

## источники питания

## 2-кВт импульсный источник питания с низким уровнем помех<sup>1</sup>

Дэвид Малиньак

Усовершенствование схемы фильтра и тщательная проработка конструкции позволили фирме Hewlett-Packard создать импульсные источники питания серии HP 6670A с уровнем помех, соответствующим линейному стабилизатору.

При попытке выйти на рынок мощных источников питания (ИП) примерно четыре года назад оказалось, что основной причиной недовольства потенциальных заказчиков оборудования в отделения фирмы Hewlett-Packard в шт. Нью-Джерси (New Jersey Division) были имеющиеся в наличии импульсные ИП. Независимо от того, насколько хорошо работала линейная часть их ИП с импульсным предрегулятором, синфазные импульсные помехи существенно ухудшали качество выходного напряжения. В ходе научно-конструкторских работ, посвященных этой проблеме, инженеры фирмы Hewlett-Packard установили, что проблему можно решить, используя для подавлений синфазных помех фильтры более высокого порядка.

В настоящее время исследования привели к созданию двух 2-кВт ИП постоянного тока типов HP 6671A и HP 6674A с характеристиками, которые ранее достигались либо в чисто линейных ИП, либо в ИП с линейными оконечными стабилизаторами. При этом новые источники обладают КПД и габаритами импульсных ИП.

Эти два источника являются первыми в запланированной серии из пяти ИП. Выходные напряжения и токи составляют (0-8) В / (0-220) А и (0-60) В / (0-35) А для HP 6671A и HP 6674A соответственно. При выходной мощности 2 кВт они являются наиболее мощными ИП со встроенной универсальной шиной интерфейса (GPIB), выпускаемыми фирмой HP.

Уровень выходных пульсаций (или уровень дифференциальной помехи), имеющий решающее значение при определении возможности применения ИП в каком-либо приложении, составляет в размахе около 50 мВ (максимум) для любого импульсного ИП, а при наличии оконечного линейного стабилизатора - примерно 5 мВ. Оговариваемое значение этого параметра для модели HP 6671A составляет 7 мВ, т.е. она вплотную приближается по данной характеристике к чисто линейному источнику, являясь в то же время импульсным ИП.

Другой мерой качества ИП служит уровень синфазных помех в виде тока помехи, протекающего как от положительного, так и от отрицательного выходов ИП на землю. Именно син-

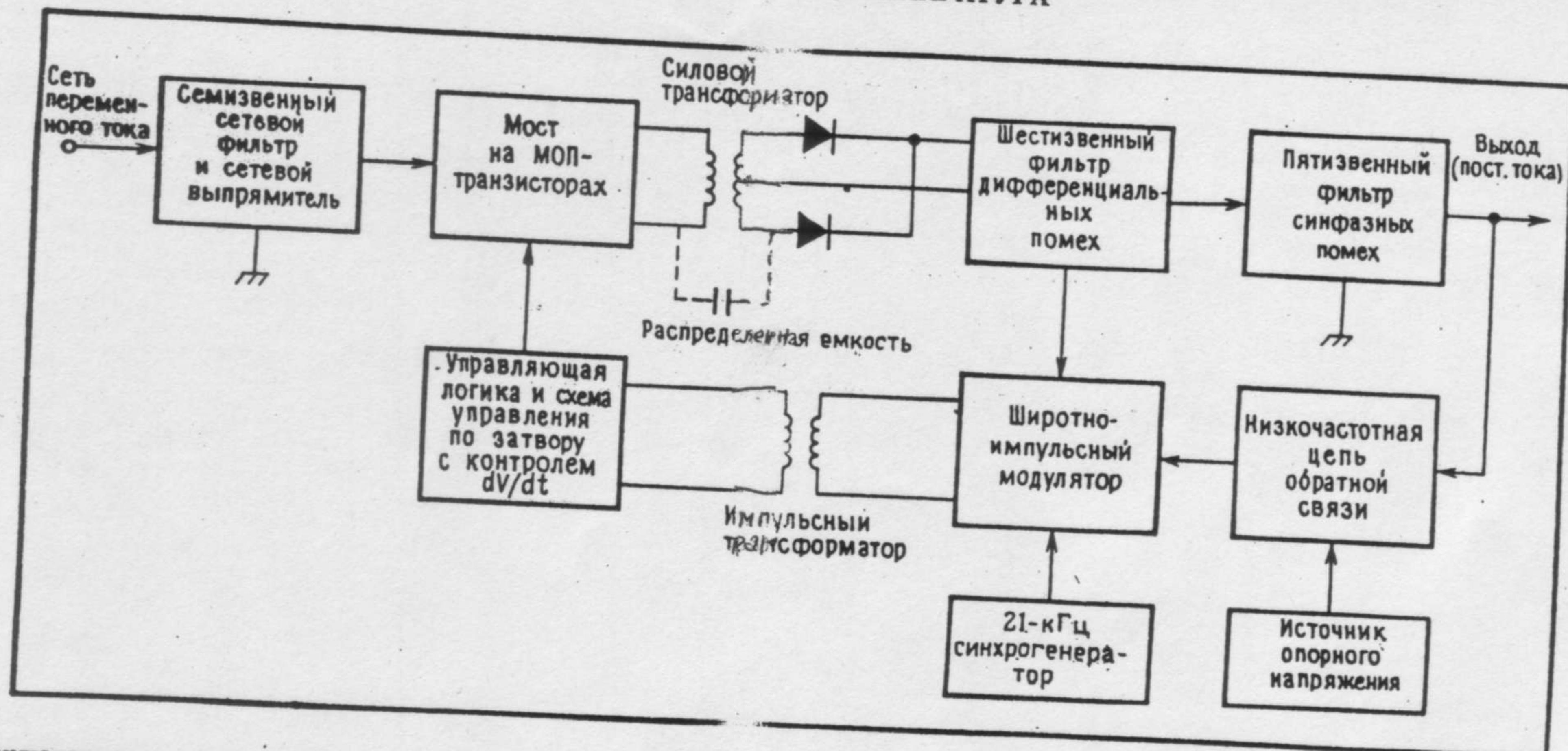
фазная помеха является причиной "необъяснимых" помех, которые часто ассоциируются с работой импульсных ИП, поскольку она может преобразовываться в дифференциальную помеху существенной величины при подключении к ИП испытуемого устройства (ИУ) или нагрузки. Такое преобразование происходит в результате небольшой асимметрии импедансов в контуре синфазной помехи. Асимметрия обычно обусловлена индуктивностями проводников нагрузки и емкостной связью между плюсовым и минусовым входами ИП и общей землей.

При рассмотрении синфазных помех (СП), которые лучше характеризовать через ток, а не через напряжение, ИП серии HP 6670A также оказываются близкими к линейным ИП. Как правило, размах тока СП в импульсных ИП составляет от 50 до 500 мА, а для ИП с линейными оконечными стабилизаторами - от 0,5 до 5 мА. У HP 6671A размах тока СП равно 5 мА, что соответствует верхней границе интервала для линейных ИП.

Многие изготовители ИП даже не оговаривают характеристики синфазных помех своих изделий. Это объясняется тем, что борьба с этими помехами может быть очень дорогостоящей. Линейные ИП создают меньше проблем с током СП благодаря самому принципу их действия, поскольку токи и напряжения в них не содержат высокочастотных составляющих, характерных для подавляющего большинства импульсных ИП: Поэтому линейные ИП традиционно считаются более предпочтительными для питания чувствительного к помехам оборудования. В моделях HP 6671A и HP 6674A проблема СП смягчена. В результате любой вывод нагрузки можно подключать к земле, не приводя к заметным изменениям характеристик помех, поступающих в нагрузку.

Основные методы, позволившие добиться столь малого уровня помех, создаваемых новыми ИП, - это контроль крутизны фронтов импульсов при переключении силовых ключей, тщательная разводка, применение шестиполюсного фильтра для дифференциальной помехи и пятиполюсного фильтра для синфазной, а также бескомпромиссность в достижении поставленных целей при проектировании ИП (см. схему). Контролирование крутизны фронтов импульсов

<sup>1</sup>David Maliniak. 2-kW dc switching supply banishes noise at output, ED, 1991, No. 2, pp. 111, 112.



