

# РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



## ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2524347

### УСТРОЙСТВО КОМПЕНСАЦИИ ТОКА ЗАМЫКАНИЯ НА ЗЕМЛЮ В ТРЕХФАЗНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ (ВАРИАНТЫ)

Патентообладатель(ли): *Мустафа Георгий Маркович (RU)*

Автор(ы): *Мустафа Георгий Маркович (RU)*

Заявка № 2012119729

Приоритет изобретения 15 мая 2012 г.

Зарегистрировано в Государственном реестре  
изобретений Российской Федерации 04 июня 2014 г.

Срок действия патента истекает 15 мая 2032 г.

Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности

Б.П. Симонов





ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА  
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

**(12) ФОРМУЛА ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

(21)(22) Заявка: 2012119729/07, 15.05.2012

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:  
15.05.2012

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 15.05.2012

(43) Дата публикации заявки: 20.11.2013 Бюл. № 32

(45) Опубликовано: 27.07.2014 Бюл. № 21

(56) Список документов, цитированных в отчете о  
поиске: RU 2130677 C1, 20.05.1999. RU 2321132  
C1, 27.03.2008. SU 813587 A1, 15.03.1981. US  
4224652 A, 23.09.1980

Адрес для переписки:

119270, Москва, Фрунзенская наб., 40, кв. 4,  
Мустафа Георгий Маркович

(72) Автор(ы):

Мустафа Георгий Маркович (RU)

(73) Патентообладатель(и):

Мустафа Георгий Маркович (RU)

**(54) УСТРОЙСТВО КОМПЕНСАЦИИ ТОКА ЗАМЫКАНИЯ НА ЗЕМЛЮ В ТРЕХФАЗНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ (ВАРИАНТЫ)****(57) Формула изобретения**

1. Устройство компенсации тока замыкания на землю в трехфазных электрических сетях, содержащее двухполюсник, соединяющий нейтраль питающего сеть трансформатора с землей и формирующий отстающий ток для компенсации опережающего емкостного тока однофазного замыкания на землю, а также датчик тока нейтрали, трансформатор напряжения сети, генератор тестовых сигналов для измерения емкости сети и вычислительный блок для определения требуемого адмиттанса упомянутого двухполюсника, отличающееся тем, что в качестве заземляющего двухполюсника применен следящий широтно-модулированный конвертор напряжения (следящий PWM-конвертор), снабженный в дополнение к обычному набору функциональных блоков блоком задатчика тока, входами которого являются напряжение нейтрали и требуемый адмиттанс, выходом является задание тока, поступающее на вход регулятора тока упомянутого следящего PWM-конвертора, а передаточная функция задатчика тока обеспечивает отстающий сдвиг фазы около 90 градусов на сетевой частоте.

2. Устройство компенсации тока замыкания на землю в трехфазных электрических сетях по п.1, отличающееся тем, что передаточная функция задатчика в дополнение к реактивной (первой) составляющей содержит демпфирующую, пропорциональную входному сигналу составляющую, которая в действии конвертора проявляется как

RU 2 524 347 C 2

R U 2 5 2 4 3 4 7 C 2

шунтирующий резистор (виртуальный резистор).

3. Устройство компенсации тока замыкания на землю в трехфазных электрических сетях по п.1, отличающееся тем, что конденсаторы постоянного напряжения следящего PWM-конвертора (накопительные конденсаторы) выполнены «подвешенными» (не присоединены к источнику либо стоку напряжения соизмеримой мощности), а в передаточную функцию задатчика введена дополнительная составляющая (составляющая баланса), вырабатываемая по рассогласованию напряжений накопительных конденсаторов следящего PWM-конвертора и обеспечивающая поддержание их напряжений около номинального уровня.

4. Устройство компенсации тока замыкания на землю в трехфазных электрических сетях по п.1, отличающееся тем, что в состав заземляющего двухполюсника введена нерегулируемая катушка на половину требуемой реактивной мощности заземляющего двухполюсника ( $Q_N/2$ ), подключенная параллельно следящему PWM-конвертору, который при этом также выполнен на такую же половинную мощность ( $Q_N/2$ ); причем регулирование следящего PWM-конвертора в полном диапазоне от  $-Q_N/2$  до  $+Q_N/2$  (от опережающих на 90 градусов токов до отстающих на 90 градусов токов) обеспечивает регулирование суммарного адмиттанса в полном диапазоне мощности - от нуля до номинального значения  $Q_N$ .

5. Устройство компенсации тока замыкания на землю в трехфазных электрических сетях по п.1, отличающееся тем, что следящий PWM-конвертор подключен через согласующий трансформатор.

6. Устройство компенсации тока замыкания на землю в трехфазных электрических сетях по п.1, отличающееся тем, что следящий PWM-конвертор подключен через согласующий трансформатор (трансформатор-реактор) с мощностью холостого хода  $Q_N/2$ .

7. Устройство компенсации тока замыкания на землю в трехфазных электрических сетях по п.1, отличающееся тем, что следящий PWM-конвертор параллельно с выполнением основной функции (компенсации емкостного тока) осуществляет вливание (инъекцию) в нейтраль сети тестового тока или тестового напряжения, а требуемый адмиттанс вычисляется в системе управления по отклику тестовой частоты в напряжении нейтрали.

8. Устройство компенсации тока замыкания на землю в трехфазных электрических сетях по п.1, отличающееся тем, что передаточная функция задатчика наряду с реактивной (компенсационной), демпфирующей и балансной составляющими содержит дополнительную составляющую - тестовый сигнал с частотой ( $\omega_{test}$ ), отличной от сетевой ( $\omega_s$ ) (например,  $\omega_{test}=0,5\omega_s$ ), генерируемый в системе управления следящего PWM-конвертора, причем тестовый сигнал представляет собой сумму двух или более гармонических составляющих разной частоты, отличающейся от сетевой.

9. Устройство компенсации тока замыкания на землю в трехфазных электрических сетях по п.1, отличающееся тем, что система управления следящего PWM-конвертора, выполненная на основе мощного сигнального процессора, совмещает выполнение функций, специфичных для устройств компенсации тока замыкания на землю в трехфазных электрических сетях, (как то: генерация тестовых сигналов, обработка откликов на тестовые сигналы и вычисление требуемых показателей) с неспецифичными (обычными) функциями управления следящим PWM-конвертором, исключая тем самым необходимость в применении дополнительной аппаратуры.



ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА  
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

## (12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(21)(22) Заявка: 2012119729/07, 15.05.2012  
 (24) Дата начала отсчета срока действия патента:  
15.05.2012  
 Приоритет(ы):  
 (22) Дата подачи заявки: 15.05.2012  
 (43) Дата публикации заявки: 20.11.2013 Бюл. № 32  
 (45) Опубликовано: 27.07.2014 Бюл. № 21  
 (56) Список документов, цитированных в отчете о  
поиске: RU 2130677 C1, 20.05.1999. RU 2321132  
C1, 27.03.2008. SU 813587 A1, 15.03.1981. US  
4224652 A, 23.09.1980  
 Адрес для переписки:  
119270, Москва, Фрунзенская наб., 40, кв. 4,  
Мустафа Георгий Маркович

(72) Автор(ы):  
Мустафа Георгий Маркович (RU)  
 (73) Патентообладатель(и):  
Мустафа Георгий Маркович (RU)

## (54) УСТРОЙСТВО КОМПЕНСАЦИИ ТОКА ЗАМЫКАНИЯ НА ЗЕМЛЮ В ТРЕХФАЗНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ (ВАРИАНТЫ)

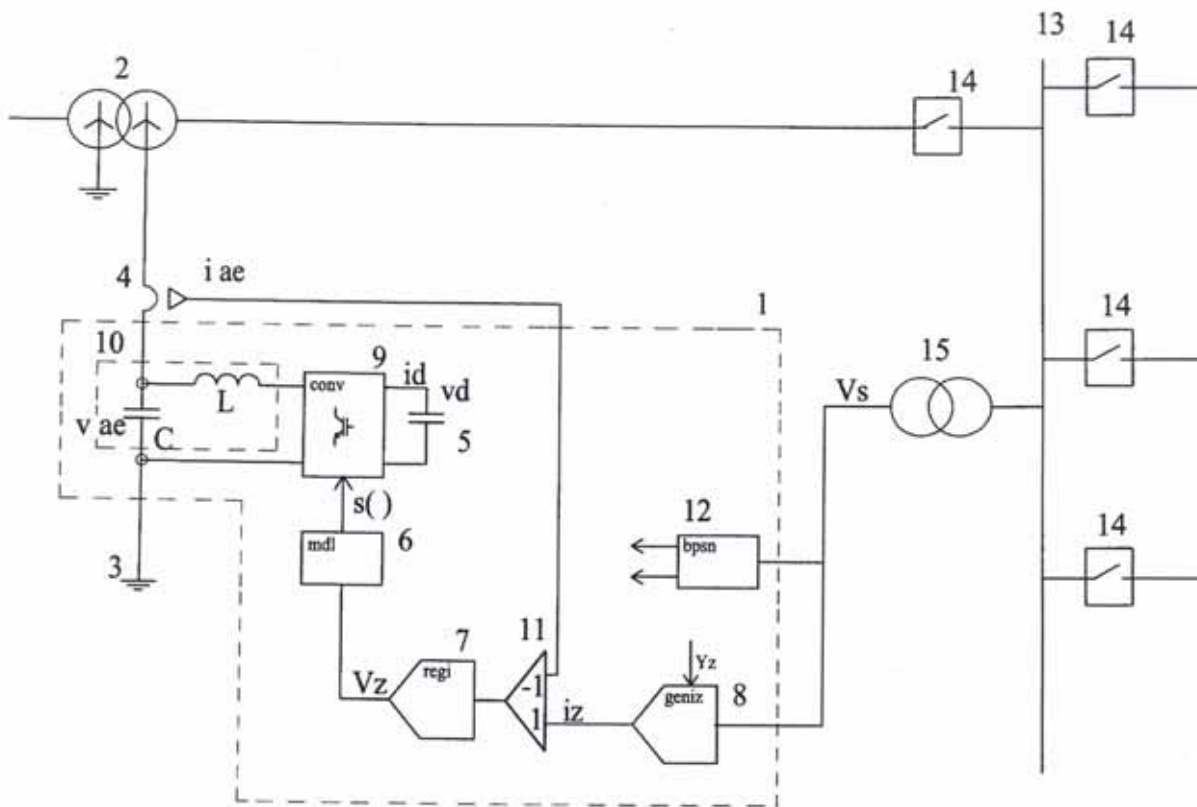
(57) Реферат:  
 Использование: в области электротехники.  
 Технический результат - повышение  
 быстродействия и расширение функциональных  
 возможностей. Устройство представляет собой  
 заземляющий двухполюсник - следящий широтно-  
 модулированный конвертор напряжения  
 (следящий PWM-конвертор), соединяющий  
 нейтраль питающего сеть трансформатора с  
 землей и формирующий отстающий ток для  
 компенсации опережающего емкостного тока  
 однофазного замыкания на землю, а также датчик  
 тока нейтрали, трансформатор напряжения сети,  
 генератор тестовых сигналов для измерения

емкости сети и вычислительный блок для  
 определения требуемого адмиттанса упомянутого  
 двухполюсника. Следящий PWM-конвертор в  
 дополнение к обычному набору функциональных  
 блоков снабжен блоком задатчика тока, входами  
 которого являются напряжение нейтрали и  
 требуемый адмиттанс, выходом является задание  
 тока, поступающее на вход регулятора тока  
 следящего PWM-конвертора, а передаточная  
 функция задатчика тока обеспечивает отстающий  
 сдвиг фазы около 90 градусов на сетевой частоте.  
 8 з.п. ф-лы, 46 ил.

RU 2 5 2 4 3 4 7 C 2

RU 2 5 2 4 3 4 7 C 2

RU 2524347 C2



Фиг. 4

Заявляемое техническое решение относится к электротехнике и предназначено преимущественно для компенсации тока замыкания на землю и гашения дуги в трехфазных электрических сетях с изолированной нейтралью.

В трехфазных электрических сетях с изолированной нейтралью допускается работа оборудования при однофазном замыкании на землю (причем однофазные замыкания на землю составляют до 90% общего числа повреждений), но ток замыкания при этом контролируется. Исходя из опыта эксплуатации, токи замыкания на землю не более 5...20 А (в зависимости от величины напряжения сети) являются допустимыми и не требуют немедленного отключения питания.

При коротком замыкании на землю одной из фаз электрической сети (средневольтной: 6, 10, 20 кВ или высоковольтной: более 20 кВ) через место короткого протекает емкостной ток, который может иметь значительную величину и поддерживать горение дуги короткого замыкания. Это явление исследовал Петерсен [1], и он же предложил средство для уменьшения тока дуги короткого замыкания - присоединение нейтрали питающего трансформатора к земле через катушку индуктивности (катушка Петерсена). Индуктивность катушки (или ее проводимость - адмиттанс) подбирается по условию резонанса так, чтобы отстающий ток индуктивности компенсировал опережающий емкостной ток; при точной настройке ток в месте замыкания в установившемся режиме должен становиться нулевым. С тех пор катушка Петерсена широко применяется в средневольтных и высоковольтных электрических сетях. В простых случаях может применяться нерегулируемая катушка. В разветвленных сетях, где емкость на землю может изменяться, применяются катушки с отводами, переключаемыми контакторами [2, 3] либо плунжерные реакторы, индуктивность которых регулируется перемещениями магнитного шунта [4, 5, 6, 7]. Мощность дугогасящего устройства  $Q_N$  зависит от напряжения сети и величины тока компенсации.

Недостатком реакторов с отводами является сложность настройки режима компенсации, обусловленная дискретностью изменения индуктивности.

Недостатками плунжерных реакторов являются большие масса и габариты, а также наличие вращающихся и перемещающихся частей, что отрицательно сказывается на надежности и долговечности реактора. Невысокая скорость перемещения подвижной части реакторов плунжерного типа накладывает ограничения на их быстродействие.

Известны также реакторы без подвижных частей, регулируемые подмагничиванием [8, 9, 10]. Разработаны устройства, позволяющие производить настройку регулируемых реакторов автоматически, без участия оператора [5, 7, 9, 10]. Для этого применяется вспомогательный преобразователь-генератор тестового сигнала, подаваемого в сеть через дополнительную обмотку реактора. По отклику на тестовый сигнал определяется емкость сети на землю и далее устанавливается соответствующее значение индуктивности реактора.

Однако применение вспомогательного преобразователя существенно увеличивает стоимость дугогасящего устройства в целом.

Для оценки того или иного дугогасящего устройства принципиальным обстоятельством является то, что устройства эти должны действовать в двух различных классах ситуаций. Катушка Петерсена успешно действует в ситуациях первого класса, когда короткое замыкание на землю устойчиво (металлическое к.з.). В этих ситуациях в установившемся режиме короткого замыкания устанавливается синусоидальный отстающий ток катушки, который компенсирует полностью или с некоторой погрешностью опережающий емкостной ток и уменьшает ток и тепловыделение в промежутке короткого замыкания. Напряжение здоровых фаз относительно земли

оказываются завышенными в  $\sqrt{3}$  раз. Однако сеть может продолжать работать некоторое время; немедленного прерывания питания потребителей удастся избежать. Возможно также и другое, более благоприятное развитие событий, когда под действием  
5 снижения тока в промежутке короткого замыкания его электрическая прочность восстанавливается, и в результате восстанавливается и нормальная работа сети.

Более типичны, однако ситуации второго класса с повторяющимися пробоями изоляционного промежутка, когда за частичным восстановлением электрической прочности промежутка следует нарастание напряжения на нем, повторный пробой и  
10 т.д. Ситуации этого второго класса рассматривались Петерсом и Слепяном [11], Джуварлы Ч.М. [12], Беляевым Н.М. [13]. В ситуациях с повторяющимися пробоями применение катушки Петерсена не дает стабильного положительного эффекта, что и следует ожидать, поскольку действие ее рассчитано на установившийся режим.

Для улучшения процессов при повторяющихся пробоях было предложено  
15 комбинированное устройство, в котором к катушке Петерсена присоединяется резистор. Выполненное Ильиных М. с соавторами исследование [14] продемонстрировало полезное демпфирующее действие резистора при повторяющихся пробоях. Вместе с тем резистивное демпфирование связано с некоторым ухудшением показателей установившихся процессов. Таким образом, возникает противоречие. Ток резистора  
20 ничем не компенсируется и добавляется к протекающему в промежутке короткого замыкания току. Возможности увеличения проводимости шунтирующего резистора для улучшения динамики ограничены.

Наиболее близким к заявляемому техническому решению является техническое решение [10], в котором применяется управляемый подмагничиванием электрический  
25 реактор (УПЭР) с системой автоматического управления. УПЭР не имеет подвижных частей и обладает относительно высоким быстродействием. Недостатками этого технического решения являются завышенный расход электротехнических материалов (медь, электротехническая сталь), большие масса и габариты, необходимость применения специального устройства для генерации тестовых напряжений на нейтрали  
30 трансформатора. Кроме того УПЭР не обеспечивает демпфирование высокочастотных колебаний, возникающих в момент замыкания на землю при повторяющихся пробоях и способствующих возникновению дуги. Система автоматического управления УПЭР не обладает способностью определять момент прекращения однофазного замыкания на землю для выхода из режима компенсации. Это оставляет возможность возникновения  
35 резонансных перенапряжений при коммутациях и прочих возмущениях и снижает уровень надежности сети.

Задача, на решение которой направлено заявляемое техническое решение, заключается в придании дугогасящей аппаратуре, наряду с основными, дополнительных  
40 полезных функций, таких как возможность идентификации сети без применения вспомогательного оборудования, быстрое подавление переходных составляющих тока, в том числе при повторяющихся пробоях, ускоренное снижение тока дуги, при одновременном устранении вышеуказанных недостатков, присущих УПЭР [10].

При решении поставленной задачи достигаемый технический результат заключается в снижении материалоемкости дугогасящего аппарата, в удобстве при эксплуатации,  
45 повышении устойчивости сети к замыканиям на землю.

