

щую среду, следовательно сократить расход греющего теплоносителя.

2. Теплоизоляция позволяет уменьшить количество тепловой энергии, необходимой для поддержания стабильного процесса переработки отходов, следовательно обеспечивает более стабильное сбраживание, при котором образование биогаза происходит быстрее и без остатка его в переработанной массе.

3. В качестве теплоизоляции рекомендуется применять PAROC UNS 37, так как у него наилучшее соотношение цены и изолирующих свойств.

4. Использование теплоизоляции в летний период также считается целесообразным.

Библиографический список

1. **Изобретение** Патент Российской Федерации RU2250878. Метантенк [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.shram.kiev.ua/top/patents_gas/gas_3/gas_60.shtml.
2. **Теплотехника** на подвижном составе железных дорог / И. Г. Киселев. – Москва : Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте, 2008. – 278 с.
3. **Теплообменные** процессы при эксплуатации вагонов / Б. Н. Китаев. – Москва : Транспорт, 1984. – 184 с.
4. **Теплообмен** с окружающей средой метантенка для сбраживания биомассы / О. В. Чеботарева, В. А. Сербин, Н. В. Колосова // Вісник Донбаської національної академії будівництва і архітектури. – 2010. – № 6. – С. 86.
5. **Прошивной** мат техноніколь [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://spb.pulscen.ru/products/tekhnonikol_4000kh1200kh100_7570706.
6. **Web сайт** Группа Компаний СТРОИТЕЛЬ [Электронный ресурс] / URSA GLASSWOOL M-15. – Режим доступа: <http://linspb.ru/URSA-GLASSWOOL-M-15-URSA-GEO-M-15.html>.
7. **Web сайт** Группа Компаний СТРОИТЕЛЬ [Электронный ресурс] / Изовер ВентФасад Оптима. – Режим доступа: <http://linspb.ru/Изовер-ВентФасад-Оптима.html>.

УДК 621.316.722.076.12

А. Н. Марикин, В. А. Мирощенко

Петербургский государственный университет путей сообщения
Императора Александра I

АДАПТИВНОЕ УСТРОЙСТВО ПОПЕРЕЧНОЙ КОМПЕНСАЦИИ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ В ТЯГОВОМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Рассмотрена одна из проблем тягового электроснабжения на переменном токе – наличие реактивной составляющей мощности в сети. Предложен перспективный способ компенсации на основе управляемого шунтирующего реактора трансформаторного типа. Описан принцип работы компенсатора и приведена его электрическая схема, на основе которой создана математическая модель устройства, реализованная в программе MATLAB Simulink.

Результаты моделирования представлены в виде графиков и гистограмм токов и напряжений в контактной сети. По ним сформулированы выводы об эффективности работы устройства в сетях тягового электроснабжения. Предложен вариант улучшения конструкции компенсатора с помощью введения в схему фильтров высших гармоник с целью увеличения энергоэффективности.

компенсация реактивной мощности, тяговая сеть переменного тока, шунтирующий реактор.

Введение

В настоящее время имеется большое количество схемотехнических решений устройств параллельной компенсации реактивной мощности для тяговой сети переменного тока, основным элементом которых является конденсаторная батарея. Адаптивность к нагрузке батареи конденсаторов достигается разными способами, например, разделением их на группы и осуществлением переключения между ними с помощью контакторов или изменением емкости с помощью тиристорных групп и др.

Все эти решения в той или иной мере обладают ограниченными возможностями по изменению реактивной мощности в зависимости от нагрузки тяговой сети.

Авторами предлагается адаптивное устройство компенсации реактивной мощности на основе управляемого шунтирующего реактора трансформаторного типа (УШРТ). Такое устройство применялось в Индии на высоковольтных сетях переменного тока [1]. В России в апреле этого года было завершено создание опытной модели УШРТ на 500 кВ и мощностью 180 МВАр. Ранее были рассмотрены варианты компенсирующих устройств с шунтирующими реакторами, управление которыми производится либо намагничиванием постоянным током с трансформаторной развязкой [2], либо тиристорными группами с электрической связью реактора и тяговой сети [3]. Рассматриваемое устройство отличается от ранее описанных.

