УДК 621.315, 621.3.022

Н.П. Винтоняк, В.Д. Семенов, В.А. Кабиров, А.В. Кобзев, А.О. Сулайманов

Оценка величины паразитных индуктивностей токоведущих шин в источнике питания испытательного комплекса для прогрузки автоматических выключателей постоянного тока

Производится оценка методов расчета паразитных (собственных) индуктивностей на примере конструкции токоведущих шин в источнике питания испытательного комплекса для прогрузки автоматических выключателей постоянного тока, построена имитационная модель источника питания для расчета индуктивностей, представлены сравнительные данные результатов расчетов и моделирования, подтверждающие достоверность используемых методов и адекватность имитационной модели.

Ключевые слова: источник питания, токоведущие шины, индуктивность, расчет, моделирование, COMSOL Multiphysics.

doi: 10.21293/1818-0442-2016-19-4-129-132

Испытательный комплекс для прогрузки (проверки) автоматических выключателей постоянного тока [1] (в дальнейшем – испытательный комплекс) предназначен для генерации тока мгновенного расцепления с целью проверки защитных характеристик автоматических выключателей в диапазоне токов до 26 кА. В состав источника питания испытательного комплекса входят семь импульсных стабилизаторов тока с микропроцессорной системой управления [2] (в дальнейшем – стабилизаторы тока), включенных параллельно и соединённых между собой медными токоведущими шинами. Конструктивное выполнение токоведущих шин испытательного комплекса представляет собой непростую задачу, тем более что их паразитные параметры (активное сопротивление и собственная индуктивность) определяют габаритную мощность и амплитуду выбросов напряжений на стабилизаторах тока при срабатывании автоматического выключателя постоянного тока. Эти выбросы напряжения (перенапряжения) способны вывести из строя полупроводниковые приборы, что неоднократно подтверждалось при проведении натурных испытаний.

Поэтому расчет величины паразитных (собственных) индуктивностей токоведущих шин источника питания испытательного комплекса и определение возможных перенапряжений является актуальной задачей.

Конструктивное исполнение токоведущих шин источника питания испытательного комплекса

Так как величина паразитных индуктивностей определяется геометрическими размерами, рассмотрим конструкцию токоведущих шин источника питания испытательного комплекса, представленную на рис. 1. Конструктивное исполнение токоведущих шин определяется расположением стабилизаторов тока (И1 – И7) и выходов источника питания испытательного комплекса (В+ и В–), которые установлены на разных горизонтальных уровнях (Y_1 – Y_5) в двух стойках типа Rittal DK-TS 7820.730. Токоведущие шины источника питания испытательного комплекса выполнены в виде двух «магистралей» (M_1 и

M_2), соединённых между собой двумя перемычками (Π_1 и Π_2), с паразитными индуктивностями $L_{\Pi 1}$ и $L_{\Pi 2}$. Шина положительной полярности (+) первой «магистрали» M_1 подключена к положительному выходу (В+) источника питания испытательного комплекса с паразитной индуктивностью L_{B1} , а шина отрицательной полярности (–) второй «магистрали» M_2 подключена к отрицательному выходу (В–) источника питания испытательного комплекса с паразитной индуктивностью L_{B2} .

Рис. 1. Конструкция токоведущих шин источника питания испытательного комплекса для прогрузки автоматических выключателей постоянного тока

Рис. 2. Эквивалентная схема источника питания испытательного комплекса для прогрузки автоматических выключателей постоянного тока

Выходы стабилизаторов тока подключаются к «магистральям» через выводы, обладающие паразитной индуктивностью L_X . Каждая «магистраль» состоит из двух монолитных медных шин (положительной «+» и отрицательной «-» полярности), но для удобства дальнейшего рассмотрения паразитных индуктивностей они разделены на отдельные участки с паразитными индуктивностями $L_{III1} - L_{III12}$. При изучении источника питания испытательного комплекса в режиме короткого замыкания в качестве нагрузки используется П-образная медная шина (ПКЗ), направление протекания тока нагрузки (I_H) указано стрелкой.

В соответствии с обозначениями, принятыми при описании конструкции токоведущих шин (рис. 1), составим эквивалентную схему источника питания испытательного комплекса, представленную на рис. 2. Направления протекания токов ($I_1 - I_7$) стабилизаторов тока (И1 – И7) указаны стрелками.