Суть настоящего технического решения заключается в том, чтобы применить в качестве дугогасящего устройства (вместо регулируемого каким-то способом реактора или комбинации реактора с шунтирующим резистором) активный элемент - следящий широтно-модулированный (pulse-width modulation, PWM) транзисторный конвертор

напряжения, далее в тексте обозначаемый как следящий PWM-конвертор. Современный уровень техники позволяет осуществлять такие конверторы с требуемыми для дугогашения параметрами, и такие конверторы при надлежащем управлении ими могут имитировать регулируемую индуктивность. Применение следящего PWM-конвертора соответствует тенденциям современной техники и дает некоторые преимущества уже само по себе, при простом воспроизведении новым способом тех же функций. Однако применение активного элемента - следящего PWM-конвертора - способно дать больше - ослабить противоречие между требованием хорошей точности компенсации при устойчивых замыканиях и требованием хорошего демпфирования при перемежающихся

пробоях.

Кроме отмеченного существует еще одно полезное свойство следящего PWM-конвертора. При предыдущем рассмотрении он рассматривался как устройство для получения отстающего тока, т.е. как аналог регулируемой индуктивности. Однако такие конверторы в равной степени могут выдавать и опережающий ток, так что они должны рассматриваться не как аналог индуктивности или емкости, но как универсальное управляемое реактивное звено. Изменению реакции такого звена с индуктивной на емкостную соответствует смена знака коэффициента проводимости  $Y_n$  конвертора как двухполюсника. При переходе коэффициента  $Y_n$  через нуль в сторону отрицательных значений  $Y_n$  следящий PWM-конвертор будет выдавать опережающий ток, т.е. станет аналогом емкости. При работе в сети такая ситуация может возникнуть, если проводимость реактора на присоединении другого трансформатора окажется больше, чем требуется. Следящий PWM-конвертор при этом автоматически скомпенсирует избыток, переходя в режим с отрицательным коэффициентом проводимости  $Y_n$  и опережающим током. Никакие переключения или перенастройки для перехода от индуктивного режима к емкостному режиму не требуются. Способность такого конвертора к двустороннему регулированию может применяться при построении дугогасящего устройства по ценовым или другого рода мотивам.

Кроме варианта дугогасящего устройства на основе упомянутого конвертора возможны и другие варианты, выбор которых обусловлен технико-экономическими соображениями.

Хорошим является вариант, когда в состав дугогасящего устройства вводится нерегулируемая катушка на половинную мощность  $Q_N/2$  и следящий PWM-конвертор на такую же половинную мощность  $Q_N/2$ . При регулировании конвертора в полном диапазоне  $\pm Q_N/2$  суммарный адмиттанс регулируется в полном диапазоне - от нуля до номинального значения.

Аналогично, по ценовым или другим каким-то мотивам (например, для выполнения конвертора на пониженное напряжение) может оказаться полезным применение согласующего трансформатора.

Может также оказаться целесообразным исполнить этот трансформатор как трансформатор-реактор, с мощностью холостого хода равной половине требуемой номинальной мощности дугогасящего устройства. Требуемая установленная мощность следящего PWM-конвертора при этом тоже составляет половину номинальной мощности.

Предлагаемый следящий PWM-конвертор по структуре подобен СТАТКОМу (Statkom - static reactive power compensation - статический компенсатор на основе преобразователя напряжения). Главное свойство СТАТКОМ - способность генерировать ток любой фазы относительно напряжения сети. Предлагаемый следящий PWM-конвертор может:



- 5 - работать в режиме двухполюсника с управляемым импедансом (адмиттансом), что позволяет осуществлять компенсацию емкостных токов и гашение дуги, причем быстрые регуляторы системы управления в сочетании с практически безинерционными полупроводниковыми силовыми элементами позволяют получить эффективное
- 10 подавление высших гармоник, благоприятное протекание переходных процессов как при устойчивом замыкании на землю, так и при перемежающихся пробоях,
  - генерировать на нейтрали трансформатора тестовые сигналы необходимой мощности с любым содержанием гармоник, требуемым для точной идентификации параметров трехфазной сети, при этом не требуется никакого дополнительного
  - 15 оборудования, кроме программной области микропроцессора в системе управления, что при возможностях современных мощных микропроцессоров не требует дополнительных материальных затрат,
    - работать в режиме двухполюсника, обладающего свойством нагрузки активного характера, т.е. резистора (но при этом без поглощения и рассеивания энергии, за
    - 20 исключением небольших потерь в элементах схемы), что позволяет демпфировать высокочастотные колебания, способствующие появлению перенапряжений,
      - совмещать при работе любые из вышеперечисленных режимов, например, режим компенсации емкостных токов и режим демпфирования паразитных колебаний и перенапряжений, что неосуществимо при применении пассивного элемента - реактора
      - 25 - любого из вышеупомянутых типов.

В соответствии с предложенным техническим решением указанная задача решается тем, что в известном устройстве компенсации тока замыкания на землю в трехфазных электрических сетях, содержащем двухполюсник, соединяющий нейтраль питающего

25 сеть трансформатора с землей и формирующий отстающий ток для компенсации опережающего емкостного тока однофазного замыкания на землю, а также датчик тока нейтрали, трансформатор напряжения сети, генератор тестовых сигналов для измерения емкости сети и вычислительный блок для определения требуемого адмиттанса упомянутого двухполюсника, согласно заявляемому техническому решению в качестве

30 заземляющего двухполюсника применен следящий широтно-модулированный конвертер напряжения (следящий PWM-конвертер), снабженный в дополнение к обычному набору функциональных блоков блоком задатчика тока, входами которого являются напряжение нейтрали и требуемый адмиттанс, выходом является задание тока, поступающее на вход регулятора тока упомянутого следящего PWM-конвертера, а передаточная функция задатчика тока обеспечивает отстающий сдвиг фазы около 90

35 градусов на сетевой частоте.

В соответствии с предложенным техническим решением указанная задача решается также тем, что передаточная функция задатчика в дополнение к реактивной (первой) составляющей содержит демпфирующую, пропорциональную входному сигналу составляющую, которая в действии конвертера проявляется как шунтирующий резистор

40 (виртуальный резистор).

В соответствии с предложенным техническим решением указанная задача решается также тем, что конденсаторы постоянного напряжения следящего PWM-конвертера (накопительные конденсаторы) выполнены «подвешенными» (не присоединены к источнику либо стоку напряжения соизмеримой мощности), а в передаточную функцию

45 задатчика введена дополнительная составляющая (составляющая баланса), вырабатываемая по рассогласованию напряжений накопительных конденсаторов следящего PWM-конвертера и обеспечивающая поддержание их напряжений около номинального уровня.

В соответствии с предложенным техническим решением указанная задача решается также тем, что в состав заземляющего двухполюсника введена нерегулируемая катушка на половину требуемой реактивной мощности заземляющего двухполюсника ( $Q_N/2$ ), подключенная параллельно следящему PWM-конвертору, который при этом также выполнен на такую же половинную мощность ( $Q_N/2$ ); причем регулирование следящего PWM-конвертора в полном диапазоне от  $-Q_N/2$  до  $+Q_N/2$  (от опережающих на 90 градусов токов до отстающих на 90 градусов токов) обеспечивает регулирование суммарного адмиттанса в полном диапазоне мощности - от нуля до номинального значения  $Q_N$ .

В соответствии с предложенным техническим решением указанная задача решается также тем, что следящий PWM-конвертор подключен через согласующий трансформатор.

В соответствии с предложенным техническим решением указанная задача решается также тем, что следящий PWM-конвертор подключен через согласующий трансформатор (трансформатор-реактор) с мощностью холостого хода  $Q_N/2$ .

В соответствии с предложенным техническим решением указанная задача решается также тем, что следящий PWM-конвертор параллельно с выполнением основной функции (компенсации емкостного тока) осуществляет вливание (инжекцию) в нейтраль сети тестового тока или тестового напряжения, а требуемый адмиттанс вычисляется в системе управления по отклику тестовой частоты в напряжении нейтрали.

В соответствии с предложенным техническим решением указанная задача решается также тем, что передаточная функция задатчика наряду с реактивной (компенсационной), демпфирующей и балансной составляющими содержит дополнительную составляющую - тестовый сигнал с частотой ( $\omega_{test}$ ), отличной от сетевой ( $\omega_s$ ) (например,  $\omega_{test}=0,5\omega_s$ ), генерируемый в системе управления следящего PWM-конвертора.

В соответствии с предложенным техническим решением указанная задача решается также тем, что тестовый сигнал представляет собой сумму двух или более гармонических составляющих разной частоты, отличающейся от сетевой.

В соответствии с предложенным техническим решением указанная задача решается также тем, что система управления следящего PWM-конвертора, выполненная на основе мощного сигнального процессора, совмещает выполнение функций, специфичных для устройств компенсации тока замыкания на землю в трехфазных электрических сетях (как то: генерация тестовых сигналов, обработка откликов на тестовые сигналы и вычисление требуемых показателей), с неспецифичными (обычными) функциями управления следящим PWM-конвертором, исключая тем самым необходимость в применении дополнительной аппаратуры.

Для пояснений представлены следующие иллюстрации.

На фиг.1 представлена схема замещения (рис.1 из книги [3]) трехфазной электрической сети с изолированной нейтралью с дугогасящим реактором в нейтрали.

На фиг.2а представлена известная однофазная мостовая схема конвертора напряжения с тремя уровнями переменного напряжения.

На фиг.2б представлена известная однофазная пятиуровневая схема конвертора напряжения.

На фиг.3а и 3б представлены известные варианты конвертора напряжения, выполненные по модульной многоуровневой схеме.

На фиг.4 представлена схема активного дугогасящего устройства, выполненного на основе однофазного следящего PWM-конвертора.

На фиг.5 изображена структурная схема трехкомпонентного DCB (D - демпфирование, C - компенсация, B - баланс) задатчика тока, функциональные блоки которого реализованы на основе мощного сигнального процессора.

На фиг.6 представлен один из возможных вариантов реализации блока регулятора баланса, входящего в состав задатчика тока.

На фиг.7а изображена сеть с двумя питающими трансформаторами с дугогасящей катушкой на первом из них и со следящим PWM-конвертором на втором.

На фиг.7б изображена схема замещения по нейтрали сети, представленной на фиг.7а.

На фиг.8 изображен вариант дугогасящего устройства с параллельной работой нерегулируемого дросселя и следящего PWM-конвертора.

На фиг.9 изображен вариант дугогасящего устройства с подключением следящего PWM-конвертора через согласующий трансформатор или трансформатор-реактор.

На фиг.10 представлена схема автоматически подстраивающегося дугогасящего устройства со следящим PWM-конвертором.

На фиг.11а представлена функциональная схема для определения резистивной  $G_n$  и емкостной  $Y_n$  составляющих проводимости сети, а также требуемого коэффициента  $Y_z$  проводимости компенсации.

На фиг.11б, представлена схема замещения сети на тестовой частоте  $f^d$ , отличающейся от сетевой частоты  $f$ .

На фиг.12 представлена функциональная схема для определения резистивной  $G_n$  и емкостной  $Y_n$  составляющих проводимости сети, а также требуемого коэффициента  $Y_z$  проводимости компенсации для случая, когда следящий PWM-конвертор работает параллельно с нерегулируемым дугогасящим реактором в схеме вида фиг.7а или в схемах вида фиг.8, фиг.9.

Схема замещения сети с дугогасящим реактором [3], представленная на фиг.1, иллюстрирует основной принцип компенсации тока замыкания на землю и гашения дуги. Дугогасящий реактор подключают к нулевой точке сети и к земле. Паразитные емкости фаз относительно земли обозначены  $C_a$ ,  $C_b$ ,  $C_c$ .

Устройство заявляемого технического решения - следящего PWM-конвертора - в его статическом состоянии может быть описано с использованием иллюстраций, представленных на фиг.2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12.

Следящий PWM-конвертор - для применения в дугогасящем устройстве может быть выполнен по любой из известных схем конверторов напряжения:

- по однофазной мостовой схеме с тремя уровнями переменного напряжения (фиг.2а);
- по однофазной пятиуровневой схеме (фиг.2б);
- по модульной многоуровневой схеме [15], (фиг.3а, 3б).

Выбор той или иной из них определяется условиями применения. Широтная модуляция должна быть достаточно высокочастотной. Пульсации широтной модуляции подавляются LC-фильтром (на фиг.2 и 3 не показан). Реактанс  $X=\omega_S L$  и адмиттанс  $Y=\omega_S C$  фильтра на сетевой частоте  $\omega_S$  пренебрежимо малы. Следящий PWM-конвертор оснащается обычным набором блоков для осуществления следящей PWM: драйверами транзисторов, датчиками и достаточно мощным сигнальным процессором. Последний осуществляет функции модулятора и требуемые дополнительные функции.

Существенными свойствами следящего PWM-конвертора являются следующие. Выходное напряжение конвертора  $v_{ae}(t)$  с достаточной точностью повторяет сигнал задания  $v_z(t)$ ; отвлекаясь от масштаба можно записать

$$v_{ae}(t) \approx v_z(t) \quad (1)$$

Кроме того, сам по себе конвертор является не накапливающим и не рассеивающим энергию звеном (non-energetic; non-dissipativ); мощность на выходе конвертора  $P_{ae}(t)$  совпадает с мощностью, проходящей в звено постоянного напряжения  $P_d(t)$ :

$$P_{ae}(t) = v_{ae}(t) \cdot i_{ae}(t) = P_d(t) = v_d(t) \cdot i_d(t) \quad (2)$$

(здесь обозначены  $v_d, i_d$  - напряжение и ток в звене постоянного напряжения конвертора,  $i_{ae}$  - выходной ток конвертора).

Для модульной многоуровневой схемы где накопительных конденсаторов несколько, в последнее выражение войдет сумма  $\sum_k v_{d,k} \times i_{d,k}$ ; при укрупненном рассмотрении вместо суммы можно рассматривать некий эквивалентный конденсатор. Для дальнейшего рассмотрения активный элемент - следящий PWM-конвертор - это управляемый четырехполюсник с двумя портами: переменного тока  $v_{ae}, i_{ae}$  и постоянного тока  $v_d, i_d$ , описываемый уравнениями (1, 2).

Активное дугогасящее устройство образуется (см. фиг.4) путем присоединения порта переменного напряжения однофазного следящего PWM-конвертора 1 между нейтралью питающего сеть трансформатора 2 и заземлением 3 последовательно с датчиком тока 4. По отношению к трехфазной сети переменного тока (на фиг.4 в однолинейном представлении) оно является управляемым двухполюсником. Порт (или порты) постоянного напряжения при применении следящего PWM-конвертора 1 в дугогасящем устройстве присоединяются только к накопительному конденсатору 5 (конденсаторам). Присоединения к источнику или стоку постоянного напряжения соизмеримой мощности не требуется; достаточно иметь присоединение к маломощному зарядному устройству для подготовительного заряда конденсаторов 5. При применении в дугогасящем устройстве следящий PWM-конвертор 1 содержит помимо неспецифических функциональных блоков, таких как модулятор 6 (mdl), регулятор 7 тока (regi), специфический функциональный блок - задатчик 8 отстающего тока  $i_z(t)$ , обозначенный  $geniz$ . На фиг.4 представлены также входящие в состав следящего PWM-конвертора 1:

- собственно конвертор 9 напряжения (силовая часть, выполненная в соответствии с одним из вариантов, изображенных на фиг.2 и 3),
  - LC-фильтр 10, подавляющий пульсации широтной модуляции,
  - сумматор 11,
  - блок 12 питания собственных нужд (bpsn), для электропитания системы управления.
- На фиг.4 изображены также сборные шины 13 трехфазной электрической сети с коммутационными аппаратами 14 как со стороны питающего трансформатора 2, так и со стороны потребителей (на фиг.4 потребители не показаны) и трансформатор 15 напряжения сети.

На фиг.5 изображена структурная схема трехкомпонентного DCB (D - демпфирование, C - компенсация, B - баланс) задатчика 8 тока  $i_z(t)$ , функциональные блоки которого реализованы на основе мощного сигнального процессора.

Структурная схема включает в себя:

- сумматоры 16, 17, 18,
- блоки умножения 19, 20, 21,
- интеграторы 22, 23,
- блок 24 регулятора баланса,
- блок 25 регулятора напряжения или энергии накопительных конденсаторов 5 конвертора 9 напряжения.

Входными сигналами задатчика 8 тока являются сигналы, вычисляемые в системе управления:

- $v_n$  - напряжение смещения нейтрали,
- $G_{demp}$  - коэффициент проводимости демпфирования,
- 5 -  $Y_z$  - требуемый коэффициент проводимости компенсации,
- $e_z$  - номинальный (расчетный) уровень энергии накопительного конденсатора (конденсаторов) 5,
- $u_d$  - текущее (измеренное) значение напряжения накопительного конденсатора (конденсаторов) 5.

10 На фиг.6 представлен один из возможных вариантов реализации блока 24 регулятора баланса. Блок 24 регулятора баланса содержит быстродействующий ПИД (пропорционально-интегрально-дифференциальный) регулятор 26, и фильтр 27 второй гармоника. ПИД-регулятор включает в себя интегральное 28, пропорциональное 29 и дифференциальное 30 звенья с постоянными времени  $t_{int}$ ,  $t_1$ ,  $t_{dif}$  соответственно. Выходы 15 звеньев 28, 29, 30 суммируются сумматором 31 с соответствующими коэффициентами  $1$ ,  $K_{pr}$ ,  $K_{dif}$ . Для уменьшения пульсаций дополнительно отфильтровывается вторая гармоника с помощью синхронной фильтрации. С этой целью выходной сигнал  $G_{bal}^I$  сумматора 31 поступает на вход фильтра 27 второй гармоника. Выходной сигнал  $G_{bal}$  блока 24 регулятора баланса поступает на один из входов блока 21 умножения (см. 20 фиг.5).

На фиг.7а изображена сеть с двумя питающими трансформаторами 32 и 2 с дугогасящей катушкой 33 на первом из них и со следящим PWM-конвертором 1 на втором. На фиг.7б изображена схема замещения по нейтрали, используемая для 25 идентификации параметров сети в системе управления следящего PWM-конвертора 1, заземляющего нейтраль второго трансформатора 2. Схема замещения (фиг.7б) состоит из включенных параллельно  $L$ ,  $C$ , и  $R$  значения которых вычисляются в системе управления (на схеме  $i_n$  и  $v_n$  - ток и напряжение нейтрали).

