Отчисления на социальные нужды:

$Э_{осн.}$ = 60645,7 ·0,304 = 18436,3 руб.

Годовой экономический эффект:

$\Delta Э_{год}$= 60645,7 +18436,3 = 79,082 тыс. руб.

Производительность труда при действующей и предлагаемой технологии обслуживания по формуле (2)

$\Delta ПТ$ = (1/2281,9)/ (1/1754,5) ·100 % = 130 %.

Заключение

Применение комплексного метода обслуживания на двух тяговых подстанциях ЭЧ-5 позволило получить годовой экономический эффект в размере 181,34 тыс. рублей и способствовало повышению производительности труда ст. Подкаменная на 25 %, и ст. Андриановская на 30 %.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Алексеева А.И., Купров А.И., Сапронов Ю.Д. Экономика, организация и планирование хозяйства электроснабжения железных дорог : учебн. для техникумов ж.-д. трансп. М. : Транспорт, 1987.240 с.
2. Наблюдательные листы формы ТНУ-1, ТНУ-3, ТНУ-4.
3. Положение о корпоративной системе оплаты труда работников филиалов и структурных подразделений ОАО «РЖД». М., 2007.
4. Сборник норм времени и нормативов численности на текущий ремонт и межремонтные испытания тяговых и трансформаторных подстанций железных дорог для ОАО «РЖД». М., 2007. 172 с.

УДК 629.423.3:621.316.9

Курносов Роман Викторович,
аспирант, инженер-конструктор 1 категории,
Дальневосточный государственный университет путей сообщения,
Закрытое акционерное общество «Дальневосточная электротехническая компания»,
тел. (4212) 41-70-41, e-mail: 148@dv-electro.ru

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОВОЗА ЭП-1 В СИСТЕМЕ ORCAD С МОДЕРНИЗИРОВАННЫМ ВЫПРЯМИТЕЛЬНО-ИНВЕРТОРНЫМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕМ

R. V. Kurnosov

SIMULATION OF ELECTRIC LOCOMOTIVE IN ORCAD WITH UPGRADED RECTIFIER-INVERTER CONVERTER

Аннотация. *Электровозы с плавным регулированием напряжения имеют существенные достоинства: плавное регулирование и рекуперативное торможение. В то же время главным их недостатком является низкий коэффициент мощности, достигающий лишь в конце четвертой зоны регулирования значения 0,84. Повышение коэффициента мощности электровоза переменного тока с плавным регулированием напряжения может быть осуществлено за счет уменьшения угла открытия тиристоров в выпрямительно-инверторном преобразователе. Для уменьшения угла открытия тиристоров предлагается заменить один из тиристоров ветви ВИП диодом такого же класса и с тем же значением предельного тока. Все прямое напряжение ветви ВИП будет прикладываться к одному тиристору. В результате ветвь ВИП будет состоять из одного тиристора и одного диода. Общее число вентилей плеча ВИП останется прежним, так как число параллельно и последовательно включенных вентилей определяется, соответственно, предельным током и классом (допустимым обратным напряжением) вентилей. При моделировании в системе ORCAD силовой цепи электровоза ЭП-1 с типовым и модернизированным ВИП-5600 были исследованы такие энергетические показатели электровоза, как коэффициент мощности, активная и полная мощность электровоза при токе двигателя 570 А.*

При помощи пакета ORCAD смоделирована работа электровоза ЭП-1 с модернизированным и стандартным ВИП и найдены основные энергетические показатели.

В системе ORCAD были смоделированы следующие основные блоки: тяговая подстанция; тяговые трансформаторы ОДНЦЭ-5700/25 У2; выпрямительно-инверторный преобразователь ВИП-5600-УЛХ2; тяговые электрические двигатели НБ-520В.

Ключевые слова: *моделирование, электровоз, выпрямительно-инверторный преобразователь, угол открытия, коэффициент мощности.*

Abstract. *Electric locomotives with voltage variable control have significant advantages: smooth control and regenerative braking. At the same time, their main drawback is the low power factor, reaching value of 0,84 only at the end of the fourth control zone. Improving the power factor of AC electric locomotives of continuously variable voltage can be accomplished by reducing the opening angle of the thyristors in the rectifier-inverter converter. To reduce the opening angle of the thyristors it is proposed to replace one of the VIP branch thyristor with the diode of the same class and with the same value of the limiting current. All the VIP branch forward voltage is applied to one thyristor. As a result, VIP branch will consist of one thyristor and a diode. Total number of VIP shoulder valves will remain the same as the number of parallel and serially connected gates is determined by the limiting current and the valves class accordingly.*

During the electric locomotive VC-1 power circuit with standard and upgraded VIP-5600 modeling in ORCAD system the following electric locomotive energy indicators were investigated: power factor, active and full electric power at a current of 570 A.