Переключение с ограничением крутизны фронтов импульсов и усовершенствованная схема фильтрации позволили фирме Hewlett-Packard создать чрезвычайно малошумящие источники питания серии HP 6670A. При этом жестко контролируются уровни синфазных и дифференциальных помех, приближающиеся к таковым у линейных источников питания.

позволяет ограничить скорость нарастания напряжения на коммутируемых компонентах, что сводит к минимуму ток синфазной помехи, протекающий через силовой трансформатор. Контролирование фронтов несколько ухудшает КПД, однако результирующее понижение уровня помех, вполне перекрывая этот недостаток КПД, тем не менее составляет 76% при полной нагрузке.

Схема фильтра существенно отличается от обычно применяемых другими изготовителями ИП, поскольку большинство обычно применяют либо двухзвенный, либо четырехзвенный фильтр для подавления синфазной помехи. Кроме того, фирма Hewlett-Packard расположила точки заземления внутри фильтра синфазных помех, выполнив их в виде одноточечных заземлений, что сводит к минимуму площади земляных контуров. Клеммы заземления размещены на задней стенке корпуса, что обеспечивает пользователю доступ к точке заземления с наименьшим уровнем помех. Такая точка является идеальной для подключения экрана кабеля внешней обратной связи.

При конструировании данного ИП значительное внимание было уделено его компоновке. Силовая часть схемы ИП имеет П-образную форму и своими концами обращена к задней стенке корпуса (правая сторона - сетевой вход, левая сторона - выход). Два больших теплоотвода, расположенных во всю длину корпуса от передней стенки до задней, разделяют его пополам и формируют канал, по которому циркули-

рует воздух, нагнетаемый вентилятором. Мощные МОП-транзисторы в максимально возможной степени электрически изолированы от этих теплоотводов, что позволило уменьшить крутизну фронтов импульсов, действующих на теплоотвод.

Данные 20-кГц импульсные ИП по уровню излучаемых помех удовлетворяют требованиям западногерманского стандарта UDE 0871/6.78 (уровень В). Что касается программируемости, то серия HP 6670A эмулирует более ранние серии HP 6650A и 6030A.

После открытия, что потребители все еще предпочитают пользоваться ручками при управлении напряжением и током, фирма Hewlett-Packard ввела их в ИП серии HP 6670A. В результате потребитель получает в свое распоряжение пять способов задания напряжения и тока на выходе ИП: ручки, шина HP-1B, кнопки дискретного приращения, аналоговое программирование и ввод с клавиатуры. Калибровка ИП осуществляется с передней панели.

#### Цена и условия поставки

Цены ИП HP 6671A и HP 6674A составляют 4450 и 4300 долл. соответственно. Поставка обеих моделей производится в настоящее время в течение примерно 4 нед после получения заказа [ED, 1991, No. 2, pp. 111, 112].

Hewlett-Packard Co., 19310 Pruneridge Ave., Cupertino, CA 95014; (800) 752-0900

# Причины возникновения помех от импульсных источников питания<sup>1</sup>

*Крейг Майер*

Hewlett-Packard Co., New Jersey Division, 150  
Green Pond Rd., Rockaway, NJ. 07866;  
(201)586-5714

Понимание причин возникновения неоговариваемых изготавляемых токов синфазной помехи и знание методики их измерения позволяют существенно облегчить процесс конструирования аппаратуры.

При возникновении необходимости покупки и использования импульсного источника питания (ИП) инженеры, как правило, оценивают уровень напряжения пульсаций и помех между его выходными шинами (т.е. уровень дифференциальной помехи), который соответствует наихудшему случаю, при этом измерения выполняются в некоторой определенной полосе частот прибором с заданной полосой пропускания. Исходя из этого, пользователь может легко определить, подходит ли для данного приложения какой-либо ИП по уровню пульсаций выходного напряжения (дифференциальной помехи).

Однако существует еще один источник помех - ток синфазной помехи (ток СП), который может самым непонятным образом проявлять себя на входах питания схемы при ее подключении к ИП. Поскольку ток СП, как правило, не измеряется и не оговаривается изготавителем, пользователю необходимо знать, как этот ток может влиять на работу его схемы, причины его возникновения и стандартную методику его измерения.

В большинстве систем напряжение помехи, создаваемой ИП, измеряется на его выходных контактах, к которым обычно подключается пассивный резистор в качестве нагрузки. При подключении к ИП какой-либо схемы или испытуемого устройства (ИУ) ток СП, генерируемый этим ИП, преобразуется в напряжение на входах питания ИУ. Это преобразование обусловлено разбалансом импедансов, по которым протекает ток СП, как в самом ИУ, так и в питающих шинах, соединяющих ИП с ИУ. В результате уровень напряжения помехи на входе ИУ может оказаться больше номинального значения, оговоренного в паспорте на ИП, а результаты испытаний могут неблагоприятно исказиться в сторону завышения чувствительности ИУ к напряжению помехи.

Например, ток СП способен сильно исказить характеристики доплеровских РЛС для наведения ракет. В таких системах разность частот излучаемого и принимаемого сигналов, обусловленная эффектом Доплера, часто состав-

ляет 10 - 200 кГц и зависит от относительной скорости объекта, отражающего сигнал. К сожалению, частота тока СП, генерируемой ИП, часто находится именно в этом диапазоне, что может приводить к неправильным показаниям, если система спроектирована без учета воздействия такой помехи. Аналогично система для испытания таких РЛС может ошибочно отбраковывать хорошие изделия, если не принимать в внимание ток СП, генерируемый источником питания испытательного оборудования.

Приведенные примеры показывают, что ток СП является фактором, который необходимо рассмотреть до использования ИП, - и не только при испытании РЛС, но и во многих других случаях. Естественно, что для оценки его потенциального воздействия в конкретном приложении инженер должен сначала понять причины возникновения СП.

Как правило, ток СП проявляется на входах питания подключаемого к ИП устройства в виде выбросов напряжения, наложенных на напряжение дифференциальной помехи (рис. 1). Из рисунка видно, что синфазная помеха может создавать больше проблем, чем дифференциальная, в особенности из-за ее высокочастотных составляющих.

Основным источником СП в импульсных ИП являются ключевые транзисторы. При их переключении происходит резкое изменение напряжения во времени ( $dV/dt$ ), сопровождаемое генерацией электрического поля между первичной и вторичной обмотками силового трансформатора. Из-за этой емкостной связи через выходы ИП может протекать нежелательный ток при его подключении к внешней нагрузке. На рис. 2 приведена эквивалентная схема, иллюстрирующая, каким образом ток СП может преобразовываться в напряжение помехи из-за неоднократности импедансов в схеме. Поскольку этот ток практически не будет протекать до тех пор, пока к ИП не будет подсоединен внешнее устройство, имеющее цепи, подключенные к общей земле, ток СП в отличие от дифференциальной помехи не будет проявлять себя на выходе ненагруженного ИП.

В то время как ток СП имеет важное значение при рассмотрении импульсных ИП, нельзя сказать, что линейные ИП совершенно не

<sup>1</sup>Craig Maier. Taking the mystery out of switching-power-supply noise, ED, 1991, No. 18, pp. 83 - 85, 88, 90, 92.

