

УДК 53.082

Д. К. Кострин, С. А. Марцынюков, А. А. Ухов
Санкт-Петербургский государственный электротехнический
университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

Моделирование частотных характеристик высоковольтных делителей напряжения, применяемых в составе аппаратуры для контроля параметров электровакуумных приборов

На этапах испытания и тренировки мощных электровакуумных приборов требуется осуществлять контроль высоких напряжений с достаточно высокой точностью. Наиболее целесообразно использовать для решения данной задачи киловольтметры с цифровым выходом, имеющие высоковольтный делитель напряжения и электронное устройство, обрабатывающее получаемый аналоговый сигнал. Можно отметить, что разработка высоковольтного делителя для широкого диапазона напряжений и частот входного сигнала достаточно сложна вследствие целого ряда факторов, негативно влияющих на характеристики делителя. Наиболее подходящими для использования в рассматриваемых условиях являются компенсированные делители напряжения, построенные с применением сочетания высоковольтных резисторов и конденсаторов. Для уточнения частотных характеристик разработанных высоковольтных делителей напряжения было проведено моделирование с применением пакета автоматического проектирования OrCAD. Компенсированный делитель напряжения вносит достаточно небольшие искажения в форму импульса при преобразовании высокого входного напряжения в низкое выходное.

Измерение высокого напряжения, делитель напряжения, компенсированный делитель, частотная характеристика, форма импульса

На стадии испытаний мощных электровакуумных приборов, в частности рентгеновских трубок, необходим контроль анодного напряжения с погрешностью не более ± 1 кВ [1]. Превышение напряжения может повлечь за собой опасный для тестируемых приборов перегрев, пробой, а также появление более жесткого рентгеновского излучения. Недостаточное напряжение также недопустимо, так как не позволяет выявить все дефекты в изготовленных приборах, что может в дальнейшем сказаться на эксплуатационных характеристиках изделий. В связи с расширением номенклатуры импульсных рентгеновских приборов остро встает вопрос об измерениях параметров импульсного анодного напряжения длительностью 0.1...1 мс и даже менее. Важно измерение не только амплитуды импульса напряжения, но и глубины пульсаций, а также длительности импульса.

Наиболее современно, просто и экономически целесообразно техническое решение, использующее высоковольтный делитель напряжения (ДН) [2]–[6] и электронное устройство, представляющее

результат измерений импульсного или постоянного напряжения в цифровом виде.

Измерение напряжений амплитудой до 250 кВ с погрешностью не хуже ± 1 кВ при помощи полупроводникового измерительного устройства требует применения ДН с коэффициентом деления (КД) порядка 50 000.

Столь высокое значение КД обусловлено тем, что максимальное входное напряжение полупроводниковых измерительных средств обычно не превышает 5 В. При этом преобразование маломощного аналогового сигнала с амплитудой около 5 В в соответствующий цифровой код с погрешностью не более ± 0.5 % не представляет никаких проблем для современных электронных схем.

При этом воспроизводимое обеспечение указанного КД высоковольтного ДН в широком интервале рабочих напряжений является весьма сложной задачей. Влияние на ДН оказывает целый ряд факторов:

– температурный дрейф, обусловленный неравномерностью нагрева элементов ДН вследствие выделения в нем тепловой мощности;

– заметный коэффициент напряжения, проявляющийся при напряжениях, близких к номинальным для используемых элементов;

– разброс характеристик элементов ДН.

Данные факторы вызывают нелинейность передаточной функции ДН, а значит, и неверные результаты измерения, если в устройстве обработки не предусмотрено специальных мер.

К высоковольтному ДН предъявляются определенные требования: он должен иметь стабильный и не зависящий от режима работы КД; обеспечивать точное воспроизведение формы контролируемого напряжения; не влиять на режим работы исследуемой цепи.

В настоящее время используются три основных типа высоковольтных ДН:

- омический;
- емкостной;
- компенсированный.