The following main components have been modeled in the ORCAD system: traction substation; traction transformers ODNTSE-5700/25; rectifier-inverter converter VIP-5600; traction electric motors NB-520V.

Keywords: *modeling, electric locomotive, rectifier-inverter converter, opening angle, power factor.*

Коэффициент мощности является одним из основных энергетических показателей электровозов переменного тока. Коэффициент мощности может быть определен по формуле

$$k_M = \cos\varphi \cdot \upsilon, \quad (1)$$

где υ – коэффициент искажения (отношение амплитуды первой гармоники потребляемого тока к действительному значению этого тока);

φ – угол сдвига между питающим напряжением и первой гармоникой потребляемого тока.

Угол φ может быть рассчитан по формуле

$$\varphi = \alpha_0 + \frac{\gamma}{2}, \quad (2)$$

где α_0 – минимальный угол открытия тиристоров;

γ – угол, характеризующий продолжительность коммутации в тиристорах преобразователя.

Повышение коэффициента мощности может быть осуществлено за счет уменьшения угла α_0.

Преобразователь ВИП-5600-УЛХ2 упрощенно представлен на рис. 1.

Данными преобразователями оснащены пассажирские электровозы ЭП-1 (по одному ВИП на три тяговых двигателя) [4]. Каждый ВИП имеет восемь плеч, образующих мостовую схему [6]. Плечи преобразователя состоят из пяти параллельно и двух последовательно соединенных тиристоров (для упрощенного восприятия параллельно соединенные тиристоры плеч на рис. 1 не показаны).

Очередность открытия плеч ВИП в выпрямительном и инверторном режимах определяется алгоритмом работы блока управления преобразователями электровоза (БУВИП) [5]. Блок управления ВИП формирует и, в соответствии с заданным алгоритмом, распределяет по плечам ВИП управляющие импульсы.

При обеспечении работы в выпрямительном и инверторном режимах используют 4 типа управляющих импульсов:

α_0 – подаваемые в начале полупериода, фаза которых соответствует мин. углу открытия тиристоров;

$\alpha_{рег}$ – регулируемые по фазе;

$\alpha_{0з}$ – нерегулируемые задержанные по фазе, используемые в режиме тяги;

β – импульсы, подаваемые на тиристоры ВИП в режиме рекуперации.

В настоящее время на электровозах с зонно-фазным регулированием напряжения на всех зонах регулирования принята фиксированная величина угла открытия тиристоров $\alpha_0 = 9 \pm 2$ эл. град.

Вследствие замены одного из тиристоров каждой ветви выпрямительно-инверторного преобразователя диодом такого же класса и с тем же значением предельного тока, напряжение между анодом и катодом тиристора увеличивается в 2 раза [3]. Таким образом, включения тиристора можно достичь при меньшем значении угла открытия тиристоров, равном 4,5 эл. градусам.

Модернизированная схема ВИП представлена на рис. 2.

Кроме этого, следует принять во внимание возможность уменьшения минимального угла открытия тиристоров на высших зонах регулирования.

На первой зоне регулирования напряжение $U_{пр.max}$ на тиристоре, вступающем в работу в начале полупериода, определяется напряжением первой секции вторичной обмотки трансформатора с действующим значением 350 В. Максималь-