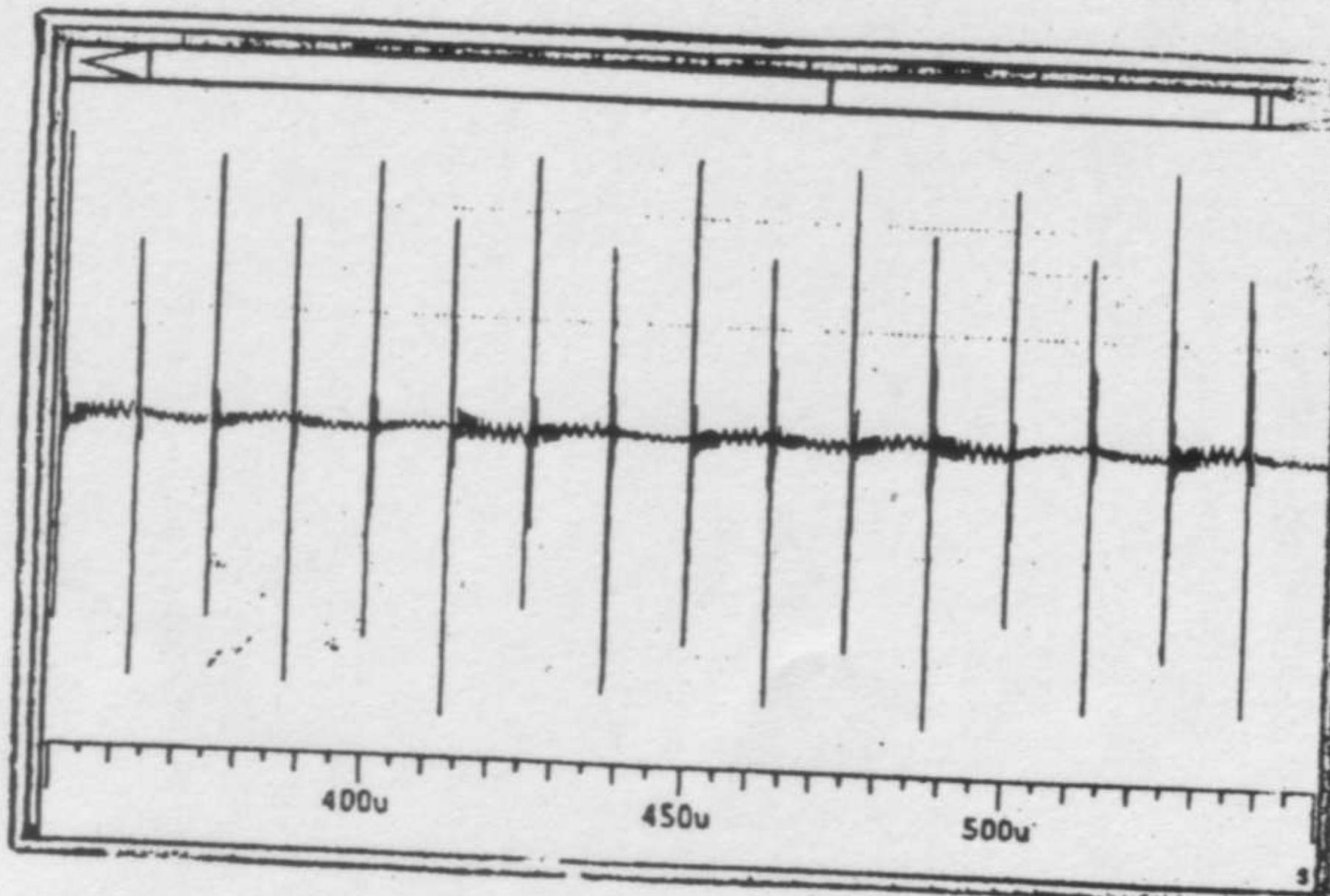


РИС. 1. Ток синфазной помехи, как правило, проявляется в виде импульсов напряжения, наложенных на дифференциальное напряжение, действующее на входе схемы. Частота импульсов зависит от частоты коммутации ключей в ИП. Моделирование с помощью программы Spice показывает, как ток синфазной помехи влияет на входное напряжение схемы, имеющей небольшой разбаланс в контуре синфазного сигнала. Масштаб 5 мВ/деление.

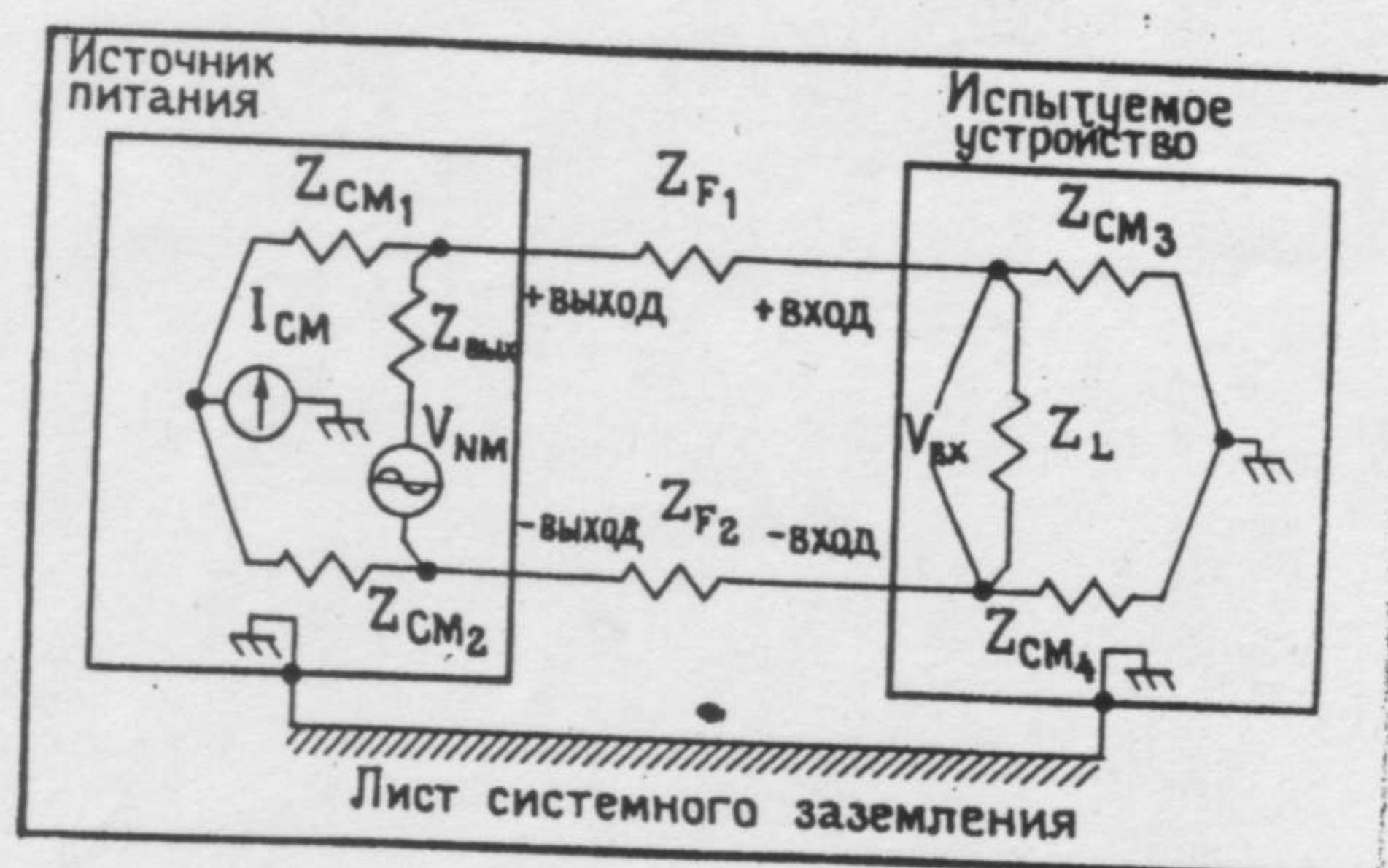


РИС. 2. Эквивалентная схема, поясняющая роль импедансов источника питания, проводников и испытуемого устройства при преобразовании тока синфазной помехи в шумовое напряжение.

генерируют этот ток. Просто в линейных ИП он существенно меньше.

Источниками тока СП в линейных ИП, которые причиняют наибольшее беспокойство, являются выпрямительные диоды, при запирании которых могут образовываться импульсные синфазные помехи с частотой, соответствующей работе двухполупериодного выпрямителя (120 Гц, или удвоенной частотой сети). Если в мощном линейном ИП эти диоды не зашунтированы подходящими помехоподавляющими цепочками, то размах тока помехи может достигать 5 мА. Однако, вообще говоря, линейные ИП имеют меньшую выходную мощность по сравнению с импульсными, поэтому их диоды работают при сравнительно небольших уровнях токов. Кроме того, эти диоды имеют тенденцию выключаться при сравнительно малых остаточных токах, благодаря чему образуемые ими помехи относительно невелики.