Все типы ДН обладают как преимуществами, так и ограничениями, которые и обуславливают выбор того или иного типа ДН в конкретной ситуации.

При подаче на вход ДН синусоидального напряжения $U_1(t) = U_{1м} \sin(\omega t + \varphi_1)$ на его выводе спустя некоторое время после затухания переходных процессов будет $U_2(t) = U_{2м} \sin(\omega t + \varphi_2)$, где t – время; $U_{1м}$, $U_{2м}$ – амплитудные значения напряжения; ω – циклическая частота; φ_1 , φ_2 – начальные фазы напряжения.

При неизменных значениях $U_{1м}$ и φ_1 выходные параметры $U_{2м}$ и φ_2 будут зависеть от частоты $f = \omega/2\pi$. Так как в ДН всегда $U_{2м} \ll U_{1м}$, то в некотором частотном диапазоне КД практически постоянен и равен $N = U_{1м}/U_{2м}$.

Частотную характеристику ДН $H(t)$ достаточно трудно измерить, так как КД N , как правило, велик (более 1000). Поэтому измеряют передаточную функцию $G(t)$ или реакцию на прямоугольное воздействие на вход схемы. Реакция на прямоугольный импульс и частотная характеристика связаны между собой обратным преобразованием Лапласа (L^{-1})

$$G(t) = L^{-1} \left[\frac{1}{p} H(p) \right] = \frac{1}{2\pi j} \lim_{\omega \rightarrow \infty} \int_{c-j\omega}^{c+j\omega} e^{pt} \frac{1}{p} H(p) dp,$$

где p – комплексная переменная (оператор Лапласа); c – вещественная постоянная, абсцисса абсолютной сходимости.

Для ДН, частотная характеристика которого при $f \rightarrow 0$ принимает значение $1/N$, реакция на прямоугольный импульс при $t \rightarrow \infty$ стремится к такому же значению, поэтому реакцию на прямоугольный импульс удобно рассчитывать и измерять в нормированном виде

$$g(t) = \frac{G(t)}{G(t \rightarrow \infty)} = NG(t). \quad (1)$$

Из (1) очевидно, что реакция на прямоугольный импульс характеризует также передаточные свойства в зависимости от частоты. Пример нормированной колебательной реакции на прямоугольный импульс показан на рис. 1.

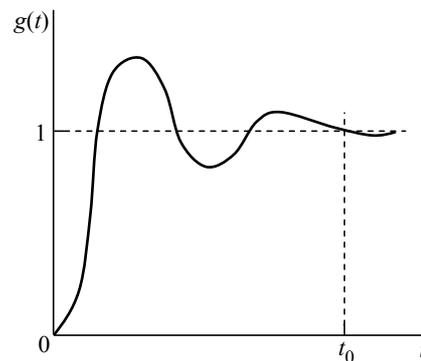


Рис. 1

Конструктивное исполнение низкочастотных ДН на напряжения до 300 кВ не вызывает затруднений, поскольку не предъявляются строгие требования по допустимому значению индуктивности. Паразитная емкость может быть уменьшена при низких напряжениях, однако предел уменьшения емкости ограничен недопустимостью коронного разряда, что достигается увеличением габаритных размеров элементов ДН. Уточненный расчет емкости ДН может быть проведен после подбора типа и числа резисторов, входящих в ДН, и только после эскизной проработки его конструкции в целом.

Высота ДН напрямую зависит от числа используемых в нем резисторов. Если коэффициент нагрузки по напряжению резисторов при максимальном измеряемом напряжении принять равным 0.9, то для контроля напряжения с амплитудой до 250 кВ включительно потребуется 28 резисторов, рассчитанных на номинальное напряжение 10 кВ. Рабочий ток ДН должен существенно превышать возможные токи утечек в обход ДН и быть достаточным для обеспечения линейной передаточной характеристики входного усилителя.

Необходимо отметить, что конденсаторы, также входящие в конструкцию компенсированного ДН (КДН), имеют существенно большие

габариты, поэтому целесообразно сначала выбрать тип конденсаторов, а затем подобрать для него наиболее подходящий тип резисторов.

