

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОГО АЛГОРИТМА КОММУТАЦИИ КЛЮЧЕЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЧАСТОТЫ ИНДУКТОРА ДЕМАГНЕТИЗАТОРА

Мигдалёнок А. А., ассист.

Белорусский национальный технический университет

пр. Независимости, 6, 220027, г. Минск, Беларусь

E-mail: migalex@tut.by

Рассмотрены возможные алгоритмы коммутации ключей двухзвенного преобразователя частоты с инвертором напряжения (ДПЧ ИН), предназначенного для питания индуктора демагнетизатора крупногабаритных колец подшипников. Разработана имитационная модель преобразователя частоты, с помощью которой получены графики электрических переменных ДПЧ ИН для рассмотренных алгоритмов коммутации и выбран оптимальный алгоритм.

**Ключевые слова:** индуктор демагнетизатора, двухзвенный преобразователь частоты, алгоритмы коммутации.

**Введение.** При обработке детали подшипников подвергаются воздействию внешнего магнитного поля, вследствие чего приобретают остаточную намагниченность. Для уменьшения остаточной намагниченности их необходимо размагничивать с помощью переменного магнитного поля с уменьшающейся до нуля амплитудой. При размагничивании деталей небольшого размера они прокатываются через демагнетизатор с неизменным по амплитуде магнитным полем, частота которого составляет 50 Гц. Данный способ размагничивания достаточно прост и экономичен, однако он непригоден для размагничивания крупногабаритных деталей. Это связано с тем, что из-за наличия поверхностного эффекта глубина проникновения магнитного поля частотой 50 Гц составляет несколько миллиметров. Таким образом, глубинные слои кольца остаются неразмагниченными, что может привести при дальнейшей эксплуатации к снижению надёжности подшипника и его поломке.

Для увеличения глубины проникновения магнитного поля в деталь и обеспечения требуемого качества размагничивания необходимо использовать магнитное поле пониженной (по сравнению с 50 Гц) частоты [1, 2]. При этом для каждой детали с определёнными геометрическими размерами существует определённая оптимальная частота размагничивания.

В работе [3] показано, что для получения магнитного поля пониженной частоты при питании индуктора демагнетизатора наиболее целесообразно использовать двухзвенный преобразователь частоты с инвертором напряжения (ДПЧ ИН).

**Цель работы.** Определение оптимального алгоритма переключения ключей преобразователя частоты индуктора демагнетизатора подшипниковых колец. Оценка качества алгоритмов будет производиться по следующим критериям:

- соответствие выходного тока преобразователя частоты заданному току (оценка гармонического состава выходной кривой тока);

- получение заданной кривой тока при минимальном числе переключений ключей инвертора.

### Материал и результаты исследований.

Функциональная схема двухзвенного преобразователя частоты с инвертором напряжения для питания индуктора демагнетизатора крупногабаритных колец подшипников приведена на рис. 1.

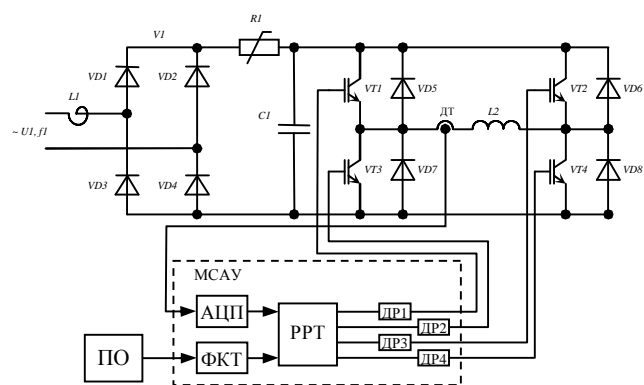


Рисунок 1 - Функциональная схема двухзвенного преобразователя частоты индуктора демагнетизатора

На рис. 1 введены следующие обозначения: L1 – токоограничивающий реактор; V1 – неуправляемый выпрямитель; R1 – термистор; C1 – конденсатор фильтра; VT1...VT4 – IGBT ключи инвертора; DT – датчик тока; L2 – индуктор; ПО – пульт оператора; МСАУ – микропроцессорная система автоматического управления; РРТ – релейный регулятор тока; ФКТ – формирователь кривой задания тока; АЦП – аналого-цифровой преобразователь; ДР1...ДР4 – драйверы.

