

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ВЕНТИЛЬНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДИАГНОСТИЧЕСКИХ ПРИЗНАКОВ ОТКАЗОВ СНАББЕРНЫХ ЦЕПЕЙ

Д.С. Шимук

(представил д.т.н., проф. Б.Ф. Самойленко)

Рассматривается структура математической модели для определения содержания и условий получения диагностических признаков технического состояния снабберных цепей в силовых частях вентильных преобразователей.

Постановка проблемы. Защита силовых вентилей источников вторичного электропитания (ИВП) от мощных импульсных коммутационных перегрузок реализуется посредством цепей коррекции динамической траектории переключения вентилей – снабберов. Снаббер представляет собой установленную параллельно вентилю R-C или VD-R-C-цепь. Дефекты снабберов (обрывы элементов, снижение емкости конденсаторов) не приводят к немедленной потере работоспособности вентилей, но лишают вентиль такой защиты, чем форсируют его внезапный отказ. Параллельное подключение снабберов силовым вентилям служит причиной инвариантности параметров входной и выходной электроэнергии ИВП к дефектам снабберных цепей. Знание содержания и условий проявления диагностических признаков отказов снабберов позволит обнаружить, локализовать место отказа и устранить его при техническом обслуживании ИВП, предупредив тем самым внезапные отказы силовых вентилей и ИВП в целом.

Анализ литературы. В [1 – 3] обоснована необходимость применения механизма работы, в [4] приводятся сведения о новых схемотехнике и элементной базе для снабберов. В [5] проанализировано влияние технического состояния (ТС) снабберов на условия работы силовых вентилей и сделан вывод о необходимости повышения глубины контроля силовых цепей до уровня снабберных цепей. Но практические рекомендации по обслуживанию и ремонту современных ИВП не предусматривают контроль ТС снабберов. При моделировании рабочих процессов в силовых частях ИВП динамика снабберов не учитывается. Для определения содержания и условий проявления диагностических признаков снаббе-

Примечание [Ш.Д.С.1]:

1. Высокочастотные транзисторные преобразователи / Э.М. Ромаш, Ю.И. Дробович, Н.Н. Юрченко, П.Н. Шевченко. - М.: Радио и связь, 1988. - 288 с.
2. Гринштейн Б.И., Тимошенко А.Л., Безуглый С.Л. Воздействие сетевых перенапряжений на высоковольтный тиристорный преобразователь. // Электричество. 1990. №2, с. 1-8.
3. С.А. Эраносян. Сетевые блоки питания с высокочастотными преобразователями. - Л.: Энергоатомиздат, Ленингр. отд-ние, 1991. -176 с.
4. П.А. Воронин. Силовые полупроводниковые ключи: семейства, характеристики, применение. – М.: Издательский дом "Додэка-XXI", 2001. – 384 с.
5. А. М. Коллаков. Устранение зашелкивания в драйверах фирмы International Rectifier. // Chip news Украина. Инженерная микроэлектроника. 2002. №1, с. 56-58.

Примечание [Ш.Д.С.2]:

6. Чибиркин В.В., Ковтун В.И., Мартыненко В.А. Новые разработки быстро восстанавливающихся диодов в ОАО "Электровыпрямитель" и их конструкторско-технологическое обеспечение. // Электротехника. 1998. №7, с. 38-46.
7. Думаневич А.Н., Якивич Н.И. Силовое полупроводниковое приборостроение в начале XXI века. // Электричество, 2001. № 9. с. 9 – 12.

Примечание [Ш.Д.С.3]:

8. Переверзев А.В. Совмещенные цепи демпфирования и питания в интегральных силовых модулях // Электротехника. 1998. С. 53 – 56.

Примечание [Ш.Д.С.4]:

9. Техническая диагностика вентильных преобразователей / В.В. Маркин, В.Н. Миронов, С.Г. Обухов. - М.: Энергоатомиздат. 1985. -152 с.

ров, согласно [5, 6], требуется изучение поведения силовой части ИВП при различных ТС снабберов и различных входных воздействиях. Результатом такого изучения [6] является математическая модель (ММ) объекта для различных ТС снабберных цепей.