На фиг.8 изображен вариант дугогасящего устройства с параллельной работой 30 нерегулируемого дросселя 34, выполненного на половину требуемой реактивной мощности заземляющего двухполюсника ( $Q_N/2$ ) и следящим PWM-конвертором 1 на такую же мощность ( $Q_N/2$ ).

На фиг.9 изображен вариант дугогасящего устройства с подключением следящего PWM-конвертора 1 через согласующий трансформатор 35.

35 Еще одним возможным вариантом (схема такая же, как на фиг.9) является выполнение согласующего трансформатора 35 в виде трансформатор-реактора, с мощностью холостого хода равной половине требуемой номинальной мощности дугогасящего устройства ( $Q_N/2$ ). Требуемая установленная мощность следящего PWM-конвертора 1 при этом тоже составляет половину номинальной мощности ( $Q_N/2$ ).

40 На фиг.10 представлена схема автоматически подстраивающегося дугогасящего устройства со следящим PWM-конвертором 1. Функции автоподстройки выполняются блоком 36 автоподстройки микропроцессорной системы управления, включающим в себя:

- субблок 37 вычисления требуемого адмитанса (коэффициента проводимости 45 нейтрали) для активного двухполюсника - следящего PWM-конвертора 1,
- генератор 38 тестового сигнала.

В составе системы управления для целей автоподстройки имеется сумматор 39.

На фиг.11а представлена функциональная схема для определения резистивной  $G_n$  и

емкостной  $Y_n$  составляющих проводимости сети, а также требуемого коэффициента  $YZ$  проводимости компенсации.

На фиг.11а обозначены:

- генератор 40 (gen0), вырабатывающий ортогональную синусоидальную пару переменных  $\cos\theta$  и  $\sin\theta$ , имеющую частоту  $f^1$  отличающуюся от сетевой частоты  $f$ ,
- блоки умножения 41, 42, 43, 44,
- сумматор 45,
- фильтры 46, 47 нижних частот,
- блок 48 вычисления резистивной  $G_n^1$  и емкостной  $Y_n^1$  составляющих проводимости сети на тестовой частоте  $f^1$  отличающейся от сетевой частоты  $f$ ,

На фиг.11б, представлена схема замещения сети на тестовой частоте  $f^1$ , отличающейся от сетевой частоты  $f$ .

- На фиг.12 представлена функциональная схема для определения резистивной  $G_n$  и емкостной  $Y_n$  составляющих проводимости сети, а также требуемого коэффициента  $YZ$  проводимости компенсации для случая, когда следящий PWM-конвертор 1 работает параллельно с нерегулируемым дугогасящим реактором в схеме вида фиг.7а или в схемах вида фиг.8, фиг.9. Схема построена аналогично схеме на фиг.11а, отличаясь от нее двойным набором множителей (добавлены блоки умножения 49, 50, 51) и фильтров нижних частот (добавлены фильтры 52, 53), а также введенным сумматором 54.

Устройство работает следующим образом.

- Как отмечено выше, следящий PWM-конвертор 1 содержит (см. фиг.4) обычно применяемые в подобных устройствах функциональные блоки: модулятор 6 и регулятор 7 тока. Для применения в качестве дугогасящего устройства в следящий PWM-конвертор 1 вводится специфический функциональный блок-задатчик 8 отстающего тока  $i_z(t)$ .

Регулятор 7 тока, построение которого при достаточно высокой частоте модуляции затруднений не вызывает, обеспечивает равенство выходного тока следящего PWM-конвертора 1 заданию:  $i_{ae}=i_z$ ;

- Задатчик 8 тока формирует переменную  $i_z(t)$ , которая в установившемся режиме отстает от напряжения смещения  $v_n$  на угол около  $90^\circ$ .

$$v_n = \frac{1}{3}(v_{sa} + v_{sb} + v_{sc}) \quad (3)$$

- где слагаемые в скобках суть напряжения фаз сети, измеряемые трансформатором 15 напряжения сети.

Для получения такой отстающей переменной можно использовать в качестве передаточной функции задатчика 8 тока просто функцию адмиттанса катушки Петерсена

$$i_z = \frac{1}{p \cdot L_0 + R_0} \cdot v_n, \quad (4)$$

- где  $L_0, R_0$  - индуктивность и сопротивление катушки. При этом следящий PWM-конвертор 1 функционировал бы как пассивный двухполосник. Однако применение следящего PWM-конвертора 1 позволяет сделать два шага вперед. Во-первых, следящий PWM-конвертор 1 может имитировать в силовой цепи не только катушку индуктивности, но и комбинированную схему, составленную из индуктивности и шунтирующего резистора  $R_{00}$

$$i_z = \left( \frac{1}{R_{00}} + \frac{1}{pL_0 + R_0} \right) \cdot v_n, \quad (5)$$

Эти индуктивность и резистор являются виртуальными; они осуществляются не более как пара операторов в микропроцессорной системе управления следящего PWM-конвертора 1, но в силовой схеме проявляют себя как дроссель и резистор. В дугогасящих устройствах, описанных в [14] демпфирующий резистор  $R_{00}$  комбинированной схемы дугогашения остается действовать и в установившемся режиме, когда он уже не нужен, и портит характеристики режима. В следящем PWM-конверторе 1 можно сделать следующий шаг усовершенствования, и снимать действие виртуального демпфирующего резистора по мере того как он становится ненужным. Этот шаг в системе с активным дугогашением является не только возможным, но и необходимым. Энергия, поглощаемая виртуальным резистором

$$E_{00} = \int v_0^2 / R_{00}$$

передается конвертором 9 напряжения в звено постоянного напряжения (накопительному конденсатору 5). В предложенной схеме дугогашения звено постоянного напряжения не подключено к какому-то источнику соизмеримой мощности, но только к накопительным конденсаторам 5. Для поддержания напряжения ( $U_d$ ) накопительных конденсаторов 5 в окрестности номинального напряжения ( $U_{dz}$ ) к заданию тока  $i_z$  должна быть добавлена третья составляющая - составляющая баланса  $i_{bal}$ . Составляющая баланса действует по направлению основной гармоники  $v_n^{(i)}$  напряжения нейтрали  $v_n$ . Уровень воздействия определяется коэффициентом проводимости баланса  $G_{bal}$ :

$$i_{bal} = G_{bal} \cdot v_n^{(i)}, \quad (6)$$

который в свою очередь определяется регулятором напряжения или энергии накопительных конденсаторов конвертора

$$G_{bal}(p) = F(p) \cdot (E_z - E_d) \quad (7)$$

$$E_d = C_d \cdot (U_d)^2 / 2, E_z = C_d \cdot (U_{dz})^2 / 2.,$$

где  $F(p)$  - функция преобразования блока 24 регулятора баланса,  $E_z$  и  $E_d$  - номинальный (расчетный) и измеренный (вычисленный) уровни энергии накопительного конденсатора (конденсаторов) 5 соответственно.

Таким образом получена система задатчика тока для активного дугогасящего устройства в которой ток задания складывается из трех составных частей (фиг.5):  
- компенсационная составляющая, действующая по ортогональному направлению напряжения нейтрали с коэффициентом проводимости компенсации  $Y_z$

$$i_{comp} = Y_z \cdot v_{n,ort}; \quad (8)$$

- демпфирующая составляющая, действующая по всем компонентам напряжения нейтрали с коэффициентом проводимости демпфирования

$$i_{demp} = G_{demp} \cdot v_n, \quad (9)$$

- балансная составляющая, действующая по направлению основной гармоники напряжения нейтрали с коэффициентом проводимости баланса  $G_{bal}$ , который определяется регулятором баланса напряжения (энергии) накопительных конденсаторов (6, 7).

Задание тока  $i_z$  есть сумма (сумматор 16 на фиг.5)

$$i_z = i_{comp} + i_{demp} + i_{bal}. \quad (10)$$

Основная гармоника  $v_n^{(i)}$  и ортогональная составляющая  $v_{n,ort}$  могут быть получены

с помощью фильтра второго порядка, изображенного на фиг.5 (блоки 17, 22, 23),

$$B2(p) = \left( \frac{p}{\omega_s} \right)^2 + \frac{p}{\omega_s} \cdot b + 1, \quad (11)$$

$$v_{n,от} = \frac{b}{B2(p)} \cdot v_n, \quad (12)$$

$$v_n^{(i)} = \frac{b \cdot p}{\omega_s \cdot B2(p)} \cdot v_n, \quad (13)$$

либо каким-то иным способом.

Активное дугогасящее устройство, выполненное на основе следящего PWM-конвертора 1 с трехкомпонентным задатчиком тока DCB (D - демпфирование, C - компенсация, B - баланс) обеспечивает демпфирование не хуже, чем комбинированная схема дугогашения, описанная в [14] (реактор с резистором), но при этом обеспечивает полную компенсацию емкостного тока в установившихся режимах замыкания.

Как отмечено выше, при применении в разветвленных сетях регулируемые дугогасящие устройства оснащаются системой автоматической настройки. Действие их основывается на том, что к основным составляющим тока или напряжения нейтрали примешивается тестовый сигнал, который имеет частоту отличную от сетевой частоты. По отклику на тестовый сигнал определяются параметры схемы замещения сети по нейтрали, и по этим параметрам определяется требуемый коэффициент проводимости заземляющего устройства. С этой целью в дугогасящих устройствах с плунжерными реакторами или в управляемых подмагничиванием реакторах применяется специальная дополнительная обмотка и специальный блок генератора тестовых сигналов и анализатора отклика [5, 7, 9, 10]. При применении предлагаемого устройства задачи автоматической подстройки существенно упрощаются. Следящий PWM-конвертор 1 может осуществлять вливание в нейтраль сети тестового тока или тестового напряжения параллельно с выполнением основной функции без всяких добавок к нему. Желательный тестовый сигнал  $i_{test}$  примешивается к сигналу задания тока  $i_z$  конвертора при помощи сумматора 39:

$$i_z^1 = i_z + i_{test}, \quad (11),$$

как это показано на фиг.10. Регулятор 7 тока и конвертор 9 напряжения обеспечивают поступление тока, равного заданию, в нейтраль сети, т.е. в составе тока нейтрали появляется составляющая тестовой частоты, смешанная с составляющей сетевой частоты.

$$i_n \cong i_z + i_{test}. \quad (12),$$

Таким образом, следящий PWM-конвертор 1 попутно с выполнением основной функции выполняет функцию мощного усилителя низкой частоты, который в дугогасящих устройствах с катушками индуктивности [5, 7, 9, 10] является отдельным дополнительным устройством. Получение тестового сигнала в предлагаемой системе не требует никакого дополнительного оборудования вообще; сигнал  $i_{test}$  генерируется микропроцессорной системой управления следящего PWM-конвертора 1 и усиливается самим следящим PWM-конвертором 1 без каких бы то ни было аппаратных добавок. Анализ отклика на тестовый сигнал так же осуществляется микропроцессорной системой управления следящего PWM-конвертора 1, опять же не требуя применения выделенных дополнительных устройств в системе дугогашения. Все необходимые для этого переменные в системе управления следящего PWM-конвертора 1 уже имеются для



исполнения его основной функции, а вычислительные возможности современных сигнальных процессоров легко позволяют совместить расчеты отклика и их обработку с выполнением базовых функций. Осуществление задачи автоматического определения требуемого коэффициента проводимости дугогасящего устройства (блоки 37 и 38, на

5 фиг.10) может осуществляться по какому-нибудь из известных применяемых алгоритмов. На фиг.11 представлена одна из возможных функциональных схем для определения требуемого коэффициента  $Y_z$  проводимости, построенная по принципу синхронной фильтрации. Генератор 40 (gen $\theta$ ) вырабатывает ортогональную синусоидальную пару

10 переменных  $\cos\theta$  и  $\sin\theta$ , имеющую частоту  $f^1$  отличающуюся от сетевой частоты  $f$ :

$$f' \neq f, \theta' = \int f'.$$

Величина напряжения нейтрали  $v_n$  вычисляется сумматором 45 в соответствии с выражением (3).

15 Тестовый сигнал  $i_{test}(t)$  получается при помощи блока 41 умножения  $i_{test} = I_{test} \times \cos\theta'$ ,

где  $I_{test}$  - выбранная амплитуда тестового тока. В системе ортогональных координат комплексная амплитуда тестового тока равна

$$I_{test} = I_d + j \cdot I_q, I_q = 0.$$

20 Комплексная амплитуда отклика

$$V_{test} = V_d' + j \cdot V_q'$$

выделяется из напряжения нейтрали  $v_n$  по методу синхронной фильтрации

умножением  $v_n$  на опорные переменные  $\cos\theta$  и  $\sin\theta$  (блоками умножения 42 и 43) и затем

25 фильтрами нижних частот 46 и 47. Резистивная  $G_n^1$  и емкостная  $Y_n^1$  составляющие проводимости вычисляются блоком 48 вычисления составляющих проводимости сети из компонентов комплексных амплитуд

$$G_n' = \frac{V_d'}{|v'|^2} \cdot I_d, Y_n' = -\frac{V_q'}{|v'|^2} \cdot I_d. \quad (19)$$

30 По емкостной проводимости на тестовой частоте  $f'$  затем определяется требуемый коэффициент  $Y_z$  проводимости на сетевой частоте (блоком умножения 44)

$$Y_z = f/f' \cdot Y_n'. \quad (20)$$

35 Все действия по схеме фиг.11 выполняются микропроцессорной системой управления следящего PWM-конвертора 1; никакие аппаратные добавления не требуются

При работе конвертора параллельно с нерегулируемым дугогасящим реактором в схеме вида фиг.7а или в схемах вида фиг.8, фиг.9 схема замещения по нейтрали становится цепью второго порядка (фиг.7б). Алгоритм автоподстройки с тестовым сигналом частоты  $f' \neq f$  в этих условиях оказывается недостаточным. Однако алгоритм

40 этот без труда может быть модифицирован. Для идентификации параметров более сложной схемы замещения в блоке 36 автоподстройки (фиг.10) должна быть предусмотрена генерация двухчастотного тестового сигнала с частотами  $f'$ ,  $f''$ , отличающимися друг от друга и от сетевой частоты  $f$

$$f' \neq f'' \neq f.$$

45 Тестовый сигнал вырабатывается генератором 40 и сумматором 54 в виде:

$$i_{test} = I_{d1} \cdot \cos\theta' + I_{d2} \cdot \cos\theta'',$$

$$\theta' = \int f', \theta'' = \int f''.$$

В функциональной схеме, изображенной на фиг.12, для обработки отклика используется двойной набор блоков умножения (41, 42, 43, 49, 50, 51) и фильтров нижних частот (46, 47, 52, 53), выходами которых являются компоненты отклика (на тестовый сигнал)  $Vd'$ ,  $Vq'$ ,  $Vd''$ ,  $Vq''$ . По этим величинам с учетом  $Iq'=0$ ,  $Iq''=0$ , в блоке 48 (calc) вычисляются  $L_n$ ,  $C_n$ ,  $R_n$  и затем определяется требуемый коэффициент  $Yz$  проводимости нейтрали для следящего PWM-конвертора 1.

Работу заявляемого управляемого полупроводникового конвертора иллюстрируют графики процессов при компенсации емкостного тока и идентификации сети, полученные математическим моделированием в пакете MathCad (фиг.14 - фиг.23).

Для целей сравнительного исследования возможностей активного дугогашения приведены результаты моделирования комбинированной системы дугогашения [14], в которой используется дугогасящая катушка с индуктивностью  $L_0$  и демпфирующий резистор с сопротивлением  $R_{00}$ . Рассматривается сеть с напряжением 6.3 кВ мощностью 5.6 МВА, в которой установившийся емкостной ток на землю составляет около 100 А.

Номинальный реактанс дугогасящей катушки составляет

$$\omega_s \cdot L_{0n} = 36.75 \Omega.$$

Фактически устанавливаемая индуктивность катушки  $L_0$  может заметно отличаться от требуемого значения, рассматриваемый диапазон начинается от

$$L_0 / L_{0n} \cong 0.8$$

(перекомпенсация) и заканчивается с

$$L_0 / L_{0n} \cong 1.25$$

(недокомпенсация). Рассматриваемые в этой части процессы дают базу для последующей оценки системы с активным дугогашением. Процессы рассматриваются в простейшей схеме замещения (фиг.13).

На графиках Arc 02 19 (фиг.14) показан процесс при большом сопротивлении шунтирующего резистора.

$$R_{00} / \omega_s L_{0n} = 13.6,$$

так что работает только дугогасящая катушка. Индуктивность дугогасящей катушки взята с перекомпенсацией

$$L_0 / L_{0n} \cong 0.8.$$

На верхних графиках показаны напряжения на пробивающемся промежутке  $vd(\cdot)$  и напряжение на заземляющем двухполюснике  $v0(\cdot)$ . Выведен так же график критического напряжения  $vkrit$ , при достижении которого наступает пробой промежутка. На средних графиках даны ток дуги  $id(\cdot)$  и ток заземляющего двухполюсника  $i0(\cdot)$ . На нижних графиках показаны фазные напряжения относительно земли  $va(\cdot)$ ,  $vb(\cdot)$ ,  $vc(\cdot)$ .

Графики показывают, что при большом сопротивлении шунтирующего резистора процесс совершенно неудовлетворителен. На интервале  $t=600$  мс следуют друг за другом повторяющиеся пробои. Перенапряжения достигают кратности  $\frac{Ampv}{V} = 2.6$ , а

выделяющаяся в дуге энергия достигает  $Endu=5.2$  кДж.

На графиках Arc 02 20 (фиг.15) показано, что введение шунтирующего резистора с меньшим сопротивлением

$$R_{00} / \omega_s L_{0n} = 4$$

исправляет процесс. После пяти следующих друг за другом пробоев прочность изоляционного промежутка восстанавливается и устанавливается нормальный режим сети. Максимальное перенапряжение снижается до  $\approx 2.45$ , а выделяющаяся энергия в месте пробоя снижается до 1.9 кДж.