Другой благоприятной особенностью линейных ИП является весьма низкочастотный спектр генерируемого ими тока СП. Величина напряже-

ния, образуемого током СП, зависит как от частоты, так и от импеданса контура СП, т.е. от  $j\omega L$  при различиях в индуктивностях и от  $1/j\omega C$  при различиях в емкостях. Поскольку в данном случае помеха имеет низкочастотный спектр, степень преобразования тока помехи в напряжение тоже будет небольшой. Кроме того, большинство современных мощных ИП имеют один или более стабилизатор напряжения, встроенный во входную часть силовой схемы. Эти стабилизаторы обеспечивают фильтрацию 120-Гц пульсации и существенно уменьшают, если не исключают полностью, влияние синфазных помех.

Частотный спектр тока СП, генерируемого импульсными ИП, определяется частотой переключений, составляющей обычно от 20 до 200 к Гц и выше. На столь высоких частотах фильтрация обычно не вызывает затруднений. Размах тока СП в линейных ИП не превышает 5 мА, в то же время в импульсных ИП он довольно часто составляет от 50 до 500 мА и более. (Исключением являются новые ИП серии НР 6670 и 66000 с размахом тока СП от 4 до 5 мА.)

Реальный эффект воздействия тока СП на конкретную схему зависит от ее топологии. На рис. 3 приведена идеализированная схема, поясняющая, каким образом топология схемы способствует проявлению тока СП. Показанный на этом рисунке ИП (часть схемы слева от точек С и D) соединен проводниками длиной 1,8 м с входами испытуемого устройства (точки Е и F), к которым пользователем подключены фильтрующий конденсатор для подавления дифференциальной помехи, а также развязывающие конденсаторы для подавления синфазной помехи. Предположим, что данный ИП генерирует ток СП всего лишь 1,25 мА, а импедансы контура СП, в который входят оба проводника и ИУ, сбалансированы относительно корпусной земли. В этом случае при измерении напряжения на входе ИУ (между точками Е и F) будет наблюдаться только напряжение дифференциальной помехи. Влияние тока СП нейтрализуется благодаря конфигурации схемы, имеющей вид сбалансированного моста (рис. 4, а).

Однако уже при небольшом различии в длинах шин питания на выводах ИУ появится шумовой сигнал, обусловленный симметричной помехой. Если верхний проводник укоротить на 31 см, то его индуктивность окажется равной 500 нГ по сравнению с 720 нГ у нижнего и на напряжение дифференциальной помехи окажутся наложенными короткие импульсы, обусловленные током СП (рис. 4, б).

В электронных системах к земле обычно подключают отрицательную шину. От того, как это делается, зависит степень влияния тока СП. Если отрицательный выход ИП подключить к корпусной земле на стороне ИП (предположим, что индуктивность этого соединения равна 40 нГ), то будет наблюдаться слабое влияние тока СП на ИУ (рис. 4, в). Если же к корпусной земле подключить отрицательный вход ИУ (точка F), то влияние тока СП усиливается (рис. 4, г).

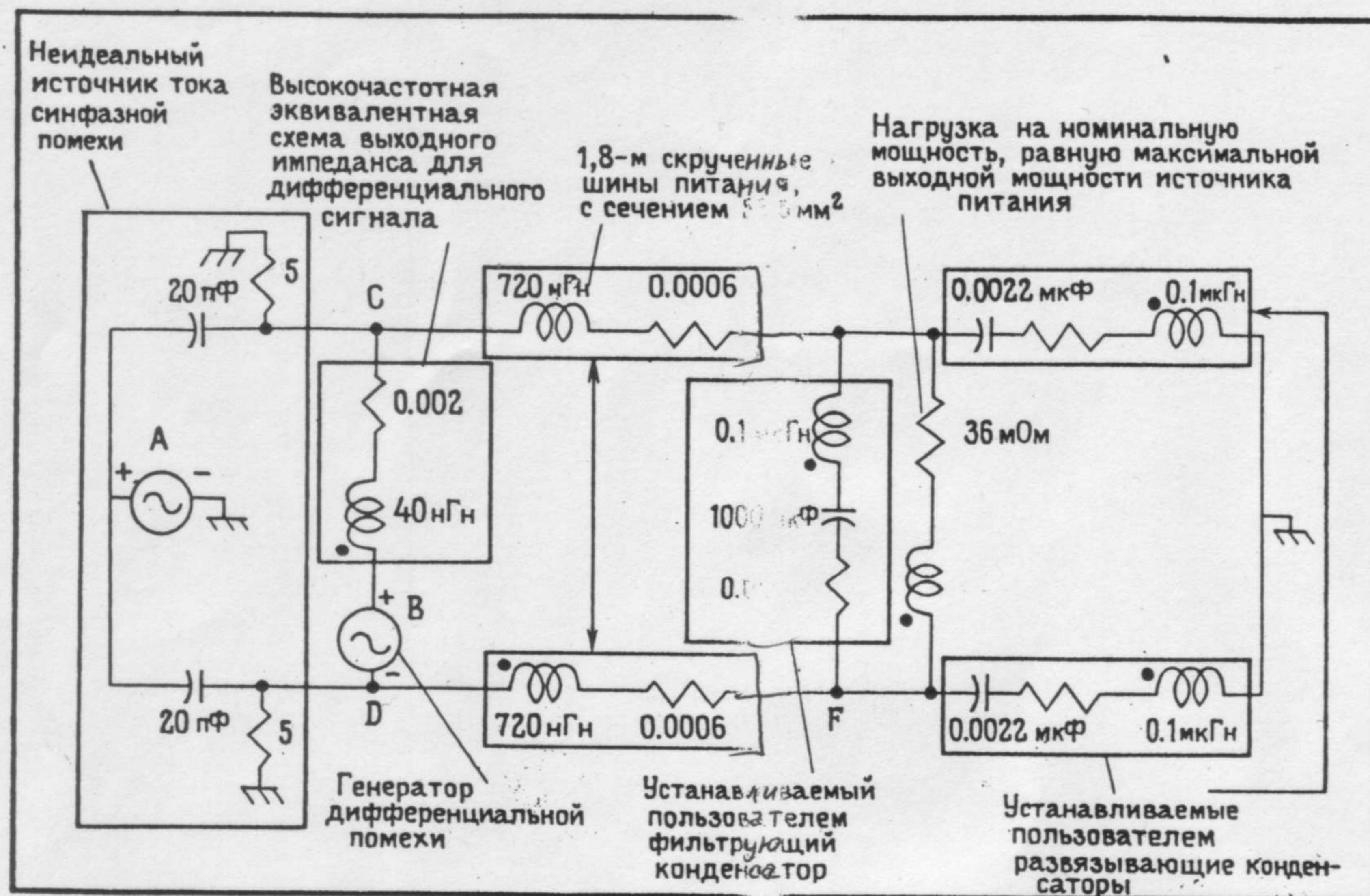


РИС. 3. Идеальная сбалансированная схема, поясняющая, как конфигурация схемы позволяет проявляться току синфазной помехи. Источник питания представлен частью схемы, расположенной слева от точек С и D, соответствующих его выходам. Напряжение от источника питания подается на входы испытуемого устройства (точки Е и F). Эквивалентная последовательная индуктивность нагрузки.

Однако наихудшим случаем является подключение ИУ с неодинаковыми импедансами между его входами и корпусной землей. Так, если проводники, соединяющие развязывающие конденсаторы в ИУ с корпусной землей, имеют разную длину, например 38 и 254 мм, то они будут иметь и разную собственную индуктивность, составляющую 30 и 200 нГ соответственно. Ток СП будет преобразовываться в напряжение помехи на входах ИУ с размахом, превышающим таковой для дифференциальной помехи (рис. 4, д).

Несмотря на то что часто имеется возможность сбалансировать индуктивность нагрузки (обеспечивая равенство длин проводников и контролируя используемую схему заземления), конструкция ИУ нередко требует, чтобы был допустим некоторый разбаланс импедансов, особенно когда существенную роль играют паразитные импедансы. Таким образом, генерируемый ИП ток СП часто имеет критическое влияние на уровень помех, возникающих на входах нагрузки.

Если данный ИП характеризуется размахом тока СП 4 мА, то уровень помех на входе вышеописанного несбалансированного ИУ (с различной длиной проводников, соединяющих развязывающие конденсаторы и землю) будет составлять 2 мВ (рис. 5). Сравним это значение с типичным уровнем пульсаций 24 мВ, соответствующим той же схеме, когда размах тока СП равен 50 мА (рис. 1), т.е. минимальному значению тока СП для импульсных ИП. Таким образом, один из наиболее действенных спосо-

бов уменьшения влияния помех на ИУ состоит в выборе ИП с очень малым током СП.

