, то есть принудительное прерывание тока;
- 3) на скорость, а также на возможность прерывания тока оказывают влияние параметры силовых цепей ТП. В случае насыщения магнитной цепи силового трансформатора режим работы ТП после отключения питания существенно изменяется. В этом случае опрокидывание инвертора с развитием токов, больших предельно допустимых значений, практически неизбежно;
- 4) насыщение трансформатора происходит в импульсном режиме. При этом, если принудительное прерывание тока якоря происходит до момента насыщения, опрокидывание инвертора не происходит;
- 5) продолжение генерации импульсов управления тиристорами в течение 1-2 периодов сетевого напряжения приводит к синхронному колебанию напряже-

ния ФКУ и увеличивает уровень заряда конденсаторов. В дальнейшем, при прекращении импульсов, за счет достаточно большого напряжения на конденсаторах, происходит принудительное прерывание тока якоря.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Об электромагнитной совместимости тиристорных электроприводов экскаватора ЭКГ-10 с питающей сетью /

А.Я. Микитченко, А.Н. Шевченко, Д.Р. Шевченко, Э.Л. Греков, С.И. Филимонов // Энергетика: состояние, проблемы, перспективы: всерос. науч.-технич. конф. (Оренбург, сентябрь 2010г.). Оренбург: изд-во ОГУ, 2010. С.238-243.

2. Греков Э.Л., Шевченко А.Н., Филимонов С.И Исследование методов управления экскаваторным фильтрокомпенсирующим устройством // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова, 2014. №1. С.196-203.

INFORMATION IN ENGLISH

EFFECT OF FILTER-COMPENSATING DEVICES ON EMERGENCY MODES OF THYRISTOR CONVERTER IN MINING ELECTRICAL EXCAVATORS

Grekov E.L., Filimonov S.I.

The article describes processes taking place in the system thyristor converter – DC motor during power supply disconnection. It is shown that the presence of filter-compensating devices leads to the interruption of armature current in the inverter mode of work. Extending of gate impulses generating after power supply disconnection increases the voltage on the capacitors and improves forced commutation.

**Keywords:** electric drive, mining excavator, «thyristor converter – motor» system.

REFERENCES

1. Mikitchenko A.Ya., Shevchenko A.N., Shevchenko D.R., Grekov E.L., Filimonov S.I. Ob elektromagnitnoi

sovmestimosti tiristornyh elektroprivodov ekskavatora EKG-10 s pitayuschei setyu [Electromagnetic compatibility of EKG-10 excavator thyristor electric drives with power supply line]. *Energetika: sostoyanie, problem, perspektivi* [Power engineering: state, problems, development prospects]. All-Russia scientific and technical conference. (Orenburg, September 2010), Orenburg: Publishing house of OGU, 2010, pp. 238-243.

2. Grekov E.N., Shevchenko A.N., Filimonov S.I. Issledovaniye metodov upravleniya ekskavatornym filtrokompensiruyuschim ustroystvom [Methods of excavator filter-compensating device control]. *Vestnik BGTU im. V.G. Shuhova* [Bulletin of Shukhov BGTU], 2014, no.1, pp.196-203.

УДК 621.313.3

Лицин К.В., Басков С.Н.

МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ С ПРОМЕЖУТОЧНЫМИ ТРАНСФОРМАТОРАМИ ПРИ ВЕКТОРНО-ИМПУЛЬСНОМ ПУСКЕ ДВИГАТЕЛЯ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

В данной статье рассматривается модель двухтрансформаторной схемы, которая может быть использована в устройствах векторно-импульсного пуска электродвигателей переменного тока. Представлена схема реального объекта. Рассмотрена модель, созданная в программе *Simulink*. Произведен расчет параметров промежуточных трансформаторов. Осуществлен анализ адекватности разработанной модели. Подведены выводы по работе, согласно которым не наблюдается фазового сдвига между синусоидами фазного напряжения, полученными в результате проведения эксперимента и на модели. При этом максимальное расхождение между значениями в один и тот же момент времени составляет 4,7%. В итоге, разработанная модель отражает все свойства реального объекта и может быть использована для модели системы векторно-импульсного пуска электродвигателя.

**Ключевые слова:** векторно-импульсный пуск, промежуточный трансформатор, модель, частота модуляции.

ВВЕДЕНИЕ

Для удешевления схемы векторно-импульсного пуска высоковольтного синхронного двигателя за счет уменьшения стоимости полупроводниковых компонентов возможно использование трансформатора, который так же позволит добиться экономии электроэнергии, увеличения срока службы электродвигателя и приводного механизма за счет оптимизации его работы в широком диапазоне изменения нагрузок и увеличения срока службы пускозащитной аппаратуры [1].

В случае векторно-импульсного пуска высоковольтного синхронного двигателя трансформатор выступает как промежуточное звено между ним и сетью, поэтому необходимо провести исследование его поведения при несинусоидальном воздействии, возникающем из-за наличия в схеме *IGBT* транзистора [2].

В связи со спецификой задачи использования трансформатора в схеме векторно-импульсного пуска необходимо рассмотреть потери, вызываемые несинусоидальным напряжением, которые окажут влияние на снижение общего КПД системы пуска.

Преимущества двухтрансформаторной схемы заключаются в следующем [3]:

- низкая цена в сравнении с высоковольтными ПЧ;
- трансформаторы могут находиться на расстоянии от ПЧ;
- гальваническая изоляция системы благодаря наличию трансформаторов;
- предельная гибкость в выборе напряжения питания двигателя;
- возможность использования недорогих ключей на *IGBT* транзисторах с максимальным напряжением кол-