На графиках Arc 02 23 (фиг.16) показаны те же процессы что и выше, но при недокомпенсации

$$R_{00} / \omega_s L_{0n} = 1.25.$$

Результаты аналогичны описанным выше: при промежуточном значении проводимости шунтирующего резистора после нескольких пробоев восстанавливается нормальная работа сети.

На графиках Arc 02 26 (фиг.17) показаны процессы при точной настройке компенсации

$$R_{00} / \omega_s L_{0n} = 1$$

Восстанавливающееся напряжение при точной настройке нарастает медленно и шунтирующий резистор в этих условиях не способствует улучшению процесса. Тем не менее применение шунтирующего резистора полезно, поскольку он смягчает влияние неизбежных погрешностей настройки.

Выполненное выше (см. фиг.14, 15, 16, 17) рассмотрение комбинированной схемы дугогашения [14] является вспомогательным. Назначение его - дать основу для оценки предлагаемого активного дугогасящего устройства. Анализируется схема по фиг.4, в которой задатчик тока 8 выполнен по схеме фиг.5. Схема замещения сети та же (фиг.13), что использовалась при рассмотрении комбинированного устройства дугогашения [14]. Сохраняются так же параметры схемы замещения и параметры модели дуги.

На графиках Arc 05 01, 02, 03, (фиг.18, 19, 20) показаны процессы активного дугогасящего устройства при перекомпенсации ( $L_0 / L_{0n} = 0.8$ ), при недокомпенсации ( $L_0 / L_{0n} = 1.25$ ) и точной настройке ( $L_0 / L_{0n} = 1$ ). Резистор  $R_{00}$  в активном дугогасящем устройстве является виртуальным. Его проводимость взята равной  $R_{00} = 1.5 \times \omega_s L_{0n}$ .

Переменные и обозначения на графиках Arc 05 01, 02, 03 те же, что и выше. Сравнение графиков активного дугогасящего устройства Arc 05 01, 02, 03 (фиг.18, 19, 20) с графиками комбинированного дугогасящего устройства Arc 02 20, 23, 26 (фиг.15, 16, 17) показывает, что каждое из этих устройств в рассматриваемых условиях дает после серии пробоев восстановление нормальной работы сети. Весьма близки и количественные показатели процессов, как видно из следующей таблицы:

Величина	Расстройка	Комбинированная схема	Активное устройство
$A_{mpv}$	1.25	2.3	2.41
	1	2.0	2.26
	0.8	2.45	2.32
ε, кДж	1.25	2.19	2.33
	1	0.62	1.52
	0.8	1.92	1.47

Таким образом, активное дугогасящее устройство в условиях восстанавливающихся пробоев эквивалентно комбинированному дугогасящему устройству [14], составленному

из реактора и резистора. Различие между функциональными характеристиками этих устройств проявляется в другом классе ситуаций, когда устанавливается и сохраняется короткое замыкание на землю. Система баланса энергии накопительных конденсаторов в этих ситуациях сводит активную составляющую тока к нулю, уменьшая тем самым ток в промежутке короткого замыкания; при точной настройке последний сводится к нулю, как это показано на графиках Arc 05 04, 04 (фиг.21, 22). Комбинированная же схема [14] при устойчивом коротком замыкании вливает остаточный ток в место замыкания даже при точной настройке (графики Arc 02 28 фиг.23), что, безусловно, является ее недостатком. При неточной настройке преимущество активного дугогасящего устройства несколько уменьшается, поскольку погрешность настройки системой баланса не компенсируется. Тем не менее, некоторое снижение тока в промежутке короткого замыкания все же получается.

Все описанное выше, в равной мере относится как к варианту дугогасящего устройства на основе следящего PWM-конвертора 1 (фиг.4, 7, 10), так и к другим вариантам (фиг.8, 9), выбор которых обусловлен технико-экономическими соображениями.

На фиг.8 представлен вариант дугогасящего устройства с нерегулируемым дросселем 34, выполненным на половину требуемой реактивной мощности заземляющего двухполюсника ( $Q_N/2$ ) и следящим PWM-конвертором 1 на такую же половинную мощность ( $Q_N/2$ ). При регулировании конвертора в полном диапазоне  $\pm Q_N/2$  суммарный адмиттанс регулируется в полном диапазоне - от нуля до номинального значения.

Аналогично, по ценовым или другим каким-то мотивам (например, для выполнения конвертора на пониженное напряжение) может оказаться полезным применение согласующего трансформатора 35 (фиг.9). Этот трансформатор 35 может быть также выполнен как трансформатор-реактор, с мощностью холостого хода равной половине требуемой номинальной мощности дугогасящего устройства. Требуемая установленная мощность следящего PWM-конвертора 1 при этом тоже составляет половину номинальной мощности.

Итак, в качестве кратких результатов можно отметить:

- 30 - предложено применить в качестве регулируемого дугогасящего устройства активный элемент - следящий PWM-конвертор 1, сам по себе либо в сочетании с нерегулируемыми дросселем 34 или трансформатором-реактором 35;
- предложен алгоритм управления с генерацией трехкомпонентного сигнала задания тока следящего PWM-конвертора 1 (DCB - алгоритм);
- 35 - предварительное сравнительное исследование характеристик активного дугогасящего устройства с комбинированным дугогасящим устройством RL-типа [14] показало, что в ситуациях с перемежающимися пробоями их характеристики близки, а в ситуациях с установившимися короткими замыканиями активное устройство - следящий PWM-конвертор 1 имеет преимущество;
- 40 - силовое оборудование следящего PWM-конвертора 1 и его микропроцессорная система регулирования могут быть использованы в качестве аппаратуры для тестирования сети и автоматической настройки дугогасящего устройства, исключая тем самым необходимость в применении какой бы то ни было дополнительной аппаратуры для автоподстройки.

45 Таким образом, при вышеуказанном исполнении заявляемого устройства обеспечивается выполнение основных функций - компенсация емкостного тока при однофазном замыкании на землю, а также дополнительные полезные функции: возможность идентификации сети без применения вспомогательного оборудования,

быстрое подавление переходных составляющих тока, в том числе при повторяющихся пробоях, ускоренное снижение тока дуги, выход из режима компенсации при прекращении замыкания.

Исходя из вышеизложенного, задача создания устройства компенсации тока замыкания на землю в трехфазных электрических сетях на основе однофазного следящего PWM-конвертора, обладающего наряду с основными, дополнительными полезными функциями, такими как возможность идентификации сети, быстрое подавление переходных составляющих тока, ускоренное снижение тока дуги, при одновременном устранении вышеуказанных недостатков, присущих УПЭР [5] решена.

Источники информации:

1. Petersen W. Der aussetzende Erdschluss. ETZ, Bd 38, S.553-555; ETZ, Bd 47, S.564-566; ETZ, Bd48, 1917.
2. Лихачев Ф.А. Замыкание на землю в сетях с изолированной нейтралью и с компенсацией емкостных токов. М. Энергия, 1971 г.
3. Черников А.А. Компенсация емкостных токов в сетях с незаземленной нейтралью... М. Энергия, 1974 г.
4. Дугогасящие реакторы, техническая информация, www.energan.ru., ООО «ЭНЕРГАН», 2007.
5. Gernot Druml, Olaf Seifert. Дугогасящие реакторы 6-35 кВ. Новый метод определения параметров сети. Новости Электротехники, №2 (44), 2007.
6. Koenigi R. Arc suppression coils - the key component of modern earth fault protection systems. Papp K. Transmission and Distribution Conference and Exposition: Latin America (T&D-LA), p.366-371, 2010.
7. Arc Suppression Coils. Рекламный проспект фирмы Trench. www.trenchgroup.com. TRENCH Group 2012.
8. Управляемые подмагничиваемые Дугогасящие реакторы с автоматической компенсацией емкостного тока замыкания на землю для сетей 6-35 кВ. Брянцев А.М., Лурье А.И., Долгополов А.Г. и др. Электричество №7, 2000 г.
9. Системы управления и защиты для дугогасящих реакторов, управляемых подмагничиванием. Брянцев А.М., Долгополов А.Г. Электрические станции №2, 2000 г.
10. Патент РФ №2130677, H02J 3/26, H02H 3/17, опубл. 20.05.1999 г. Авторы: Брянцев А.М., Долгополов А.Г.
11. Peters I.F., Slepian I. Voltage Inducted by Arcing Grounds. Tr. AIEE, p.478-489, 1923.
12. К теории перенапряжения от заземляющих дуг в сети с изолированной нейтралью. Джуварлы Ч.М., Электричество №6, стр.18-27, 1953 г.
13. Исследование перенапряжений при дуговых коротких замыканиях на землю в сетях 6 и 10 КВ с изолированной нейтралью. Беляков Н.М., Электричество №5, стр.31-36, 1957 г.
14. М. Ильиных, Л. Сарин, А. Ширковец, Э Буянов. Компенсированная и комбинированно заземленная нейтраль. Опыт эксплуатации сети 6 кВ металлургического комбината. Новости Электротехники, №2 (44), 2007.
15. DE 10103031 B4, 2011.12.01, H02M 5/42. Marquardt Rainer. St romrichterschaltung mit verteilten Energiespeichern und Verfahren zur Steuerung einer derartigen Stromrichterschaltung

#### Формула изобретения

1. Устройство компенсации тока замыкания на землю в трехфазных электрических сетях, содержащее двухполюсник, соединяющий нейтраль питающего сеть

трансформатора с землей и формирующий отстающий ток для компенсации опережающего емкостного тока однофазного замыкания на землю, а также датчик тока нейтрали, трансформатор напряжения сети, генератор тестовых сигналов для измерения емкости сети и вычислительный блок для определения требуемого адмиттанса упомянутого двухполюсника, отличающееся тем, что в качестве заземляющего двухполюсника применен следящий широтно-модулированный конвертор напряжения (следящий PWM-конвертор), снабженный в дополнение к обычному набору функциональных блоков блоком задатчика тока, входами которого являются напряжение нейтрали и требуемый адмиттанс, выходом является задание тока, поступающее на вход регулятора тока упомянутого следящего PWM-конвертора, а передаточная функция задатчика тока обеспечивает отстающий сдвиг фазы около 90 градусов на сетевой частоте.

2. Устройство компенсации тока замыкания на землю в трехфазных электрических сетях по п.1, отличающееся тем, что передаточная функция задатчика в дополнение к реактивной (первой) составляющей содержит демпфирующую, пропорциональную входному сигналу составляющую, которая в действии конвертора проявляется как шунтирующий резистор (виртуальный резистор).

3. Устройство компенсации тока замыкания на землю в трехфазных электрических сетях по п.1, отличающееся тем, что конденсаторы постоянного напряжения следящего PWM-конвертора (накопительные конденсаторы) выполнены «подвешенными» (не присоединены к источнику либо стоку напряжения соизмеримой мощности), а в передаточную функцию задатчика введена дополнительная составляющая (составляющая баланса), вырабатываемая по рассогласованию напряжений накопительных конденсаторов следящего PWM-конвертора и обеспечивающая поддержание их напряжений около номинального уровня.

4. Устройство компенсации тока замыкания на землю в трехфазных электрических сетях по п.1, отличающееся тем, что в состав заземляющего двухполюсника введена нерегулируемая катушка на половину требуемой реактивной мощности заземляющего двухполюсника ( $Q_N/2$ ), подключенная параллельно следящему PWM-конвертору, который при этом также выполнен на такую же половинную мощность ( $Q_N/2$ ); причем регулирование следящего PWM-конвертора в полном диапазоне от  $-Q_N/2$  до  $+Q_N/2$  (от опережающих на 90 градусов токов до отстающих на 90 градусов токов) обеспечивает регулирование суммарного адмиттанса в полном диапазоне мощности - от нуля до номинального значения  $Q_N$ .

5. Устройство компенсации тока замыкания на землю в трехфазных электрических сетях по п.1, отличающееся тем, что следящий PWM-конвертор подключен через согласующий трансформатор.

6. Устройство компенсации тока замыкания на землю в трехфазных электрических сетях по п.1, отличающееся тем, что следящий PWM-конвертор подключен через согласующий трансформатор (трансформатор-реактор) с мощностью холостого хода  $Q_N/2$ .

7. Устройство компенсации тока замыкания на землю в трехфазных электрических сетях по п.1, отличающееся тем, что следящий PWM-конвертор параллельно с выполнением основной функции (компенсации емкостного тока) осуществляет вливание (инъекцию) в нейтраль сети тестового тока или тестового напряжения, а требуемый адмиттанс вычисляется в системе управления по отклику тестовой частоты в напряжении нейтрали.

8. Устройство компенсации тока замыкания на землю в трехфазных электрических сетях по п.1, отличающееся тем, что передаточная функция задатчика наряду с реактивной (компенсационной), демпфирующей и балансной составляющими содержит дополнительную составляющую - тестовый сигнал с частотой ( $\omega_{test}$ ), отличной от сетевой ( $\omega_s$ ) (например,  $\omega_{test}=0,5\omega_s$ ), генерируемый в системе управления следящего PWM-конвертора, причем тестовый сигнал представляет собой сумму двух или более гармонических составляющих разной частоты, отличающейся от сетевой.

9. Устройство компенсации тока замыкания на землю в трехфазных электрических сетях по п.1, отличающееся тем, что система управления следящего PWM-конвертора, выполненная на основе мощного сигнального процессора, совмещает выполнение функций, специфичных для устройств компенсации тока замыкания на землю в трехфазных электрических сетях, (как то: генерация тестовых сигналов, обработка откликов на тестовые сигналы и вычисление требуемых показателей) с неспецифичными (обычными) функциями управления следящим PWM-конвертором, исключая тем самым необходимость в применении дополнительной аппаратуры.