В то время как эффективность преобразования тока СП в напряжение помехи зависит от схемы заземления и степени неодинаковости импедансов проводников и импедансов контура СП в ИУ, уровень тока СП зависит в основном от схемы и конструкции ИП. Следует отметить, что в идеализированной схеме ИП (рис. 3) импеданс контура СП сбалансирован относительно положительного и отрицательного выходов ИП. Сбалансированность этого импеданса гарантирует, что образуемые током СП напряжения помехи, наблюдаемые на выходах ИП, будут совпадать по фазе и амплитуде. Это является одним из показателей качества хорошо сконструированного ИП.

Другим параметром, влияющим на ток СП, является частота переключения ИП. Как отмечалось выше, преобразование тока СП в напряжение зависит от частоты, при этом, чем ниже частота переключения, тем меньше эффективность такого преобразования. Кроме того, ограничение скорости переключения транзисторов позволяет уменьшить скорость изменения напряжения,  $dV/dt$ , и тем самым свести к минимуму синфазную помеху.

Однако изменения напряжения ( $dV/dt$ ) в импульсном ИП обязательно создают поля электромагнитных помех. Поэтому для сведения к минимуму помех, наводимых на выходные цепи очень важно надлежащим образом изолировать импульсную часть ИП от его выхода. Здесь могут помочь установка электростатиче-

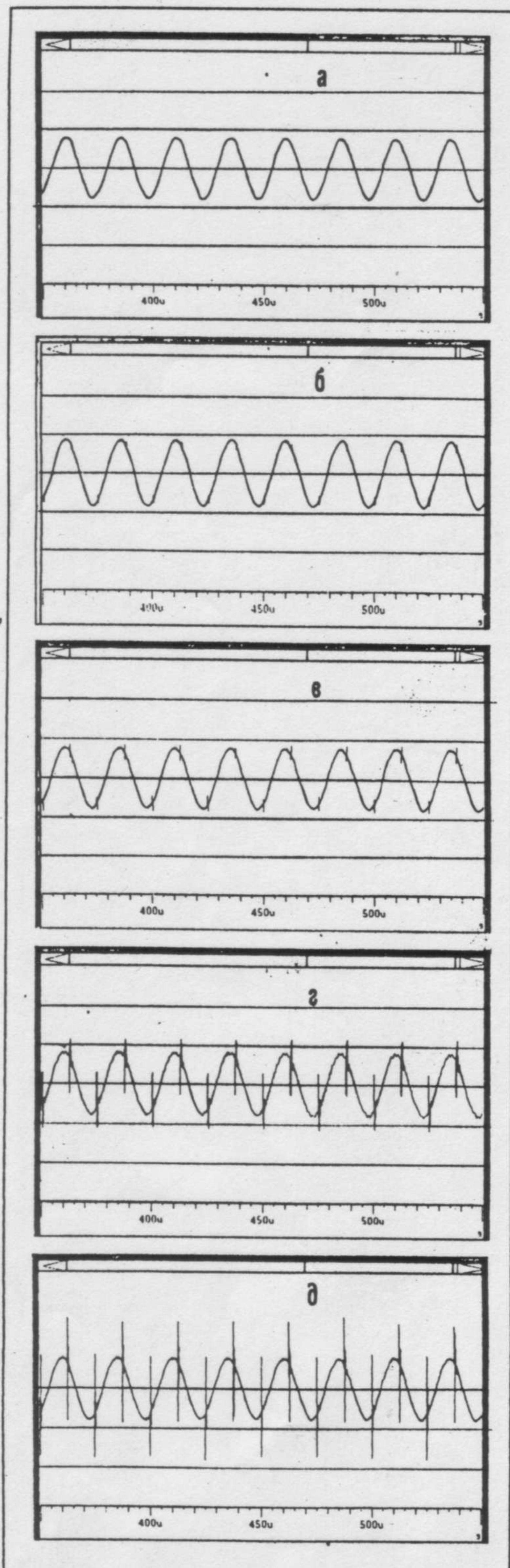


РИС. 4. При моделировании с помощью программы Spice идеальной схемы, показанной на рис. 3, все измерения выполнялись в точках Е и F, соответствующих входам испытуемого устройства (ИУ). Масштаб для всех графиков равен 200 мкВ/деление. Моделирование показало, что влияние небольшого (1,25 мА) тока синфазной помехи (СП) полностью компенсируется и между точками Е и F наблюдается только дифференциальная помеха. Различия в импедансах проводов приводят к преобразованию тока СП в напряжение (б). Заземлению отрицательного входа источника питания (в) соответствует меньшая помеха, чем при заземлении отрицатель-

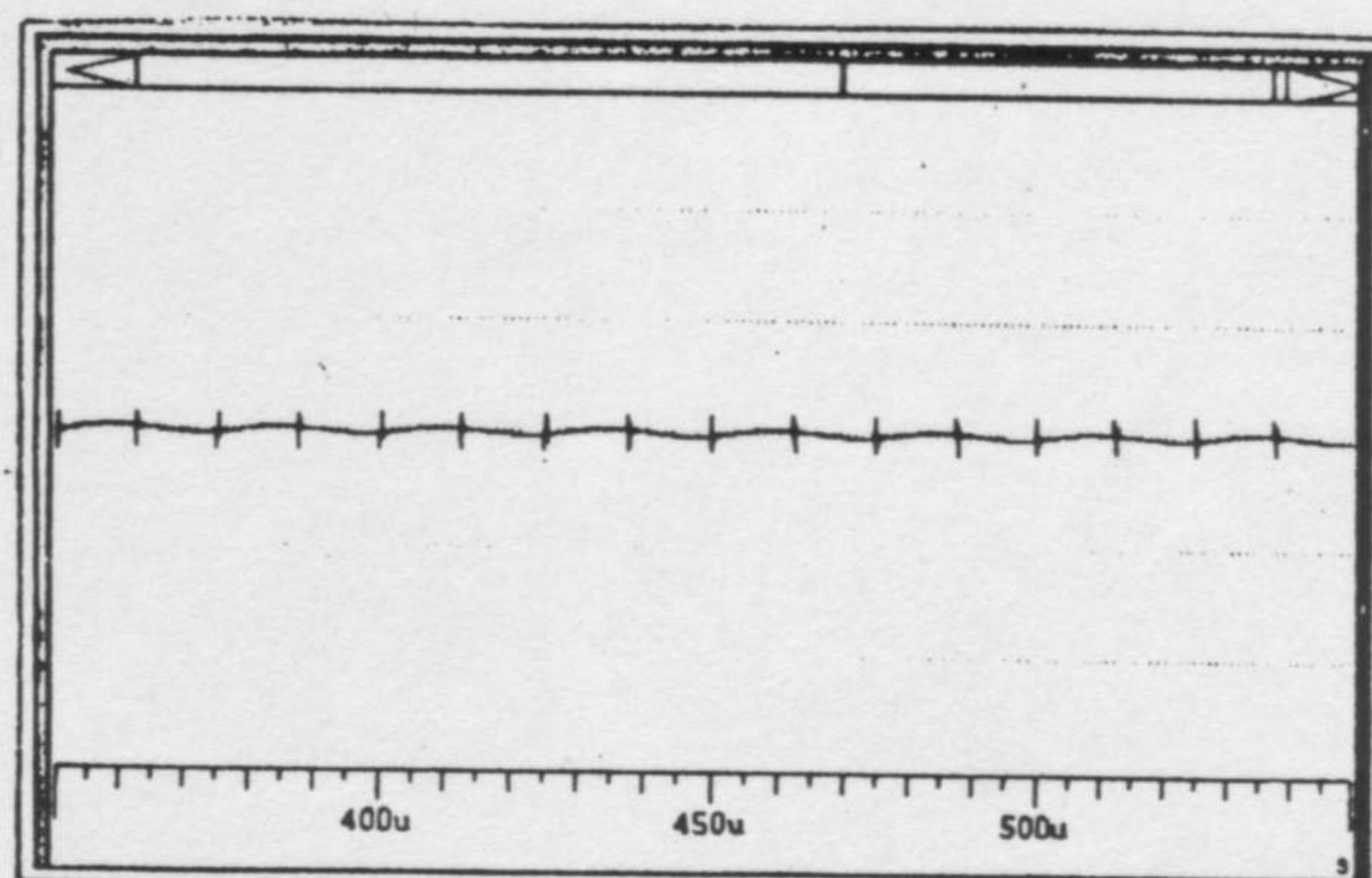


РИС. 5. Наилучший способ свести к минимуму влияние тока синфазной помехи (СП) на характеристики питаемого оборудования состоит в использовании источника питания с очень малым током СП. Напряжение, показанное на графике, появляется на входе испытуемого устройства (нагрузки) при токе СП, равном 4 мА, и минимальном разбалансе входных импедансов нагрузки. Сравните это с эффектом от применения источника с током СП 50 мА, как показано на рис. 1. Масштаб 5 мВ/деление.