Высокий уровень тока источника питания измерительного комплекса, конструктивные особенности измерительного комплекса и модульный принцип его построения накладывают ограничения на конструктивное исполнение токоведущих шин, что в свою очередь воплощается в несимметричном подключении «магистралей» и стабилизаторов тока (рис. 1 и 2) к нагрузке.

Расчет паразитных индуктивностей токоведущих шин

Паразитную индуктивность токоведущих шин при постоянном токе и низкой частоте, в соответствии с рис. 3, можно рассчитать по формуле [3]

$$L = \frac{\mu_0}{\pi} \left(\ln \left(\frac{d}{b+c} \right) + \frac{\gamma^2 - 1}{2\gamma^2} \times \ln(1 + \gamma^2) + \frac{2}{\gamma} \arctg(\gamma) \right) \times l, \quad (1)$$

где L – паразитная индуктивность; μ_0 – магнитная постоянная; d – расстояние между осями шин; b – толщина шин; c – ширина шин; $\gamma = \frac{c}{d}$; l – длина шин.

Рис. 3. Размеры параллельных участков токоведущих шин

Исходя из (1) и рис. 3, паразитная индуктивность участков шин $L_{III1} - L_{III4}$, при $d=155$ мм, $b=10$ мм, $c=120$ мм, $l=950$ мм составляет

$$L_{III1} = L_{III2} = L_{III3} = L_{III4} \approx L/4 \approx 1,635 \times 10^{-7} \text{ Гн}. \quad (2)$$

По аналогии с (2) можно рассчитать паразитные индуктивности остальных участков токоведущих шин.

Так как токоведущие шины источника питания испытательного комплекса выполнены в виде двух «магистралей» (M_1 и M_2), вследствие магнитной связи в них может возникнуть ЭДС взаимной индукции, обусловленная наличием взаимной индуктивности между «магистральями» [4]. Взаимную индуктивность двух лежащих в одной плоскости прямоугольников, в соответствии с рис. 4, можно рассчитать по формуле [3]

$$L_{12} = -\frac{\mu_0}{4\pi} \times \frac{S_1 S_2}{r^3} \times \left[1 + (5u^2 - 1) \times \frac{a_1^2 + a_2^2}{2r^2} + (5v^2 - 1) \times \frac{b_1^2 + b_2^2}{2r^2} + (21uv^2 - 2) \times \frac{5(a_1^2 + a_2^2)(b_1^2 + b_2^2)}{4r^4} + \right]$$

$$+\frac{1}{8}(1-14u^2+21u^4)\times\frac{3a_1^4+10a_1^2a_2^2+3a_2^4}{r^4}+ \\ +\frac{1}{8}(1-14v^2+21v^4)\times\frac{3b_1^4+10b_1^2b_2^2+3b_2^4}{r^4}\Big], \quad (3)$$

где L_{12} – взаимная индуктивность «магистралей»; S_1, S_2 – площадь «магистралей» M_1 и M_2 ; $a_1 = A_1/2$, $a_2 = A_2/2$, $b_1 = B_1/2$, $b_2 = B_2/2$ – длины соответствующих сторон «магистралей»; r – расстояние между центрами «магистралей»; $u = \cos(\Theta)$; $v = \sin(\Theta)$; Θ – угол между направлением r и направлением, параллельным сторонам A_1 и A_2 ;

Рис. 4. Размеры «магистралей» токоведущих шин

Исходя из (3) и рис. 4, взаимная индуктивность «магистралей» M_1 и M_2 , при $A_1 = A_2 = 155$ мм, $B_1 = 1100$ мм, $B_2 = 1455$ мм, $r = 625,7$ мм, $\Theta = 16,48^\circ$, составляет

$$L_{12} \approx -6,397 \times 10^{-9} \text{ Гн}, \quad (4)$$

Так как взаимная индуктивность «магистралей» M_1 и M_2 в десятки раз меньше индуктивности участков шин $L_{III1} - L_{III4}$, её можно не учитывать в дальнейшем рассмотрении паразитных индуктивностей.

Несмотря на то, что в [3, 5] представлено обширное количество методов расчета индуктивностей для различных конструктивных исполнений токоведущих шин, их расчет является трудоемкой задачей. Наряду с эмпирическими формулами и методами расчета можно использовать численные методы расчета и соответствующие программные средства моделирования, которые позволяют учитывать реальные конструктивные особенности токоведущих шин и значительно упрощают задачу расчета паразитных индуктивностей.

