

Т. М. Корнус, С. М. Тиховод канд. техн. наук  
Запорожский национальный технический университет

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПУСКА ТИРИСТОРНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ДЛЯ ПИТАНИЯ ОБМОТКИ ВОЗБУЖДЕНИЯ ТУРБОГЕНЕРАТОРА

*Разработана программа на языке MATLAB для моделирования электрических процессов в тиристорных преобразователях, описываемых жёсткими дифференциальными уравнениями. С помощью проведённых исследований разработаны рекомендации пуска преобразователя с большой индуктивной нагрузкой.*

**Ключевые слова:** моделирование, тиристорный преобразователь.

При проектировании тиристорного управляемого выпрямителя для питания обмотки возбуждения турбогенератора током свыше 2000 А возникла проблема запуска. Дело в том, что обмотка возбуждения турбогенератора имеет очень большую индуктивность – 1,75 Гн, ограничивающую скорость нарастания тока в тиристорах. Если напряжение между анодом и катодом тиристора положительное ( $U_{ak} > 0$ ), а на управляющем электроде находится положительный потенциал импульса управления, тиристор находится в открытом состоянии. В течение открытого состояния тиристора ток возрастает незначительно и, в некоторых случаях, не может достигнуть значения тока включения  $I_L$ . Поэтому после снятия управляющего импульса тиристор закрывается, и ток нагрузки не увеличивается. Преобразователь запуститься не может. Для решения этой проблемы обычно параллельно нагрузке включают балластное сопротивление. Однако это связано с дополнительными затратами энергии. Поэтому решение проблемы запуска такого преобразователя без дополнительных затрат энергии является актуальной задачей.

Для решения данной проблемы предложено включать параллельно нагрузке RC-цепочку. Проверка эффективности предложенного решения, а также выбор параметров цепочки может быть выполнен с помощью компьютерного моделирования процесса включения преобразователя. Моделирование в системе Simulink положительного результата не дало. Дело в том, что хотя система Simulink поддерживает моделирование тиристорных преобразователей, но при этом игнорируется ряд важных параметров тиристорных преобразователей, например, не учитывается ток включения мощных тиристорных преобразователей. Применение системы PSpice (и других подобных систем) при моделировании устройств силовой электроники также встречает ряд трудностей. При проектировании некоторых тиристорных преобразователей особенностью является то, что система дифференциальных уравнений, описывающих электрические процессы, становится жесткой настолько, что система PSpice не может справиться

с ее интегрированием. Для «смягчения» системы уравнений разработчики включают в модель дополнительные элементы, которых нет в проектируемом устройстве, и корректность включения которых зависит от опыта и интуиции разработчика.

Для устранения указанных недостатков разработан новый программный комплекс Thyrist для моделирования электрических процессов в тиристорных устройствах силовой электроники [1].

Система Thyrist специально разработана так, чтобы жесткая система дифференциальных уравнений, описывающая электрические процессы в тиристорных устройствах, интегрировалась в течение приемлемого времени.

Особенности системы Thyrist изложим на примере моделирования электрических процессов в тиристорном управляемом выпрямителе для питания обмотки возбуждения турбогенератора током свыше 2000 А. Последовательно покажем основные операции, которые выполняет программа Thyrist в процессе моделирования.

Тиристорный управляемый выпрямитель собран по схеме трехфазного моста Ларионова (рис. 1).

Особенностью схемы является то, что постоянная времени нагрузки весьма высока и составляет порядка 15 секунд. Как известно, электрические процессы в произвольный момент времени описываются системой дифференциально-алгебраических уравнений, составленных по законам Кирхгофа. Для того чтобы система Кирхгофа имела единственное решение, предварительно программа строит дерево графа цепи и главные контуры выбираются так, чтобы каждый контур включал только одну хорду. Полная система независимых уравнений Кирхгофа в матричной форме для цепи на рис. 1 имеет следующий вид:

$$A_S X_S' + A_Z X_Z' + B_S X_S + B_Z X_Z = F, \quad (1)$$

где  $A_S$  – матрица коэффициентов, стоящих перед производными переменных состояния;  $B_S$  – матрица коэф-