Цель статьи заключается в изложении содержания ММ силовой части вентильного преобразователя, позволяющей определять диагностические признаки ТС снабберных цепей при произвольных входных воздействиях.

Силовая часть (СЧ) вентильного ИВП представляет собой нелинейный динамический объект, выполняющий функцию преобразования спектрального состава входной электрической энергии. Содержание такого преобразования определяется схемой силовой части ИВП, параметрами ее элементов, алгоритмом переключения силовых вентилях. Поэтому содержание диагностических признаков для определения ТС СЧ следует искать в виде различий спектральных составов откликов исправного и неисправного объекта на определенное входное воздействие.

Спектральный состав отклика определяется мгновенным значением отклика. Поэтому в основу математической модели положим кусочно-линейную аппроксимацию нелинейных характеристик вентилях, которая обеспечивает наибольшую точность определения мгновенных процессов в СЧ ИВП.

Поскольку невозможно априорно определить состояния и порядок изменения проводимости вентилях, то предлагается следующая структура математической модели (рис. 1). Исходные данные: схема силовой части, параметры ее элементов; законы изменения во времени входных воздействий; вид аппроксимации нелинейных характеристик вентилях. Далее определяется начальная комбинация линейных участков характеристик вентилях, для которой составляется линейная система дифференциальных уравнений (СДУ₁) состояния. Решение полученной системы получаем в результате ее численного интегрирования при известных начальных условиях. В ходе решения контролируем текущие значения токов и напряжений всех вентилях $[i_{VD} \ u_{VD}]^T$ на предмет соответствия логическим условиям коммутации вентилях: выполнение этих условий определяет момент $t_{п}$ переключения какого-либо вентиля на иной линейный участок. Каждое i -е состояние проводимости вентилях описывается своей СДУ; на временном интервале продолжительностью Δt_i . Последовательно переходя от одной комбинации линейных участков характеристик вентилях к другой и накапливая массив мгновенных значений токов и напряжений элементов, получим массив мгновенных значений токов и напряжений для конкретного набора параметров элементов силовой части и входных воздействий. Спектральные характеристики лю-

Примечание [Ш.Д.С.5]:

10. Давыдов П.С. Техническая диагностика радиоэлектронных устройств и систем. – М.: Радио и связь, 1988. – 256 с.

Примечание [Д.С.6]:

11. Вентильные преобразователи переменной структуры/ Тонкаль В.Е., Руденко В.С., Жуйков В.Я. и др.: Отв. ред. Шидловский А.К.; АН УССР, Ин-т электродинамики. – Киев, Наукова думка, 1989. 336 с.

бого тока или напряжения схемы получим на основе стандартных методов спектрального анализа.

В качестве примера рассмотрим получение явной ММ однофазного мостового выпрямителя с L-фильтром и снабберными RC-цепями (рис. 2). Цель моделирования – установить влияние изменения параметров RC-цепей на мгновенные процессы в схеме; определить условия для проявления диагностических признаков проявления изменений параметров снаббер-

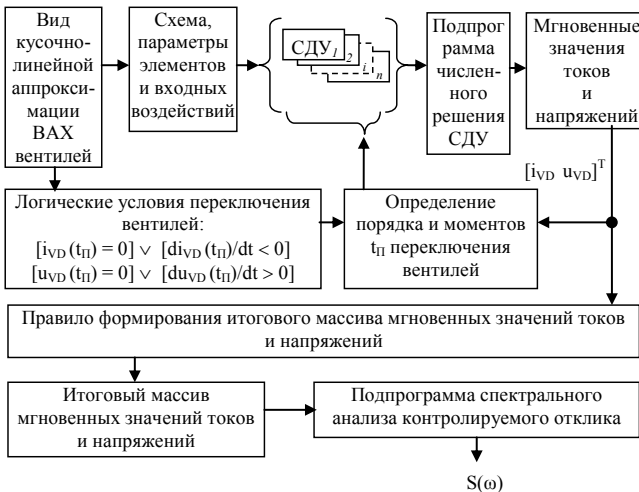


Рис. 1. Структура математической модели силовой части источника вторичного электропитания

ных RC-цепей на выходе схемы. Стрелками на рис. 2 отмечены принятые положительные направления протекания тока в ветвях.