ского экрана в силовом трансформаторе и достаточное разнесение первичной обмотки от вторичной с целью минимизации емкости между ними (рис. 6). Установка на выходе ИП сбалансированного многозвездного фильтра дополнительно гарантирует, что лишь минимальная синфазная помеха будет проникать в выходную цепь (рис. 7).

Схема заземления в ИП также может влиять на синфазную помеху. Одноточечное заземление лучше подходит для фильтра, подавляющего синфазную помеху, чем использование заzemляющего листа. При этом точка заземления будет иметь минимальный уровень помех в данном ИП и может быть выведена наружу для подключения к ней экранов проводов, идущих к нагрузке. Это делается с целью свести к минимуму увеличение помех в выходном напряжении ИП из-за внешних источников синфазных помех, обусловленных электростатическими на-водками, а также из-за других источников ВЧ-помех.

Поскольку уровень тока СП оговаривается редко, но имеет важное значение во многих приложениях, пользователю часто потребуется самостоятельно проводить его проверку, вследствие чего ниже дается описание соответствующей методики. Общие требования к используемому при измерении тока СП контрольно-измерительному оборудованию относительно просты (рис. 8).

Входное напряжение поступает к ИП от автотрансформатора, подключенного к питающей сети. Автотрансформатор позволяет оптимально подстраивать входное напряжение ИП в процессе испытаний. Например, если наивысшее максимальное напряжение 120-В сети равно 127 В,

ногого входа ИУ (г). Наихудший случай в отношении помех соответствует небольшому разбалансу в импедансах входных цепей ИУ относительно земли (30 и 200 нГ).

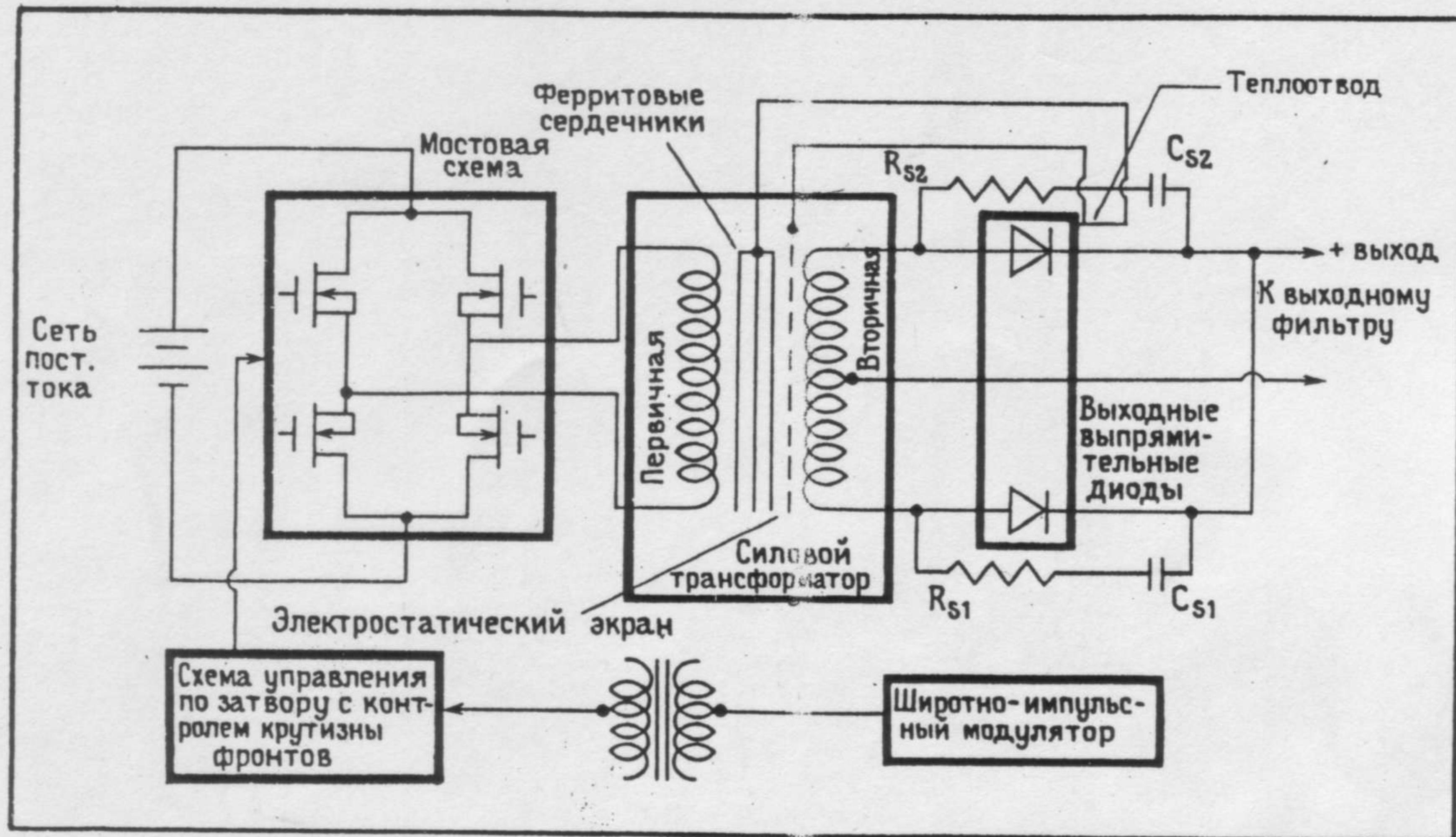


РИС. 6. Протекание тока синфазной помехи на выход источника питания можно предотвратить, установив электростатический экран в силовом трансформаторе.

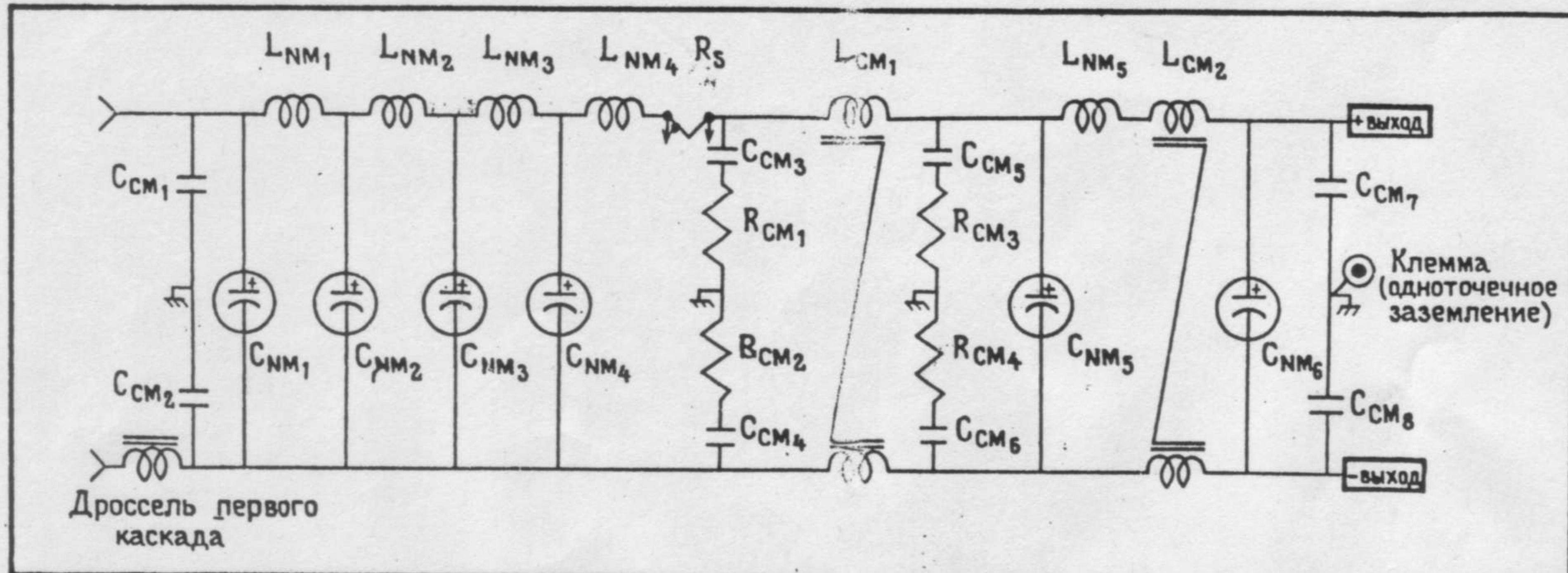


РИС. 7. Применение сбалансированного фильтра для подавления синфазной помехи на выходе ИП является последней мерой по уменьшению этой помехи.