Поддержание тока демагнетизатора заданной амплитуды и частоты осуществляется релейным регулятором тока РРТ. На его вход поступает сигнал задания тока с формирователя кривой тока ФКТ и сигнал обратной связи по току с датчика тока ДТ. На основании сравнения этих сигналов регулятор тока формирует открывающие импульсы для ключей преобразователя частоты.

Последовательность поступления открывающих импульсов на ключи преобразователя может быть различна и зависит от алгоритма работы релейного регулятора тока РРТ.

Сигнал задания тока, формируемый ФКТ, представляет собой тридцатишестиступенчатую за период кривую, аппроксимирующую синусоиду с заданной амплитудой и частотой.

Возможно использование нескольких алгоритмов работы РРТ для получения заданной кривой выходного тока.

Согласно первому алгоритму, ключи преобразователя включаются и отключаются попарно (симметричная коммутация), в зависимости от знака сигнала задания тока. При положительной полуволне сигнала задания работают ключи VT1, VT4, при отрицательной полуволне – VT2, VT3. Для регулирования величины тока используется релейный принцип. Ключи VT1, VT4 открываются и проводят ток (рис. 2. а), когда действительный ток меньше тока задания на величину, равную половине ширины петли гистерезиса релейного регулятора. Происходит потребление энергии индуктором демагнетизатора от конденсатора фильтра С1. Ключи VT1, VT4 закрываются, когда действительный ток больше тока задания на величину, равную половине ширины петли гистерезиса релейного регулятора. При этом ток протекает через диоды VD6, VD7 (рис. 2. б) и происходит возврат энергии от нагрузки в конденсатор фильтра С1. Ключи VT2, VT3 работают по аналогичному алгоритму с учётом отрицательного знака сигнала задания тока (рис. 2. в, г).

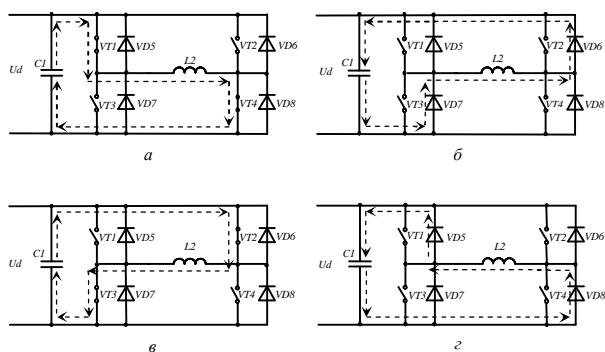


Рисунок 2 - Схемы протекания тока для симметричного алгоритма коммутации

Симметричный алгоритм коммутации математически может быть описан следующим образом:

– положительная полуволна кривой задания тока (интервалы 1 – 18)

$$VT1 = 1, \quad VT4 = 1, \quad \text{если } (i_3 - i_\delta) \geq \frac{\Delta}{2},$$

$$VT1 = 0, \quad VT4 = 0, \quad \text{если } (i_\delta - i_3) > \frac{\Delta}{2},$$

$$VT2 = 0, \quad VT3 = 0;$$

где  $i_3, i_\delta$  – заданное и действительное значения тока индуктора;  $\Delta$  – ширина петли гистерезиса релейного регулятора тока;

– отрицательная полуволна кривой задания тока (интервалы 19 – 36)

$$VT2 = 1, \quad VT3 = 1, \quad \text{если } (i_3 - i_\delta) \geq \frac{\Delta}{2},$$

$$VT2 = 0, \quad VT3 = 0, \quad \text{если } (i_\delta - i_3) > \frac{\Delta}{2},$$

$$VT1 = 0, \quad VT4 = 0.$$

В приведённых алгоритмах 1 означает открытое состояние транзисторного ключа, 0 – закрытое состояние.