Предварительными исследованиями [7] установлено, что факторами, маскирующими проявление диагностических признаков снабберов через выходное напряжение, служат: подключенная параллельно нагрузке R_H емкость выходного фильтра; низкоомная нагрузка R_H . Поэтому силовая часть ИВП на рис. 2 не содержит выходной емкости, а величина сопротивления R_H принята равной 1 Мом, что соответствует входному сопротивлению большинства измерительных приборов.

Примечание [Д.С.7]:
12. Шимук Д.С. Методика выявления информативных параметров технического состояния статических преобразователей. // Системи обробки інформації. Збірник наукових праць. Вип. 2(6). – Харків: НАНУ, ПАНМ, ХВУ, 1999. С. 145 – 149.

В исправной схеме элементы снабберов имеют одинаковые номиналы ($C1 = C2 = C3 = C$, $R1 = R2 = R3 = R$). Реальную ВАХ вентиля аппроксимируем R-S кусочно-линейной характеристикой (с нулевым сопротивлением в проводящем состоянии и высокочастотным сопротивлением R_{VD} в закрытом состоянии).

Логические условия для определения момента переключения вентилей показаны на рис. 1: открытый вентиль запирается в момент перехода его положительного тока i_{VD} в отрицательную полуплоскость, а закрытый вентиль открывается в момент перехода его отрицательного обратного напряжения u_{VD} в положительную полуплоскость.

Положим, что

$$e = E_m \sin \omega t,$$

где E_m – амплитуда; ω – круговая частота; t – текущее время. Начальные условия (напряжения емкостей) на момент $t = 0$ начала моделирования определим нулевыми: $u_{C1}(0) = 0$; $u_{C2}(0) = 0$; $u_{C3}(0) = 0$; $u_{C4}(0) = 0$. Тогда при $t = 0$ откроются вентили VD1 и VD4. На основе усовершенствованного топологического метода сформируем представленную на рис. 3 топологическую структуру уравнений состояния цепи. Подобными системами уравнений описываются и состояния схемы, соответствующие открытым вентилям VD2, VD3. На рис. 3 приняты следующие обозначения: слева показаны узлы-источники (напряжения емкостей, напряжение источника питания, ток индуктивности), справа – узлы-стоки (первые производные по времени напряжений емкостей и тока индуктивности и другие контролируемые параметры схемы). Дуга с открытой стрелкой имеет передачу плюс единица; закрытая – минус единица. Сдвоенные линии показывают собственные контуры схемы и систему их взаимодействия в смысле касания.

Для краткости изложения собственно уравнения состояния не приводятся. Формирование выражений для отдельных коэффициентов уравнений состояния посредством формулы Мэсона [8] поясним на примере

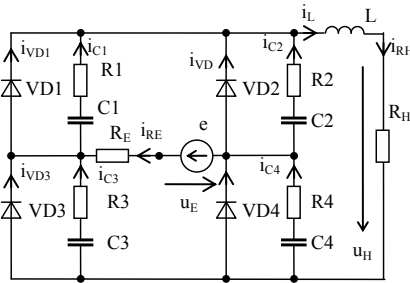


Рис. 2. Силовая часть источника вторичного электропитания

коэффициента, отражающего влияние напряжения емкости u_{C2} на производную по времени напряжения емкости du_{C2}/dt . Общий знаменатель Δ_{14} всех коэффициентов передачи вычисляется согласно формуле Мэсона по выражению

$$\Delta_{14} = 1 + R_E \left[(R_2)^{-1} + (R_3)^{-1} + (R_{V2})^{-1} + (R_{V3})^{-1} \right]. \quad (1)$$

Согласно рис. 3 от узла-источника u_{C2} в узел-сток du_{C2}/dt имеется один путь с передачей $(-1)(R_2)^{-1}(C_2)^{-1}$. Минор этого пути $\Delta_{u_{C2}, \dot{u}_{C2}}$ равен выражению (1), в котором приравнены нулю передачи контуров, имеющие общие узлы с рассматриваемым путем:

