

## ВЫБОР РАЦИОНАЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ УЗЛА ГАЛЬВАНИЧЕСКОЙ РАЗВЯЗКИ ТИРИСТОРНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЧАСТОТЫ

Ламанов С.Л., с.н.с., Цодик И.А., к.т.н., доц., Бабич Е.А., студ.

Донбасский государственный технический университет

просп. Ленина, 16, 94204, г. Алчевск, Украина

E-mail: [tsodikua@rambler.ru](mailto:tsodikua@rambler.ru)

Приведены результаты исследования узла гальванической развязки тиристорного преобразователя частоты, первичная обмотка которого имеет параллельные ветви. Описана методика расчета токов по параллельным ветвям, предложена оценка качества структуры.

**Ключевые слова:** магнитосвязанные контуры, COMSOL Multiphysics, распределение токов, коэффициент увеличения потерь.

**Введение.** Современные силовые преобразователи для обеспечения высокоэффективной работы нуждаются в согласовании выходных параметров преобразователя с параметрами индуктора.

Также необходима гальваническая развязка индуктора от источника питания. Гальваническая развязка значительно повышает уровень безопасности эксплуатации индукционных нагревательных установок.

Несмотря на очевидную необходимость, гальваническая развязка индукционной нагрузки от источника питания почти не применяется, отчего индукторы индукционных установок зачастую имеют гальваническую связь между инвертором и промышленной сетью питания ~ 380В, 50Гц, что требует дополнительных мер по согласованию нагрузки с источником среднечастотного питания и ухудшает электрическую безопасность для обслуживающего персонала, подвергая людей возможности поражения электрическим током с тяжелейшими последствиями.

Отсутствие гальванической развязки связано со значительной стоимостью (5 – 25 тыс. \$), массой (100 – 200 кг и более) и габаритами закалочных трансформаторов. Потери в стали магнитопровода таких трансформаторах доходят до 20%, поэтому их необходимо обеспечивать водяным охлаждением. Всё это ухудшает экономические характеристики установки.

В качестве другого технического решения гальванической развязки нагрузки с промышленной сетью ~ 50 Гц иногда используют питание преобразователя частоты через трансформатор с изолированной нейтралью, но это требует применения отдельного трансформаторной подстанции.

В рассматриваемой далее схеме гальванической развязки предлагается использовать две системы контуров, между которыми имеется индуктивная связь. Первичная обмотка в предлагаемой схеме может содержать несколько параллельных ветвей, которые необходимы для выравнивания нагрузки между параллельно включенными тиристорами. На распределение нагрузки между ветвями влияет эффект вытеснения тока и размагничивающее действие вторичной обмотки. В связи с вышесказанным возникает вопрос – как необходимо разместить вит-

ки параллельной ветви, чтобы нагрузка распределялась равномерно.

**Анализ предыдущих исследований.** Расчет рабочих процессов в системе двух контуров в настоящее время изучен недостаточно. В основном это расчет индуктивностей [1]. Анализ рабочих процессов в воздушном трансформаторе, первичная обмотка которого содержит параллельные ветви, изучен недостаточно.

Поэтому возникает необходимость оценки изменения распределения нагрузки при различном размещении витков параллельной ветви и получения интегрального показателя качества структуры первичной обмотки.

**Материал и результаты исследования.** На рис. 1 показана расчетная схема силовой цепи. В ней имеется конденсатор С, который разряжается после одновременного открывания тиристоров VS1 – VS3. Диоды VD1 – VD3 необходимы для пропускания обратной полуволны. Во вторичной цепи включена нагрузка, причем в расчетах учитывается только ее активная составляющая. Индуктивная составляющая нагрузки не учитывается, так как она компенсируется имеющимся в этой цепи конденсатором.

Для решения поставленной задачи необходимо смоделировать переходной процесс в приведенной на рис. 1 цепи. Для этого запишем уравнения электрического равновесия в этой цепи:

$$\begin{aligned} U_c &= i_1 \cdot r_1 + L_{1,1} \frac{di_1}{dt} + M_{1,2} \frac{di_2}{dt} + M_{1,3} \frac{di_3}{dt} + M_{1,4} \frac{di_4}{dt} \\ U_c &= i_2 \cdot r_2 + M_{2,1} \frac{di_1}{dt} + L_{2,2} \frac{di_2}{dt} + M_{2,3} \frac{di_3}{dt} + M_{2,4} \frac{di_4}{dt} \\ U_c &= i_3 \cdot r_3 + M_{3,1} \frac{di_1}{dt} + M_{3,2} \frac{di_2}{dt} + L_{3,3} \frac{di_3}{dt} + M_{3,4} \frac{di_4}{dt} \\ 0 &= i_4 \cdot r_4 + M_{4,1} \frac{di_1}{dt} + M_{4,2} \frac{di_2}{dt} + M_{4,3} \frac{di_3}{dt} + L_{4,4} \frac{di_4}{dt} \\ \frac{dU_c}{dt} &= -\frac{1}{C}(i_1 + i_2 + i_3) \end{aligned} \quad (1)$$