Второй возможный алгоритм коммутации ключей инвертора предполагает несимметричную коммутацию с обеспечением трёх режимов работы индуктора демагнетизатора:

– режим потребления энергии от конденсатора фильтра, при котором открыта пара ключей VT1 и VT4 или VT2 и VT3 (рис. 3. а, б);

– режим рассеивания энергии в контуре нагрузки, при котором открыт один ключ VT3 или VT4 (рис. 3. в, г);

– режим возврата энергии от нагрузки в конденсатор фильтра, при котором закрыты все ключи VT1...VT4 (рис. 3. д, е).

Переход от одного режима к другому происходит при достижении действительным значением тока заданного значения. Схемы протекания тока для каждого из режимов представлены на рис. 3.

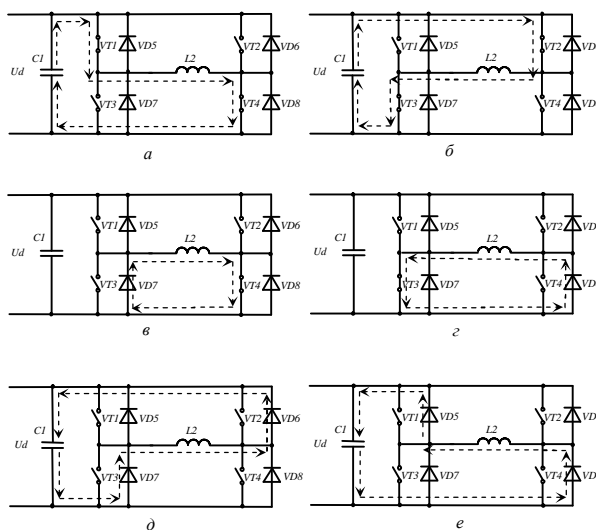


Рисунок 3 - Схемы протекания тока для несимметричного алгоритма коммутации

Математическое описание несимметричного алгоритма коммутации может быть представлено следующим образом:

– интервалы 1 – 9

$$VT1 = \begin{cases} 1, & \text{если } (i_3 - i_0) \geq \frac{\Delta}{2} \text{ при } t_i \leq t \leq t_r, \\ 0, & \text{при } t_r < t < t_j, \end{cases}$$

$$VT4 = 1, \quad VT2 = 0, \quad VT3 = 0;$$

где  $t_r$  – время, при котором  $i_3 = i_0$ ;  $t_j$  – время окончания дискретного интервала кривой задания тока,  $j = 1 \dots 36$ ;

– интервалы 10 – 18

$$VT4 = \begin{cases} 1, & \text{если } (i_0 - i_3) \leq \frac{\Delta}{2} \text{ при } t_r \leq t \leq t_j, \\ 0, & \text{при } t_j < t < t_r, \end{cases}$$

$$VT1 = 0, \quad VT2 = 0, \quad VT3 = 0;$$

– интервалы 19 – 27

$$VT2 = \begin{cases} 1, & \text{если } (i_0 - i_3) \geq \frac{\Delta}{2} \text{ при } t_i \leq t \leq t_r, \\ 0, & \text{при } t_r < t < t_j, \end{cases}$$

$$VT1 = 0, \quad VT4 = 0, \quad VT3 = 1;$$

– интервалы 28 – 36

$$VT3 = \begin{cases} 1, & \text{если } (i_3 - i_0) \leq \frac{\Delta}{2} \text{ при } t_r \leq t \leq t_j, \\ 0, & \text{при } t_j < t < t_r, \end{cases}$$

$$VT1 = 0, \quad VT4 = 0, \quad VT2 = 0.$$

Для сравнения предложенных алгоритмов и выбора наиболее оптимального выполним компьютерное моделирование преобразователя частоты индуктора демагнетизатора. При моделировании определим гармонический состав кривой выходного тока для каждого алгоритма и частоту коммутации ключей преобразователя.