1 Описание устройства

В общем случае УШРТ представляет собой трехфазный двухобмоточный реактор с обмоткой высокого напряжения (сетевой), подключаемой к шине высокого напряжения подстанции, и обмоткой низкого напряжения (обмоткой управления) с номинальным напряжением, значение которого зависит от мощности УШРТ. Отличительной особенностью электромагнитной части УШРТ является 100-процентная магнитная связь между

сетевой обмоткой и обмоткой управления, что позволяет регулировать ток первичной обмотки путем изменения угла управления тиристоров, подключенных параллельно сетевой обмотке.

Если добавить к реактору третью обмотку, состоящую из батареи конденсаторов (компенсационную обмотку), можно использовать реактор как адаптивное устройство компенсации реактивной мощности.

Электрическая схема устройства представлена на рис. 1. Трансформаторная подстанция является источником синусоидального напряжения $U_{н/ст}$. К шинам подстанции подключены трансформатор тока ТА и трансформатор напряжения TV. Своими измерительными обмотками они подключены к цифровому фазомеру Ф, который передает значение измеренного угла по аналоговому каналу на микроконтроллер МК. Микроконтроллер осуществляет сравнение полученного сигнала с допустимой ошибкой и ПИД-регулирование.

Нагрузкой в схеме является источник тока $I_{п}$. Активное и индуктивное сопротивления в линии представлены на схеме как $R_{кв}$ и $L_{кв}$ соответственно. Ключевым элементом схемы является УШРТ. Он включен параллельно нагрузке линии, осуществляя поперечную компенсацию. Его компенсационная обмотка подключена к батарее конденсаторов С. Обмотка управления подключена к тиристорному блоку VS1 и VS2, управление которыми осуществляется с помощью формирователя управляющих импульсов, получающего сигналы с микроконтроллера.

В зависимости от угла управления тиристоров (от нуля до 90°) ток в обмотке управления изменяется от номинального до нулевого значения, а в сетевой обмотке от номинального индуктивного тока до емкостного, обусловленного батареей конденсаторов компенсационной обмотки. При полностью закрытых тиристорах в силовой обмотке индуцируется максимальный емкостной ток, что соответствует режиму максимальной компенсации. При полностью открытых тиристорах (обмотка управления замкнута накоротко) в силовой обмотке индуцируется индуктивный ток.

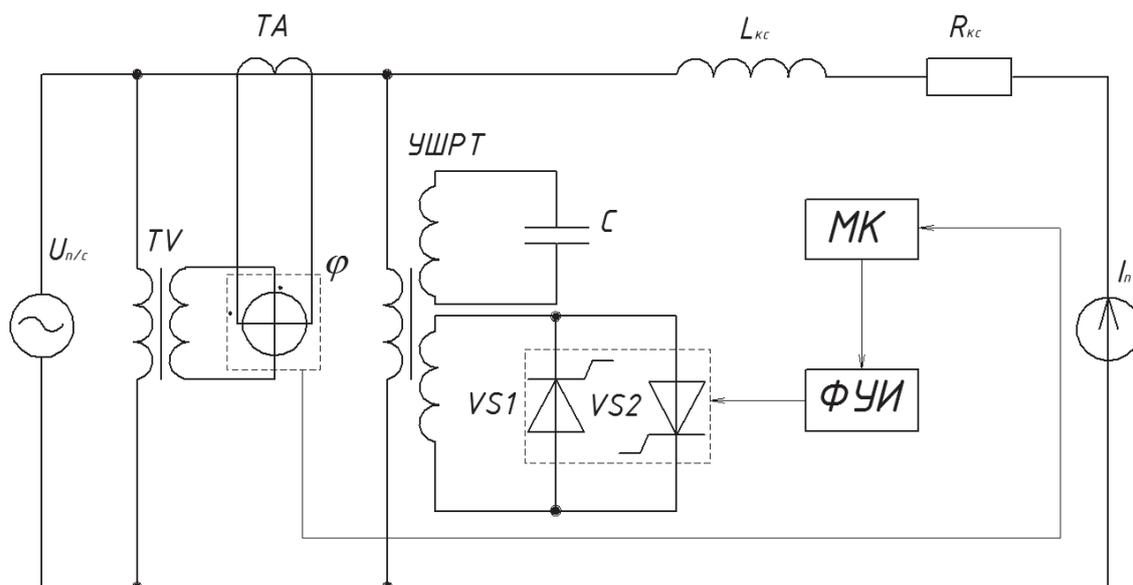


Рис. 1. Электрическая схема УШРТ

Таким образом, путем изменения угла управления тиристоров его ток можно изменить за полпериода промышленной частоты во всем диапазоне регулирования (например, от нуля до номинального тока). Потери мощности в таком реакторе такие же, как в трансформаторе аналогичной мощности.

