

РОСЖЕЛДОР

**Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Ростовский государственный университет путей сообщения»
(ФГБОУ ВО РГУПС)**

А.А. Зарифьяном, М.В. Чавычалов, Н.В. Гребенниковым,
А.А. Андрющенко, Т.З. Талахадзе

Методическое обеспечение
для выполнения курсовой работы и самостоятельной работы магистрантов
по дисциплине «Программирование машиностроительных задач»

Ростов-на-Дону
2015

УДК 629.423

Рецензент – доктор технических наук,
профессор кафедры «Теоретическая механика» П.Г. Иваночкин

Зарифьян, А.А.

Методическое обеспечение для выполнения курсовой работы и самостоятельной работы магистрантов по дисциплине «Программирование машиностроительных задач»/ М.В. Чавычалов, Н.В. Гребенниковым, А.А. Андриющенко, Т.З. Талахадзе. ФГБОУ ВО РГУПС. – Ростов н/Д, 2015. – 19 с.

В учебно-методическом пособии описываются современные системы управления электроподвижного состава железных дорог, включая высокоскоростные поезда. Также описан порядок расчета тягового инвертора напряжения.

Соответствует дисциплине «Программирование машиностроительных задач» по направлению 15.04.01 Машиностроение, направленность «Моделирование и проектирование подвижного состава железных дорог».

Одобрено к изданию кафедрой «Локомотивы и локомотивное хозяйство».

© Зарифьян А.А.
© ФГБОУ ВО РГУПС, 2015

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
1 КЛАССИФИКАЦИЯ АВТОНОМНЫХ ИНВЕРТОРОВ НАПРЯЖЕНИЯ	5
2 ОСНОВНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ И НЕОБХОДИМЫЕ ПАРАМЕТРЫ ДЛЯ РАСЧЕТА АВТОНОМНОГО ИНВЕРТОРА НАПРЯЖЕНИЯ	8
3 УСЛОВИЯ РАБОТЫ ОСНОВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ АВТОНОМНОГО ИНВЕРТОРА НАПРЯЖЕНИЯ	9
4 РАСЧЕТ АВТОНОМНОГО ИНВЕРТОРА НАПРЯЖЕНИЯ ДЛЯ ПРИВОДА АСИНХРОННОГО ТЯГОВОГО ДВИГАТЕЛЯ	10
4.1 РАСЧЕТ ОСНОВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ИНВЕРТОРА	10
4.2 ВХОДНЫЕ И ВЫХОДНЫЕ ЗНАЧЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЙ	11
4.3 ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ПРИБОРЫ АИН	11
4.4 ЭЛЕМЕНТЫ ФИЛЬТРА	12
4.5 ПРОВЕРКА РАБОТЫ ОТДЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В НЕСТАНДАРТНЫХ РЕЖИМАХ РАБОТЫ	13
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	17
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	18

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время большая часть производимого подвижного состава для сети железных дорог России оснащена коллекторными тяговыми двигателями. Между тем, современные достижения силовой электроники позволяют эффективно использовать в тяге более совершенные асинхронные двигатели, что доказано опытом эксплуатации электровозов ЭП10, ЭП20, 2ЭС5 и электропоездов «Сапсан» и «Ласточка». Эти электровозы и электропоезда имеют значительные отличия в алгоритмах управления тяговыми двигателями и в схемах тяговых преобразователей по сравнению с эксплуатируемым парком подвижного состава с коллекторными тяговыми двигателями. Настоящее учебно-методическое пособие содержит основные сведения о принципе и условиях работы автономных инверторов напряжения в качестве тяговых преобразователей современного подвижного состава, а также методику проведения краткого расчета инвертора, включающую выбор полупроводниковых элементов и элементов фильтра.

Для более глубокого изучения материала рекомендуется к изучению литература [1-4].

1 КЛАССИФИКАЦИЯ АВТОНОМНЫХ ИНВЕРТОРОВ НАПРЯЖЕНИЯ

Автономные инверторы – это устройства, преобразующие постоянный ток в переменный с постоянной или регулируемой частотой и работающие на автономную нагрузку. В отличие от инверторов, ведомых сетью (зависимых инверторов), у автономного инвертора на стороне переменного тока нет другого источника энергии.

Отсутствие в питаемой сети автономного инвертора источников электрической энергии не позволяет, в отличие от зависимого инвертора, осуществлять естественную коммутацию вентилях (силовых полупроводниковых приборов) за счет ЭДС сети переменного тока.

В автономном инверторе желательно применять полностью управляемые силовые полупроводниковые приборы (СПП), выполняющие функции ключей, которые поочередно подключают фазы нагрузки в цепи переменного тока к положительному и отрицательному полюсам источника постоянного тока. При использовании обычных (однооперационных) тиристоров возникает необходимость в принудительной коммутации (запирании) тиристоров. Сущность принудительной коммутации заключается в том, что за счет пропуска через проводящий тиристор обратного тока прямой ток уменьшается до нуля, точнее до значения тока удержания, а затем к тиристорному прикладывается отрицательное анодное напряжение для восстановления его запирающих свойств.