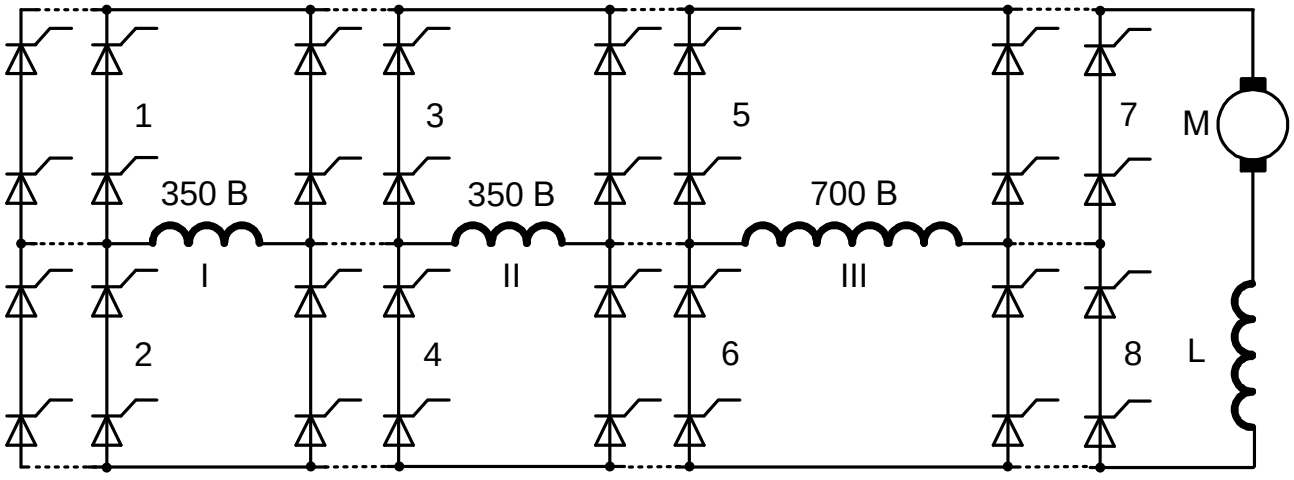


Рис. 1. ВИП-5600-УЛХ2 электровоза ЭП-1

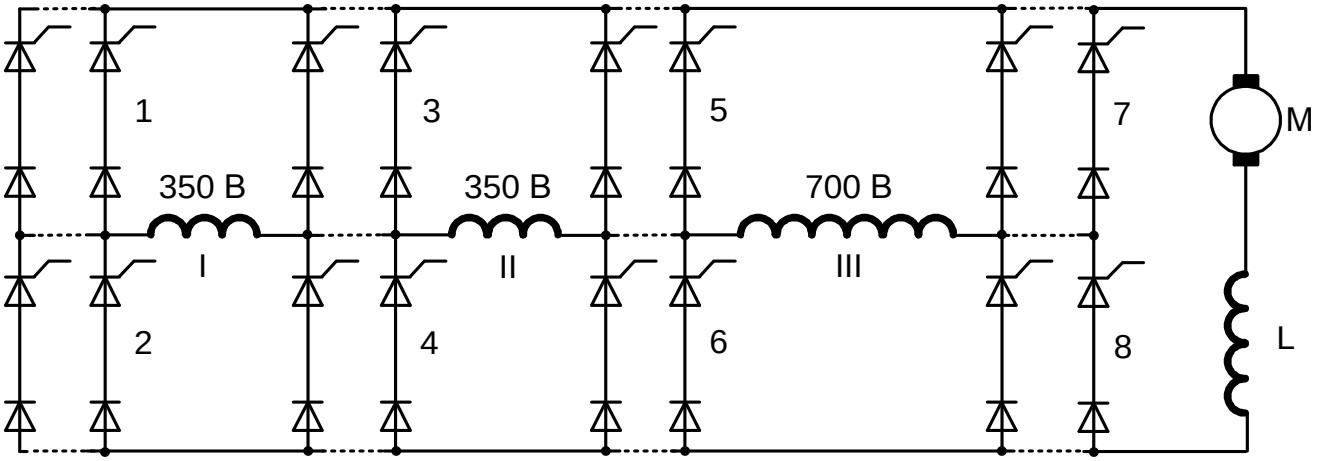


Рис. 2. Модернизированная схема ВИП-5600-УЛХ2

ное значение прямого напряжения рассчитывается по формуле

$$U_{np.\max} = \sqrt{2} \cdot U_1 \cdot \sin(\alpha_0) = 77 \text{ В}. \qquad (4)$$

На второй зоне регулирования максимальное значение прямого напряжения на соответствующем тиристоре увеличивается в 2 раза (подключаются I и II секции вторичной обмотки трансформатора) и составляет 154 В. На третьей и четвертой зонах регулирования напряжение $U_{np.max}$ на соответствующих тиристорах увеличивается в 3 (231 В) и 4 (308 В) раза соответственно.