20

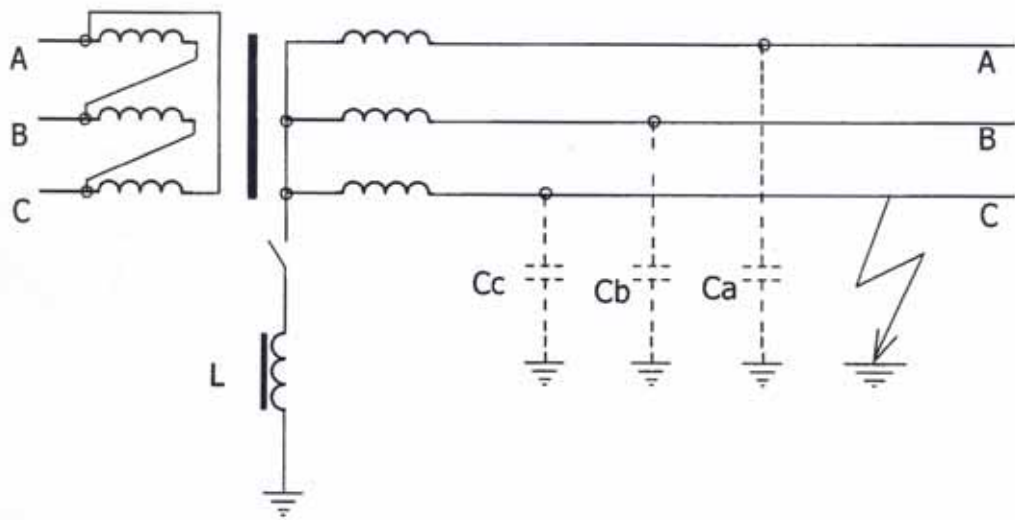
25

30

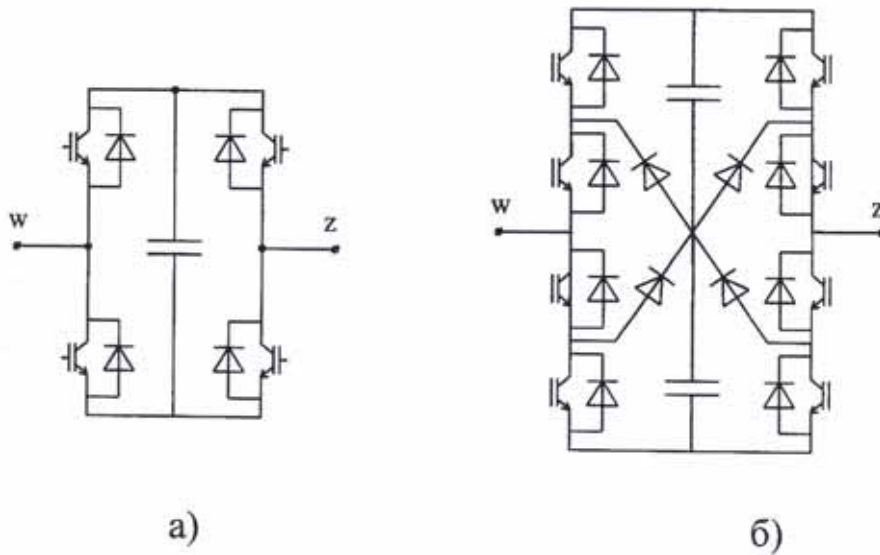
35

40

45



Фиг. 1

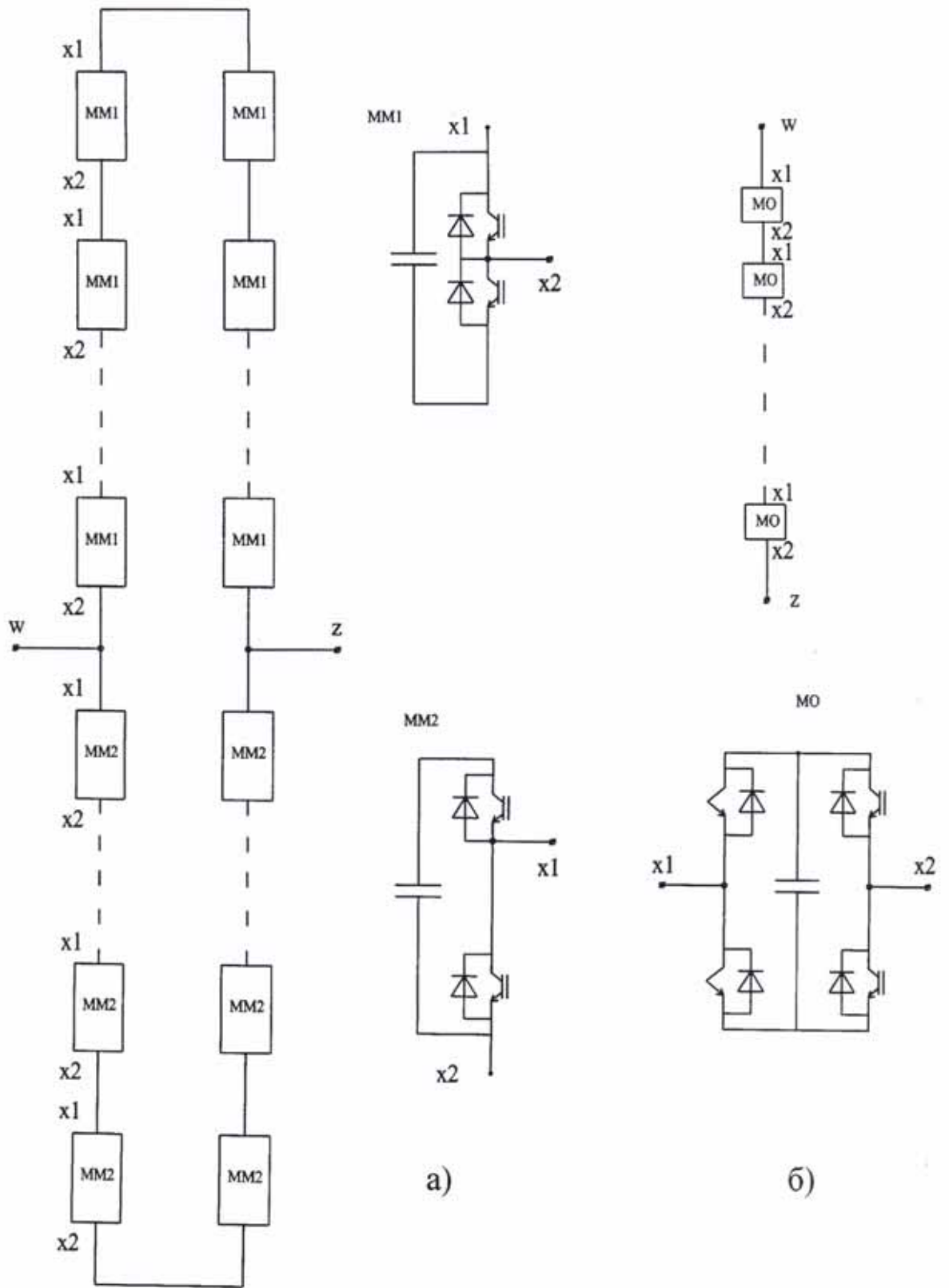


Фиг. 2

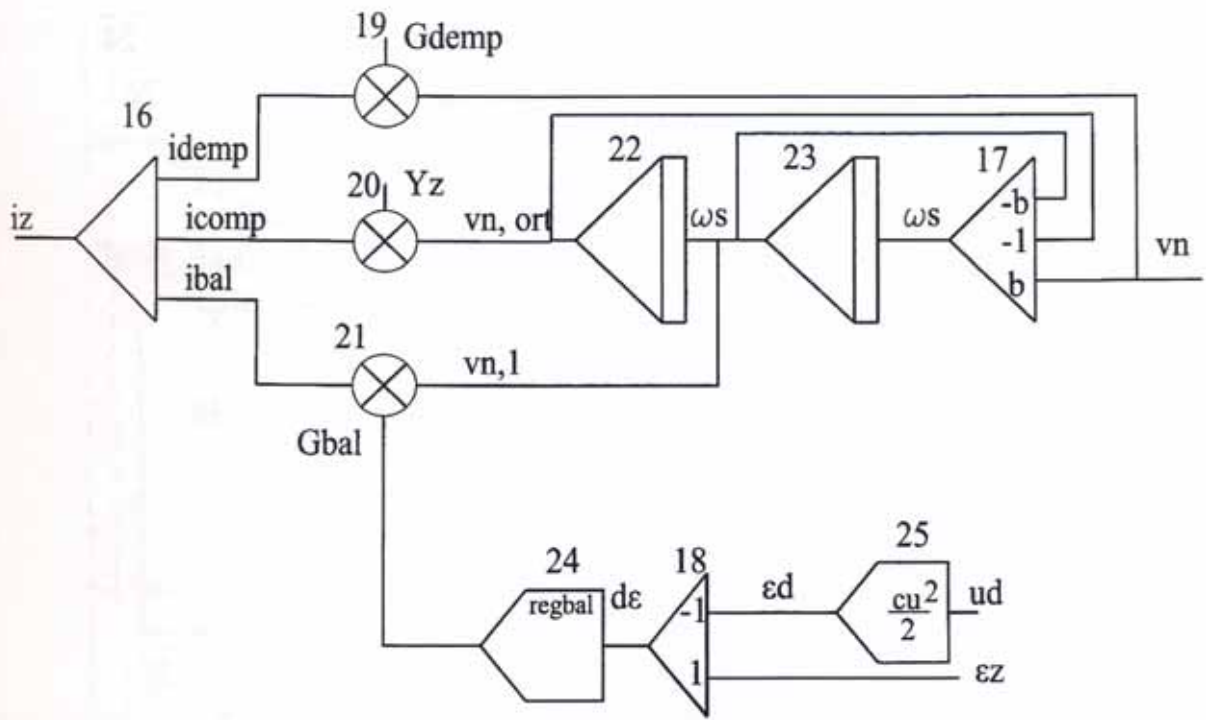
электрических  
ду с  
и содержит  
ной от  
едящего  
или более

электрических  
онвертора,  
олнение  
ю в  
работка  
ифичными  
тем самым

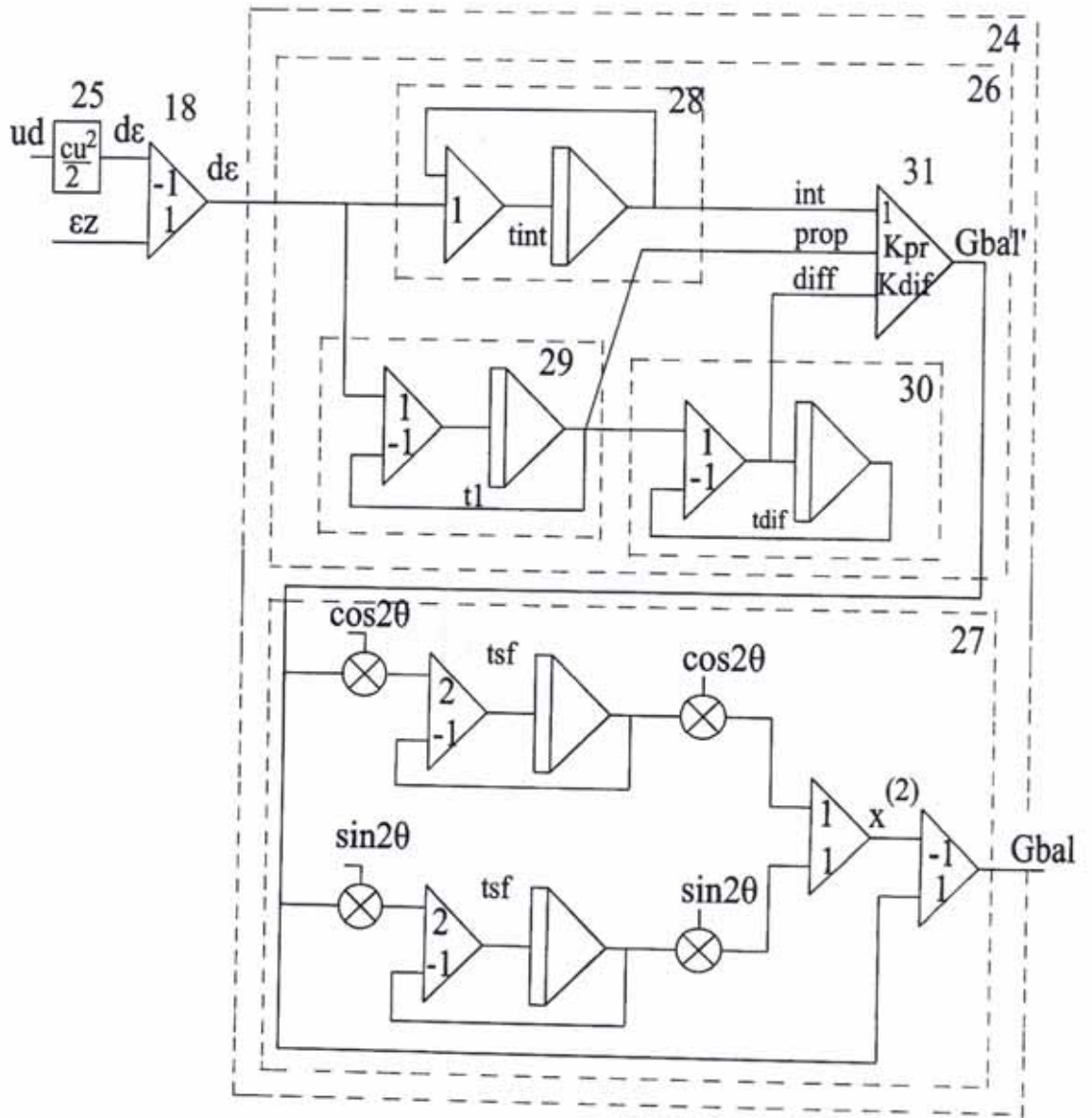




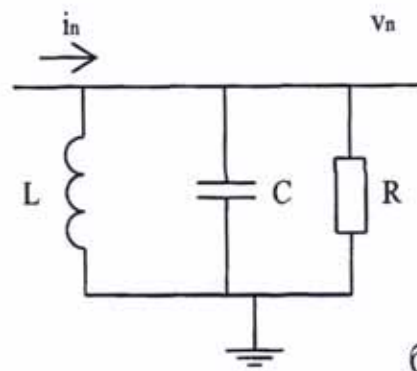
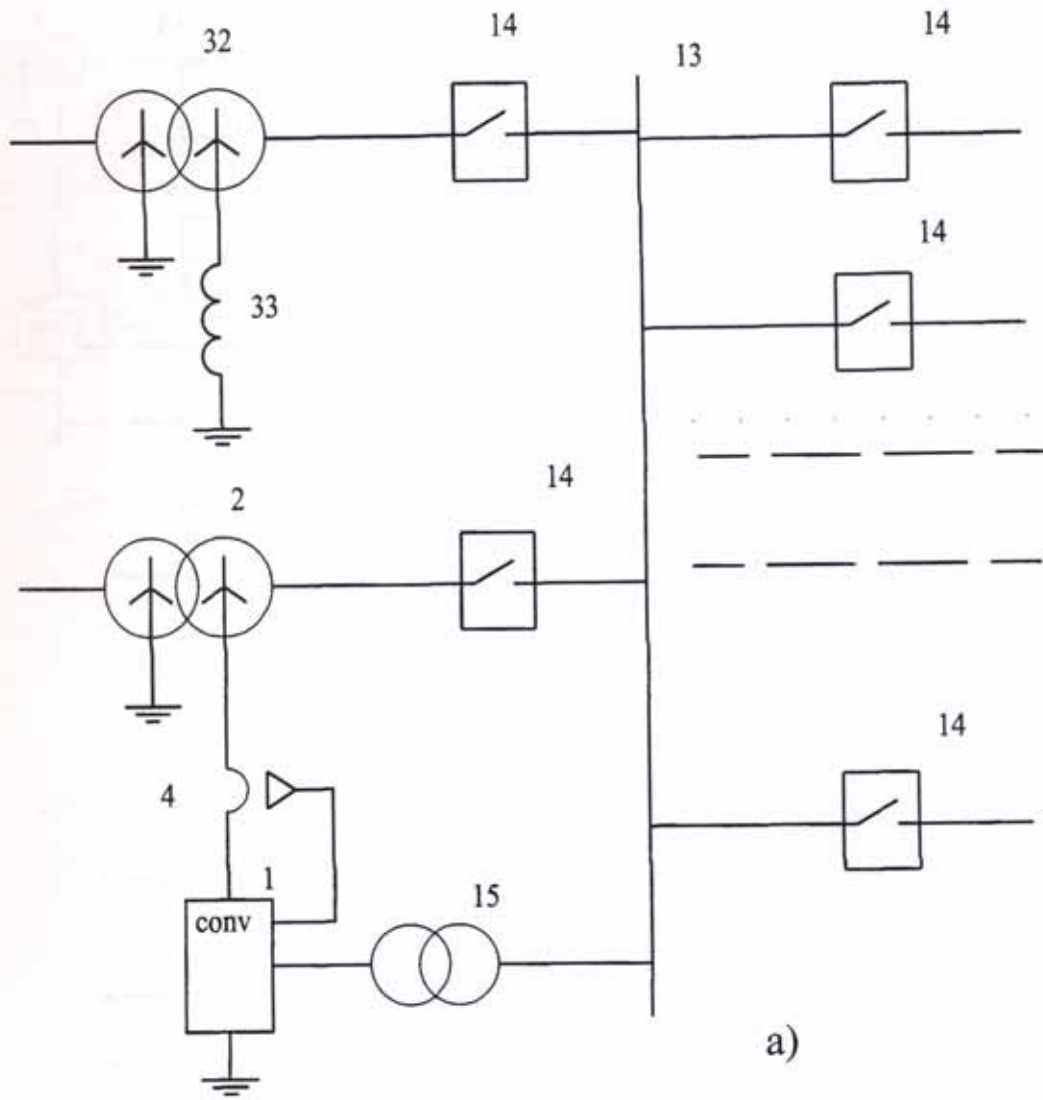
Фиг. 3