Эскиз одной из возможных конструкций КДН приведен на рис. 2 (1 – пробка резервуара для расширяющегося масла; 2 – высоковольтный ввод; 3 – резисторы высоковольтного плеча; 4, 5 – конденсаторы высоковольтного плеча; 6 – корпус делителя; 7 – резистор низковольтного плеча; 8 – конденсатор низковольтного плеча; 9 – основание; 10 – разъем; 11 – плата буфера). Пластиковая труба диаметром 150 мм закреплена на электрической платформе с ножками. Внутри пластиковой трубы помещается малая пластиковая трубка с размещенным внутри нее высоковольтным плечом ДН, образованным резисторами R_1 и конденсаторами C_1 . Для соединения отдельных компонентов высоковольтной части КДН используется пайка.

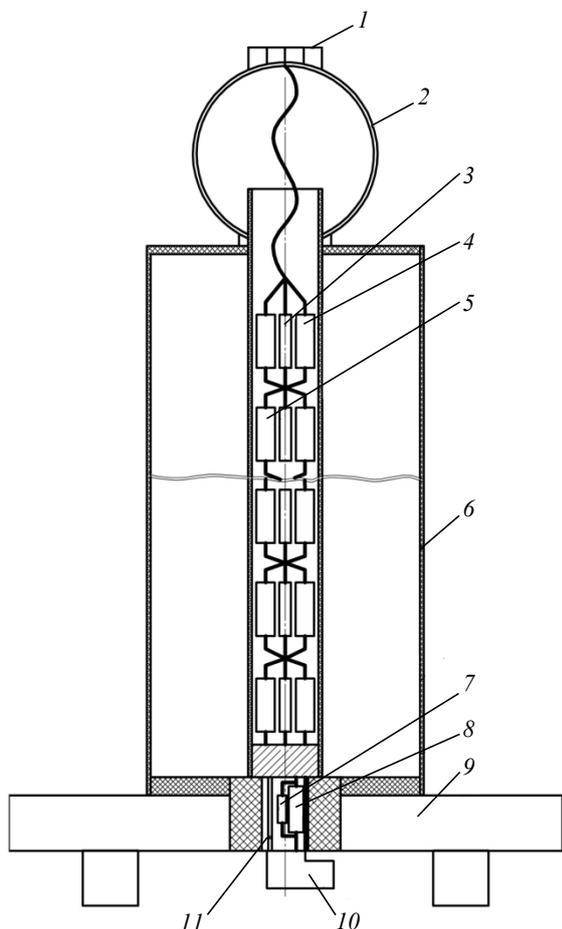


Рис. 2

Обе трубы сообщаются и заполнены трансформаторным маслом. В верхней части ДН расположен металлический шар, который служит резервуаром для расширяющегося при нагреве трансформаторного масла и одновременно выступает в качестве высоковольтного ввода.

Большая труба с обоих торцов заглушена диэлектрическими вставками. В нижней вставке предусмотрено отверстие, в которое вставляется заглушка с низковольтным плечом КДН – резистором R_2 и конденсатором C_2 , а также буфером. К этой же заглушке монтируется разъем для подключения измерительного кабеля длиной 10 м. К контактам низковольтного плеча КДН также можно подключить защитный варистор с классификационным напряжением порядка 18 В, защищающий низковольтную часть прибора от перенапряжений.

Чисто омический ДН из-за наличия распределенных паразитных емкостей между компонентами высоковольтного плеча по отношению к «земле» и относительно друг друга превращается в фильтр нижних частот (ФНЧ). Это приводит к тому, что высоковольтные переменные и импульсные сигналы после прохождения ДН искажаются. Для того чтобы исправить ситуацию, такие ДН компенсируют.