Регулирование тока в силовой обмотке осуществляет цепь управления, которая формирует необходимые импульсы тиристоров.

2 Принцип работы модели

В микроконтроллере (МК) поступивший по аналоговому входу сигнал с фазометра (φ) преобразуется в дискретный сигнал и сравнивается на программном уровне с эталонным значением $\varphi = 0$ с учетом заданной погрешности $\pm\Delta$. Разница между действительным и заданным значением поступает на ПИД регулятор, где происходит формирование закона регулирования и команды на изменения угла открытия тиристоров. При значении угла больше эталонного осуществляется уменьшение угла управления тиристоров. При значении угла меньше эталонного генерируется команда на увеличения угла управления тиристоров.

Команды, поступающие с микроконтроллера, обрабатываются формирователем уп-

равляющих импульсов (ФУИ) и передаются на тиристоры.

На основе электрической схемы устройства была разработана математическая модель, реализованная средствами программного комплекса MATLAB Simulink. Моделирование проводилось с целью анализа работы устройства в реальной электротяговой сети. При моделировании решены следующие задачи:

- оценка сходимости ПИД-регулятора;
- оценка скорости регулирования;
- определение состава высших гармоник

в тяговой сети во всем диапазоне регулирования реальной мощности.

3 Результаты моделирования

В процессе моделирования были получены результаты для разных значений тока в контактной сети. Предполагается, что кривая тока имеет синусоидальную форму. В реальных условиях она отличается от синусоиды из-за влияния выпрямителей электровоза, что позволяет оценить вклад компенсирующего устройства в гармонический состав тягового тока. В качестве примера используется близкое к максимальному для расчетного участка значение тока.

На рис. 2 представлены кривые тока и напряжения в контактной сети без подключения устройства компенсации реактивной мощности.

На рис. 3 представлена кривая тока в контактной сети с подключенным устройством компенсации реактивной мощности для того же отрезка времени, что и без КУ. Из рисунка

