

К ВОПРОСУ О НАДЕЖНОСТИ СИСТЕМ С РАСПРЕДЕЛЕННОЙ НАГРУЗКОЙ

Кривцов В. В.¹, Гуревич В. И.²¹Автоконцерн Форд, Мэрилендский университет (США),²Центральная Лаборатория Электрической компании Израиля (Израиль)

В данной статье предлагается краткий обзор аспектов надежности для технических систем с распределенной нагрузкой в параллельной и последовательной конфигурациях.

Постановка проблемы

В теории надежности под *системой с распределенной нагрузкой*, как правило, понимается *параллельное* резервирование, при котором общая нагрузка системы распределяется между составляющими ее компонентами. Примером таких параллельных систем являются опоры мостов, мультипроцессорные компьютерные системы, структура композитных материалов и т.п. Следует заметить, что при отказе одной из компонент такой системы, нагрузка перераспределяется между оставшимися компонентами и функционирование системы не прерывается.

Некоторые электротехнические системы, такие как например высоковольтный тиристорный ключ, в котором общее коммутационное напряжение распределяется между последовательно соединенными тиристорами, с точки зрения теории надежности представляют собой *последовательную систему с распределенной нагрузкой*. При этом очевидно, что отказ любой из компонент ведет к отказу всей системы. В данном контексте возникает задача оптимального выбора числа компонент в том смысле, что его увеличение ведет к снижению удельной нагрузки на компоненту, таким образом увеличивая ее надежность, но при этом снижая надежность всей системы; и наоборот.

Основные материалы исследований

Говоря о *последовательной* электротехнической системе с распределенной нагрузкой, следует учесть, что в такой электротехнической системе возможны два вида повреждений: пробой полупроводниковой структуры (short-circuit) и обрывы (open-circuit) внутри полупроводниковой структуры или во внешних элементах соединяющих последовательно тиристоры. Вероятность повреждений типа short-circuit и open-circuit не одинаковы (для тиристоров, например, по статистике 90 % повреждений являются повреждениями типа short-circuit). При отсутствии "горячего" резерва и небольшом количестве последовательно соединенных элементов (2–3) при пробое хотя бы одного последовательно соединенного элемента нагрузка на остальные элементы недопустимо возрастет и они также будут пробиты.

Если, чисто теоретически предположить, наличие в системе, состоящей из большого числа последовательно соединенных элементов, "горячего" резерва в виде некоторого количества дополнительных последовательных элементов, обеспечивающих работоспо-

собность системы при повреждении отдельных элементов, то в этом случае последовательная система с точки зрения надежности могла бы превратиться в тривиальную параллельную.

На практике же этого не происходит по нескольким причинам. Во-первых, с ростом количества последовательно соединенных элементов растет также и количество дефектов в последовательной цепочке, включающей и дефекты внутри полупроводниковой структуры тиристоров, и дефекты во внешних элементах последовательного соединения тиристоров. Во-вторых, повреждение даже одного последовательно соединенного элемента в такой сложной и дорогой системе, как высоковольтный тиристорный модуль, свидетельствует о серьезной неисправности системы и она, обычно, выводится из работы устройством защиты для предотвращения развития аварии и необратимого разрушения всей системы.

При этом дополнительные элементы необходимы лишь для предотвращения необратимого разрушения системы и возможности ее оперативного отключения средствами автоматического или ручного управления по сигналам системы мониторинга, а не для продолжения работы. Это особенно актуально в системе с небольшим количеством последовательно соединенных мощных высоковольтных элементов, каждый из которых имеет высокую стоимость [3–6].

Однако, с точки зрения надежности не важно по какой именно причине система оказывается не в состоянии выполнять свои функции. Таким образом, рассматриваемая последовательная система с распределенной нагрузкой не может рассматриваться как частный случай параллельной системы даже с учетом малой вероятности отказов вида "обрыв" и наличия некоторого количества "запасных" элементов, поскольку даже единичный пробой приводят к отказу системы так же, как и единичный обрыв [7–8].

В общем случае, физика отказов в тиристорах достаточно сложная, например, под действием высокой скорости нарастания тока di/dt возможен эффект "шнурования тока", то есть его концентрации на малой площади полупроводниковой структуры и точечный прожег этой структуры (пробой). При большом значении тока возможно полное выгорание внутренней структуры и обрыв тока, после чего все напряжение системы будет приложено к этому единичному обрыву, что вызовет повторный пробой, сопровождающийся мощной электрической дугой, которая расплавляет металл и может привести либо к образованию короткозамкнутого мостика из этого металла, либо к его испарению и образованию диэлектрического

промежутка, выдерживающего рабочее напряжение системы.