Способы коммутации тиристоров различны. Чаще всего в современных инверторах используется коммутация с помощью конденсаторов или LC -контура, подключаемого к рабочему тиристорному другим силовым тиристором. По способу коммутации автономные инверторы также делятся на несколько групп. Выбор способа коммутации определяется разработчиком.

По схеме преобразования различают схемы:

- одновентильную (схема прерывателя или тиристорного ключа);
- однофазную двухтактную (полумостовую) с нулевым выводом нагрузки;
- однофазную двухтактную (полумостовая) с нулевым выводом источника питания;
- однофазную мостовую;
- трехфазную мостовую;
- трехфазную с нулевым выводом.

Все остальные схемы являются производными перечисленных групп.

Наибольшее применение в преобразовательной технике на электроподвижном составе, особенно для привода асинхронного тягового двигателя, нашли трехфазные мостовые схемы, которые и будут рассмотрены далее.

В зависимости от особенностей протекания электромагнитных процессов автономные инверторы могут быть разделены на три основных типа, показанные на рисунке 1.1: автономные инверторы тока (АИТ), автономные инверторы напряжения (АИН), резонансные инверторы. На этом же рисунке показаны формы тока и напряжения в номинальном режиме при регулировании напряжения одноимпульсным способом (180-ти градусное управление) [5].

Для автономного инвертора тока (рисунок 1.1а) характерно то, что в результате переключения тиристоров в нагрузке формируется ток определенной формы (i_n), а форма и фаза выходного напряжения зависят от параметров нагрузки. Источник постоянного тока работает в режиме генератора тока, для чего во входную цепь включен реактор L_d с большой индуктивностью. Кроме того, реактор L_d выполняет функции фильтра высших гармонических напряжений.

Преимущества АИТ [5]:

- простота схемы;
- возможность применения тиристоров с относительно большим временем выключения (250-300 мкс).

Недостатками АИТ являются:

- рост амплитуд обратных и прямых напряжений на тиристорах и сопутствующих им больших величин скорости нарастания тока (di/dt) и напряжения (du/dt) на полупроводниковых приборах.

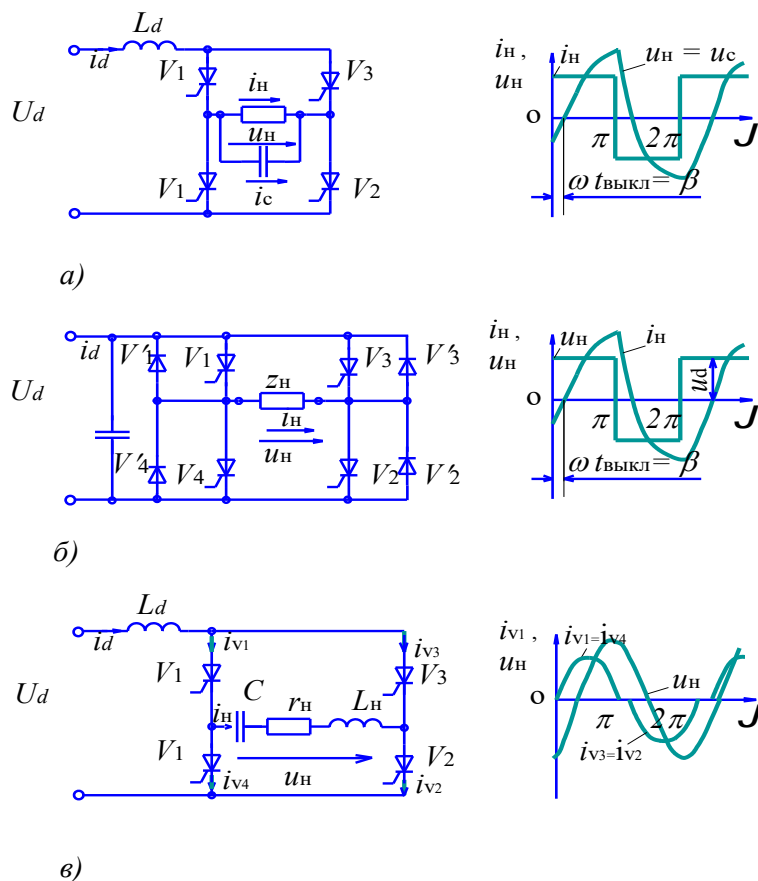


Рисунок 1.1 – Типы инверторов

а – автономный инвертор тока (АИТ); б – автономный инвертор напряжения (АИН); в – резонансный инвертор.

Обозначения: U_d, i_d – входные напряжение и ток, соответственно; $V_1 \div V_4$ – СПИ, выполненные на базе однооперационных тиристоров; $V'_1 \div V'_4$ – обратные

диоды; u_n , i_n , r_n , L_n, C_n, z_n – напряжение, ток, активное сопротивление, индуктивность, емкость и полное сопротивление нагрузки, соответственно; C – зарядная емкость АИТ; C_0 – входная емкость АИН; u_n , i_n – выходные напряжение и ток; u_c – напряжение на конденсаторе АИТ; β – угол запираания; $i_{V1} \div i_{V4}$ – токи вентиляей.