Где  $L_{1,1}, L_{2,2}, L_{3,3}, L_{4,4}$  – собственная индуктивность исследуемых контуров;  $M_{1,2}, M_{1,3}, M_{1,4}, M_{2,1}, M_{2,3}, M_{2,4}, M_{3,1}, M_{3,2}, M_{3,4}, M_{4,1}, M_{4,2}, M_{4,3}$  – коэффициенты взаимной индукции между контурами;  $r_1, r_2, r_3, r_4$  – активные сопротивления контуров;  $i_1, i_2, i_3, i_4$  – токи в контурах;  $U_c$  – напряжение на конденсаторе.

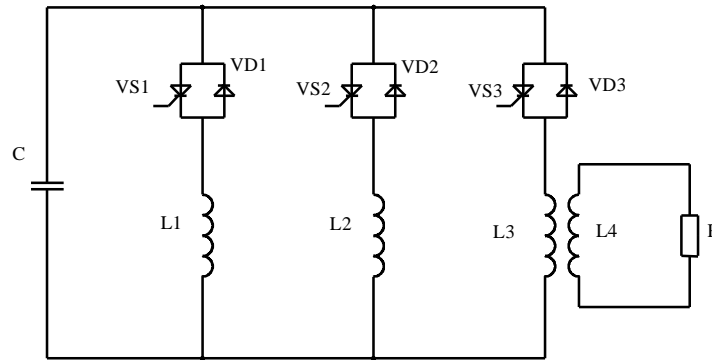


Рисунок 1 – Расчетная схема силовой части преобразователя частоты

Чтобы проводить эксперименты с моделью, необходимо определить собственные индуктивности и коэффициенты взаимной индукции.

Одним из наиболее удобных путей решения – это решение ее численным методом с использованием

COMSOL Multiphysics. Как определять коэффициенты взаимной индукции и собственные индуктивности, в таких задачах достаточно подробно описано в [2].

В качестве объекта исследований выбрана система из двух катушек круглой формы намотанных из медной трубки и расположенных соосно. Катушка первичной обмотки имеет внутренний диаметр 200 мм, она изготовлена из трубки с наружным диаметром 12 мм и содержит 18 витков, которые соединены в 3 параллельные ветви. Вторичная обмотка выполнена из медной трубки диаметром 20 мм, содержит 6 витков и имеет внутренний диаметр 300 мм.

На рис. 2 показан общий вид исследуемого объекта.

Исследовались различные варианты соединения витков в параллельные ветви.

В первом случае (рис. 3,а) последовательно соединены витки одного слоя. Во втором (рис. 3,б) – обмотка состоит из трех отдельных катушек. В третьем (рис. 3,в) – параллельная ветвь состоит из двух катушек, которые размещаются между катушками другой параллельной ветви. В четвертом случае (рис. 3,г), параллельные ветви переплетаются.

После определения коэффициентов взаимной индукции и индуктивностей, решив (1) получаем распределение тока по ветвям параллельным ветвям. Неравномерное распределение тока связано проявлением двух факторов – это неодинаковые коэффициенты взаимной индукции между фазами (эффект вытеснения тока) и неодинаковое размагничивающее действие вторичной обмотки. Влияние этих факторов приводит к увеличению потерь в обмотке.