Фиг. 5

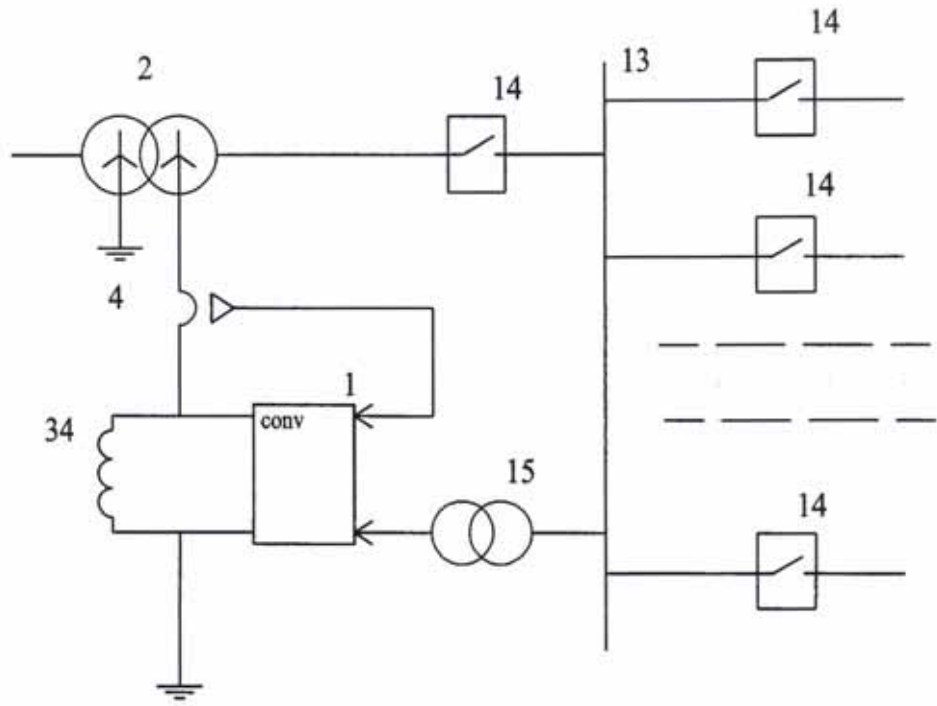


Фиг. 6

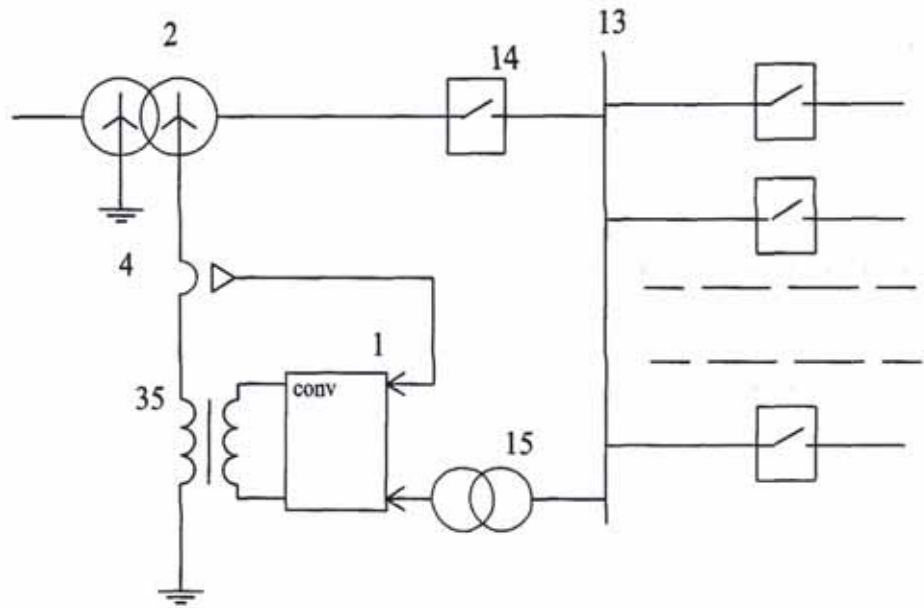


Фиг. 7

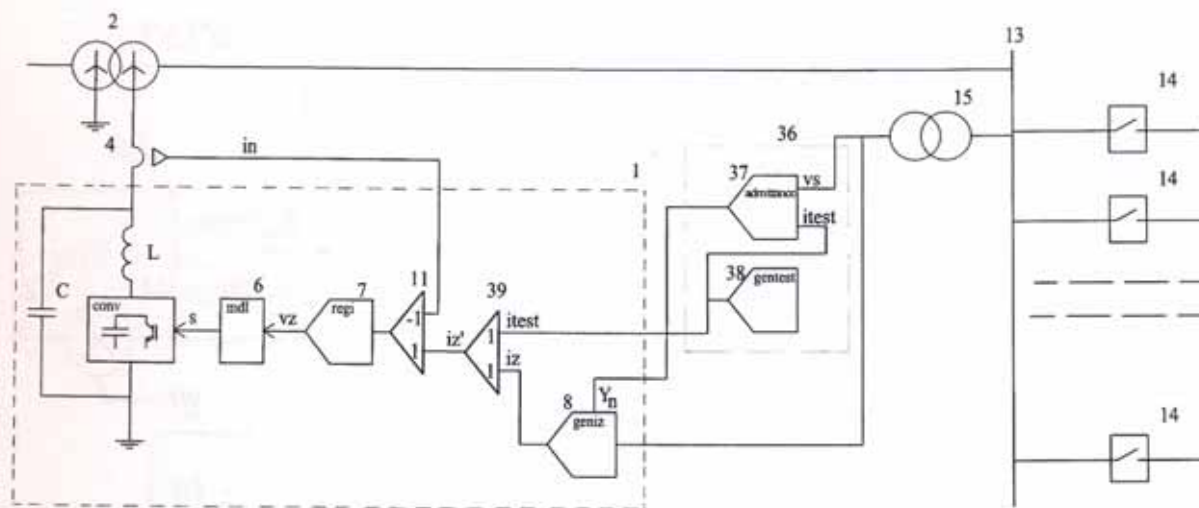
Gbal



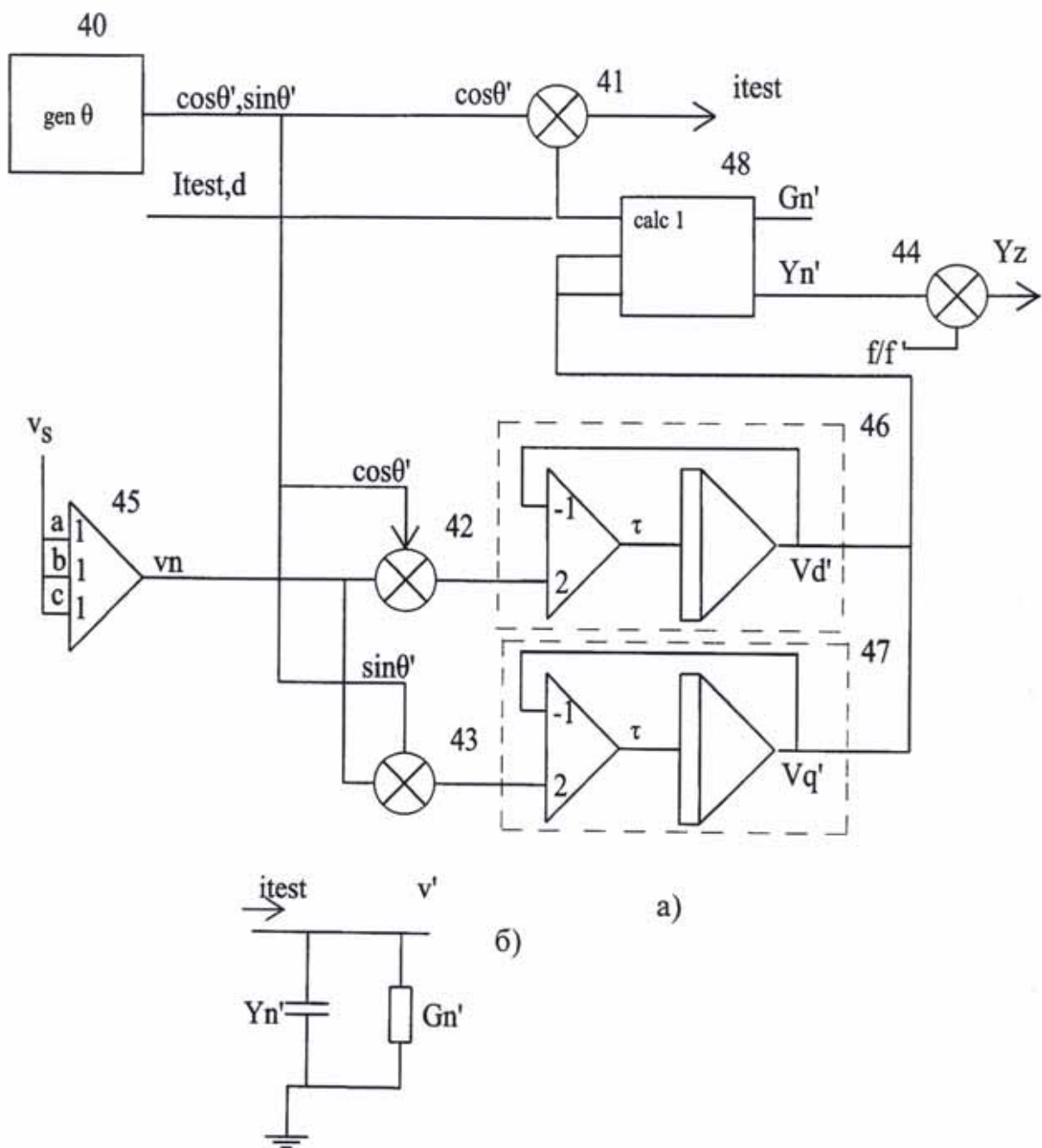
Фиг. 8



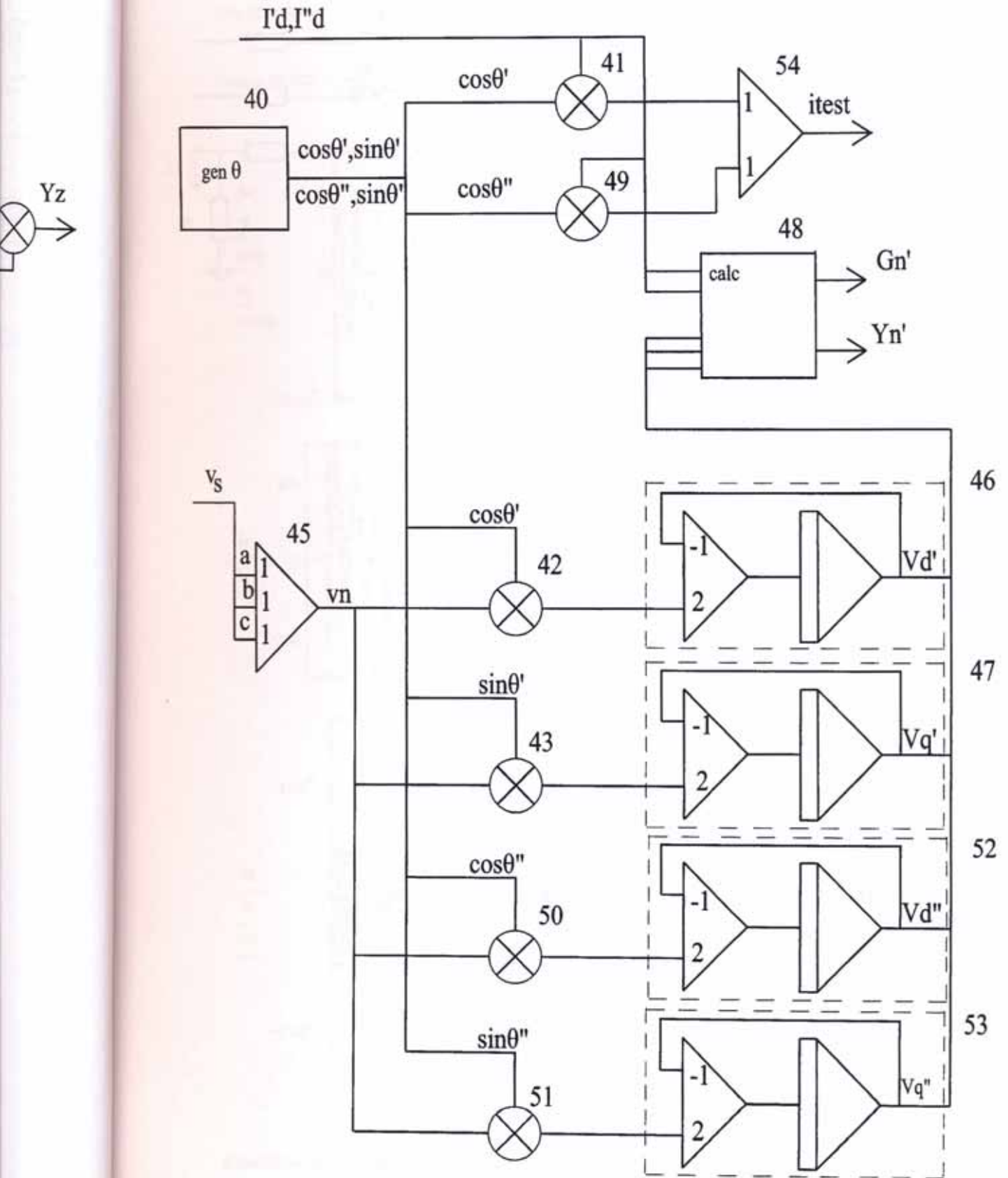
Фиг. 9



Фиг. 10

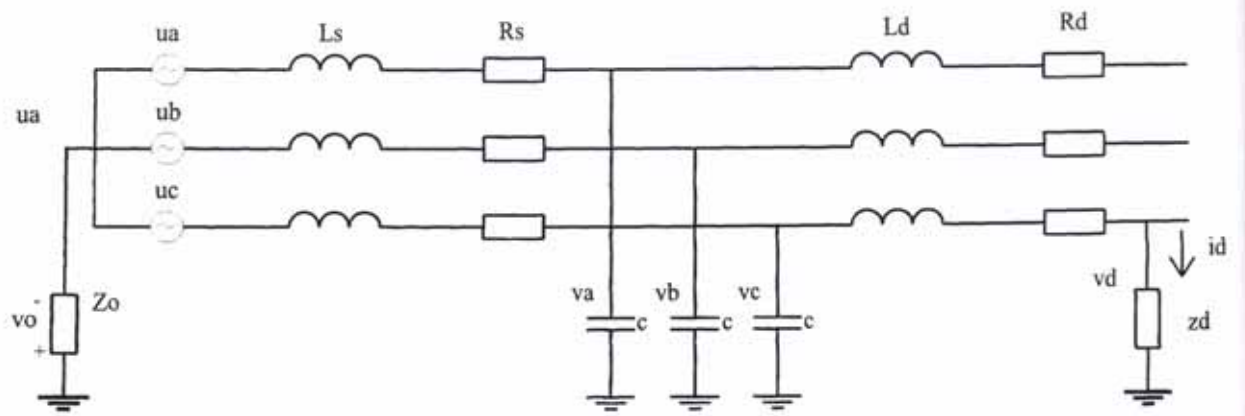


Фиг. 11



Фиг. 12

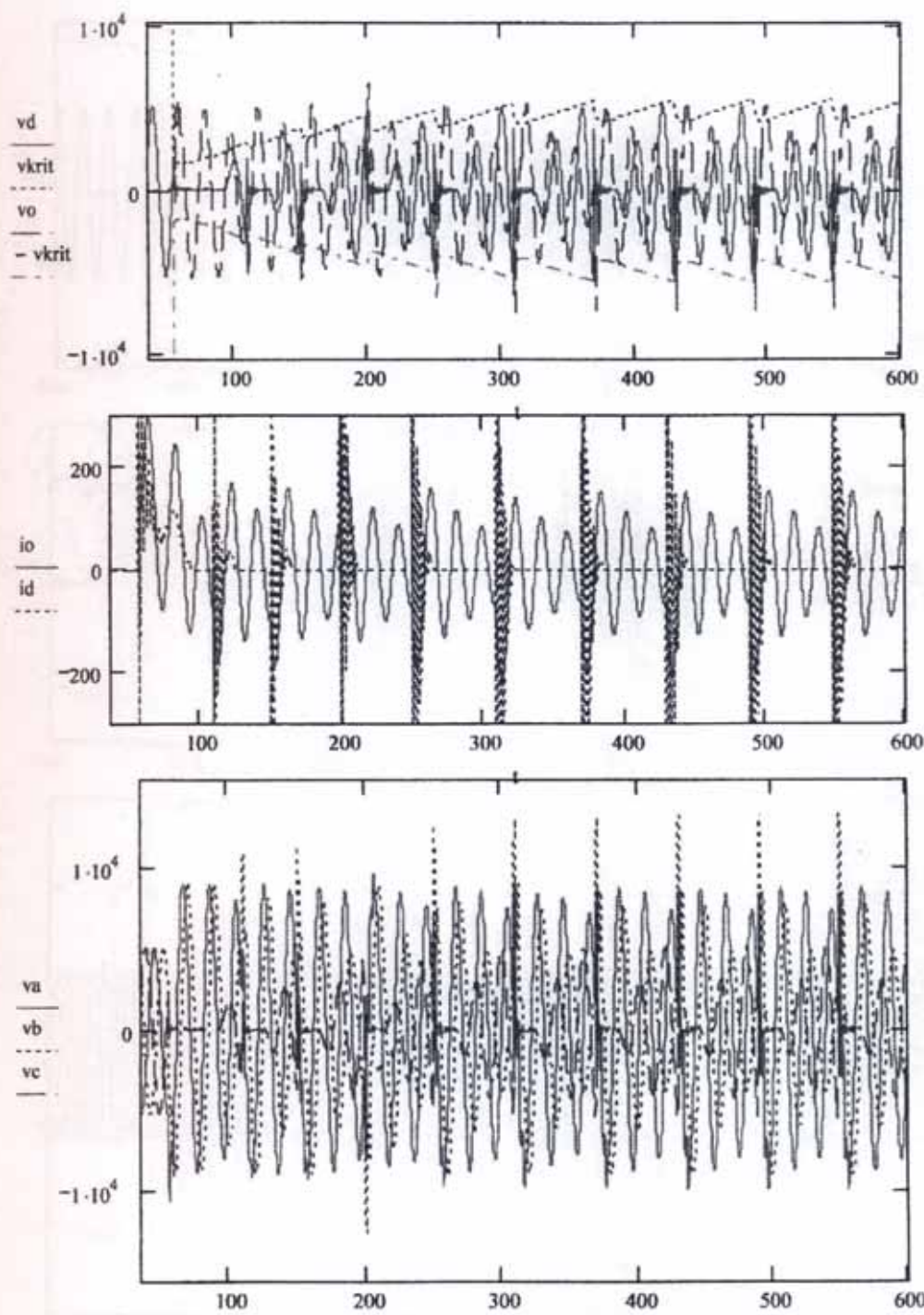
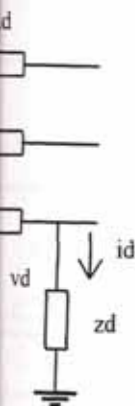




Фиг. 13

Arc 02' 19

$$f_{Lon} = 36.752 \quad \frac{L_o}{L_{on}} = 0.8 \quad \frac{R_{oo}}{f_{Lon}} = 13.605 \quad \frac{Ampv}{V} = 2.599 \quad Endu_N = 5.196 \times 10^3 \text{ J}$$

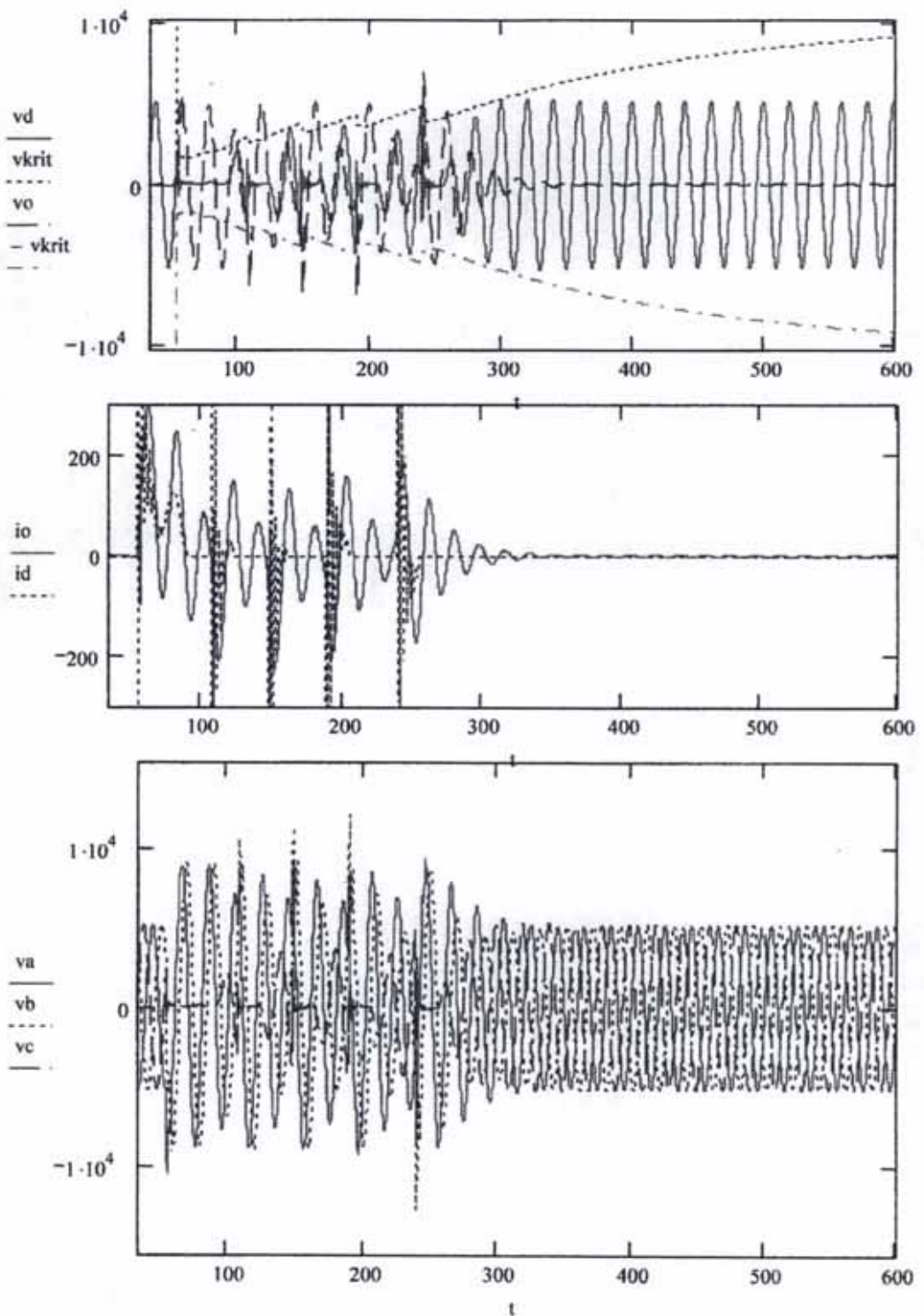


Комбинированная схема дугогашения [14]. Перекомпенсация. Сопротивление шунтирующего резистора большое.