то на выходе автотрансформатора надо установить 127 В.

Возможность регулировки входного напряжения позволяет измерять уровни тока СП, соответствующий наихудшему случаю. Как отмечалось ранее, ток СП зависит от  $dV/dt$  на переключающих транзисторах. Поскольку время переключения  $dt$  сравнительно постоянно для стабилизированного ИП, наихудшие условия будут соответствовать наибольшему  $dV$ , т.е. случаю наибольшего перепада напряжения на переключающих транзисторах, который в свою очередь соответствует максимальному значению входного напряжения.

Напряжение на выходе автотрансформатора необходимо контролировать для гарантии того,

что оно остается неизменным в течение испытаний. Другими словами, необходимо контролировать уровень переменного напряжения на входе ИП. На рис. 8 такие контрольные приборы соединены с автотрансформатором штриховыми линиями, чтобы показать возможность установки автотрансформаторов со встроенным контролем.

Выход ИП подключается к электронной нагрузке посредством проводников, намотанных на торOIDальные сердечники и образующих двухобмоточный дроссель, заставляющий весь ток СП протекать через измерительный шунт.

Чтобы измерить характеристики 2-кВт ИП для дросселя, были использованы три торOIDальные сердечника фирмы TDK из материала Н512 (с магнитной проницаемостью 10000), на

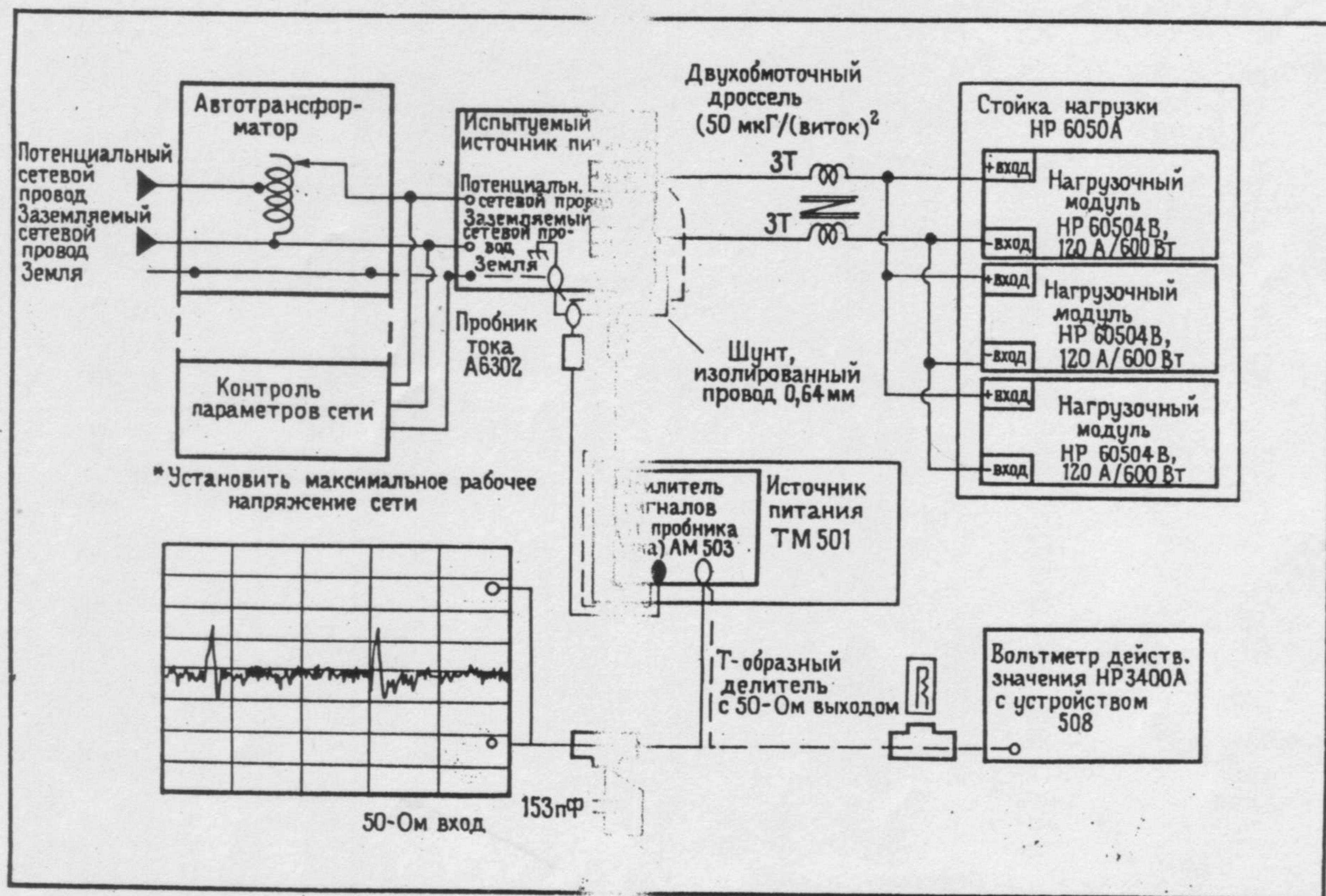


РИС. 8. Применение двухобмоточного дросселя позволяет

затормозить протекание каких-либо части тока синфазной помехи через электронную нагрузку и обеспечивает тем самым

