

СПОСОБЫ УМЕНЬШЕНИЯ КОММУТАЦИОННЫХ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ В МНОГОДЕКАДНЫХ ИНДУКТИВНЫХ ДЕЛИТЕЛЯХ НАПРЯЖЕНИЯ

Андреев С.А., Ким В.Л.

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск, Россия (634050, Томск, пр. Ленина, 30), e-mail: kimval11@rambler.ru

Для решения ряда прикладных задач необходимо уменьшать напряжение переменного тока в звуковом и ультразвуковом диапазонах частот. Наиболее приемлемыми метрологическими характеристиками в этом диапазоне частот обладают индуктивные делители напряжения. В современных индуктивных делителях напряжения возникают коммутационные перенапряжения в сотни и тысячи вольт, оказывающие влияние на нагрузку, в связи с этим были созданы методы уменьшения перенапряжения. В статье описаны и сравнены два метода решения этой проблемы: один основан на сохранении магнитного потока в декадах многокаскадного индуктивного делителя напряжения во время переключения отводов делительных обмоток контактами электромагнитных реле, другой – на использовании электронных коммутаторов, работающих параллельно с основными коммутационными элементами. В результате исследования было выявлено, что второе техническое решение имеет лучшее быстродействие и надежность, поэтому оно весьма перспективно при построении широкополосных программируемых индуктивных делителей напряжения с микропроцессорным управлением, где сравнительно просто можно обеспечить управление работой электромагнитных реле и аналоговых интегральных коммутаторов, не вносящих дополнительные частотные искажения.

Ключевые слова: индуктивный делитель напряжения, коммутационное перенапряжение, электромагнитные реле, электронные коммутаторы.

METHODS FOR REDUCING SWITCHING SURGES IN MULTI-DECADE INDUCTIVE VOLTAGE DIVIDERS

Andreev S.A., Kim V.L.

National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia (634050, Tomsk, Lenin Avenue, 30), e-mail: kimval11@rambler.ru

The voltage of the alternating current in the sonic and ultrasonic frequency ranges is used solve a number of problems. Inductive voltage dividers have the most appropriate metrological characteristics in this frequency range. Switching surges of hundreds or thousands volts occur in the modern inductive voltage dividers, affecting the load. In this turn methods for reducing the overvoltage are used. This article describes and compares two methods for solving the problem. The first one is based on the preservation of the magnetic flux in the decades of a multistage inductive voltage divider during switching of winding taps by contacts of electromagnetic relays. Another method is based on the usage of electronic switches working in parallel with the main switching elements. The study shows that the second solution has better performance and reliability, therefore it is quite promising in the construction of broadband programmable inductive voltage dividers with microprocessor control, because control of electromagnetic relays and analog integrated switches that do not introduce additional frequency distortion are easily provided there.

Keywords: inductive voltage divider, switching surge, electromagnetic relays, electronic switches.

Наиболее точными делителями переменного напряжения в звуковом и ультразвуковом диапазонах частот являются индуктивные делители напряжения (ИДН). К одному из основных недостатков современных программируемых (кодоуправляемых) ИДН следует отнести коммутационные перенапряжения в сотни и тысяч вольт, оказывающие негативное влияние на нагрузку [2, 4].

Известны способы уменьшения этих перенапряжений, основанные на сохранении магнитного потока в декадах многокаскадного ИДН во время переключения отводов делительных обмоток контактами электромагнитных реле (ЭМР) [1]. С этой целью в ИДН первого типа (ИДН1), содержащем каскадно соединенные предыдущий и последующий

декадные делительные обмотки $L1$, $L2$, выполненные на магнитопроводах тороидального типа, введены дополнительные переключающие контакты $K12.1$, $K12.2$ и резисторы $R1$, $R2$ (рис. 1). При этом отводы первой (предыдущей) декадной делительной обмотки $L1$ коммутируются основными контактами реле $K0 - K10$, а второй (последующей) – контактами $K13 - K23$. Связь между декадами в статическом режиме осуществляется как вышеупомянутыми контактами $K0 - K10$, так и посредством контактов $K11.1$, $K11.2$. Последние обеспечивают параллельное и согласное подключение делительной обмотки $L2$ к одной из секций обмотки $L1$.

Напряжение в нагрузке Z_H зависит от устанавливаемого значения коэффициента передачи

$$K_{\Pi} = \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{U_{\text{ВХ}}}$$

где $U_{\text{ВХ}}$, $U_{\text{ВЫХ}}$ – входное и выходное напряжения соответственно.