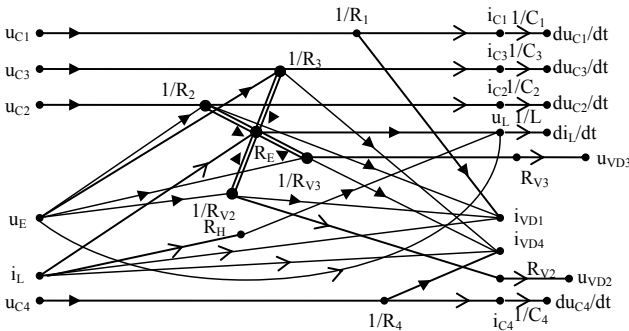


Рис. 3. Топологическая структура уравнений состояния цепи на рис. 2 при открытых вентилях VD1, VD4

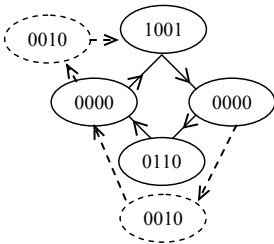


Рис. 4. Граф переключения вентилях:
 – в исправной схеме (сплошная линия);
 – при снижении емкости одного 152 снаббера (штриховая линия)

$$\Delta_{u_{C2}, \dot{u}_{C2}} = 1 + R_E \left[(R_3)^{-1} + (R_{V2})^{-1} + (R_{V3})^{-1} \right].$$

В результате коэффициент передачи от узла u_{C2} в узел du_{C2}/dt имеет вид:

$$\frac{\dot{u}_{C2}}{u_{C2}} = - \frac{-\Delta_{u_{C2}, \dot{u}_{C2}}}{R_2 C_2 \Delta_{14}}.$$

Для исправной схемы установлено, что порядок изменения состояния проводимости вентилях исправной схемы соответствует графу, показанному на рис. 4 сплошной линией. Со-

стояние 1001 соответствует открытым вентилям VD1, VD4; состояние 0000 – всем закрытым вентилям; состояние 0110 – открытым вентилям VD2, VD3. Топологическая структура уравнений состояния цепи на интервале 0000 показана на рис. 5.

Результаты численного моделирования процессов в схеме с исправными цепями показаны на рис. 6, а, в схеме с десятикратным снижением величины емкости C_1 – на рис. 6, б.

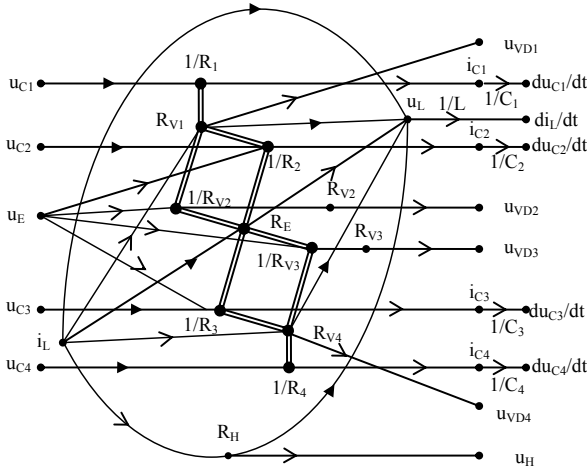


Рис. 5. Топологическая структура уравнений состояния цепи (рис. 2) для закрытого состояния всех вентилях

Снижение величины емкости C_1 привело к изменению порядка переключения вентилях, что отражено штриховыми линиями на рис. 4. В табл. 1 приведены амплитуды спектральных составляющих выходного напряжения исправной схемы и для указанного вида неисправности.

Из сравнительного анализа мгновенных процессов на рис. 6, а, б и табл. 1 очевидно, что снижение величины емкости одной из RC-цепей привело к возрастанию постоянной составляющей выходного напряжения свыше величины амплитуды напряжения питания. Кроме того, в выходном напряжении неисправной схемы присутствует гармоническая составляющая на частоте, равной частоте питающей сети. Перечисленные явления, как известно, не присущи мостовым однофазным схемам

выпрямления с исправными вентилями. Поэтому указанные изменения спектрального состава могут быть использованы в качестве диагностических признаков для контроля ТС снабберов. Для локализации отказавшей снабберной цепи достаточно провести измерения амплитуды обратных напряжений вентилях: как следует из рис. 6, б вентиль с дефективной RC-цепью имеет повышенную относительно других вентилях амплитуду обратного напряжения.