Кроме того, в этом случае резисторы и конденсаторы в высоковольтном плече КДН несут еще одну важную функцию – выравнивание напряжений на каждом элементарном звене. Неоднородность распределения напряжения на отдельных звеньях вызвана тем, что элементы всегда имеют разброс по сопротивлению или емкости. В общем случае оптимальная компенсация получается при выполнении условия

$$(R_1 + R_2)/R_2 = (C_1 + C_2)/C_1, \quad (2)$$

в случае равенства КД по R и по C .

В реальных условиях равенство (2) может нарушаться наличием паразитных емкостей и сопротивлений, а также измерительными приборами с линией связи в цепи низковольтного плеча ДН. В том случае, если емкость C_1 достаточно велика, емкостью по отношению к «земле» можно пренебречь. Параметрами, нарушающими равенство (2), со стороны низковольтного плеча ДН обычно выступают:

- емкость по отношению к «земле»;
- сопротивление и емкость соединительного кабеля;
- входное сопротивление и емкость осциллографа или другого измерительного прибора (в данном случае это входное сопротивление операционного усилителя).

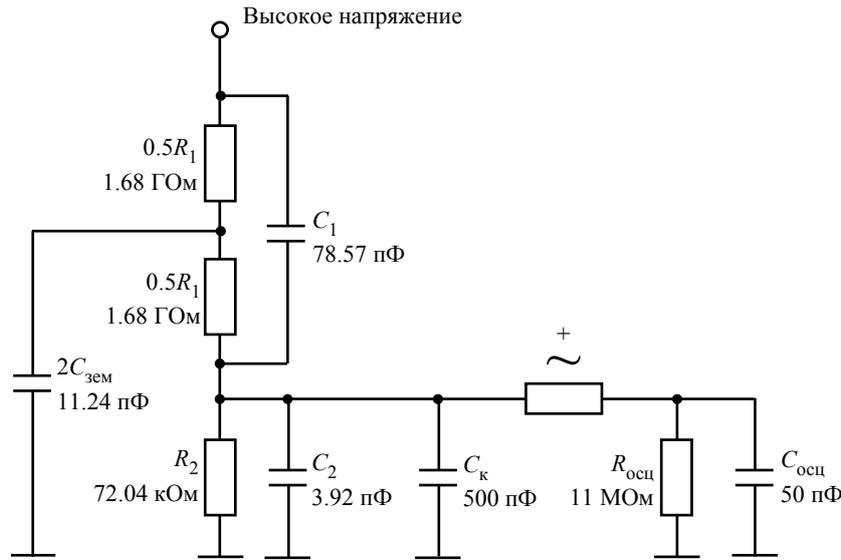


Рис. 3

Для того чтобы получить хорошую компенсацию в ДН, необходимо выполнение условия $C_1 \gg C_{зем}$, где $C_{зем}$ – емкость ДН по отношению к «земле». Идеальная компенсация получается при условии $C_1/C_{зем} \rightarrow \infty$, но это неприемлемо по двум причинам: во-первых, из-за сильного влияния такого ДН на измеряемую цепь, а во-вторых, из-за того, что большие значения емкости высоковольтного конденсатора C_1 приводят, соответственно, к большим габаритным размерам и массе КДН, а также к его высокой стоимости. Поэтому отношение $C_1/C_{зем}$ должно равняться какому-то конечному, небольшому числу. Удовлетворительные результаты получаются уже при $C_1/C_{зем} = 3$.

Эквивалентная схема измерительной цепи с указанием номиналов элементов, в соответствии с которой проводились расчет и дальнейшее моделирование работы устройства, приведена на рис. 3.

Моделирование амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) разных типов ДН проводилось с использованием пакета автоматического проектирования OrCAD. Необходимо отметить, что хотя этот пакет считается одним из лучших среди профессионалов, он предназначен для разработки низковольтных полупроводниковых устройств и не учитывает некоторые эффекты, проявляющиеся при высоких напряжениях – коэффициент напряжения, паразитные емкости между элементами и др. Тем не менее, моделирование позволяет выявить общие закономерности в протекании физических процессов в цепях и получить приближенные к реальности картины происходящего.