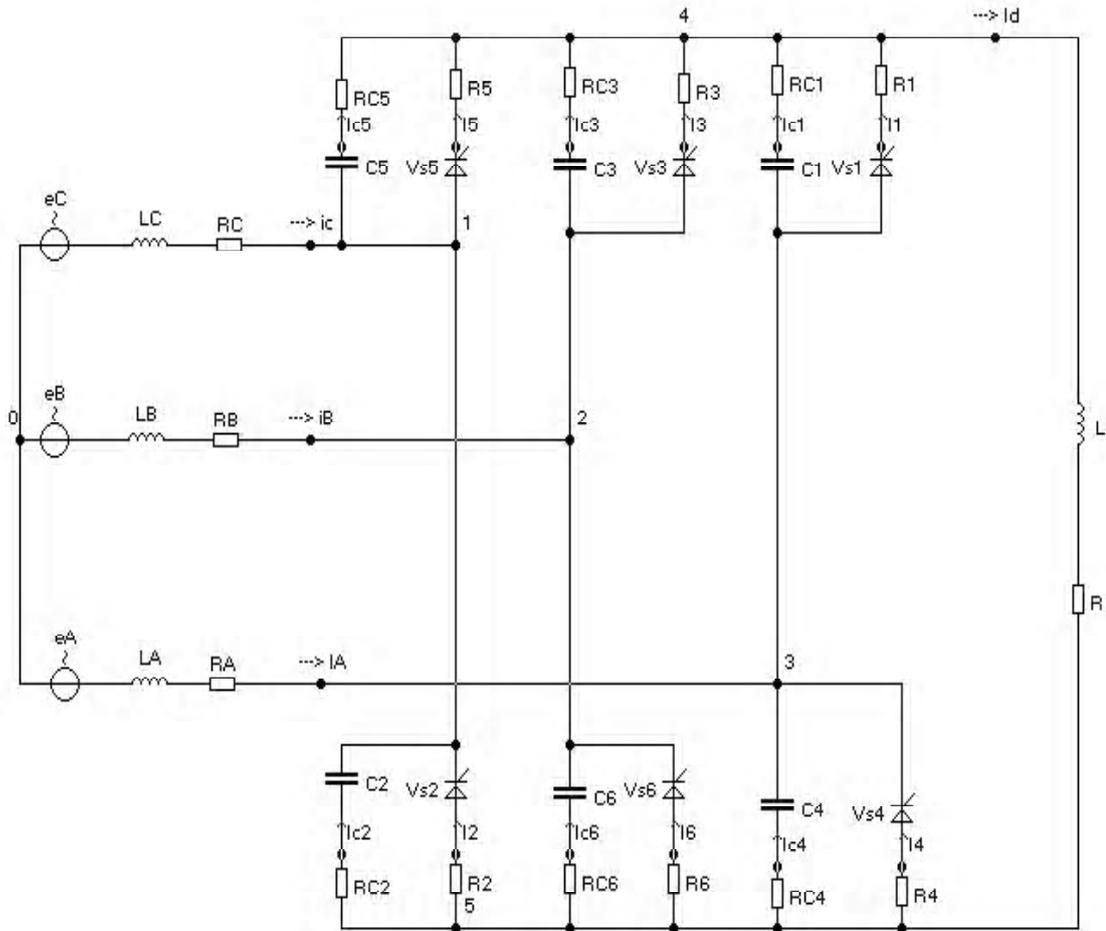


Рис. 1. Схема тиристорного выпрямителя

фициентов, стоящих перед переменными состояниями;  $\mathbf{B}_z$  – матрица коэффициентов, стоящих перед зависимыми переменными;  $\mathbf{F}$  – вектор правых частей уравнений Кирхгофа.

В любой электрической цепи, если в некоторый момент времени известны переменные состояния, то зависимые переменные могут быть однозначно выражены через переменные состояния. Поэтому численные методы достаточно применять для определения на новом шаге интегрирования только переменных состояний и по найденным переменным состояниям находить значения зависимых переменных. Для численного интегрирования дифференциальных уравнений применяют как явные, так и неявные методы [2]. Однако, как известно [2], неявные методы более предпочтительны, чем явные, так как они обладают большей устойчивостью. Более точными и быстрыми являются многошаговые методы, чем одношаговые.