На основе функциональной схемы (рис. 1) и предложенных алгоритмов функционирования РРТ разработана имитационная модель ДПЧ индуктора с релейным регулятором тока при симметричной и несимметричной коммутации (рис. 4).

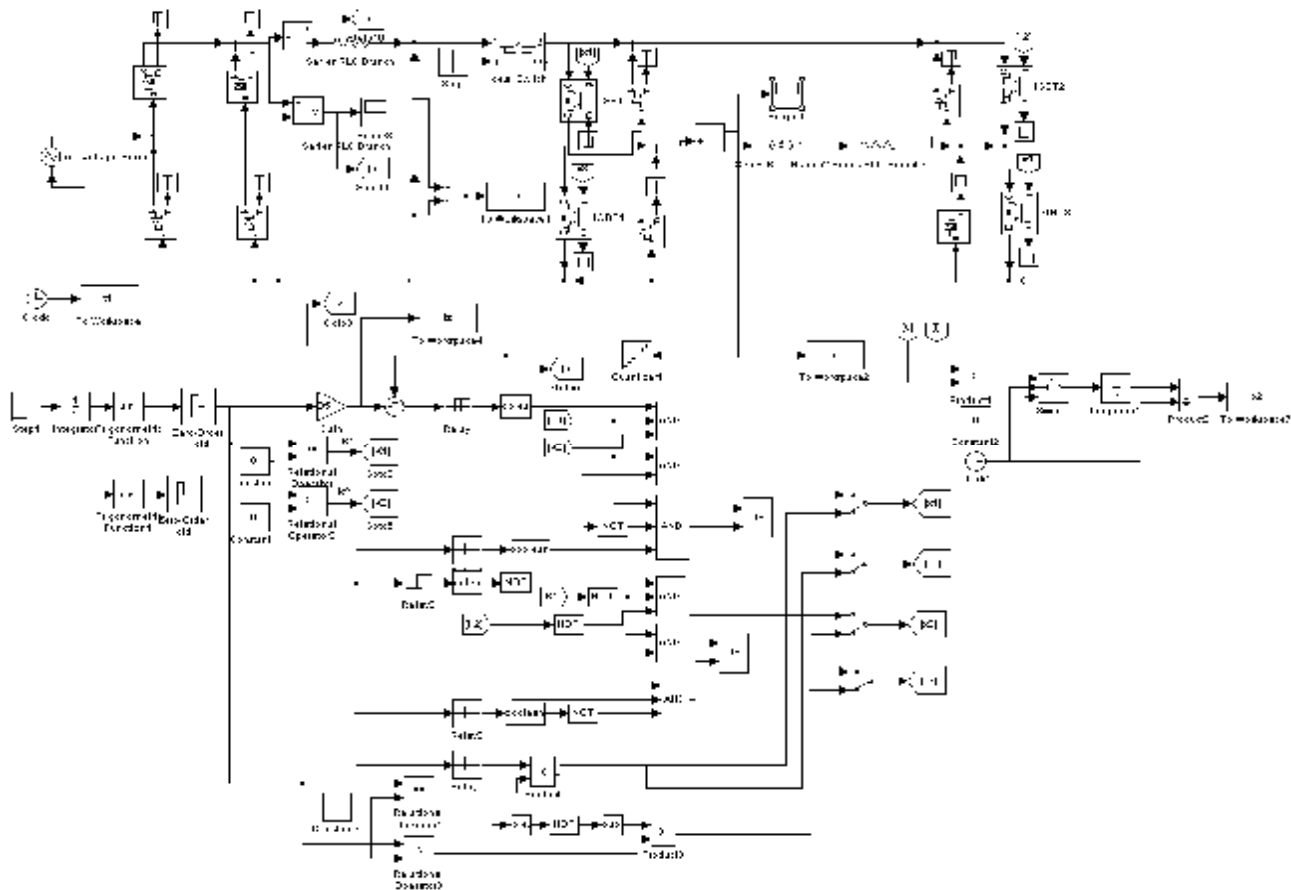


Рисунок 4 - Имитационная модель ДПЧ индуктора с релейным регулятором тока при симметричной и несимметричной коммутации