К моменту подачи импульса открытия тиристора α_0 на соответствующие тиристоры прямое напряжение 77 В обеспечивает гарантированное открытие тиристоров. Соответственно, на второй, третьей и четвертой зонах регулирования гарантированное включение соответствующих тиристоров ВИП можно осуществить при напряжении 77 В с уменьшенным в 2, 3 и 4 раза соответственно углом управления.

Смоделированный ВИП-5600 в системе ORCAD [1] представлен на рис. 3.

В связи с тем, что постоянно в работе находятся только три плеча ВИП, моделирование восьми плеч не обязательно. Для моделирования каждой из четырех зон необходимо подключать плечи ВИП к соответствующим выводам вторичной обмотки трансформатора и в соответствии с

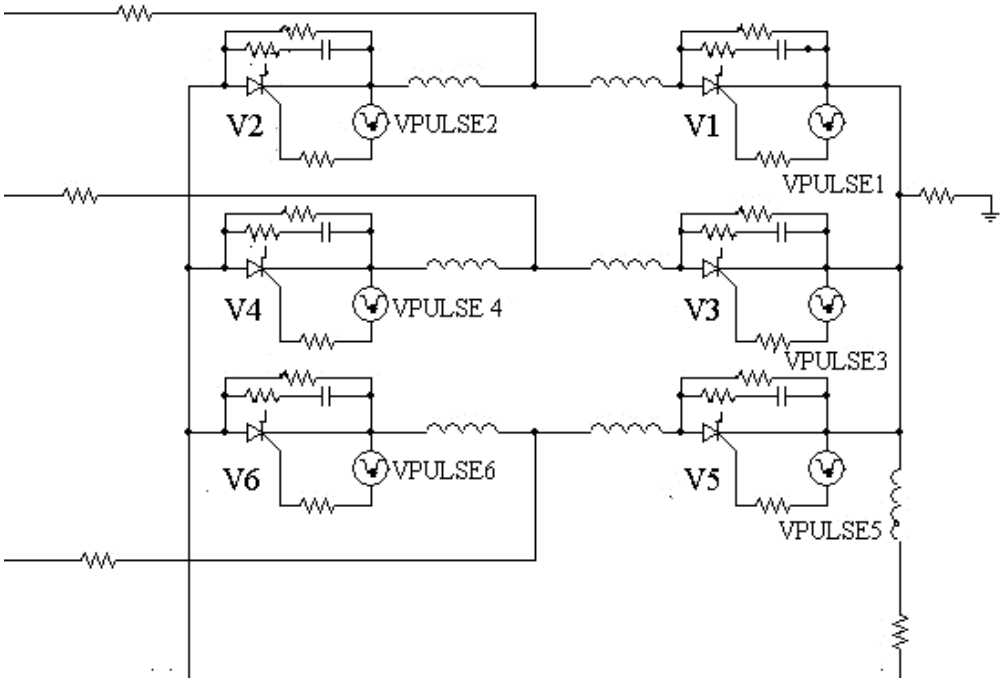


Рис. 3. Схема ВИП-5600-УЛХ2 в системе ORCAD

зоной регулирования и алгоритмом управления устанавливать значения углов управления.

Управляющие импульсы задаются элементом VPULSE (источник трапецеидальных импульсов) [2]. С помощью данного элемента задаются углы управления для стандартной и модернизированной схем ВИП-5600 (для моделирования достаточно одного тиристора в ветви). Путем установки значения TD (время задержки в секундах) элемента VPULSE производится открытие тиристоров при стандартных и модернизированных углах [2].

Для нахождения коэффициента мощности в системе ORCAD была использована следующая зависимость:

$$k_M = \frac{P}{S}, \qquad (5)$$

где P – действующее значение активной мощности;

S – действующее значение полной мощности

Действующее значение активной мощности определяется по формуле

$$P = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T u \cdot i \cdot dt, \qquad (6)$$

где $u,\ i$ – мгновенные значения тока и напряжения.

Действующее значение полной мощности определяется по формуле

$$S = U \cdot I, \qquad (7)$$

где $U,\ I$ – действующие значения тока и напряжения.