Выпускающиеся в настоящее время отечественной промышленностью силовые полупроводниковые приборы не всегда имеют достаточную для работы в АИТ di/dt и du/dt :

- затруднение работы при перегрузках из-за недостаточного времени для восстановления запирающих свойств тиристоров;

- требование обязательного применения источника входного преобразователя, осуществляющего регулирование тока независимо от типа первичного источника питания;

- введение во входной преобразователь, при питании от сети постоянного тока, дополнительных диодов и контакторов тормозного переключателя при переходе в генераторный режим.

В автономных инверторах напряжения (рисунок 1.1 б) в результате переключения тиристоров на нагрузке формируется напряжение определенной формы (u_n), а форма и фаза тока зависят от характера нагрузки. Через обратные диоды выпрямительного моста $V'_1 \div V'_4$ осуществляется энергообмен между накопителями, имеющимися в составе нагрузки, и источниками питания или конденсатором C_0 достаточно большой емкости. Конденсатор C_0 выполняет функции фильтра высших гармонических тока. Источник питания инвертора напряжения работает в режиме генератора напряжения.

Если АИН питается от выпрямителя, то конденсатор C_0 выбирается большей емкости, чем при питании от сети постоянного тока, для сглаживания пульсаций выпрямленного тока. Кроме того, он служит для обеспечения проводимости источника постоянного напряжения в обратном направлении.

Преимущества АИН:

- работоспособность в режиме холостого хода;
- работоспособность от сети постоянного тока (без дополнительного входного преобразователя);

- автоматический переход в генераторный (рекуперативный) режиме без входного преобразователя при питании от сети постоянного тока, или при наличии входного преобразователя с двусторонней проводимостью при питании от сети переменного тока.

Недостатки АИН:

- применение силовых полупроводниковых приборов с временем восстановления менее 100 мкс (быстродействующих приборов);
- сложность силовой схемы.

Работоспособность АИН в режиме, близком к короткому замыканию, определяется коммутационными свойствами вентиляей. АИН характеризуется относительной стабильностью выходного напряжения при изменении выходной частоты в широких пределах.

В резонансных инверторах (рисунок 1.1 в) нагрузка, имеющая, как правило, значительную индуктивность, образует с реактивными элементами схемы инвертора колебательный контур. Ток в вентилях изменяется во времени по колебательному закону. Выключаются тиристоры инвертора благодаря плавному спадающему этому току до нуля на каждом полупериоде, т. е. исключается плавное регулирование частоты и напряжения. Резонансные инверторы имеют близкие к синусоидальным кривые напряжения и тока в нагрузке (рисунок 1.1 в), плавное нарастание и спад тока через вентили, что обеспечивает малые коммутационные потери мощности в последних.

Данный тип инверторов используется при повышенных частотах выходного напряжения (килогерцы-десятки килогерц).

В тяговом приводе АИН применяются чаще чем АИТ.

Появление СПП, выполненных по схеме силовых транзисторов с изолированным затвором (*IGBT*), т.е. практически идеальных ключей, обеспечило еще более широкое применение их в преобразовательной технике.

В связи с вышесказанным дальнейшие расчеты выполнены для трехфазного АИН. В настоящее время наибольшее распространение получили двухуровневые автономные инверторы напряжения.

2 ОСНОВНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ И НЕОБХОДИМЫЕ ПАРАМЕТРЫ ДЛЯ РАСЧЕТА АВТОНОМНОГО ИНВЕРТОРА НАПРЯЖЕНИЯ

К автономным инверторам предъявляются следующие основные требования:

- обеспечение максимального КПД;
- минимальная установленная мощность отдельных узлов и элементов;
- возможность регулирования выходного напряжения;
- обеспечение синусоидальной или близкой к синусоидальной формы выходного напряжения;
- возможность регулирования выходной частоты в широких пределах;
- возможность работы в режиме холостого хода;
- обеспечение заданных показателей надежности и срока службы;
- обеспечение уровня помех, соответствующих ГОСТам на качество электроэнергии в питающих сетях;
- возможность параллельной работы однотипных инверторов на общую нагрузку;
- обеспечение требуемых динамических нагрузок.

В зависимости от конкретного назначения АИН требования, предъявляемые к ним, уточняются или дополняются.

В связи с вышесказанным, для выбора и расчета АИН в зависимости от области их применения являются следующие параметры [5]:

- номинальная и максимальная мощность нагрузки $S_{\text{ном}}$ и $S_{\text{макс}}$;
- номинальное значение тока, кратность пусковых и других токовых перегрузок;

- номинальные значения входных и выходных напряжений и частот $U_{\text{вх}}$, $f_{\text{вх}}$; $U_{\text{вых}}$, $f_{\text{вых}}$;
- отклонения напряжения питающей сети;
- коэффициент мощности нагрузки $\cos\varphi_{\text{н}}$.
- коэффициент полезного действия КПД;
- стабильность выходного напряжения и частоты;
- диапазон регулирования выходной частоты инвертора и несущей частоты при регулировании напряжения на двигателе импульсным способом;
- качественные показатели выходного напряжения и тока, к которым относится коэффициент гармоник;
- возможность параллельной работы;
- устойчивость к внешним коротким замыканиям;
- масса и габаритные размеры;
- надежность и срок службы;
- условия эксплуатации.