Имитационное моделирование проведено в системе компьютерного моделирования «Matlab Simulink». В модели использованы следующие параметры силовой цепи: ёмкость конденсатора фильтра  $C1 = 2000$  мкФ, индуктивность индуктора  $L2 = 0,16$  Гн, активное сопротивление индуктора  $R2 = 0,32$  Ом. Амплитуда заданного тока  $I_m = 35$  А, частота  $f = 2$  Гц. В результате моделирования получены графики электрических переменных в ДПЧ ИН: действительного  $i_d$  значения тока индуктора, напряжения  $U_c$  конденсатора фильтра, потребляемой мощности  $P$  (рис. 5. – рис. 6.). Выполнено разложение выходной кривой тока на составляющие гармоники.

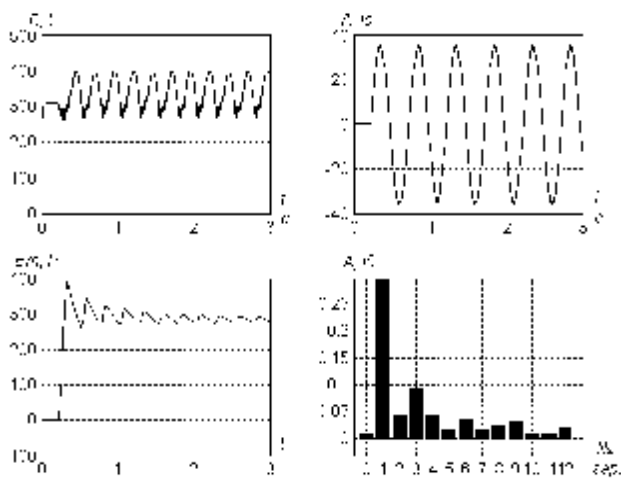


Рисунок 5 - Графики электрических величин при симметричной коммутации

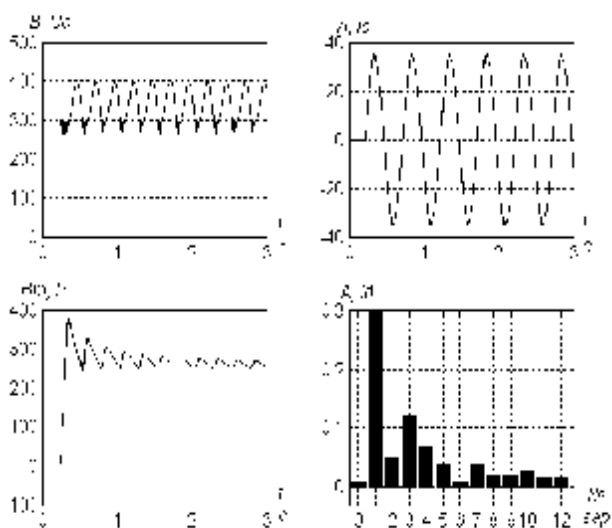


Рисунок 6 - Графики электрических величин при несимметричной коммутации

Анализ графиков электрических величин показывает, что с точки зрения качества

формирования кривой выходного тока индуктора демультипликатора предложенные алгоритмы практически идентичны. Амплитуда первой гармоники при симметричном алгоритме коммутации составляет  $I_{m1} = 34,95$  А, при несимметричном алгоритме коммутации  $I_{m2} = 34,4$  А. Амплитуды высших гармоник не превышают 0,4 % от амплитуды основной гармоники.

Количество переключений силовых ключей преобразователя частоты за период можно определить через количество переключений на каждой ступени кривой заданного тока.