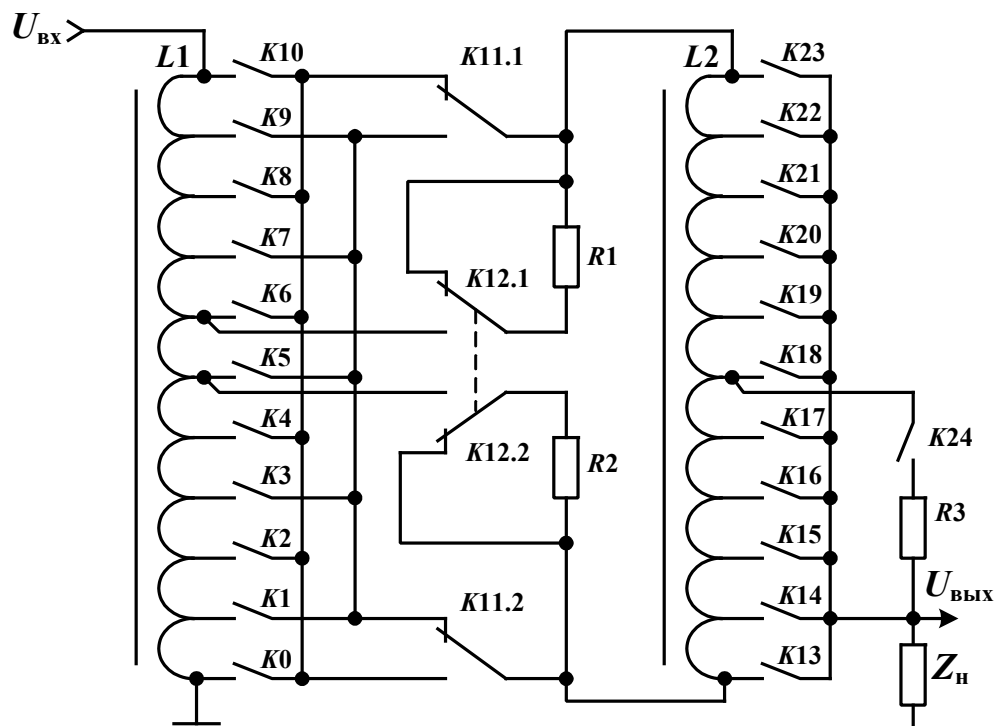


Рис. 1. Уменьшение перенапряжений посредством коммутируемых резисторов

Заметим, что при любом коэффициенте передачи ИДН всегда замкнуты два соседних контакта из группы контактов $K0 - K10$ и только один из контактов группы $K13 - K23$.

В переходном (динамическом) режиме, когда осуществляется установка нового значения коэффициента передачи, на время, несколько большее времени переключения основных контактов $K0 - K10$, последующая обмотка $L2$ посредством двух резисторов $R1$, $R2$ и дополнительных переключающих контактов $K12.1$, $K12.2$ подключается к средней секции предыдущей обмотки $L1$. Этим и достигается сохранение магнитного потока в магнитопроводе второй декады. После завершения переключений основных контактов

дополнительные контакты $K_{12.1}$, $K_{12.2}$ возвращаются в исходное состояние.

Безразрывное подключение нагрузки к обмотке L_2 обеспечивают резистор R_3 и дополнительный замыкающий контакт K_{24} . Последний замыкается раньше и размыкается позже основных контактов второй декады $K_{13} - K_{23}$.

Данное техническое решение улучшает параметры переходного процесса без существенного влияния на частотные характеристики ИДН, так как малые паразитные емкости дополнительных переключающих контактов $K_{12.1}$, $K_{12.2}$ не приводят к существенному росту шунтирующих емкостей секций первой декады. Как известно, последние определяют искажения амплитудно-частотной характеристики ИДН [5, 6].

Важным достоинством данного варианта улучшения качества переходного процесса является его применимость в широкополосных ИДН ввиду малости паразитных параметров дополнительных контактов K_{11} , K_{12} и универсальность, т.е. возможность его применения в делителях, как с ручным, так и программным управлением.

К недостаткам рассмотренного способа следует отнести:

1. Низкое быстродействие из-за большого времени установления выходного напряжения индуктивного делителя напряжения. Это время, определяемое как длительность времени от момента подачи сигнала управления на изменение коэффициента передачи до момента времени, когда отклонение выходного напряжения от установившегося значения не превышает допустимого отклонения, равно

$$t_{\text{уст}} = t_{n1} + t_{n2},$$

где t_{n1} и t_{n2} – время переключения основных контактов и дополнительных контактов соответственно. Эти времена могут достигать в зависимости от типа реле десятки и сотни миллисекунд.

2. Перенапряжения в нагрузке в переходном режиме, обусловленное тем, что контакты $K_{12.1}$, $K_{12.2}$ при изменении коэффициента передачи первой декады подключают последующий обмотку L_2 второй декады и нагрузку к средним отводам предыдущей обмотки L_1 . На этих отводах напряжения превышают минимальное напряжение первой декады в 5 раз. Такое же перенапряжение наблюдается и при изменении коэффициента передачи второй декады, когда нагрузка Z_H подключается посредством замыкающего контакта K_{24} к среднему отводу обмотки L_2 этой декады. Такие перенапряжения могут быть опасными для нагрузки и контактов электромагнитных реле.