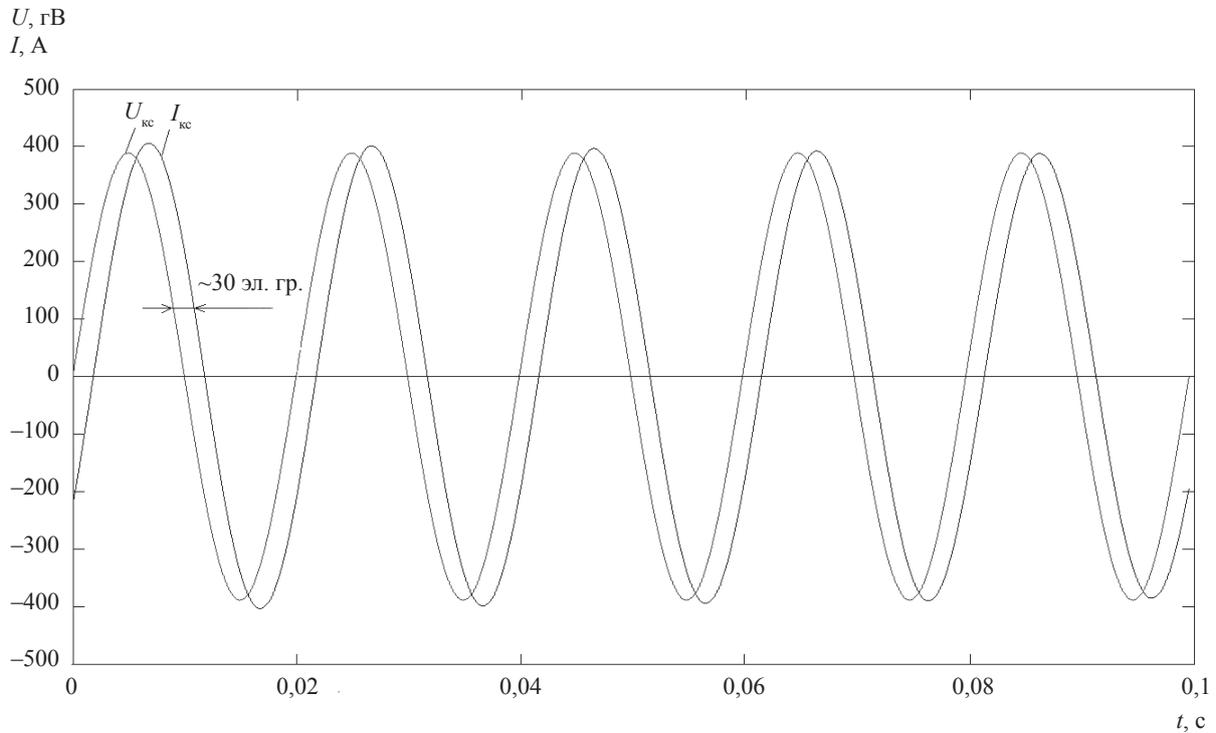


Рис. 2. Графики тока и напряжения без КУ

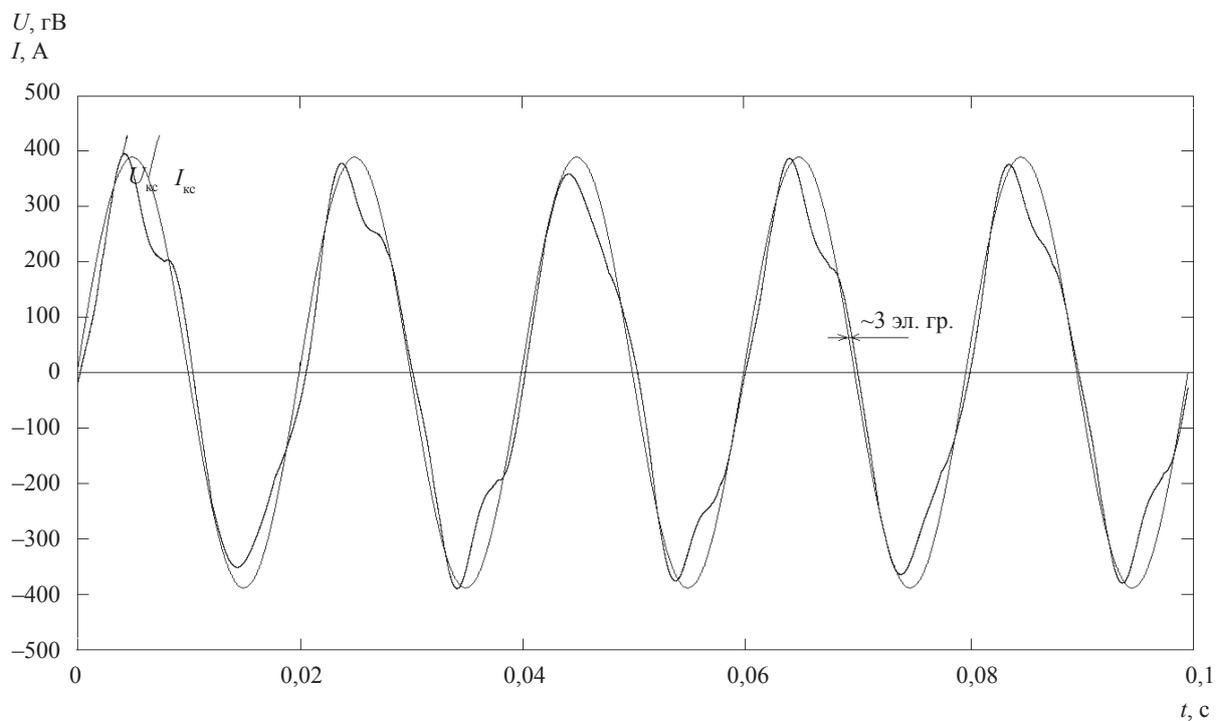


Рис. 3. Графики тока и напряжения с КУ

ка можно сделать вывод о хорошей сходимости ПИД-регулятора. Анализ диаграмм показывает, что уже через 5 периодов угол между током и напряжением не превышает четырех эл. град., в то время как при отсутствии КУ он остается равным 30 эл. град.