Действующие значения тока и напряжения определяются по формулам

$$U = \sqrt{\int_0^T u^2 \cdot dt}, \qquad (8)$$

$$I = \sqrt{\int_0^T i^2 \cdot dt}. \qquad (9)$$

Блок-схема вычисления коэффициента мощности представлена на рис. 4.

При помощи элементов: перемножитель, интегратор, устройство вычисления квадратного корня и делитель – становится возможным нахождение действующих значений полной, активной мощности и соответственно коэффициента мощности.

Смоделированная схема вычисления активной и полной мощности в системе ORCAD представлена на рис. 5.

Вычисление активной мощности в системе ORCAD происходит в соответствии со следующим алгоритмом:

1. Сигналы тока и напряжения поступают на элементы «операционный усилитель» (1E-3) [1], где происходит их послабление на 10^{-3}.

2. Сигнал тока при помощи элемента «E205» [1] преобразуется в эквивалентный сигнал напряжения.

3. При помощи элемента «MULT» [1] происходит перемножение мгновенных значений тока и напряжения.

4. Далее сигнал поступает на элемент «Sbreak» [1]. Ключ служит для замыкания цепи в момент времени 0,28 с (начало последнего периода сетевого напряжения). Последний период сетевого напряжения 0,28–0,3 с (T = 0,02 с).

5. Источник трапецеидальных импульсов «PULSE» [1] служит для подачи логической единицы на ключ для его открытия в момент времени 0,28 с.

6. Далее сигнал поступает на интегратор INTEG [1]. Для нахождения значения активной мощности необходимо значение в конце периода сетевого напряжения рис. 6 (0,3 с) разделить на время этого периода (0,02 с).