3 УСЛОВИЯ РАБОТЫ ОСНОВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ АВТОНОМНОГО ИНВЕРТОРА НАПРЯЖЕНИЯ

Основными элементами АИН являются полупроводниковые приборы и элементы, обеспечивающие их надежную работу: (демпфирующие и шунтирующие цепи), конденсаторы и реактор фильтра. Параметры и характеристики элементов приводятся в информационных материалах. Допустимые значения каждого параметра, указанные в них, соответствуют определенным оговоренным условиям. Такие условия называются классификационные. Так, например, для каждого СПП в информационных материалах задан допустимый средний ток в открытом состоянии тиристора $I_{T(AV)}$ (диода $I_{V(AV)}$) при следующих классификационных условиях: форма тока-одно-полупериодная, синусоидальная; угол проводимости $\beta = 180^\circ$; частота $f = 50$ Гц; режим длительный; температура корпуса T_c – заданная для конкретного прибора.

В большинстве случаев в преобразовательных установках, в том числе и в АИН, выполненных по трехфазной мостовой схеме, форма тока-несинусоидальная, $\beta < 180$, среднее значение тока за период работы не остается неизменным, условия охлаждения, как правило, хуже, чем в классификационном режиме, $f \neq 50$ Гц. При повышенной частоте работы АИН, или при регулировании величины выходного напряжения способами импульсного регулирования, указанные условия приводят к увеличению коммутационных потерь. Вследствие этого температура структуры T_j при токе, равном классификационному, превысит допустимое значение $T_{j \text{ макс. доп.}}$. Поэтому ток должен быть уменьшен так, чтобы температура структуры не превышала $T_{j \text{ макс. доп.}}$. Изменение формы тока и температуры окружающей среды $T_{\text{окр}}$ также сказываются на выборе допустимого среднего значения тока.

Воздействие других факторов влияет на выбор СПП, конденсаторов и реакторов.

В связи с вышесказанным при расчете основных элементов АИН необходимо указывать все условия их работы, отличающиеся от классификационных.

4 РАСЧЕТ АВТОНОМНОГО ИНВЕРТОРА НАПРЯЖЕНИЯ ДЛЯ ПРИВОДА АСИНХРОННОГО ТЯГОВОГО ДВИГАТЕЛЯ

Основные технические данные, представленные в качестве исходных данных к курсовой работе, приведены в таблице 2.1.

Таблица 1 – Основные технические данные

Наименование параметров
Род тока в контактной сети
Номинальное напряжение $U_{\text{ном}}$, В
Диапазон отклонений напряжения, В (U_{min} , U_{max})
Мощность на валу тягового двигателя, номинальная $P_{2\text{ ном}}$, кВт
К.п.д. двигателя $\eta_{\text{АТД}}$,
Коэффициент мощности нагрузки $\cos \varphi$,
К.п.д. АИН, $\eta_{\text{АИН}}$,
Кратность пускового тока в течении 5 мин,
Номинальная частота статора $f_{1\text{ ном}}$, Гц
Диапазон регулирования частоты статора f_1 , Гц
Способ регулирования напряжения, определяющий форму кривых тока и напряжения на выходе АИН: – в период пуска и разгона – при $f_1 > 35$ Гц
Частота регулирования (несущая) ШИМ $f_{\text{нес}}$, Гц
Номинальные значения климатических факторов по ГОСТ15150–69, климатическое исполнение У, категория размещения 2, при этом: – верхнее рабочее значение температуры окружающего воздуха в кузове, $^{\circ}\text{C}$ – нижнее рабочее значение температуры окружающего воздуха, $^{\circ}\text{C}$ – высота над уровнем моря не более, м
Способ охлаждения
Скорость охлаждающего воздуха в межреберном пространстве охладителей, м/с

Каждый инвертор питает один тяговый двигатель. Входной фильтр общий на два инвертора.

4.1 РАСЧЕТ ОСНОВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ИНВЕРТОРА

Входные и выходные мощности АИН

Активная мощность на входе АТД

$$P_{1\text{ АТД}} = \frac{P_2}{\eta}$$

Полная мощность двигателя в номинальном режиме

$$S_{1АТД} = \frac{P_{1АТД}}{\cos \varphi}.$$

Активная мощность на выходе АИН определяется входной мощностью АТД

$$P_{2АИН} = P_{1АТД} = 378 \text{ кВт}.$$

Активная мощность на входных зажимах АИН

$$P_{1АИН} = \frac{P_{2АИН}}{\eta_{АИН}}.$$

Активная входная мощность с учетом подключения двух АИН к одному фильтру

$$P_d = 2P_{1АИН} + \Delta P_\phi.$$

где ΔP_ϕ – предварительная оценка мощности потерь в элементах фильтра.