протекание этого тока через шунт, где его можно измерить про-

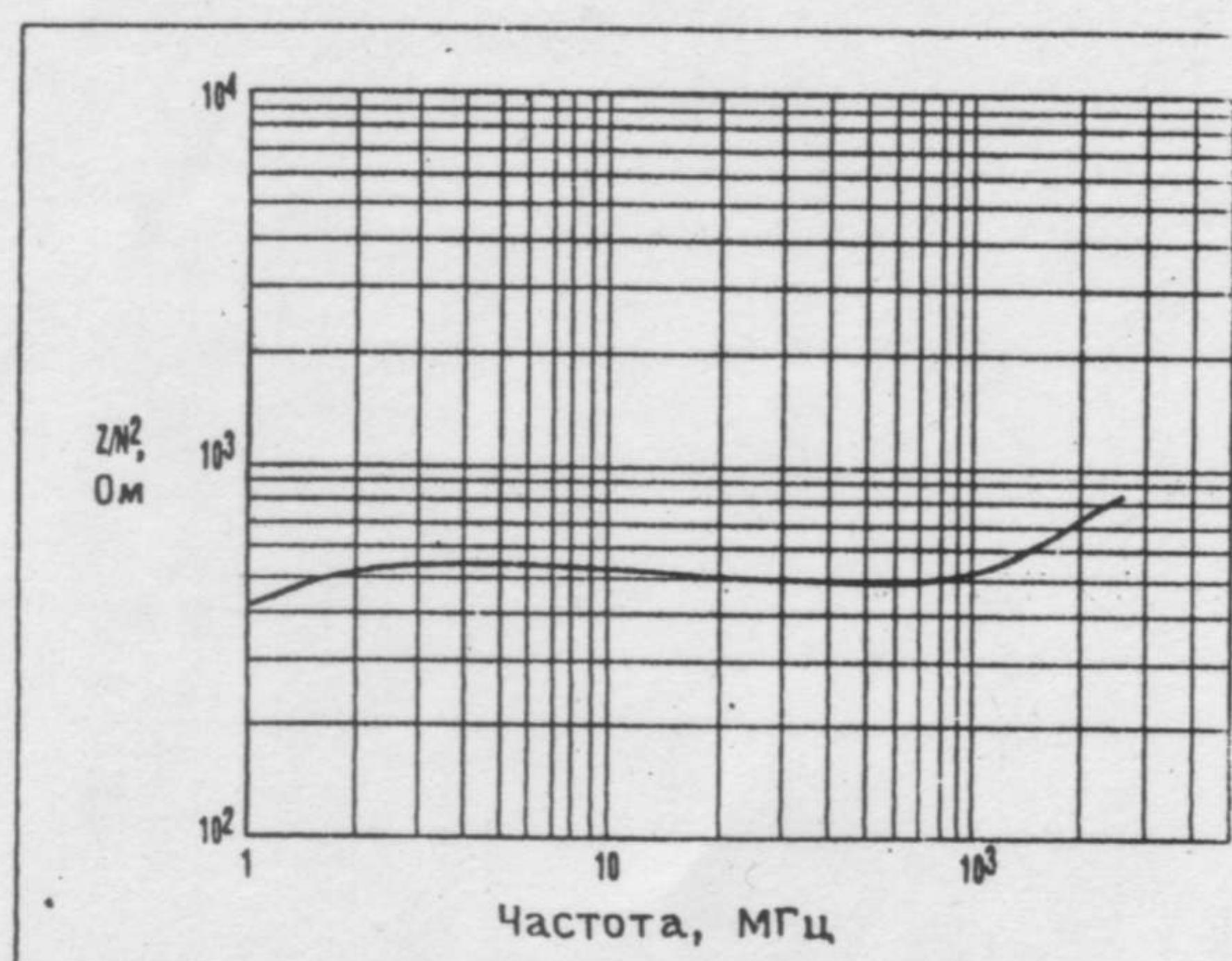


РИС. 9. График частотной зависимости импеданса для идеального сердечника фирмы TDK из материала H5C2 показывает равномерность его частотной характеристики. Графика можно определить величину создаваемого дросселя блокирующей синфазную помеху импеданса между источником питания и нагрузкой.

которые наматывались три витка из обоих проводников, соединяющих ИП с нагрузкой. На рис. 9 приведена частотная зависимость отношения импеданса к квадрату числа витков, полученная для данного типа сердечников.

В качестве электронной нагрузки использовалась система HP 6050A с тремя нагрузочны-

ми модулями моделей НО 60504В. Каждый модуль может рассеивать около 600 Вт, так что эти три модуля были включены параллельно, чтобы обеспечить требуемую нагрузку для 2-кВт ИП. Однако можно использовать нагрузки и другого типа. Годятся, если удастся найти, мощные резисторы, способные рассеивать требуемую мощность. При этом нет необходимости в дросселе, поскольку через эти мощные резисторы не будет протекать существенный ток СП. В то же время электронная нагрузка упрощает проведение испытаний при нескольких рабочих режимах, что необходимо при измерении тока СП. Кроме того, электронная нагрузка упрощает проведение обычных измерений динамических характеристик.

Поскольку ИП может не иметь сбалансированного выходного импеданса для тока СП и измеряемый сигнал поступает от неидеального источника тока, измерения тока СП следует проводить, поочередно подключаясь к положительному и отрицательному выходам ИП. На рис. 8 сплошными линиями показано подключение пробника тока шунта при проведении измерений тока СП на отрицательном выходе ИП, а штриховыми линиями - при измерениях на положительном выходе.

При измерении тока СП на отрицательном выходе этот выход подключается к заземленному листу посредством короткого проводника диаметром 0,64 мм, выполняющего роль токового

шунта. Поскольку дроссель препятствует протеканию тока СП через нагрузку, практически весь ток СП протекает через шунт и может быть измерен в этом месте.

Шунт должен иметь минимально возможную длину, чтобы свести к минимуму импеданс между ИП и землей. При испытаниях 2-кВт импульсного ИП длина проводника шунта составляла всего 89 мм благодаря близкому расположению клеммы системной земли к выходным зажимам. При проведении сравнительных измерений для двух или более различных ИП во всех случаях необходимо использовать один и тот же шунт, чтобы его индуктивность оказывала одно и то же влияние.

Измерение тока, протекающего через шунт, осуществляется с помощью пробника тока A6302 фирмы Tektronics, используемого совместно с усилителем сигналов датчиков тока AM 503 и стойкой питания TM501. Важными особенностями данного пробника, реагирующего на магнитное поле, возникающее при протекании тока, являются его способность измерять малые токи (до 1 мА) при максимальном импульсном значении 50 А, ширина полосы частот более 20 МГц (фактически она простирается от постоянного тока до 50 МГц), а также его малая паразитная входная емкость. Последняя особенность гарантирует точность измерения тока в шунте, поскольку через пробник не будет отводиться часть измеряемого тока.

При измерениях размаха тока СП в шунте использовался 50-МГц осциллограф HP 54504A (рис. 8), причем в данном случае используется только один канал с 50-Ом входом. При минимальном коэффициенте отклонения 10 мВ/деление этот осциллограф позволяет без труда измерять даже наименьшие измеряемые данным пробником значения тока СП. Конденсатор емкостью 153 пФ сужает полосу частот осциллографа до 20 МГц, что является промышленным стандартом "де факто" для измерений размаха пульсаций на выходе ИП.

Поскольку некоторым пользователям важно знать эффективное значение тока СП, в измерительный стенд введен вольтметр эффективного значения HP 3400A с делителем (Option 508), измеряющий напряжения от 1 мВ до 300 В с частотой до 20 МГц и при пик-факторе до 10 : 1. Т-образный делитель с 50-Ом выходом согласует импедансы вольтметра и усилителя сигналов от пробника тока.

При наличии вышеописанного измерительного стенда измерение тока СП в типичном ИП не должно занимать более 10 - 15 мин. Изменения в ширине импульса приводят к изменению уровня тока СП, при этом наиболее ценные измерения будут соответствовать наихудше-

му случаю сочетания параметров выхода ИП. Измерения, проведенные при наихудшем сочетании условий, дают возможность точного сравнения по току СП различных ИП с учетом всего диапазона их рабочих режимов. Основная методология нахождения максимальных значений тока СП, соответствующих наихудшему случаю, состоит в выполнении измерений для ряда значений тока нагрузки. При этом измерения можно начинать, установив как максимальное значение нагрузки, так и минимальное.

Хотя можно предположить, что нет смысла измерять ток при холостом ходе, на самом деле это не так. Теоретически импульсная часть схемы ИП должна работать с нулевой длительностью импульсов при нулевой выходной мощности, и, следовательно, не будет генерировать ток СП. Однако на практике такого не бывает. Во многих мощных импульсных ИП используется специальная схема, например активная схема подгрузки, для поддержания нормальной работы широтно-импульсного модулятора в режиме холостого хода.

В некоторых случаях может оказаться желательным предусмотреть прогрев ИП до проведения измерений. В импульсных ИП, в которых используются обычные биполярные транзисторы либо биполярные транзисторы с изолированным затвором, характеристики будут зависеть от температуры. Первоначально, пока транзисторы холодные, они характеризуются меньшими временами переключения. Поскольку уровень тока СП пропорционален скорости переключения, такие ИП будут иметь больший уровень тока СП, пока они холодные, чем после прогрева. С другой стороны, при использовании МОП-транзисторов влияние температуры на ток СП не столь заметно. Условия применения ИП в конкретном приложении также должны учитываться в методике измерения его характеристик. Следует отметить, что, как правило, ИП должен соответствовать своим техническим характеристикам лишь после некоторого оговоренного времени прогрева.

---

Автор выражает благодарность Майку Бенесу, Роберту Бланду и Роберту Янгу за их вклад в разработку концепций, рассмотренных в данной статье.

Крейг Майер, управляющий по исследованиям и разработкам источников питания в фирме Hewlett-Packard (Рокавей, шт. Нью-Джерси), степень бакалавра со специализацией в биомедицинской технике он получил в Технологическом институте шт. Нью-Джерси (Ньюарк).