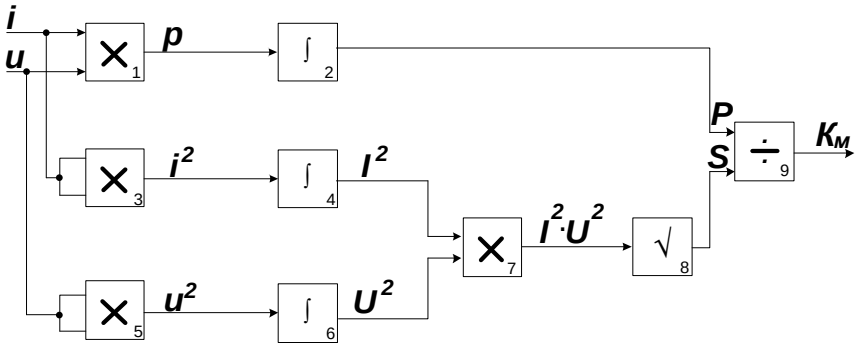


Рис. 4. Блок-схема вычисления коэффициента мощности

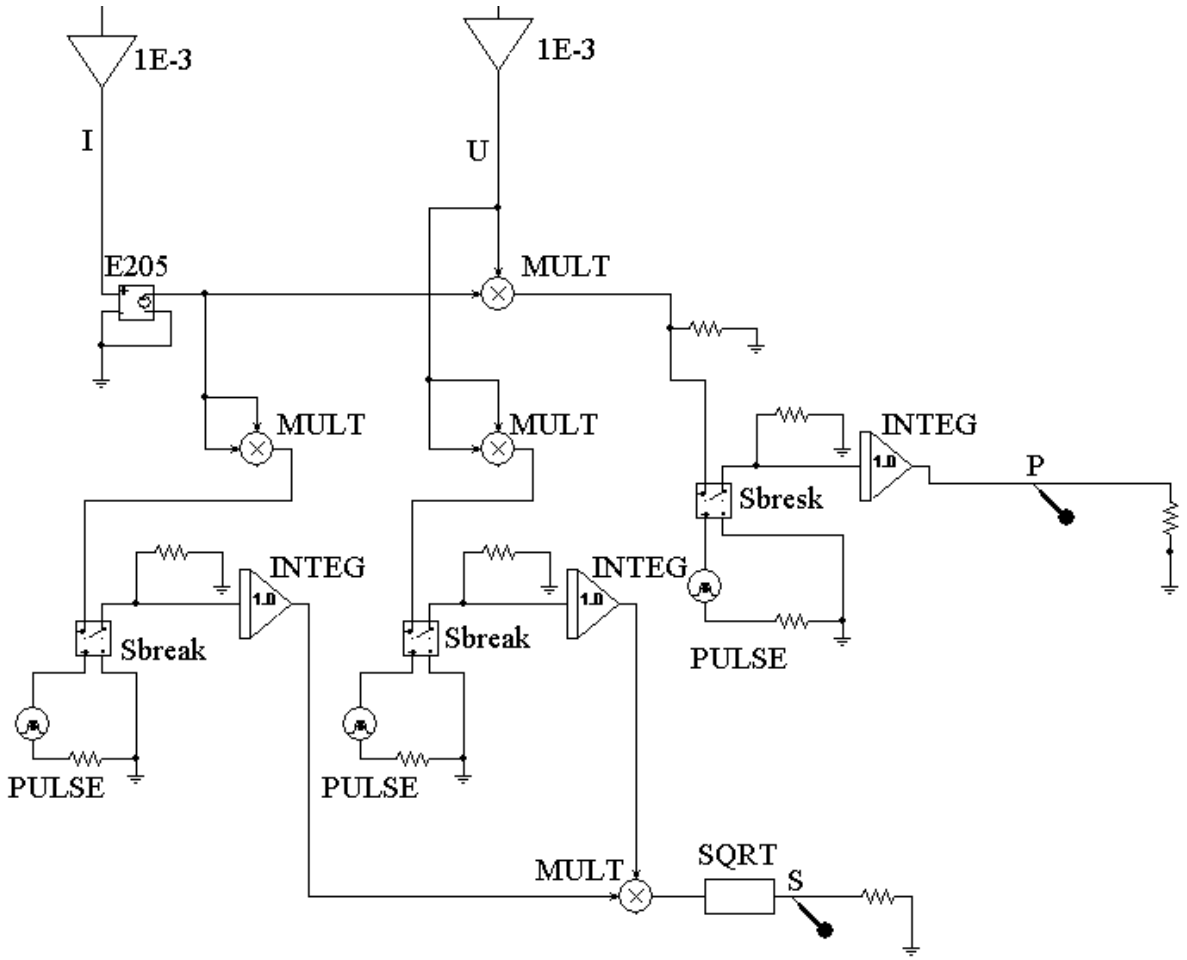


Рис. 5. Схема вычисления активной и полной мощности в системе ORCAD

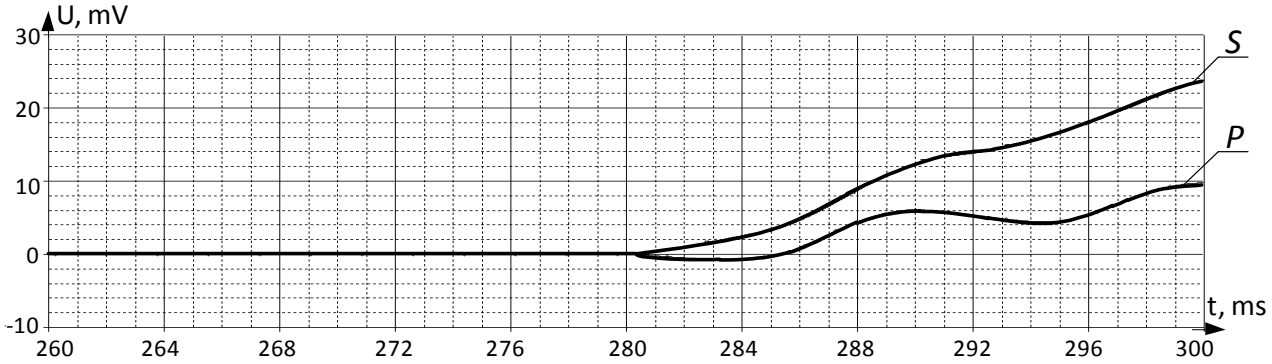


Рис. 6. Кривые полной и активной мощности в системе ORCAD

Вычисление полной мощности в системе ORCAD происходит в соответствии со следующим алгоритмом:

1. Сигнал тока при помощи элемента «E205» [1] преобразуется в эквивалентный сигнал напряжения.

2. При помощи элемента «MULT» [1] происходит умножение мгновенного значения тока самого на себя.

3. При помощи элемента «MULT» [1] происходит умножение мгновенного значения напряжения самого на себя.