Измерение индуктивности токоведущих шин в среде моделирования COMSOL Multiphysics

Для расчета паразитных индуктивностей токоведущих шин источника питания испытательного комплекса подходят среда моделирования COMSOL Multiphysics и методика [6], основанная на измерении энергии магнитного поля как интеграла по объему от плотности магнитной энергии, с дальнейшим пересчетом ее в значение индуктивности.

Моделирование проводится в подразделе Magnetic and Electric Fields модуля AC/DC, в трехмерном пространстве и при стационарном анализе. После импортирования 3D-модели токоведущих шин источника питания измерительного комплекса (рис. 1)

с помощью геометрического инструмента Blok создается кубическое пространство размером $2 \times 3 \times 2$ м (со смещением $-0,75 \times -0,5 \times -0,5$ м) для имитации воздушного пространства. В дальнейшем каждому элементу модели назначается соответствующий материал (воздух и медь). Для имитации стабилизаторов тока (И1 – И7) используется медная перемычка с зазором (g), подключенная к выводам «магистралей», и элемент Gap Feed, раздела Single-Turn Coil, который задает ток в зазоре (g). Параметры разбиения сетки задаются средой моделирования (Physics-controlled mesh) с размером элементов – Normal.

Для измерения паразитной (собственной) индуктивности отдельных участков токоведущих шин стабилизаторы тока поочередно замыкаются друг на друга и на нагрузку, тем самым создавая контуры измерения. Например, для измерения индуктивности L_{III1} и L_{III2} И1 замыкался на И2 (см. рис. 2), при этом элемент Gap Feed И2 отключался (И2 используется как медная перемычка – замкнутая цепь), а в качестве материала остальных стабилизаторов тока и нагрузки выбирался воздух (разомкнутая цепь).

В результате моделирования с помощью инструмента Global Evaluation полученное значение энергии магнитного поля (mf.intWm), преобразуется в суммарное значение индуктивности участков токоведущих шин (измеряемого контура) по формуле [4]

$$L_{\Sigma} = \frac{2W_m}{I^2}, \quad (5)$$

где L_{Σ} – суммарная индуктивность участков шин; W_m – энергия магнитного поля; I^2 – ток, протекающий в измеряемом контуре.

В инструменте Global Evaluation значение индуктивности (5) рассчитывается с помощью выражения $-2 * \text{mf.intWm} / (I^2)$.

Значение индуктивностей отдельных участков токоведущих шин вычисляет из (5). Например при замыкании И1 на И2 (см. рис. 2) индуктивности L_{III1} и L_{III2} вычисляются по формуле

$$L_{III1} = L_{III2} \approx \frac{L_{\Sigma}}{2}. \quad (6)$$

Данные, представленные в таблице, подтверждают хорошую сходимость результатов моделирования и расчетов (1). На прямых участках токоведущих шин расхождение результатов моделирования и расчетов не превышает 3%. Расхождение рассчитанных значений индуктивностей перемычек и выводов источника питания измерительного комплекса с результатами моделирования не превышает 9%. Данное расхождение (9%) обусловлено неточностью расчетов по (1), т.к. указанные участки токоведущих шин расположены в разных плоскостях и расчет их паразитных индуктивностей требует применения других методик и значительно усложняется. На основании этого сравнения результаты моделирования можно считать достоверными, а построенную имитационную модель – адекватной.

Индуктивность участков токоведущих шин источника питания испытательного комплекса для прогрузки автоматических выключателей постоянного тока

Индуктивность участка токоведущих шин	Рассчитанное значение, Гн	Результат моделирования, Гн	Расхождение, %
L_{III1}	$1,635 \times 10^{-7}$	$1,591 \times 10^{-7}$	2,69
L_{III3}			
L_{III2}		$1,606 \times 10^{-7}$	1,77
L_{III4}			
L_{III6}		$1,607 \times 10^{-7}$	1,71
L_{III9}			
L_{III7}		$1,596 \times 10^{-7}$	2,38
L_{III10}			
L_{III8}		$1,605 \times 10^{-7}$	1,83
L_{III11}			
$L_{II1}+L_{III5}+L_{II2}+L_{III12}$	$8,907 \times 10^{-7}$	$8,134 \times 10^{-7}$	8,68
$L_{BI1}+L_{BI2}$	$5,107 \times 10^{-7}$	$4,679 \times 10^{-7}$	8,38

Заключение

Разработанная в среде моделирования COMSOL Multiphysics имитационная модель для расчета индуктивностей токоведущих шин в силовых источниках питания позволяет рассчитать индуктивности конструктивно сложных шин, не обладающих симметрией.