Системы уравнений, описывающие электрические процессы в тиристорных схемах, являются весьма жесткими. Жесткость уравнений появляется потому, что ряд тиристоров в некоторый момент времени открыт, и они имеют весьма малое сопротивление, а другой ряд тиристоров может быть закрыт и, соответственно,

закрытые тиристоры имеют весьма большое сопротивление. При этом индуктивность нагрузки весьма велика, а индуктивности в фазах весьма малы. Через некоторые промежутки времени у тиристоров происходят переключения, после которых в течение весьма короткого промежутка времени происходят быстропротекающие переходные процессы, а затем в течение продолжительного промежутка времени до следующей коммутации какого-нибудь тиристора изменения функции напряжений и токов незначительны. Для интегрирования жестких систем дифференциальных уравнений рекомендуется использовать неявные многошаговые методы Гира [2], которые являются одним из представлений метода дифференцирования назад BDF.

Система уравнений, составленная по законам Кирхгофа, состоит из  $s+z$  уравнений. Незвестными в момент времени номер  $k$  являются  $s$  переменных состояний,  $z$  зависимых переменных и  $s$  производных переменных состояний, т. е. всего  $2s+z$  неизвестных.

Если к системе уравнений Кирхгофа присоединить  $s$  уравнений системы Гира, то полная система уравнений будет содержать  $2s+z$  независимых уравнений. Тогда решение полученной системы даст все переменные состояния, зависимые переменные и производные

переменных состояния в  $k$ -й момент времени. Таким образом, полная система  $2s+z$  уравнений в матричной форме имеет вид:

$$\mathbf{AX} = \mathbf{F}. \quad (2)$$

Поскольку матрицы  $\mathbf{A}$  и  $\mathbf{F}$  в уравнении (2) содержат много нулевых элементов, то для решения этой системы используются специальные методы решения систем линейных уравнений с разреженными матрицами. Эти методы существенно экономят оперативную память компьютера и сокращают время решения системы уравнений.

Будем рассматривать тиристор как резистивный элемент электрической цепи, который может изменять свое сопротивление  $R_T$  в зависимости от ряда условий [3]. Такое представление не соответствует физике процессов в полупроводниковых структурах.

Поставим целью, чтобы модель при этом сохранила логику работы тиристора и внешние характеристики с точностью, достаточной для практики, соответствовали реальному прибору. Состояние тиристора в произвольный момент времени охарактеризуем параметром  $Flag$ , который может принимать целые значения от нуля до пяти (см. табл. 1). Таким образом, тиристор

представим как нелинейный резистивный элемент, который может изменять свое сопротивление как скачком, так и непрерывно, согласно определенной логике. В программе Thyrist состояние всех тиристоров проверяется на каждом шаге интегрирования. Решение уравнения (2) в цикле с пошаговым изменением текущего времени позволяет получить временные зависимости всех переменных электрической цепи. Как отмечалось ранее, система дифференциальных уравнений, описывающих электрические процессы в преобразователе, весьма жесткая. Это приводит к тому, что после коммутации какого-нибудь тиристора происходят быстрые процессы, которые скоро прекращаются, и переменные далее изменяются медленно до следующей коммутации тиристора. Пренебрегать вычислением быстрых процессов, возникающих после коммутации тиристора, нельзя, так как именно они приводят к опасным броскам токов и напряжений, которые нужно учитывать и оптимизировать выбором параметров элементов схемы. Поэтому для правильного отображения быстрых процессов необходимо задавать значение шага интегрирования  $h$  весьма малым.

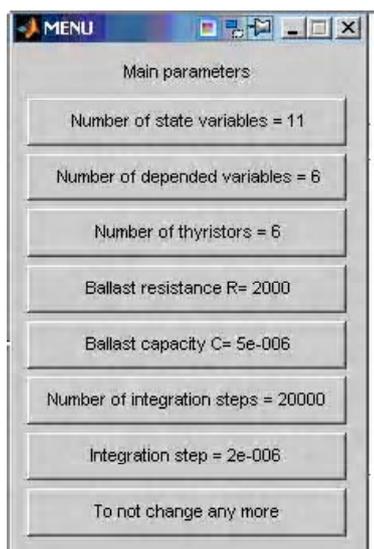
Если выполнить расчет с малым шагом  $h$ , то время расчета сильно возрастает и расчет только одного пе-