Фиг.14

Arc 02' 20

$$f \cdot L_{on} = 36.752 \quad \frac{L_o}{L_{on}} = 0.8 \quad \frac{R_{oo}}{f \cdot L_{on}} = 4.081 \quad \frac{Ampv}{V} = 2.453 \quad Endu_N = 1.923 \times 10^3 \text{ J}$$

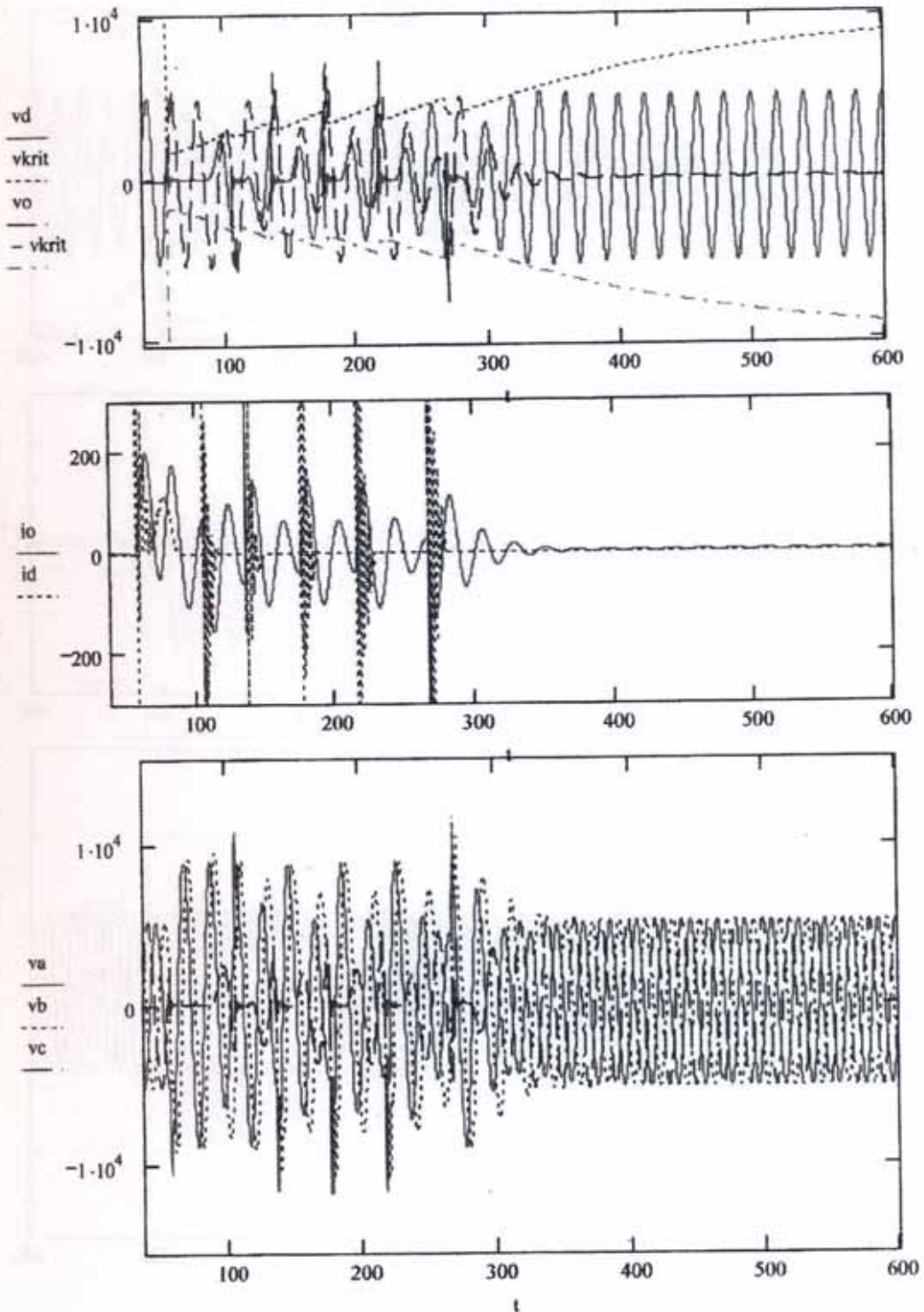


Комбинированная схема дугогашения [14] при умеренной величине сопротивления шунтирующего резистора

Фиг. 15

Arc 02' 23

$$f_{Lon} = 36.752 \quad \frac{L_o}{L_{on}} = 1.25 \quad \frac{R_{oo}}{f_{Lon}} = 4.081 \quad \frac{Ampv}{V} = 2.297 \quad Endu_N = 2.19 \times 10^3 \text{ J}$$

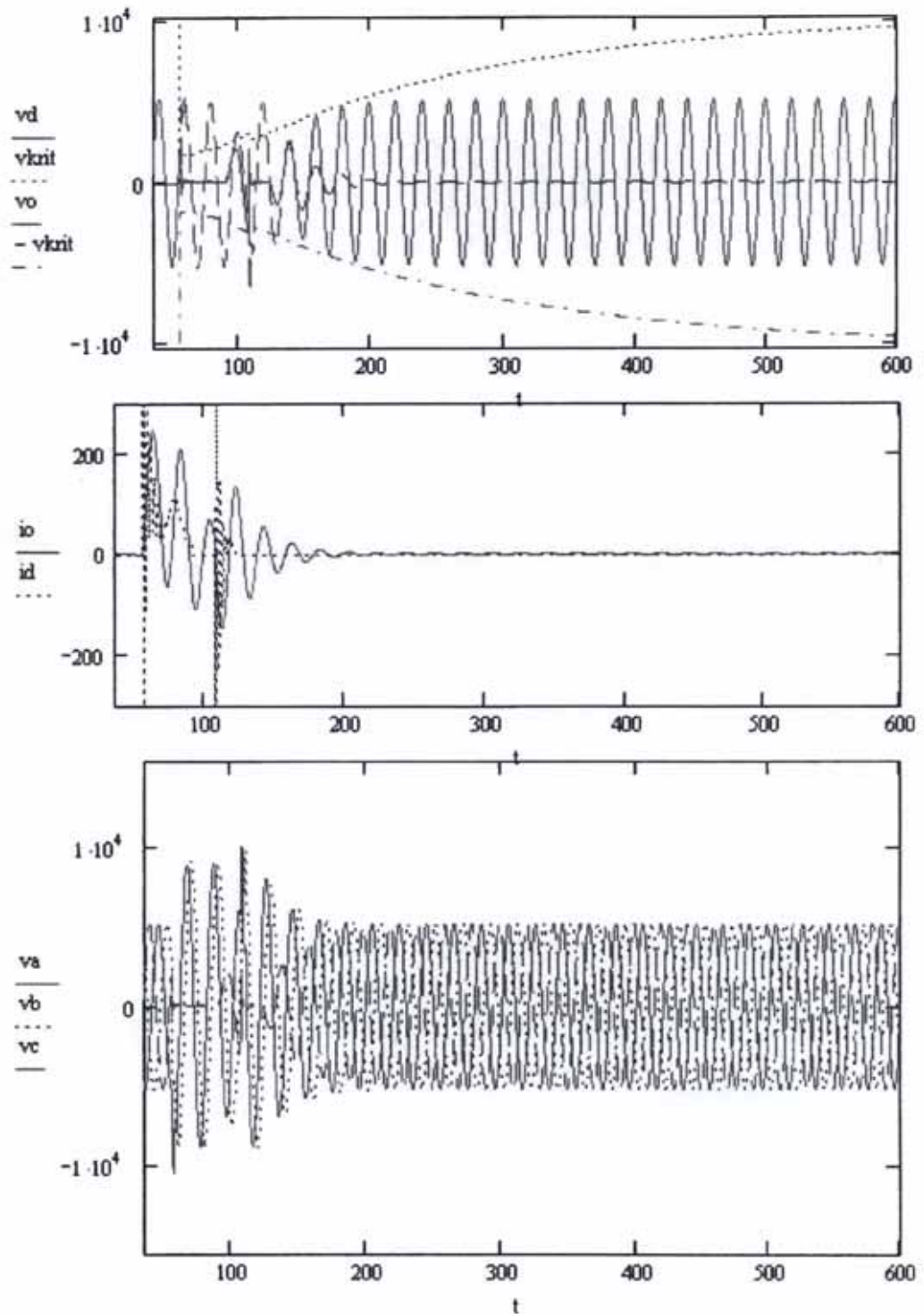


Комбинированная схема дугогашения [14]. Режим недокомпенсации.  
Шунтирующий резистор с умеренной проводимостью.

Фиг. 16

Arc 02' 26

$$f_{Lon} = 36.752 \quad \frac{L_o}{L_{on}} = 1 \quad \frac{R_{oo}}{f_{Lon}} = 4.081 \quad \frac{Ampv}{V} = 2.039 \quad Endu_N = 620.956 \quad J$$



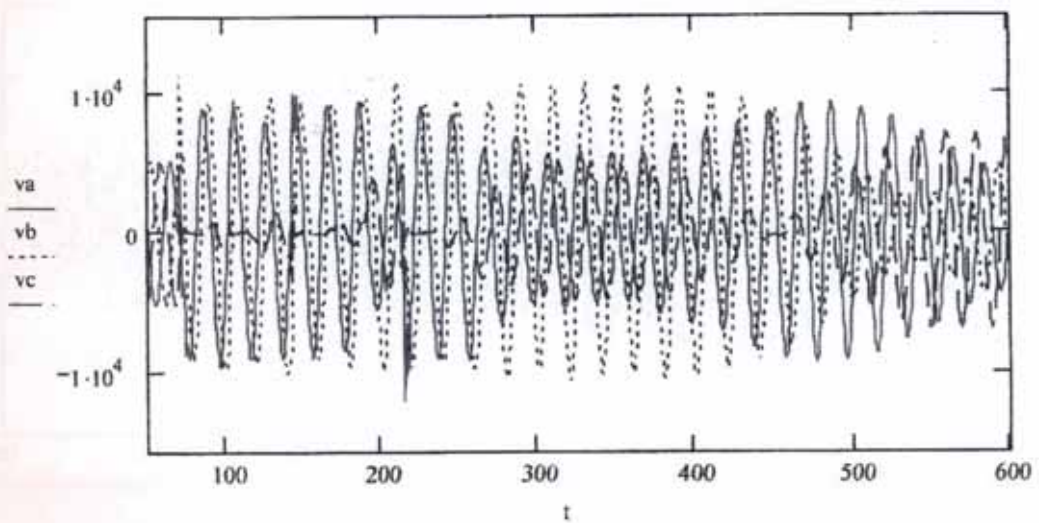
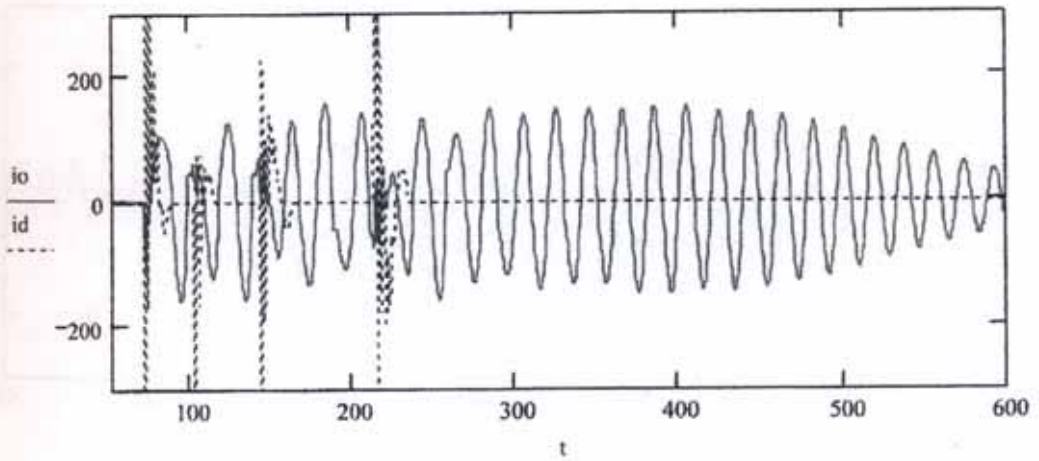
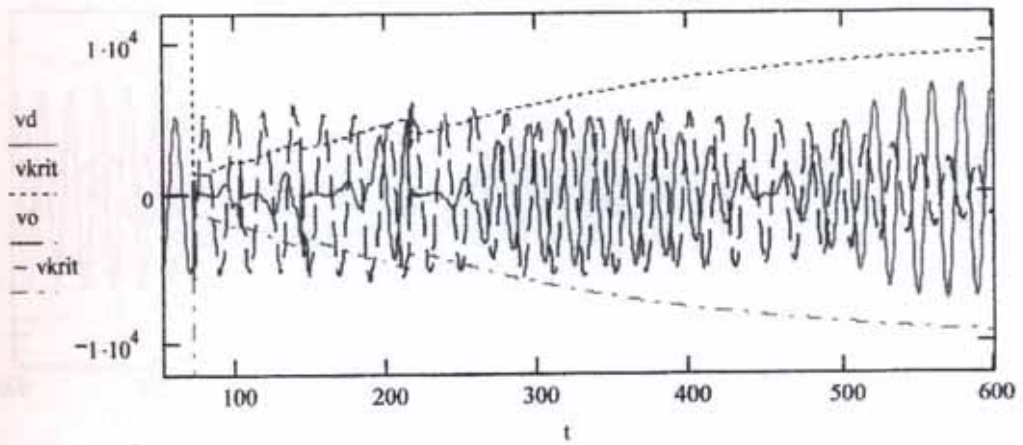
Комбинированная схема дугогашения [14]. Точная настройка.

Промежуточное значение проводимости шунтирующего резистора.

Фиг. 17

Arc 05 01

$$f_{Lon} = 36.752 \quad \frac{L_o}{L_{on}} = 0.8 \quad \frac{R_{oo}}{f_{Lon}} = 1.5 \quad \frac{Amp_v}{V} = 2.319 \quad Endu_N = 1.468 \times 10^3 \text{ J}$$

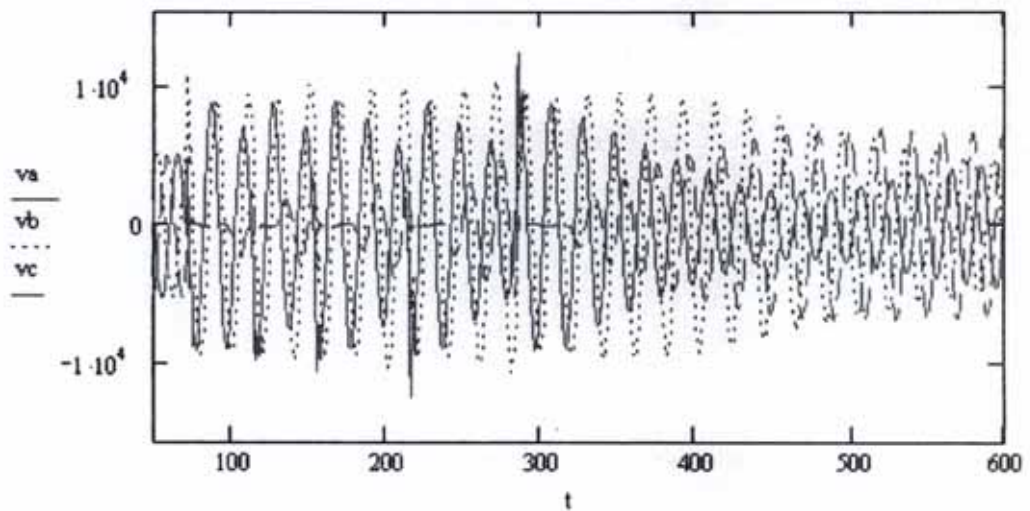
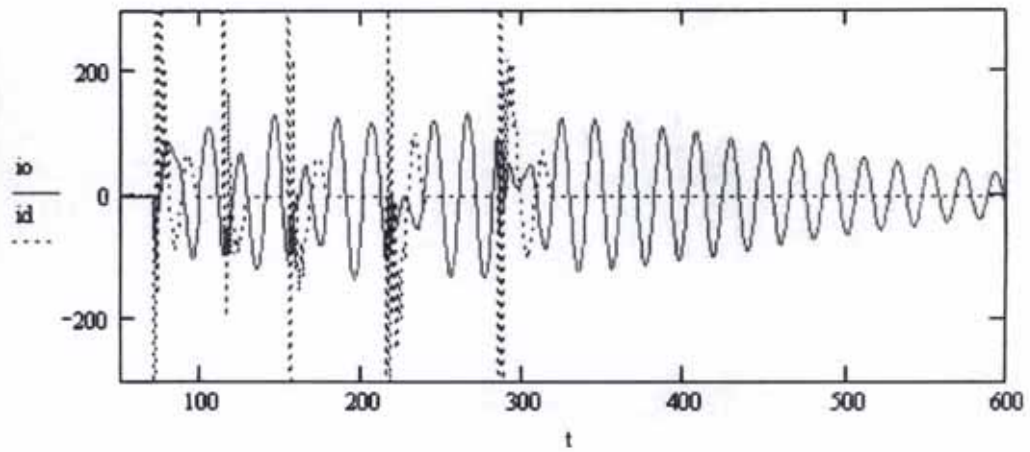
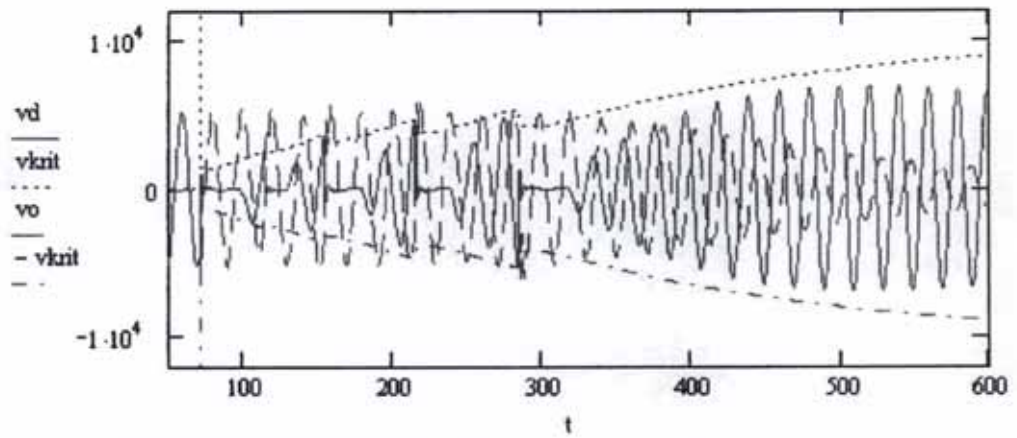