4. Сигнал квадрата напряжения поступает на элемент «Sbreak» [1]. Ключ служит для замы-

кания цепи в момент времени 0,28 с (начало последнего периода сетевого напряжения). Последний период сетевого напряжения 0,28–0,3 с (T = 0,02 с).

5. Сигнал квадрата тока поступает на элемент «Sbreak» [1]. Ключ служит для замыкания цепи в момент времени 0,28 с (начало последнего периода сетевого напряжения). Последний период сетевого напряжения 0,28–0,3 с (T = 0,02 с).

6. Источник трапецеидальных импульсов «PULSE» [1] служит для подачи логической единицы на ключ для его открытия в момент времени 0,28 с.

7. Далее сигналы поступают на интеграторы INTEG [1].

8. С выхода интеграторов сигналы поступают на перемножитель «MULT» [1].

9. Далее сигнал поступает на элемент «SQRT» [1]. Вычисляется корень квадратный. Для нахождения полной мощности необходимо значение из графика на рис. 6 в конце периода сетевого напряжения (0,3 с) разделить на время этого периода (0,02 с).

Кроме всего прочего, для повышения среднего значения выпрямленного напряжения на двигателе возможно параллельное подключение к нагрузке обратного вентиля (диода) [2].

При работе на каждой зоне регулирования на интервалах с положительной величиной выпрямленного напряжения обратный вентиль находится в закрытом состоянии под действием выпрямленного напряжения. На интервалах $0 - \alpha_0$ с отрицательными значениями выпрямленного напряжения обратный вентиль переходит в проводящее состояние. На этих интервалах ток двигателя замыкается через обратный вентиль, а выпрямленное напряжение на двигателе определяется падением напряжения на обратном вентиле, находящемся в открытом состоянии. Поскольку это напряжение близко к нулю, вместо интервалов с отрицательным напряжением образуются интервалы с нулевым напряжением. Таким образом, на двигатель поступает повышенное значение среднего напряжения, которое увеличивается за счет исключения участков с отрицательным напряжением.

Необходимо отметить, что при переходе электровоза в режим рекуперативного торможения обратный вентиль отключается от силовой цепи электровоза.

Также необходимо отметить, что при применении модернизированной схемы ВИП уменьшаются потери мощности в преобразователе. Исходя из математического моделирования и моделирования в системе ORCAD, потери мощности на вентилях и, соответственно, сумма потерь мощности в преобразователе уменьшаются на 357,8 Вт. Годовая прибыль от применения модернизированной схемы ВИП примерно составит 1 850 000 рублей.

По результатам моделирования можно сделать вывод, что модернизация ВИП путем замены одного тиристора ветви ВИП диодами, уменьшения угла α_0 на высших зонах регулирования и применения обратного (нулевого) вентиля позволяет:

- повысить энергетические показатели электровоза за счет повышения коэффициента мощности, что приведет к повышению КПД;
- повысить среднее значение выпрямленного напряжения;
- уменьшить полную мощность электровоза;
- упростить конструкцию ВИП и системы управления ВИП за счет уменьшения числа тиристоров;
- уменьшить потери мощности в преобразователе ВИП-5600 и, соответственно, на электровозе в целом.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Дерюшев А.А., Свито И.Л., Беляков В.Б. Применение САПР ORCAD для расчета и проектирования электрических схем. Минск : Белорус. гос. ун-т информатики и радиоэлектроники, 2006. 66 с.
2. Пат. 54704 Рос. Федерация, МПК H02M 5/42. Многозонный выпрямитель однофазно переменного тока / С.В. Власьевский, А.Н. Савоськин, В.В. Литовченко ; опубл. 20.04.2008, Бюл. № 11.
3. Пат. 236860 Рос. Федерация, МПК H02M 7/162. Преобразователь однофазно-постоянного тока / Ю.М. Кулинич ; опубл. 20.09.2009, Бюл. № 26.
4. Электровоз ЭП-1: Руководство по эксплуатации / М.Г Сальник и др. Новочеркасск : НЭВЗ, 2006.
5. Проектирование систем управления электроподвижным составом / под. ред. Н.Д. Ротанова. М. : Транспорт, 1986. 327 с.
6. Тихменев Б.Н., Трахтман Л.М. Подвижной состав электрифицированных железных дорог. М. : Транспорт, 1980. 471 с.