Будем считать, что обрывы, в отличие от пробоев, не зависят от коэффициента загрузки, а определяются лишь наличием изначальных дефектов в самой полупроводниковой структуре и дефектами во внешних соединительных элементах.

Дефекты во внешних соединительных элементах, увеличивающие вероятность обрыва в последовательной системе, могут возникать по причине нарушения электрического контакта между элементами вследствие многократно повторяющихся циклических нагрузок, сопровождающихся циклическим изменением температуры и возникновением циклических механических напряжений в жестком соединении между элементами, а также вследствие механического разрушения элементов крепления.

Кроме всего вышеизложенного, авторы принимают во внимание также и отказы, связанные с системой управления тиристорами. Так, например, пропуск даже одного импульса управления приведет к тому, что все последовательно соединенные тиристоры, за исключением одного, будут открыты.

Оставшийся запертым тиристор обусловит появление отказа типа "обрыв" с последующим переходом его в пробой. Аналогичным образом, лишний сигнал отпирания даже одного тиристора в то время, когда все остальные тиристоры заперты, инициирует отказ типа пробоя и вызовет срабатывание устройства защиты и отключение всей системы. Однако, эти отказы не изменяют общей модели системы, принятой в расчете.

Выводы

Кривцов и Гуревич [1] впервые сформулировали проблему оптимального выбора числа компонент для последовательной системы с распределенной нагрузкой в рамках экспоненциальной модели времени жизни с ковариантной функцией Аррениуса.

Позднее решение было обобщено для распределения Вейбулла–Гнеденко с ковариантной функцией в виде моделей пропорциональных рисков и ускоренных испытаний [2].

Полученное решение имеет не только чисто теоретическое, но также и большое практическое значение, заключающееся в возможности оптимального проектирования сложных и дорогостоящих систем, содержащих последовательно соединенные элементы.

Список использованных источников

1. Кривцов В. В. К расчету оптимального по надежности числа последовательно соединенных элементов РЭА / В. В. Кривцов, В. И. Гуревич // Электронная техника. – Сер.: Электровакуумные и газоразрядные приборы. – 1991. – с. 68-71.

2. Krivtsov V. Load sharing in series configuration [Electronic resource] / V. Krivtsov, S. Amari, V. Gurevich // Qual Reliab Engng Int. – 2017. – 1-12. – Mode of access: <https://doi.org/10.1002/qre.2230>.

3. Гуревич В. И. Уязвимости микропроцессорных реле защиты: проблемы и решения / В. И. Гуревич. – М.: Инфра-Инженерия, 2014. – 256 с.

4. Гуревич В. И. Защита оборудования подстанции от электромагнитного импульса / В. И. Гуревич. – М.: Инфра-Инженерия, 2016. – 302 с.

5. Гуревич В. И. Преднамеренные электромагнитные деструктивные воздействия – угроза национальной безопасности страны / В. И. Гуревич // Проблемы анализа риска. – 2016. – № 5. – с. 44-51.

6. Гуревич В. И. Электромагнитный терроризм – новые опасности / В. И. Гуревич // Электротехника и Электромеханика. – 2005. – № 4. – с. 81-83.

7. Гуревич В. И. Проблема электромагнитных воздействий на микропроцессорные устройства релейной защиты / В. И. Гуревич // Компоненты и технологии. – 2010. – № 2. – с. 60-64.

8. Гуревич В. И. Проблема устойчивости микропроцессорных систем релейной защиты и автоматизации к преднамеренным деструктивным электромагнитным воздействиям / В. И. Гуревич // Компоненты и технологии. – 2011 – № 4.

Аннотация

К ВОПРОСУ О НАДЕЖНОСТИ СИСТЕМ С РАСПРЕДЕЛЕННОЙ НАГРУЗКОЙ

Кривцов В. В., Гуревич В. И.

В данной статье предлагается краткий обзор аспектов надежности для технических систем с распределенной нагрузкой в параллельной и последовательной конфигурациях.

Abstract

ON RELIABILITY OF LOAD SHARING SYSTEMS

V. Krivtsov, V. Gurevich

This paper offers a brief review of reliability aspects of load sharing systems in parallel and series configurations.