Моделирование позволяет увидеть, какие изменения произойдут с АЧХ при введении в цепь сосредоточенной емкости по отношению к «земле» при компенсации ДН. В процессе моделирования были исследованы АЧХ следующих ДН:

- идеального омического;
- омического с паразитной емкостью на «землю»;
- емкостного;
- компенсированного;
- компенсированного с паразитной емкостью на «землю».

Принципиальная схема идеального омического ДН (рис. 4) не обладает паразитными элементами, поэтому его АЧХ на всех частотах имеет вид прямой линии, т. е. КД такого ДН постоянен при любых частотах входного воздействия, и такой ДН идеальным образом повторяет форму входного воздействия, не внося никаких искажений.

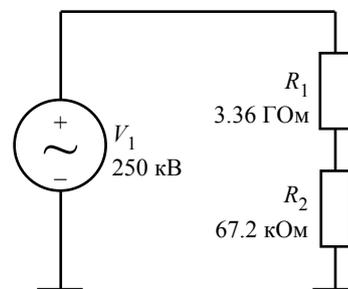


Рис. 4

На рис. 5 приведена принципиальная электрическая схема омического ДН с паразитной емкостью на «землю». Очевидно, что в этом случае схема представляет собой ФНЧ первого порядка.

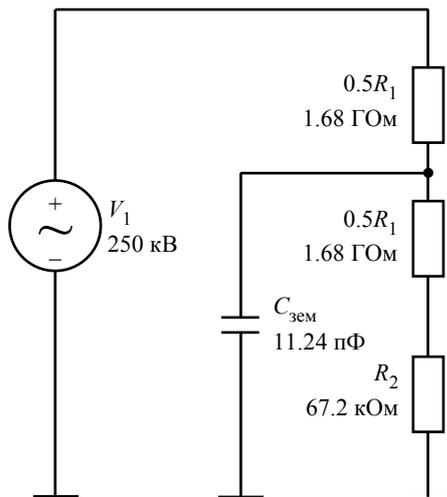


Рис. 5

На рис. 6 представлена АЧХ такого ДН, имеющая типичный вид АЧХ для ФНЧ. Частота среза полученного ФНЧ составляет около 17 Гц. Следовательно, данный ДН не подходит для контроля импульсных сигналов, поскольку КД такого ДН быстро растет с увеличением частоты и на частотах свыше 10 кГц стремится к бесконечности.

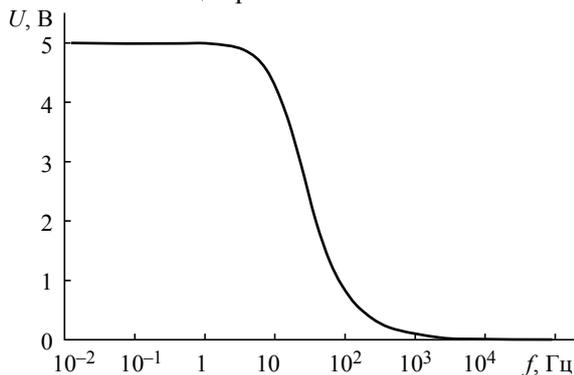


Рис. 6

Рассмотрим чисто емкостной ДН, который обладает хорошими характеристиками на высоких частотах. Электрическая цепь такого делителя представлена на рис. 7, а его АЧХ – на рис. 8.

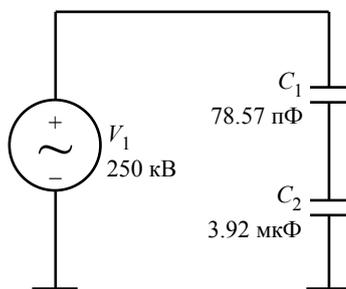


Рис. 7

АЧХ емкостного ДН обладает формой, аналогичной фильтру верхних частот (ФВЧ). Такой ДН хорошо работает на сравнительно высоких частотах и непригоден для контроля постоянного напряжения.