Для симметричного алгоритма коммутации при ширине петли гистерезиса релейного регулятора тока  $\Delta = 1$  А на каждой ступени происходит в среднем 25 переключений силовых ключей. При этом при каждом переключении открываются или закрываются два силовых транзистора. Таким образом, общее число переключений транзисторов за период выходного тока для симметричного алгоритма коммутации будет равно:

$$N_{\text{сим}} = 36 \cdot 25 \cdot 2 = 1800.$$

При несимметричном алгоритме коммутации на каждой ступени происходит два переключения. При первом переключении открываются или закрываются два силовых транзистора, при втором – только один. Таким образом, общее число переключений при несимметричном алгоритме коммутации составит:

$$N_{\text{несим}} = 36 \cdot 3 = 108.$$

Потребляемая из сети мощность меньше для несимметричного алгоритма коммутации, что связано с меньшими потерями на коммутацию силовых ключей инвертора. Исходя из вышесказанного, можно сделать вывод, что наиболее оптимальным является несимметричный алгоритм коммутации ключей инвертора, так как он позволяет получить кривую выходного тока с заданными параметрами при минимальной частоте переключения ключей, что снижает коммутационные потери.

Выводы. Рассмотрены симметричный и несимметричный алгоритмы коммутации силовых ключей преобразователя частоты индуктора демультипликатора подшипниковых колец. Анализ выходной кривой тока и числа переключения силовых ключей преобразователя частоты позволил выбрать алгоритм с несимметричной коммутацией как оптимальный.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Кифер И. И. О размагничивании колец подшипников / И. И. Кифер. Труды института физики металлов АН СССР, 1959. – Вып. 21. – С. 59 – 62.
2. Мороз Р. Р. Влияние частоты электромагнитного поля на качество размагничивания ферромагнитных тел / Р. Р. Мороз // Изв. вузов. Энергетика, 1989. - №1. – С. 55 – 58.
3. Гульков Г. И. Преобразователь частоты демагнетизатора / Г. И. Гульков, А. А. Мигдалёнок, Шайби Рашид // Энергетика – Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ, 2009. - №3. – С. 21 – 27.

## **ВИЗНАЧЕННЯ ОПТИМАЛЬНОГО АЛГОРИТМУ КОМУТАЦІЇ КЛЮЧІВ ПЕРЕТВОРЮВАЧА ЧАСТОТИ ІНДУКТОРА ДЕМАГНЕТИЗАТОРА**

*Мигдальонок О. А., асист.*

*Білоруський національний технічний університет*

*пр. Незалежності, 65, 220027, м. Мінськ, Білорусь*

*E-mail: migalex@tut.by*

Розглянуто можливі алгоритми комутації ключів дволанкового перетворювача частоти з інвертором напруги (ДПЧ ІН), призначеного для живлення індуктора демагнетизатора великогабаритних кілець підшипників. Розроблено імітаційну модель перетворювача частоти, за допомогою якої отримані графіки електричних змінних ДПЧ ІН для розглянутих алгоритмів комутації й обраний оптимальний алгоритм.

**Ключові слова:** індуктор демагнетизатора, дволанковий перетворювач частоти, алгоритм комутації.

## **DETERMINATION OF THE OPTIMAL COMMUTATION ALGORITHM FOR THE POWER SWITCHES OF DEMAGNETIZER INDUCTOR FREQUENCY CONVERTER**

*A. A. Migdalionok, assist.*

*Belarusian National Technical University*

*Nezavisimosti av., 65, 220027, Minsk, Belarus*

*E-mail: migalex@tut.by*

Different commutation algorithms for the power switches of a two-step frequency converter with voltage inverter designed to supply a bearing ring demagnetizer inductor are considered. With the help of a simulation model the charts of frequency converter electrical variables have been obtained and the optimal algorithm has been chosen.

**Key words:** demagnetizer inductor, two-step frequency converter, commutation algorithm.