Несмотря на то, что полученные значения паразитных индуктивностей участков токоведущих шин источника питания испытательного комплекса на первый взгляд могут показаться незначительными (сотни нГн), для рабочих токов в диапазоне от 4 до 26 кА они являются причиной возникновения значительных выбросов напряжения при срабатывании автоматического выключателя постоянного тока.

Амплитуда выбросов напряжения накладывает ограничения на выбор полупроводниковых приборов, установленных в выходной цепи стабилизаторов тока (синхронных выпрямителей) [2], или требует применения специальных защитных цепей.

Полученные значения паразитных индуктивностей (таблица) будут использованы при построении имитационной модели источника питания испытательного комплекса, на основе которой будут определены амплитуды выбросов напряжения, возникающих в процессе прогрузки автоматических выключателей постоянного тока, и проведена оптимизация конструктивного исполнения токоведущих шин.

Литература

1. Винтоняк Н.П. Испытательный комплекс для прогрузки автоматических выключателей постоянного тока // Научная сессия ТУСУР-2016. – 2016. – Т. 2. – С. 237–239.
2. Винтоняк Н.П. Программное обеспечение ячейки испытательного комплекса для прогрузки автоматических выключателей постоянным током / Н.П. Винтоняк, В.А. Федотов, В.Д. Семенов // Электронные средства и системы управления. – 2015. – Ч. 1. – С. 217–221.
3. Калантаров П.Л. Расчет индуктивностей: справочная книга / П.Л. Калантаров, Л.А. Цейтлин. – 3-е изд., перераб. и доп. – Л.: Энергоатомиздат, 1986. – 488 с.

4. Калашников С.Г. Электричество. – М.: Физматлит, 2003. – 624 с.

5. Носов Г.В. Расчет сопротивлений и индуктивностей экранированного трехфазного шинпровода / Г.В. Носов, К.А. Трофимович // Доклады ТУСУРа. – 2013. – № 2(28). – С. 81–85.

6. Упорова Е.О. Методика расчета индуктивности проводников сложной конструкции с использованием среды моделирования COMSOL Multiphysics // Итоги научно-исследовательских работ курсового проектирования студентов кафедры промышленной электроники / под ред. к.т.н. В.Д. Семенова. – Вып. 8. – Томск: Том. гос. ун-т систем управления и радиоэлектроники, 2015. – С. 77–85.

Винтоняк Никита Павлович

Аспирант каф. промышленной электроники ТУСУРа
Тел.: +7-953-922-24-77
Эл. почта: nic-nic91@yandex.ru

Семенов Валерий Дмитриевич

Канд. техн. наук, профессор каф. промышленной электроники ТУСУРа
Тел.: +7-913-821-22-92
Эл. почта: svd@ie.tusur.ru

Кабиров Вагиз Александрович

Зав. лаб. ГПО каф. промышленной электроники ТУСУРа
Тел.: +7-952-888-46-13
Эл. почта: fva@vipelec.com

Кобзев Анатолий Васильевич

Д-р техн. наук, профессор каф. промышленной электроники ТУСУРа
Тел.: +7 (382-2) 51-05-30
Эл. почта: akobzev@ie.tusur.ru

Сулайманов Алмаз Омурзакович

Канд. техн. наук, зав. каф. электроэнергетических систем ТПУ
Тел.: +7 (382-2) 56-37-31
Эл. почта: sao@tpu.ru

Vintonyak N.P., Semenov V.D., Fedotov V.A., Kobzev A.V., Sulaymanov A.O.

Evaluation of the parasitic inductances magnitude for the bus-bars in the power supply testing system to load automatic circuit breakers DC

The article evaluates methods for the calculation of spurious (self) inductance based on the example of con-design of bus-bars in the power supply testing system used to load of automatic circuit breakers DC. Also, a simulation model of the power supply for the calculation of inductances is built, and comparative data on the results of calculations and simulations, confirming the accuracy of the used methods and the adequacy of the simulation model are provided.

Keywords: power supply, current-carrying bus, inductance, calculation, simulation, COMSOL Multiphysics.