Следует отметить, что тиристоры в обмотке управления оказывают негативное влияние на качество электрической энергии, вызывая появление высших гармоник в токе реактора. Эти гармоники попадают в сеть и могут привести к таким последствиям, как повышение износа коммутационного оборудования, сбои в работе систем контроля, ошибки срабатывания выключателей и многое другое. Для рассмотрения гармонического состава кривой тока необходимо проанализировать кривую тока за один период (рис. 4).

Для определения гармонического состава кривой тока была применена стандартная функция программы MATLAB под названием «fft». Функция раскладывает численно заданную кривую в ряд Фурье. По результатам разложения кривой тока выделим следующие гармоники с их процентным соотношением от первой гармоники: 3-я гармоника – 14,08%; 5-ая гармоника – 2,78%; 7-ая

гармоника – 0,15%; 9-ая гармоника – 0,52%; 13-ая гармоника – 0,28%. Согласно ГОСТ 13109–97 «Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения», 3-я гармоника должна быть не больше 3%, 5-ая – не больше 2,5%, 7-ая – не больше 2%, 9 и 13 – не больше 1% [4]. Результаты представлены на гистограмме (рис. 5).

Остальные гармоники составляют незначительную часть (менее 0,1%), поэтому они не оказывают существенного влияния на качество электрической энергии.

Заключение

По результатам моделирования можно сделать следующие выводы:

1. Предложенное устройство компенсации реактивной мощности обладает широким диапазоном регулирования и возможностью подстраиваться под нагрузку, что делает его применение предпочтительным для сетей тягового электроснабжения.

2. Устройство должно быть снабжено фильтрами высших гармоник, которые устанавливаются в компенсационную обмотку. Фильтры настраиваются на третью и пятую