4.2 ВХОДНЫЕ И ВЫХОДНЫЕ ЗНАЧЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЙ

Действующее значение первой гармоники номинального фазного напряжения на выходе АИН (фазное напряжение АТД) определено по формуле

$$U_{1\phi.\text{ном}} = 0,45 \cdot U_d$$

Диапазон изменения действующих значений фазных напряжений при отклонениях контактной сети

$$U_{1\phi.\text{max}} = 0,45 \cdot 2000 = 900 \text{ В}.$$

$$U_{1\phi.\text{min}} = 0,45 \cdot 1100 = 495 \text{ В}.$$

4.3 ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ПРИБОРЫ АИН

Фазный ток двигателя

$$I_{1\text{ном}} = \frac{P_2}{3U_\phi \cos \varphi_1 \cdot \eta_{АТД}},$$

Фазный ток двигателя в пусковом режиме

$$I_{1\text{пуск}} = 1,5 \cdot I_{1\text{ном}}.$$

Ток входной цепи в номинальном режиме определен по формуле

$$I_d = 1,35 \cdot I_{1\text{ном}} \cdot \cos \phi_1.$$

Ток входной цепи в пусковом режиме

$$I_d = 1,35 \cdot I_{1\text{пуск}} \cdot \cos \phi_1.$$

Амплитуда тока через полупроводниковый ключ

$$I_{k\text{max}} = \frac{1,05 \cdot I_{1\text{пуск}}}{\cos \phi_1}.$$

Среднее значение тока управляемого вентиля плеча АИН (тиристора, транзистора) определено для пускового режима по формуле

$$I_{m.\text{cp}} = \frac{I_{1\text{ном}}}{\sqrt{2} \cdot \pi} (1 + \cos \phi_1).$$

В режиме рекуперации основной ток потечет через обратные диоды.

Среднее значение диода обратного тока плеча АИН определено для пускового режима по формуле

$$I_{d.c.p} = \frac{I_{ном}}{\sqrt{2} \cdot \pi} (1 - \cos \phi_1),$$

Среднее значение диода обратного тока плеча АИН в режиме рекуперации

$$I_{d.c.p} = \frac{I_{ном}}{\sqrt{2} \cdot \pi} (1 + \cos \phi_1) K_{i.p},$$

где $K_{i.p}$ – коэффициент уменьшения тока в режиме рекуперации (обычно принимается равным 0,8).

Для определения количества последовательно и параллельно соединенных приборов в плече необходимо выбрать тип СПП.

В связи с широким применением в настоящее время *IGBT*-транзисторов выбираем *IGBT*-транзистор производства фирмы «Хитачи» типа *MBN1200C33*. Фирма-разработчик указывает максимальное значение длительного тока коллектора через прибор $I_c = 1200$ А, допустимое максимальное значение тока коллектора через прибор $I_{c.max} = 2400$ А в течении 1 мс. Среднее значение тока через прибор $I_{T(AV)}$ при синусоидальной форме тока равно

$$I_{T(AV)} = \frac{I_c}{\pi}.$$

Максимальное среднее значение тока плеча с учетом возможности работы определяется по формуле при чисто активной нагрузке

$$I_{max.c.p.пл} = \frac{\sqrt{2} \cdot I_1 \cdot K_{II} \cdot K_{II}}{\pi}.$$

Количество параллельных ветвей с учетом рекомендуемого фирмой коэффициента допустимой нагрузки (коэффициент запаса по току) $K_{наг.i} = 0,7$ определяется по формуле

$$m = \frac{I_{max.c.p.пл.}}{I_{T(AV)} K_{наг.i}},$$

По току достаточно одного транзистора в плече.

В связи с тем, что ранее вычисленное значение максимального тока обратного диода меньше тока транзистора, также достаточно одного обратного диода в плече.

Количество последовательно соединенных приборов определяется с учетом рекомендуемого фирмой коэффициента допустимой нагрузки (коэффициент запаса по напряжению) $K_{наг.и}$ по формуле

$$n = \frac{U_{d max.пл} \cdot K_{II}}{U_{DRM}^* K_{наг.и}},$$

Из-за большой стоимости приборов иногда допускается увеличивать коэффициент нагрузки до 0,8 и применять по одному прибору в плече. Однако при этом снижается срок службы данного прибора.