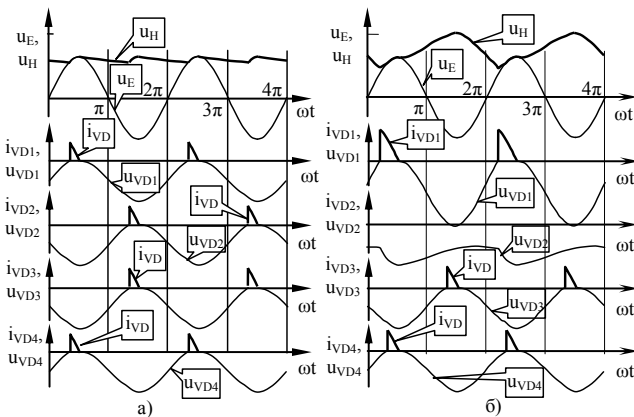


Рис. 6. Токи и напряжения в силовой части при величине $R_H = 1 \text{ МОм}$ для исправной схемы (а); при десятикратном снижении величины емкости C_1 (б)

Таблица 1

Амплитуды спектральных составляющих выходного напряжения для исправной и неисправной силовых частей

Номер гармоники	0	1	2	3	4	5	6	7
Испр.	11,942	0	0,611	0	0,273	0	0,151	0
Неиспр.	15,021	4,398	1,179	0,341	0,385	0,087	0,125	0,018

Выводы. 1. Предложена структура математической модели силовой части вентильного преобразователя, учитывающая наличие ЦПЗ и позволяющая определять диагностические признаки для различных технических состояний ЦПЗ.

2. Необходимым условием для контроля и диагностики ТС ЦПЗ является отключение выходной емкости фильтра и обеспечение близкого к холостому ходу режима работы СЧ.

3. Диагностическими признаками для контроля ТС ЦПЗ является повышение постоянной составляющей выходного напряжения сверх амплитудного значения напряжения питания и наличие в выходном напряжении гармоник с сетевой частотой.

4. Диагностическими признаками для локализации дефективной РС-цепи является повышенная амплитуда обратного напряжения вентиля с дефективным снаббером.

ЛИТЕРАТУРА

1. Воронин П.А. Силовые полупроводниковые ключи: семейства, характеристики, применение. – М.: Издательский дом "Додэка-XXI", 2001. – 384 с.
2. Гринштейн Б.И., Тимошенко А.Л., Безуглый С.Л. Воздействие сетевых перенапряжений на высоковольтный тиристорный преобразователь // *Электричество*. – 1990. – № 2. – С. 1 – 8.
3. Колпаков А.М. Устранение зацелкивания в драйверах фирмы International Rectifier // *Chip news Украина. Инженерная микроэлектроника*. – 2002. – № 1. – С. 56 – 58.
4. Чибиркин В.В., Ковтун В.И., Мартыненко В.А. Новые разработки быстро-восстанавливающихся диодов в ОАО "Электровыпрямитель" и их конструкторско-технологическое обеспечение // *Электротехника*. – 1998. – № 7. – С. 38 – 46.
5. *Техническая диагностика вентиляльных преобразователей* / В.В. Маркин, В.Н. Миронов, С.Г. Обухов. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 152 с.
6. Давыдов П.С. *Техническая диагностика радиоэлектронных устройств и систем*. – М.: Радио и связь, 1988. – 256 с.
7. Шимук Д.С. Методика выявления информативных параметров технического состояния статических преобразователей // *Система обробки інформації. Збірник наукових праць*. Вип. 2(6). – Х.: НАНУ, ПАНМ, ХВУ, 1999. – С. 145 – 149.
8. Шимук Д.С. Усовершенствованный топологический метод расчета сложных электрических цепей // *Збірник наукових праць*. – Вип. 1(27). – Х.: ХВУ, 2000. – С. 118 – 123.

Поступила 12.09.2003

ШИМУК Дмитрий Степанович, преподаватель кафедры электроснабжения Харьковского военного университета. Окончил Военную академию им. Ф.Э. Дзержинского. Область научных интересов – электротехника, силовая электроника.