Активное устройство. Перекомпенсация

Фиг. 18

Arc 05 02

$$f_{Lon} = 36.752 \quad \frac{L_o}{L_{on}} = 1.25 \quad \frac{R_{oo}}{f_{Lon}} = 1.5 \quad \frac{Amp_v}{V} = 2.414 \quad Endu_N = 2.332 \times 10^3 \text{ J}$$

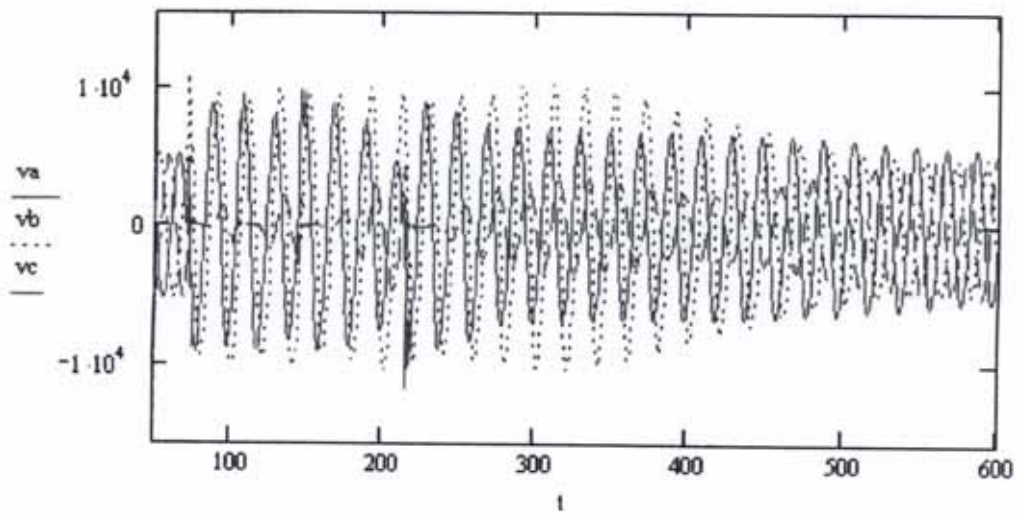
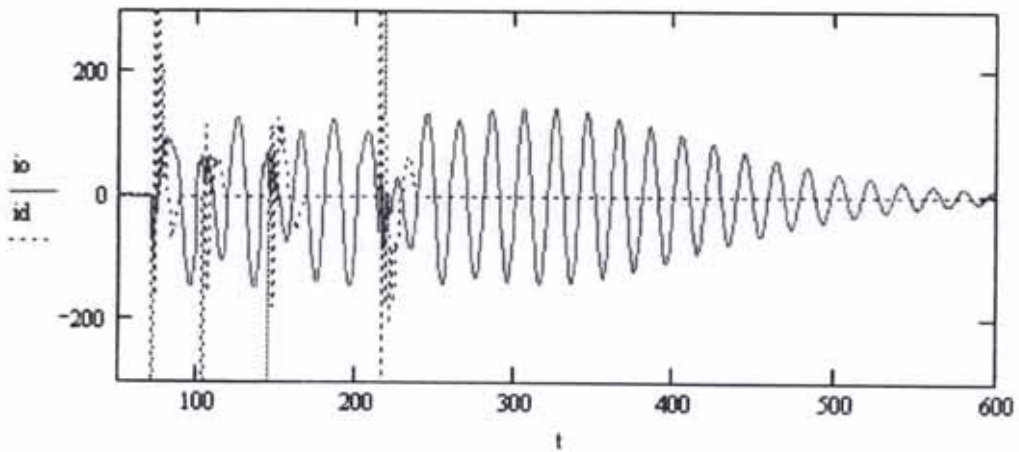
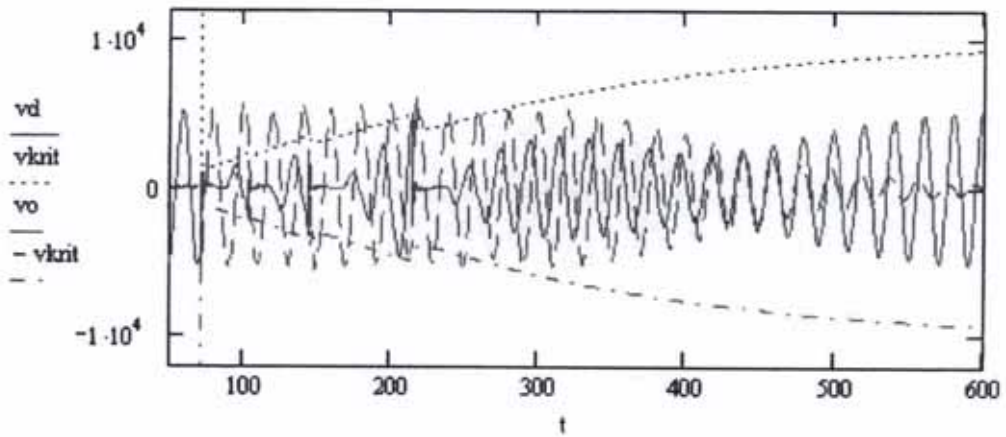


Активное устройство. Недокомпенсация.

Фиг. 19

Arc 05 03

$$f_{Lon} = 36.752 \quad \frac{L_o}{L_{on}} = 1 \quad \frac{R_{oo}}{f_{Lon}} = 1.5 \quad \frac{Amp_v}{V} = 2.26 \quad Endu_N = 1.521 \times 10^3 \text{ J}$$



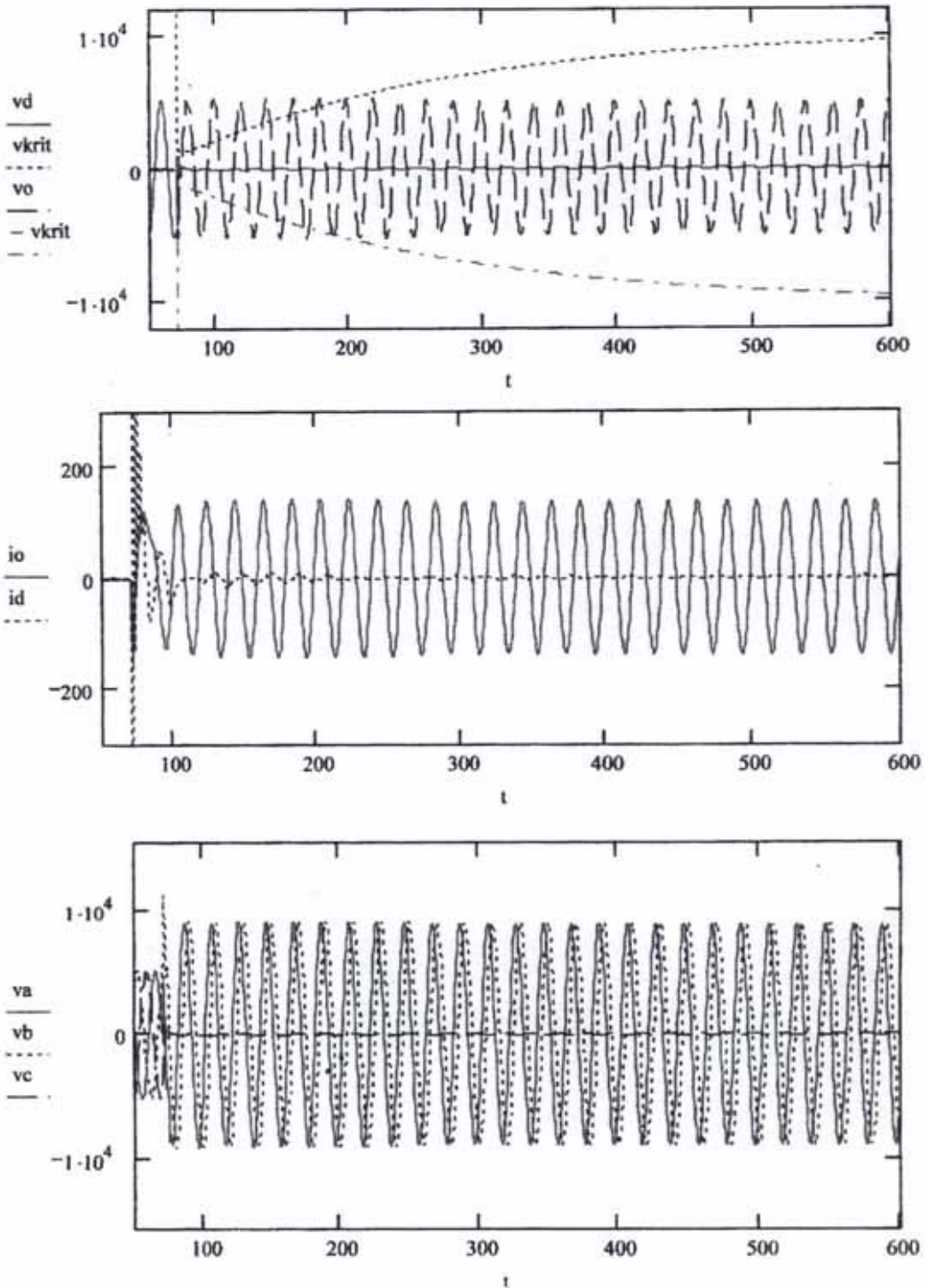
Активное устройство. Точная настройка

Фиг. 20



Arc 05 04

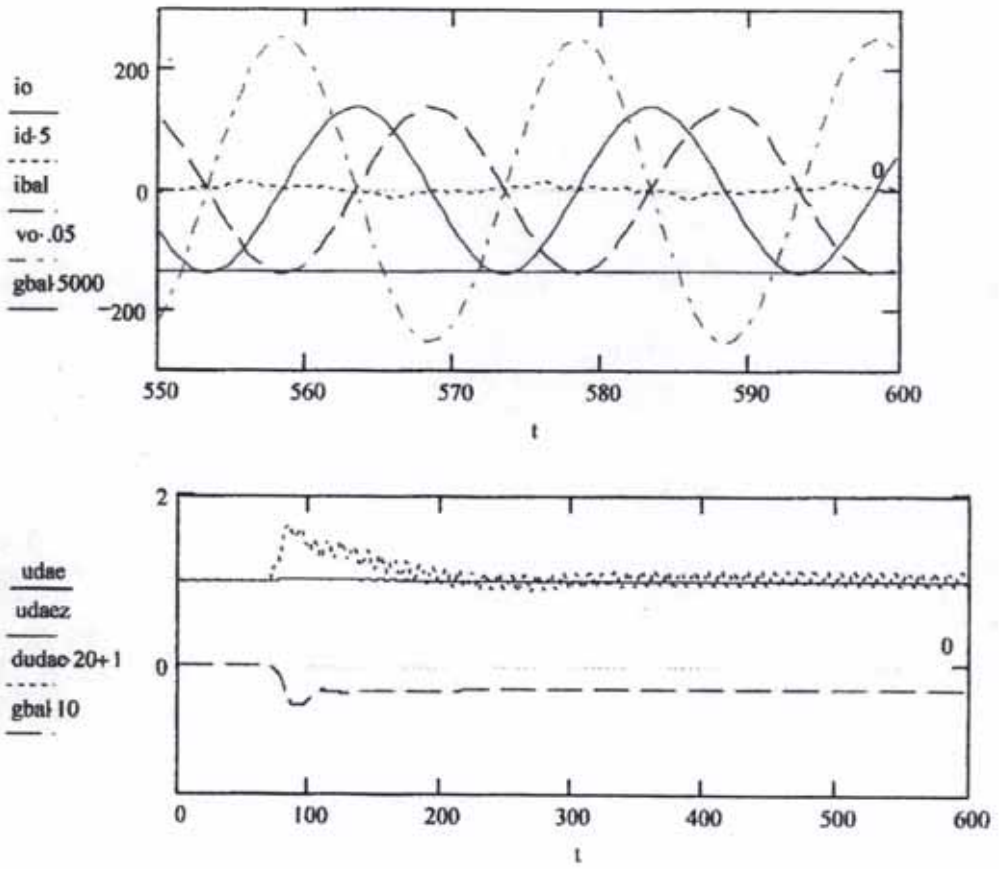
$$f \cdot L_{on} = 36.752 \quad \frac{L_o}{L_{on}} = 1 \quad \frac{R_{oo}}{f \cdot L_{on}} = 1 \quad \frac{Ampv}{V} = 2.192 \quad Endu_N = 580.225 \quad J$$



Активное устройство. Устойчивое короткое замыкание

Фиг. 21

Arc 05 04'



Устойчивое короткое замыкание. Активное устройство.

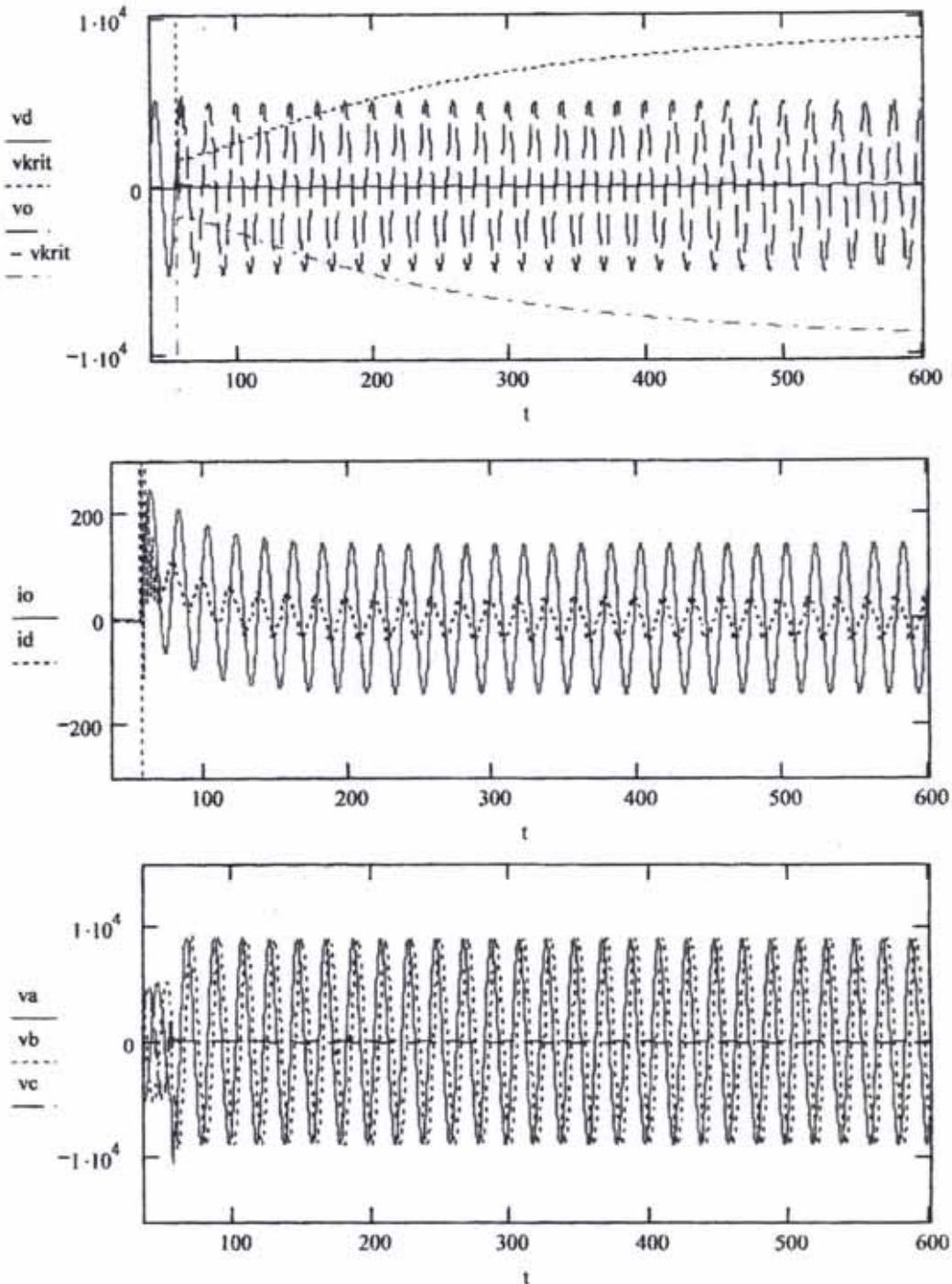
Действие регулятора баланса

Фиг. 22

Arc 02' 28

$$f_{Lon} = 36.752 \quad \frac{L_o}{L_{on}} = 1 \quad \frac{R_{oo}}{f_{Lon}} = 4.081 \quad \frac{Amp_v}{V} = 2.039 \quad Endu_N = 1.467 \times 10^3 \text{ J}$$

$$idrms := 24.821 \text{ A}$$



Комбинированная схема [14]. Устойчивое короткое замыкание

Фиг. 23