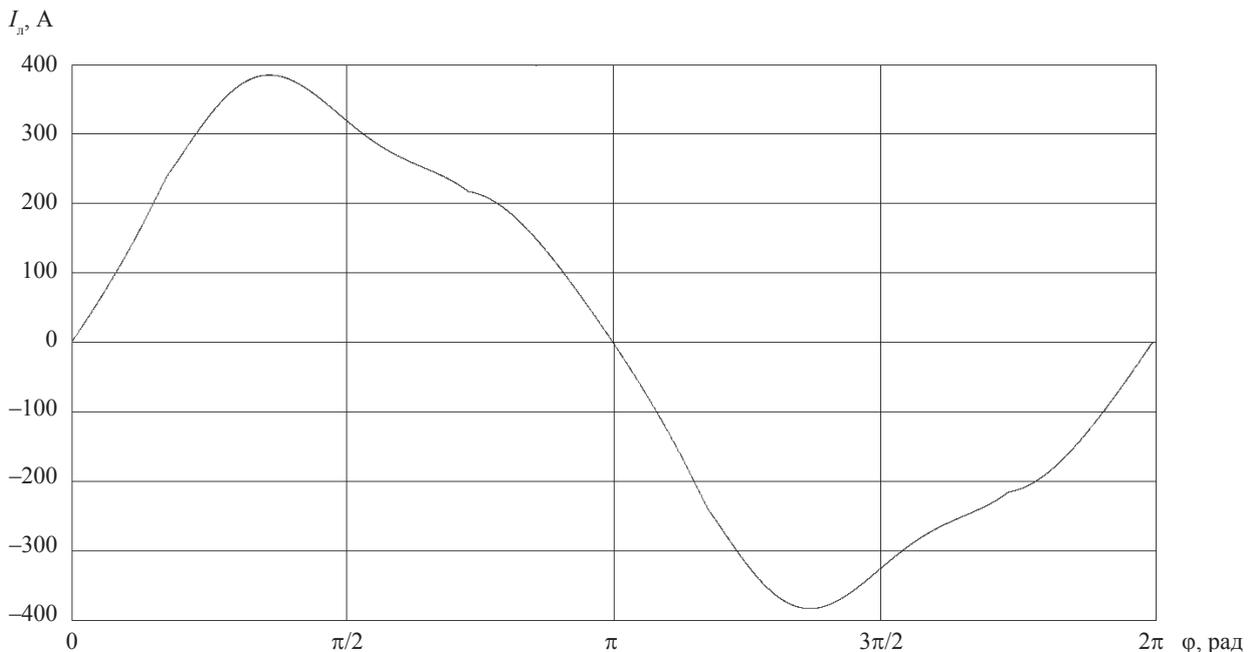


Рис. 4. Кривая тока за период

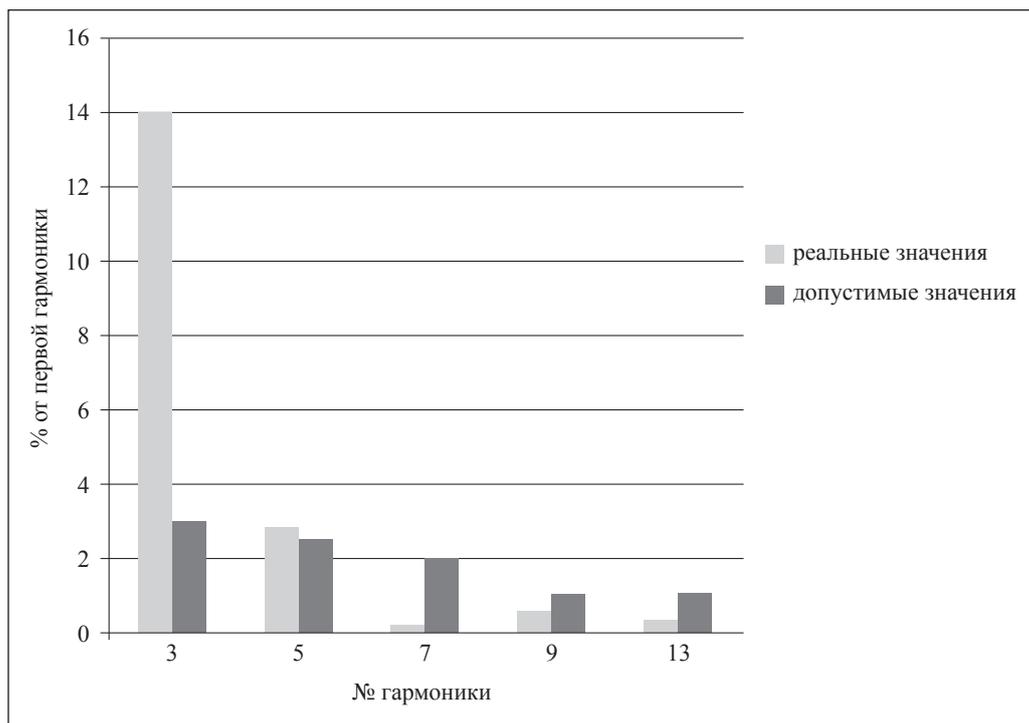


Рис. 5. Гистограмма токов высших гармоник

гармоники. Для этой цели могут быть использованы колебательные контуры (L–C цепочки), подобранные под резонансную частоту каждой из гармоник.

3. Устройство способно решить важную проблему тягового электроснабжения переменного тока – компенсацию реактивной мощности в зависимости от тяговой нагрузки, что, в свою очередь, обеспечивает энергосбережение, увеличивает ресурс работы оборудования и повышает пропускную способность.

Библиографический список

1. **Управляемые реакторы** / Г. Н. Александров, В. П. Лунин. – Санкт-Петербург :

Центр подготовки кадров энергетики, 2005. – 200 с.

2. **Разработка** методов и средств по симметрированию электрических нагрузок в системе тягового электроснабжения переменного тока : автореф. дис. ... канд. техн. наук / А. А. Королев. – Москва : МИИТ, 2013. – 24 с.

3. **Регулируемые** установки емкостной компенсации в системах тягового электроснабжения железных дорог : монография / Л. А. Герман, А. С. Серебряков. – Москва : МИИТ, 2012. – 211 с.

4. **ГОСТ 13109–97**. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – Москва : Изд-во стандартов, 2002. – 64 с.