4.4 ЭЛЕМЕНТЫ ФИЛЬТРА

Выбираем наиболее применяемые в приводе отечественные фильтровые конденсаторы типа К 75-80. В ТУ на конденсаторы приводятся либо зависимо-

сти допустимой амплитуды переменной составляющей от частоты, либо расчетная формула, включающая температуру окружающей среды и диэлектрические характеристики конденсатора. Допустимая величина амплитуды переменной составляющей (пульсации) при частоте 50 Гц равна $\approx 10\%$, на частоте 250 Гц ($f_k = 6f_1$) $\approx 5\%$, на несущей частоте 600 Гц $\approx 3\%$. Наиболее тяжелый режим работы конденсаторов при пониженном напряжении контактной сети. Тогда для номинального режима

$$C_\phi = \frac{\Delta I}{8 \cdot f_k \cdot U_c},$$

При допустимой величине пульсации напряжения на конденсаторе при частоте f_k , равной 0,05, максимального напряжения контактной сети, и допустимой амплитуде пульсаций сетевого тока, равного $5\% I_d$, находим

$$L_d = \frac{\Delta U}{2\pi \cdot f_k \cdot I_v},$$

Данные величины емкости и индуктивности обеспечивают нормальное функционирование АИН. Для обеспечения электромагнитной совместимости требуется дополнительная проверка по условию

$$f_\phi = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_\phi C_\phi}} < f_{рез}.$$

Расчитанные параметры фильтра удовлетворяют условию.

Для обеспечения минимальных массогабаритных показателей рекомендуется изменять соотношение C_ϕ и L_ϕ , но так, чтобы f_ϕ было меньше 23 Гц. Например, $L_\phi = 5$ мГн, $C_\phi = 10$ мФ. При этом $f_\phi = 22,5$ Гц.

4.5 ПРОВЕРКА РАБОТЫ ОТДЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В НЕСТАНДАРТНЫХ РЕЖИМАХ РАБОТЫ

Проверка по интегральной мощности потерь (защитному показателю $I^2 t$).

В связи с тем, что регулирование напряжения на двигателе осуществляется способом ШИМ, в пусковых режимах отсутствует длительное протекание тока. Поэтому проверка по защитному показателю однооперационных тиристор, транзисторов и диодов модуля *IGBT* производится только в режимах короткого замыкания. Токи короткого замыкания и длительности их протекания в различных режимах могут достигать десятков кА.

Для однооперационных тиристор и диодов производится проверка на соответствие $I^2 t$ по его допустимому значению, приводимому в паспорте на тиристор, или в справочных материалах фирм-изготовителей. Значение тока короткого замыкания и длительности его протекания в аварийных режимах рассчитывается по специальным методикам.

Для транзисторного модуля в справочных материалах фирм-изготовителей не приводится значение интегральной мощности потерь от одного импульса (защитный показатель), но дается рекомендация выключить при-

бор за время меньше, чем 10 мкс с начала протекания тока к.з. Данное условие требует разработки быстродействующей защиты, либо применения драйверов (специальных усилителей – формирователей для управления транзистором) со встроенной внутренней защитой от токов к.з, либо снижением токовой нагрузки применением параллельных ветвей.

Для диодов обратного тока в некоторых справочных материалах приводится значение $I^2 t$. По приводимому значению защитного показателя определяется допустимое максимальное значение тока к.з. через диод. Так для диода модуля *IGBT* фирмы «*EUPEC*» на аналогичные параметры допустимое значение тока к.з в течение 10 мкс не превышает 10 кА.

Проверка по устойчивости к скорости нарастания тока и напряжения в динамических режимах для *IGBT*-транзисторов не производится в связи с их хорошими динамическими характеристиками.

Проверка по устойчивости к перенапряжениям на входе производится при питании от сети постоянного тока. После ограничителя напряжения остающееся напряжение $U_{ост} = 4,5$ кВ. Тогда

$$n = \frac{U_{ост}}{U_{DRM}^*}.$$

Таким образом, при отсутствии быстродействующей защиты по напряжению необходима установка двух последовательно соединенных *IGBT*-модулей с номинальным напряжением 3300 В.

Однако исследования, проведенные в ВЭЛНИИ, показали, что напряжение на конденсаторе фильтра растет довольно медленно. Существующие в настоящее время отечественные датчики напряжения фирмы «ТВЕЛЕМ» с быстродействием 50÷100 мкс обеспечивают отключение приборов при воздействии импульса перенапряжения на входе. Таким образом, при применении стандартных блоков защиты, устанавливаемых на входе АИН, и датчиков напряжения фирмы «ТВЕЛЕМ» достаточно применения одного *IGBT*-модуля в плече.

В блоке защиты, стоящем на входе, к диоду, соединенному последовательно с транзисторным ключом, прикладывается полное перенапряжение, поэтому его необходимо выбирать по величине $U_{ост}$ ОПН.

Проверка конденсаторов по допустимой величине пульсаций производится по формуле и выполнения условия в режиме ШИМ с заданной частотой регулирования. Фактическая величина пульсаций $\Delta U_{факт}$ равна

$$\Delta U_{факт} = \frac{\Delta I}{8 \cdot C \cdot f_{нес}}.$$

Для конденсаторов К75-80 допустимая величина пульсаций (амплитуды переменной составляющей) ΔU определяется из ТУ на данный конденсатор для максимального значения температуры окружающей среды +60°C по формуле

$$\pi \cdot \Delta U^2 \cdot C_{ном} \cdot f \cdot tg\delta_0 + 2(\pi \cdot \Delta U \cdot f \cdot C_{ном})^2 \cdot R_A < \frac{70 - T}{R_T}.$$

где R_A и R_T – параметры, указанные в ТУ для выбранного конденсатора;

$tg\delta$ – тангенс угла потерь;

T – температура окружающей среды.