Таблица 1 – Перечень состояний тиристора

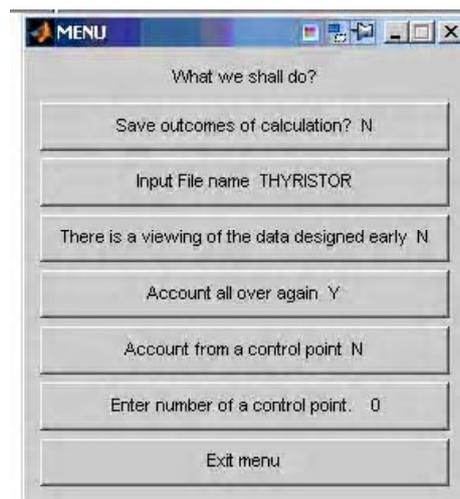
Значение параметра $Flag$	Тип состояния тиристора	Примечание
0	Закрытое удерживаемое состояние.	Тиристор находится в закрытом состоянии, если даже напряжение между анодом и катодом положительное ( $U_{ak} > 0$ ). В этом случае сопротивление тиристора равно сопротивлению в закрытом состоянии: $R_T = R_{off}$ .
1	Открытое неудариваемое состояние.	Тиристор открыт, но ток тиристора $I_T$ не достиг величины тока включения $I_L$ . В этом состоянии тиристор будет находиться до тех пор, пока напряжение между анодом и катодом тиристора положительное ( $U_{ak} > 0$ ), а на управляющем электроде находится положительный потенциал импульса управления ( $imp=1$ ). В этом состоянии сопротивление тиристора равно значению сопротивления в открытом состоянии: $R_T = R_{on}$ .
2	Открытое удерживаемое состояние.	Тиристор открыт, и значение тока $I_T$ , протекающего через него, превышает значение тока включения $I_L$ . В этом состоянии тиристор находится до тех пор, пока $U_{ak} > 0$ и ток вентиля $I_T$ превышает величину тока удержания $I_H$ , независимо от наличия на управляющем электроде импульса управления.
3	Открытое состояние при отрицательном напряжении тиристора.	При перемене знака $U_{ak}$ на отрицательный тиристор некоторое время находится в открытом состоянии, пока ток в обратном направлении не достигнет значения $I_{rrm}$ .
4	Переходное состояние при обратном восстановлении заряда.	При отрицательном знаке $U_{ak}$ после достижения током значения $I_{rrm}$ тиристор закрывается не мгновенно. В этом состоянии сопротивление тиристора постепенно изменяется до значения $R_{off}$ .
5	Закрытое неудариваемое состояние.	После закрытия тиристор в течение некоторого времени $tq$ может открыться, если значение напряжения $U_{ak}$ изменит знак на положительный.

риода может занимать несколько часов времени. Чтобы ускорить расчет, используется следующий прием. После каждой коммутации шаг  $h$  уменьшается: делится на заданный коэффициент деления шага  $K_{del}$ , который выбирается в зависимости от режима в пределах 10–200. С малым шагом вычисляется заданное число шагов  $N_T$  после коммутации, и расчет продолжается далее с исходным шагом  $h$  до следующей коммутации. Такой прием позволяет сократить время расчета в несколько раз.

Для ввода исходных данных используется два меню (рис. 2, 3). Расчет переходного процесса можно выполнить с самого начала или с контрольной точки. Контрольная точка создается с помощью меню рис. 2, б. При этом по окончании расчета все данные сохраняются в файле, имя которого задается, а также сохраняются значения всех переменных состояния и флаги состояния тиристоров в массиве  $KONTx$  ( $x$ -номер контрольной точки). При расчете с заданной контрольной точки начальные значения переменных считываются из массива  $KONTx$  и расчет продолжается.