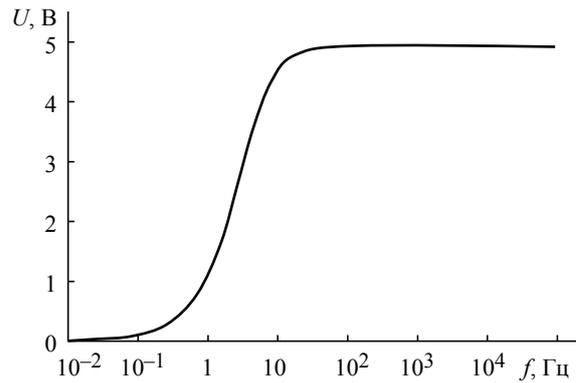


Рис. 8

Для получения требуемой АЧХ необходимо совместить омический ДН с емкостным, в этом случае действие ФНЧ будет скомпенсировано действием ФВЧ. Принципиальная схема такого высоковольтного КДН приведена на рис. 9. Наличие паразитной емкости по отношению к «земле» пока не рассматривается.

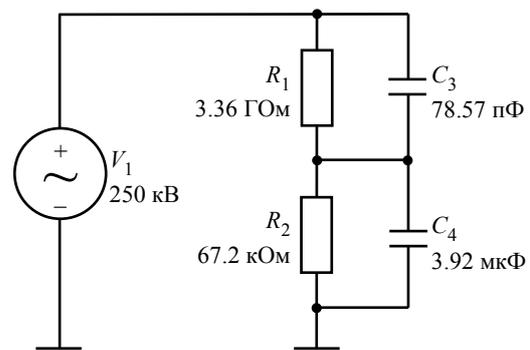


Рис. 9

На рис. 10 приведена АЧХ КДН. Она аналогична по виду АЧХ идеального омического ДН с той лишь разницей, что имеет небольшой подъем вблизи точки 1 Гц. Этот подъем вызван не совсем точным выполнением равенства КД по сопротивлениям и по емкостям, что всегда происходит в реальных условиях из-за действия дестабилизирующих факторов (температура, паразитное взаимодействие, влажность) и разброса сопротивлений и емкостей реальных резисторов и конденсаторов.

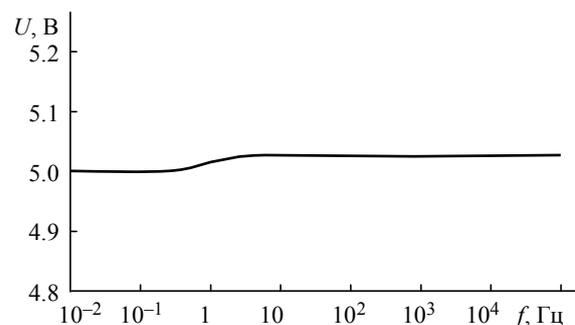


Рис. 10

Введем теперь в модель сосредоточенную емкость относительно «земли», как это было сделано в случае омического ДН. Принципиальная схема КДН с паразитной емкостью представлена на рис. 11.

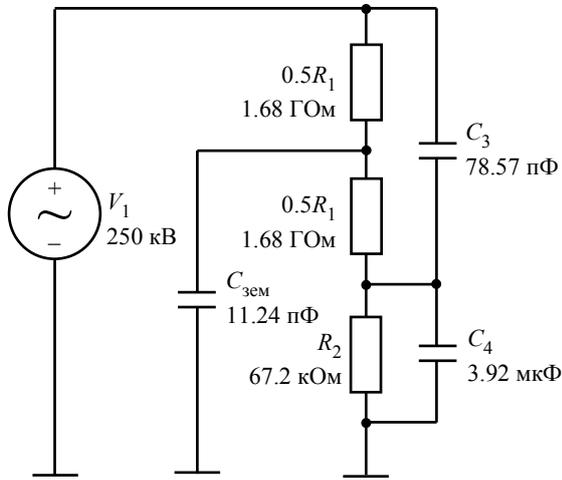


Рис. 11

В случае постоянного напряжения, а также на малых частотах работает резистивная ветвь КДН (рис. 12). С увеличением частоты входного сигнала АЧХ начинает спадать, т. е. сказывается действие ФНЧ. С ростом частоты в работу включается емкостная ветвь КДН, благодаря чему АЧХ начинает выравниваться и на частотах свыше 100 Гц КД вновь принимает постоянное значение, не зависящее от частоты. Таким образом, АЧХ КДН имеет небольшой провал в области частот – порядка единиц герц. Уменьшение КД в экстремуме кривой АЧХ не превышает 3.5 %.