Например, для конденсатора К75-80 с параметрами $U_{ном} = 3000В$, $C_{ном} = 300$ мкФ находим допустимую величину пульсаций ΔU

$$3,14 \cdot \Delta U^2 \cdot 10 \cdot 10^{-3} \cdot 600 \cdot 5 \cdot 10^{-3} + 2(3,14 \cdot \Delta U \cdot 600 \cdot 10 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 1,45 \cdot 10^{-3} < \frac{70-60}{1,65},$$

$$9,42 \cdot 10^{-2} \Delta U^2 + 2(18,84 \Delta U)^2 \cdot 1,45 \cdot 10^{-3} = 9,42 \cdot 10^{-2} \Delta U^2 + 1,029 \Delta U^2 = 1,11 \Delta U^2,$$

$$1,11 \Delta U^2 < 6,$$

$$\Delta U < 5,5 В.$$

Фактическая величина пульсаций для данного конденсатора и заданной частоты регулирования $\Delta U_{факт}$ выше полученной по расчетам допустимой для данного конденсатора и заданной частоты величины ΔU ($9,75 > 5,5$).

В этом случае необходимо увеличивать либо величину емкости, либо снижать частоту регулирования ШИМ.

В условиях изменяющейся частоты регулирования напряжения АД конденсаторы фильтра необходимо выбирать для наиболее тяжелых условий работы; минимальной несущей частоты в режиме одноимпульсного регулирования и максимальной несущей частоты в режимах ШИМ.

На рисунке 2.2 и рисунке 2.3 приведены зависимости допустимой амплитуды пульсаций от частоты для отечественных фильтровых конденсаторов типа К75-80 «в», «г» с параметрами: $C = 360$ мкФ ; $U = 2500В$, и К 78-42 с параметрами $C = 1300$ мкФ ; $U = 2000В$, применяемых в тяговых приводах АД отечественного подвижного состава. Зависимости рассчитаны для одной банки конденсаторов при $T_{окр} = + 60^0 С$. Значения R_A , R_t , $tg\delta$ взяты из технических условий на данные конденсаторы.

Из данных зависимостей видно, что величина ΔU_c даже для конденсаторов одной и той же фирмы отлична. Поэтому данные зависимости для выбранных конденсаторов должна быть определяющими при выборе величины емкости фильтра.

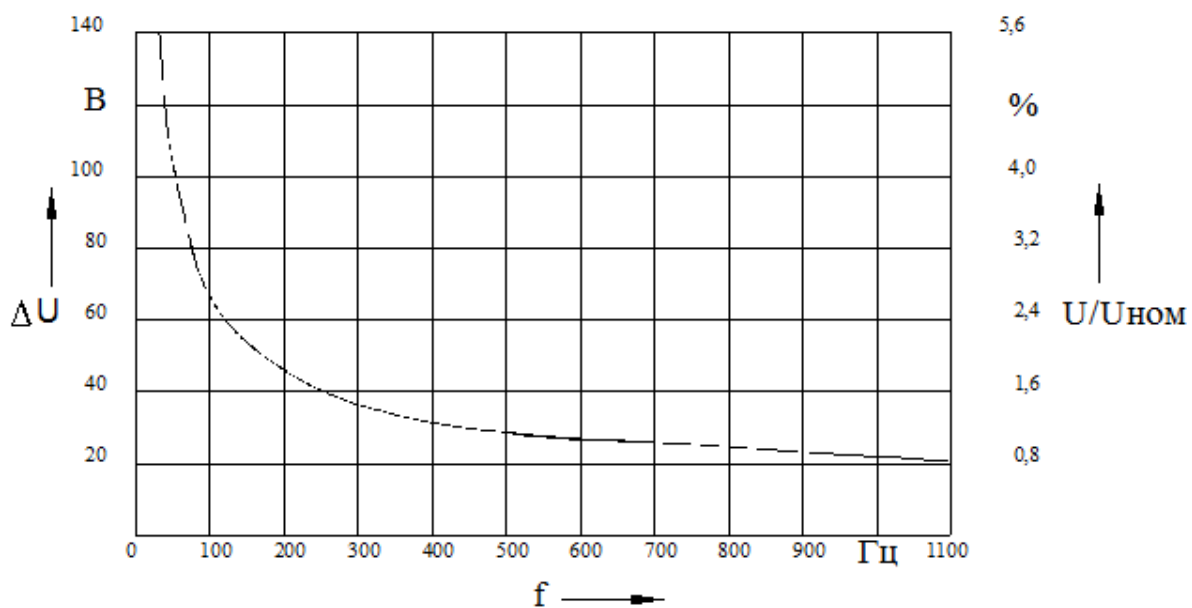


Рисунок 2.2 – Зависимость допустимой амплитуды пульсаций от частоты для конденсаторов К-75-80 «в», «г»