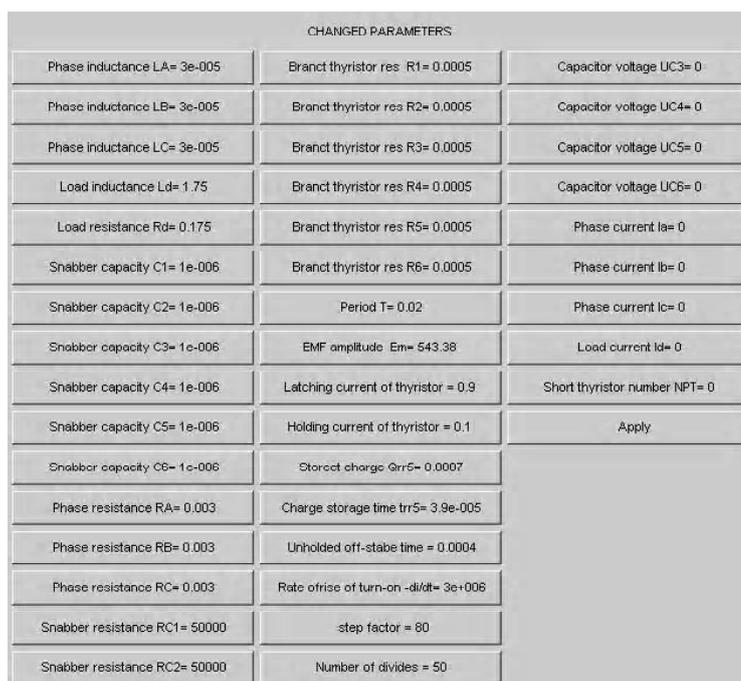


а



б

**Рис. 2.** Меню, определяющие характер расчета: а) задание количества переменных состояния, зависимых переменных, количества тиристоров, значений  $RC$ -цепочки, максимальное количество шагов интегрирования, значение шага интегрирования; б) запрос о сохранении результатов расчета в файле, имя файла, ввод данных с клавиатуры или из файла, расчет с самого начала или с контрольной точки, ввод номера контрольной точки



**Рис. 3.** Меню, позволяющее изменить данные цепи

Программа позволяет выполнить не только расчет штатного режима, но и аварийного режима, когда пробивается тиристор. Перед пробоем тиристора организуется контрольная точка, а при расчете с новой конт-

рольной точки указывается номер пробитого тиристора, который не переходит в закрытое состояние никогда.

На рис. 4, а показаны зависимости тока и напряжения первого тиристора от текущего времени при пуске