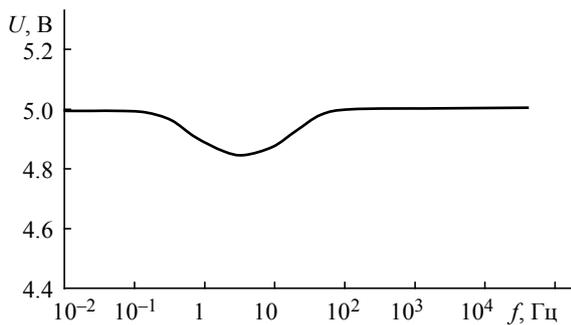


Рис. 12

Как было упомянуто ранее, идеальный ДН имеет частотно независимую характеристику передачи, т. е. его КД постоянен для любой частоты входного сигнала. Введение в модель сосредоточенной емкости по отношению к «земле» приводит к тому, что КД приобретает сильнейшую частотную зависимость и на частотах свыше десятков герц неприменим. КД такого делителя стре-

мится к бесконечности на высоких частотах. И наоборот, чисто емкостной ДН не пригоден для использования на малых частотах и при постоянном уровне напряжения.

КДН обладает практически постоянным КД во всем требуемом частотном диапазоне. На постоянном токе (частоты менее 1 Гц) КДН обладает характеристикой, подобной идеальному омическому ДН, т. е. его КД постоянен. С увеличением частоты КД такого ДН начинает незначительно уменьшаться и асимптотически стремиться к некому постоянному значению, при котором выходное напряжение ДН составляет чуть больше 5 В при максимальном уровне входного напряжения, равном 250 кВ, т. е. КД незначительно уменьшается.

Введение в модель ДН сосредоточенной емкости по отношению к «земле» приводит к небольшому провалу АЧХ в области достаточно малых частот. В целом же АЧХ такого делителя близка к АЧХ идеального делителя, т. е. достигается требуемый эффект компенсации.

Очевидно, что при очень больших значениях емкости высоковольтной части КДН, т. е. при $C_1/C_{зем} \rightarrow \infty$, провал на АЧХ уменьшается до нуля – получается точно такая же частотная характеристика, как в случае идеального омического ДН.

Создадим условия недокомпенсации ДН, уменьшив емкость C_1 на 50 % от рассчитанного значения, и перекомпенсации, увеличив эту же емкость также на 50 %. В первом случае емкость C_1 составит около 39 пФ, во втором – около 118 пФ. Результаты моделирования представлены на рис. 13 (1 – достаточная компенсация; 2 – недокомпенсация; 3 – перекомпенсация).

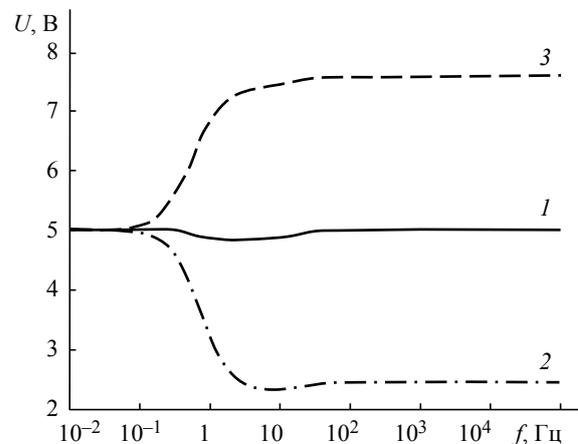


Рис. 13

Очевидно, что недостаточная компенсация и перекомпенсация ДН ведут к сильному изменению КД в зависимости от частоты.