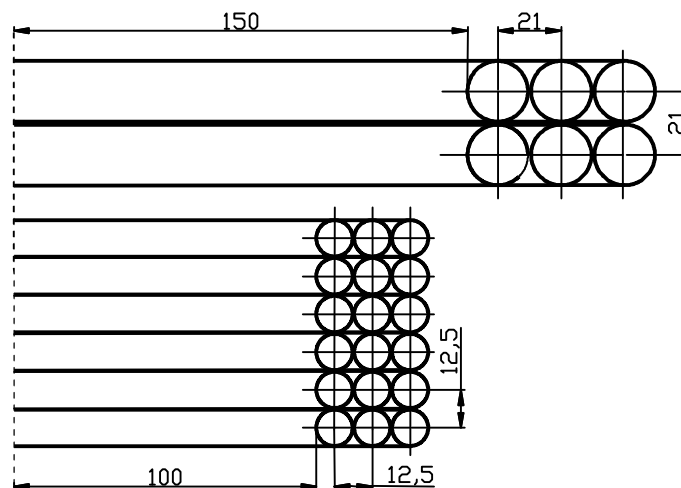


Рисунок 2 – Общий вид узла гальванической развязки

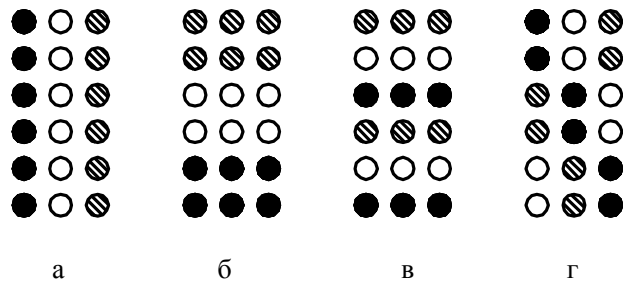


Рисунок 3 – Варианты структуры первичной обмотки

Для оценки структуры предлагается ввести коэффициент увеличения потерь, равный квадрату отношения среднеквадратичного тока к среднему току по ветвям обмотки.

В табл. 1 приведены результаты расчета коэффициента увеличения потерь для различных вариантов структуры обмотки.

Таблица 1 – Коэффициенты увеличения потерь различных вариантов структуры обмотки

Вариант 1	Вариант 2	Вариант 3	Вариант 4
1.558	1.243	1.13	1.007

Получение минимального коэффициента увеличения потерь в четвертом варианте предполагалось до начала исследований. Однако, получение численного значения коэффициента увеличения потерь позволяет оценить целесообразность усложнения конструкции, связанную с необходимостью трансформации витков. Справедливости ради, следует отметить, что неравномерность потерь несколько завышена, связано это с тем, что в модели не учитывалось влияние токоподводящих шин. Но это не сложно сделать, если активные сопротивления и собственные индуктивности ветвей увеличить на соответствующее значение.

## ВИБІР РАЦІОНАЛЬНОЇ СТРУКТУРИ ВУЗЛА ГАЛЬВАНІЧНОЇ РОЗВ'ЯЗКИ ТИРИСТОРНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА ЧАСТОТИ

Ламанов С. Л., с.н.с., Цодік І. А., к.т.н., доц., Бабич Е. А., студ.

Донбаський державний технічний університет

просп. Леніна, 16, 94204, м. Алчевськ, Україна

E-mail: [tsodikua@rambler.ru](mailto:tsodikua@rambler.ru)

Наведені результати дослідження вузла гальванічної розв'язки тиристорного перетворювача частоти, первинна обмотка якого має паралельні гілки. Описана методика розрахунку струмів по паралельним гілкам, запропонована оцінка якості структури

**Ключові слова:** магнітозв'язані контури, COMSOL Multiphysics, розподіл струмів, коефіцієнт збільшення втрат.

## CHOICE OF RATIONAL STRUCTURE OF THE GALVANIC ISOLATION UNIT OF THE THYRISTOR FREQUENCY CONVERTER

Lamanov S., Sen. Resear., Tsodik I., Cand. of Sc. (Tech.), Assoc. Prof., Babich E., stud.

Donbass state technical university

Lenin's prosp., 16, 94204, Alchevsk, Ukraine

E-mail: [tsodikua@rambler.ru](mailto:tsodikua@rambler.ru)

Results of research of the galvanic isolation unit of the thyristor frequency converter which primary winding has parallel lines are given. The calculation procedure of currents on parallel lines is described, the estimation of structure quality is offered.

**Key words:** magnetic connected circuits, COMSOL Multiphysics, distribution of currents, losses increase factor.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Калантаров П. Л., Цейтлин Л. А. Расчет индуктивностей: Справочная книга. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1986. – 488 с: ил.

2. Ламанов С.Л. Исследование в среде Comsol Multifisuc узла гальванической развязки тиристорного преобразователя частоты / С.Л. Ламанов, Л.Ф. Михайлова, Л.Ф. Цодик // Сб. научн. тр. ДонГТУ.– 2010. – Вып. 32. – С. 426 – 433.

Стаття надійшла 19.03.2011 р.

Рекомендовано до друку д.т.н., проф.  
Сенько В.І.