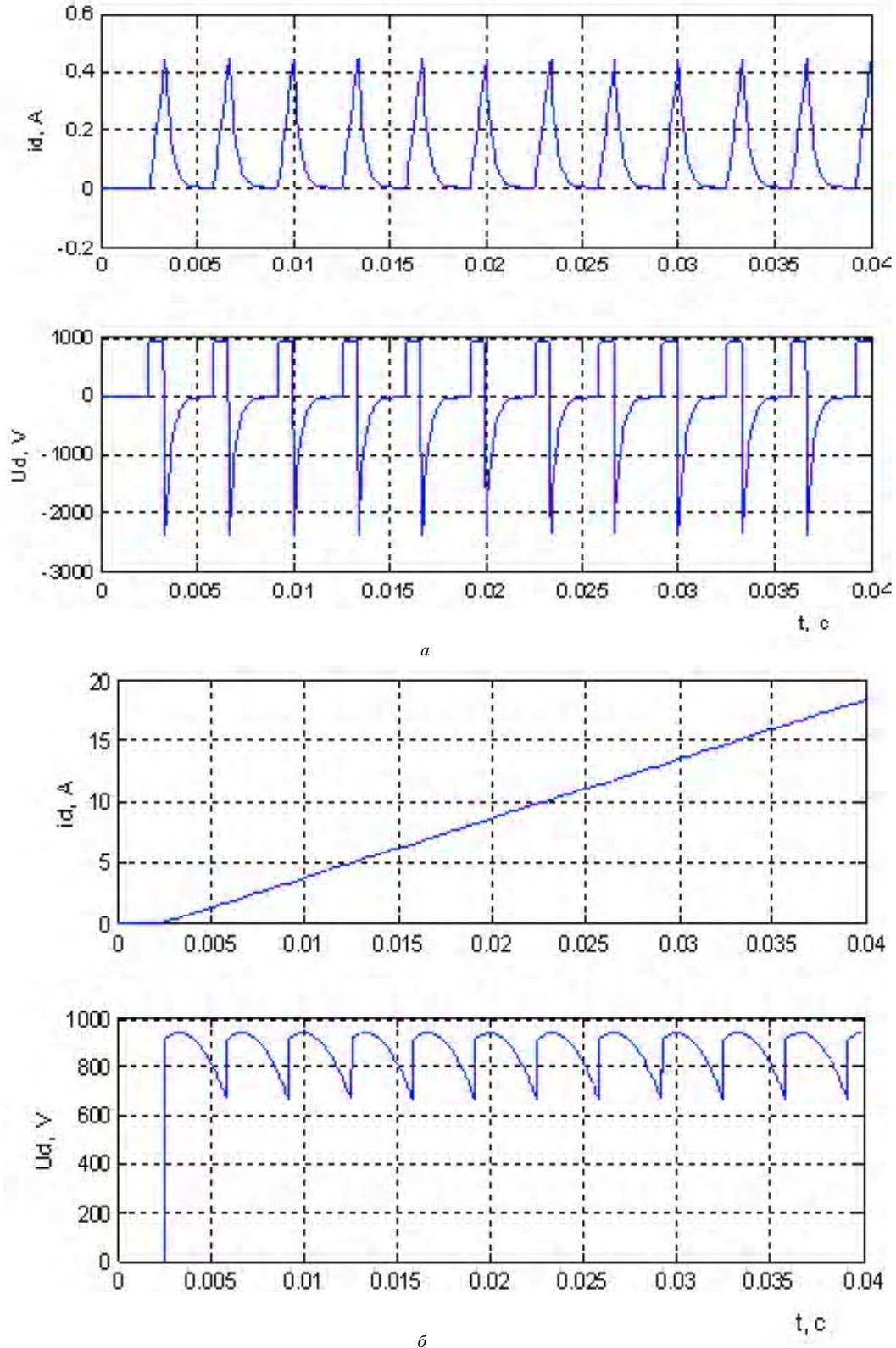


Рис. 4. Зависимости тока и напряжения первого тиристора от текущего времени при пуске преобразователя: а) без RC-цепочки; б) с RC-цепочкой

преобразователя без RC-цепочки. Эти зависимости показывают, что преобразователь самостоятельно запуститься не может. На рис 4, б показаны те же зависимости, но параллельно нагрузке включена RC-цепочка:  $R=2000$  Ом,  $C=5$  мкФ. Преобразователь уверенно запускается.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тиховод, С. М. Программа для компьютерного моделирования электрических процессов в тиристорных цепях / С. М. Тиховод, Т. М. Корнус // Электротехника та електроенергетика. – 2002. – № 1.

2. Ортега, Дж. Введение в численные методы решения дифференциальных уравнений / Дж. Ортега, У. Пулл. – М. : Наука, 1986. – 288 с.
3. Тиховод, С. М. Разработка компьютерной программы моделирования магнитоэлектрических цепей, содержащих тиристоры / С. М. Тиховод, И. О. Афанасьева, Т. М. Корнус // Технічна електродинаміка. – 2009. – № 3. – С. 9–13.

Стаття надійшла до редакції 03.06.2011.

**Корнус Т. М., Тиховод С. М.**

#### **Модельювання пуску тиристорного перетворювача для живлення обмотки збудження турбогенератора**

*Розроблено MATLAB-програму для моделювання електричних процесів в тиристорних перетворювачах, що описуються жорсткими диференціальними рівняннями. За допомогою проведених досліджень розроблено рекомендації пуску перетворювача з [і] великим індуктивним навантаженням.*

**Ключові слова:** моделювання, тиристорний перетворювач.

**Kornus T. M., Tykhovod S. M.**

#### **Modeling of thyristor converter start for turbogenerator excitation winding power supply**

*The MATLAB program is developed, modeling electric processes in thyristor converters which are described by rigid differential equations. Based on investigation results recommendations are given for converter start under high inductive load.*

**Keywords:** Modeling, Thyristor Converter.

УДК 621.316.925:621.3.049.77

**V. I. Gurevich**

Central Electric Laboratory, Israel

## **RELIABILITY OF MICROPROCESSOR-BASED PROTECTIVE DEVICES – REVISITED**

*The article is a continuation of a set of the author's previous publications about the reliability of the microprocessor-based protective devices. The statistical data introduced by the author, coincide with data of other authors and confirm higher reliability of electromechanical relays in comparison with microprocessor-based. The inadequacy of the criterion for estimating the reliability of the protective relay is noted and a new normalized criterion for such estimation is offered by author.*

**Keywords:** microprocessor-based protective devices, reliability, relay protection, life expectancy, intensity of failures, failure rate.

### **1. Introduction**

In previous publications the author has already analyzed the transition from electromechanical to a microprocessor-based protective relays, and considered the prospects and problems of microprocessor relays applications [1–4]. The rather sharp reaction of the readers, often arising after these publication, on the one hand, and the author's detailed answers to the criticism of opponents on the other show that among the specialists in this area there is no common opinion about the prospects of

microprocessor protection, there is no unequivocal understanding that, as any other complex device, the microprocessor protection not only possesses obvious advantages, but also has serious weaknesses.

### **2. Myth about the extremely importance of microprocessor-based protective devices**

One of the widely widespread fables [5] justifying the inevitability of transition to microprocessor relay protection is the myth that electromechanical protective relays do