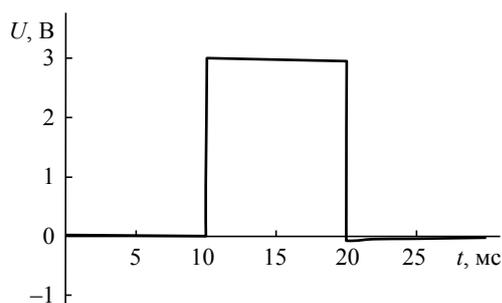


Рис. 14

Рассмотрим подачу на вход КДН близкого к идеальному прямоугольного импульса с амплитудой 150 кВ и длительностью 10 мс (что соответствует частоте 100 Гц). Результат моделирования реакции КДН представлен на рис. 14.

КДН вносит небольшие искажения при преобразовании высокого входного напряжения в

низкое выходное. На более высоких частотах искажения уменьшаются, а на более низких – остаются примерно на том же уровне.

Моделирование показало, что КДН дает возможность обеспечить низкий уровень искажений при преобразовании импульсных напряжений в отличие от чисто омического и чисто емкостного ДН. Можно отметить, что проведенное моделирование в силу многих допущений об идеальности протекания того или иного процесса в рассматриваемой схеме, хоть и не имеет строгого соответствия реальной ситуации, позволяет достаточно точно оценить требуемые характеристики электрической схемы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Производственный контроль медицинских рентгенодиагностических трубок серии БД-150 / Ю. А. Быстров, Д. К. Кострин, Н. О. Перес Васкес, А. А. Ухов // Биотехносфера. 2013. № 4. С. 60–64.
2. Шваб А. Измерения на высоком напряжении: Измерительные приборы и способы измерения. М.: Энергоатомиздат, 1983.
3. Исакова Ю. И., Пушкарев А. И., Холодная Г. Е. Дифференциальный высоковольтный делитель напряжения // Приборы и техника эксперимента. 2011. № 2. С. 39–43.
4. Францев С. М., Кавторов А. Ю. Разработка и исследование емкостного делителя напряжения для измерения величин пробивных напряжений системы зажигания ДВС // Уральский науч. вест. 2018. Т. 4, № 2. С. 16–18.
5. High precision high voltage divider and its application to electron beam ion traps / W. D. Chen, J. Xiao, Y. Shen, Y. Q. Fu // Review of Scientific Instruments. 2008. Vol. 79. P. 123304.
6. Merev A., Kalenderli Ö. The construction of a DC high voltage precision divider // J. of Electrostatics. Vol. 67, № 5. P. 741–745.

D. K. Kostrin, S. A. Martsinukov, A. A. Uhov
Saint Petersburg Electrotechnical University

MODELING OF FREQUENCY CHARACTERISTICS OF HIGH-VOLTAGE DIVIDERS USED AS PART OF EQUIPMENT FOR MONITORING THE PARAMETERS OF ELECTROVACUUM DEVICES

At the testing and training stages of high-power electrovacuum devices, it is necessary to monitor high voltages with sufficiently high accuracy. It is most appropriate to use kilovoltmeters with a digital output that have a high-voltage divider and an electronic device that processes the received analog signal to solve this problem. It can be noted that the development of a high-voltage divider for a wide range of input signal voltages and frequencies is quite a difficult task due to a number of factors that negatively affect the characteristics of the divider. The most suitable for use in the conditions under consideration are compensated voltage dividers constructed using a combination of high-voltage resistors and capacitors. To clarify the frequency characteristics of the developed high-voltage dividers, modeling was performed using the OrCAD automatic design package. The compensated voltage divider introduces fairly small distortions to the pulse shape when converting a high input voltage to a low output voltage.

High voltage measurement, voltage divider, compensated divider, frequency response, pulse shape