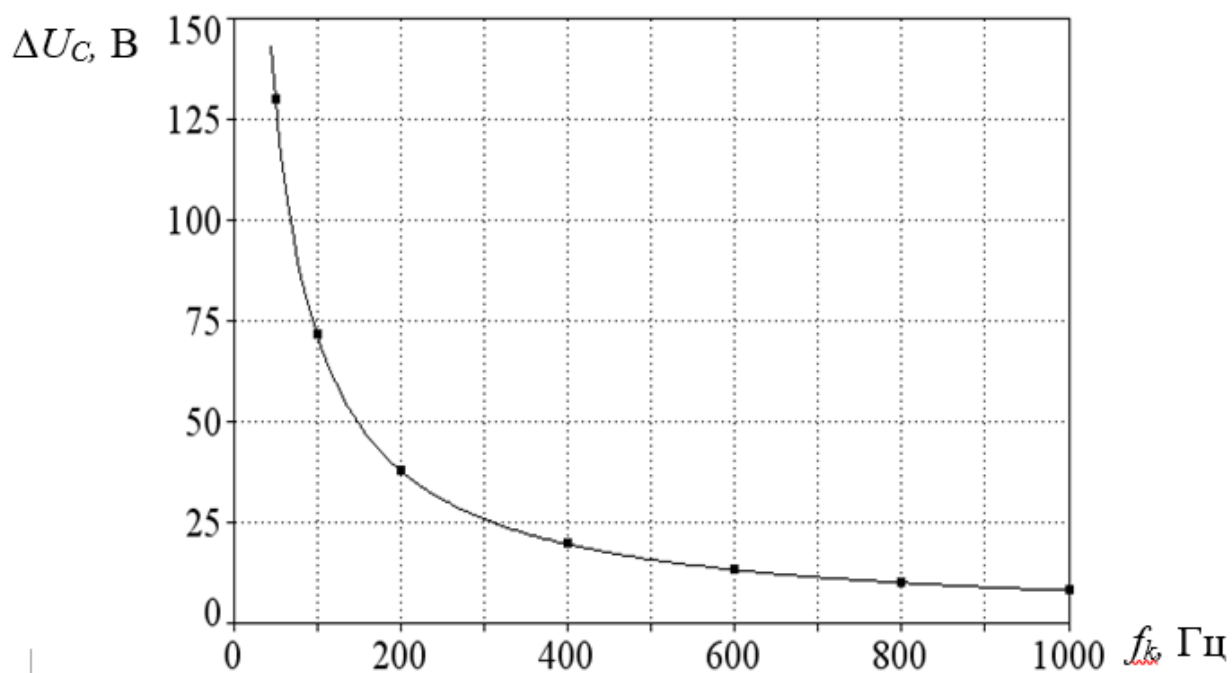


Рисунок 2.3 – Зависимость допустимой амплитуды пульсаций от частоты для конденсаторов К78-42

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В учебном-методическом пособии к курсовой работе описаны некоторые аспекты расчета автономного инвертора напряжения для питания асинхронного тягового двигателя электровоза или электропоезда. При выполнении курсовой работы студенту необходимо усвоить основы конструирования тяговых преобразователей, включая выбор полупроводниковых элементов, элементов фильтра и т.д.

Приведенная методика расчета является упрощенной и не затрагивает многих важных аспектов, которые прорабатываются на этапе проектирования тяговых преобразователей.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Л.А. Баранов, А.Н. Савоськин, О.Е. Пудовиков и др. — М.: Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте, 2014. — 400 с.
2. Электроника и преобразовательная техника. Т. 2: Электронная преобразовательная техника [Электронный ресурс] : учебник: в 2 т. / А.Т. Бурков. - М. : УМЦ ЖДТ, 2015. - <http://www.studentlibrary.ru/book/ISBN9785890357977.html>.
3. Электроподвижной состав с асинхронными тяговыми двигателями / Н. А. Ротанов, А. С. Курбасов, Ю. Г. Быков, В. В. Литовченко; Под ред. Н. А. Ротанова. — М.: Транспорт, 1991. — 336 с.
4. Кабалык, Ю.С. Системы управления электроподвижным составом : учеб. пособие / Ю.С. Кабалык. – Хабаровск : Изд-во ДВГУПС, 2013. – 119 с.: ил

Учебное издание

.А. Зарифьяном, М.В. Чавычалов, Н.В. Гребенниковым,
А.А. Андриющенко, Т.З. Талахадзе

Методическое обеспечение
для выполнения курсовой работы и самостоятельной работы магистрантов
по дисциплине «Программирование машиностроительных задач»

Печатается в авторской редакции
Технический редактор

Подписано в печать 10.12.15 Формат 60×84/16.
Бумага газетная. Ризография. Усл. печ. л.
Тираж экз. Изд. № 50 Заказ 3,48.

Редакционно-издательский центр ФГБОУ ВО РГУПС.

Адрес университета: 344038, г. Ростов н/Д, пл. Ростовского Стрелкового Полка
Народного Ополчения, 2.