Рассмотрим динамический режим работы двухдекадного ИДН1, делительные обмотки которого выполнены на отдельных магнитопроводах, при изменении коэффициента передачи от 0,30 до 0,10. В исходном состоянии замкнуты контакты K_3 , K_4 первой декады и $K_{13} - K_{23}$ второй.

На рис. 2 приведены графики переходных процессов (для огибающей синусоидального напряжения) при $U_{\text{вх}} = 1$ В амплитудного значения. Момент времени $t_0 = 0$ соответствует приходу импульса запуска, инициирующего изменение коэффициента передачи. В интервале $t_0 - t_3$ срабатывают контакты $K12.1, K12.2$, затем при $t = t_3$ размыкаются контакты $K3, K4$. В момент времени $t = t_4$ замыкаются контакты $K1, K2$, устанавливающие новое состояние делителя. На этом переходный режим не завершается, так как контакты $K12.1, K12.2$ должны вернуться в исходное состояние. Размыкание этих контактов происходит при $t = t_5$. Таким образом, из рис. 2 видно, что время установления ИДН1 равно

$$t_{\text{уст1}} = t_5 - t_0 = 2(t_{\text{ср}} + t_{\text{отп}}), \quad (1)$$

где $t_{\text{ср}}, t_{\text{отп}}$ – время срабатывания и время отпускания ЭМР.

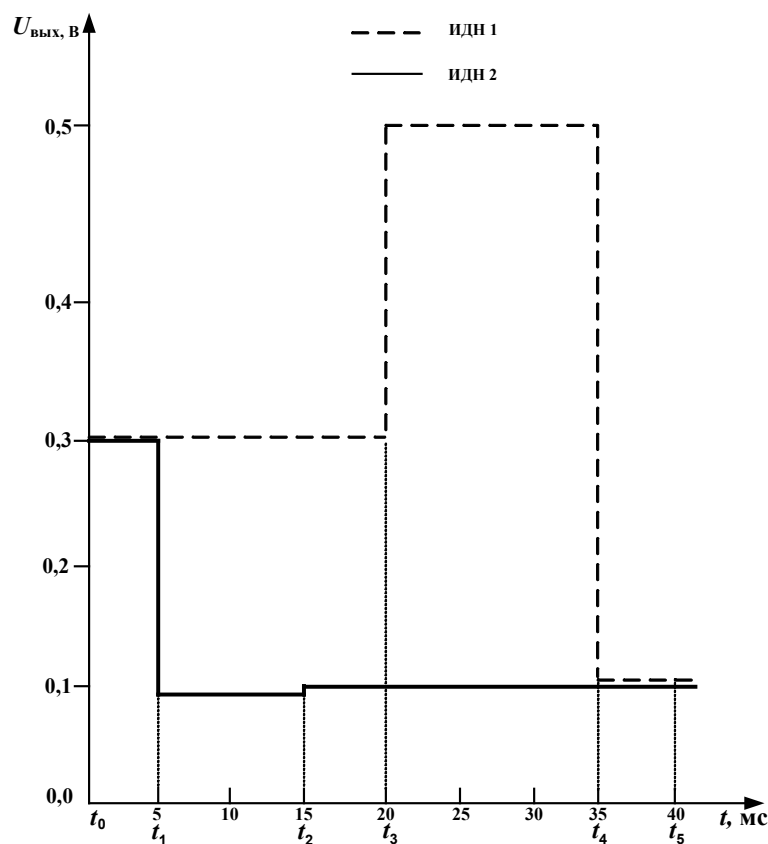


Рис. 2. Графики переходных процессов ИДН1 и ИДН2

Подключение последующей обмотки в переходном режиме к отводам средней секции предыдущей обмотки приводит к появлению выброса напряжения с амплитудой 0,5 В, в пять раз превышающей новое значение выходного напряжения.

Другой способ борьбы с переходными процессами [3] заключается в использовании электронных коммутаторов, работающих параллельно с основными коммутационными элементами. Рассмотрим двухдекадный делитель ИДН2, выполненный также на отдельных магнитопроводах (рис. 3). С целью упрощения полагаем, что коммутация отводов 0...10 делительных обмоток $L1, L2$ осуществляется многопозиционными переключателями $S1, S2$.

Во время переключения переключателя $S1$ последующая обмотка $L2$ оказывается подключенной к новой секции предыдущей обмотки $L1$ посредством аналоговых коммутаторов $DA1 - DA4$ с входами $In(.)$ и резисторов $R1, R2$. Поэтому в переходном режиме магнитный поток в магнитопроводе второй декады сохраняется, и перенапряжения на выходе делителя отсутствуют. Заметим, что в качестве основных коммутационных элементов $S1$ и $S2$ могут быть использованы контакты ЭМР.

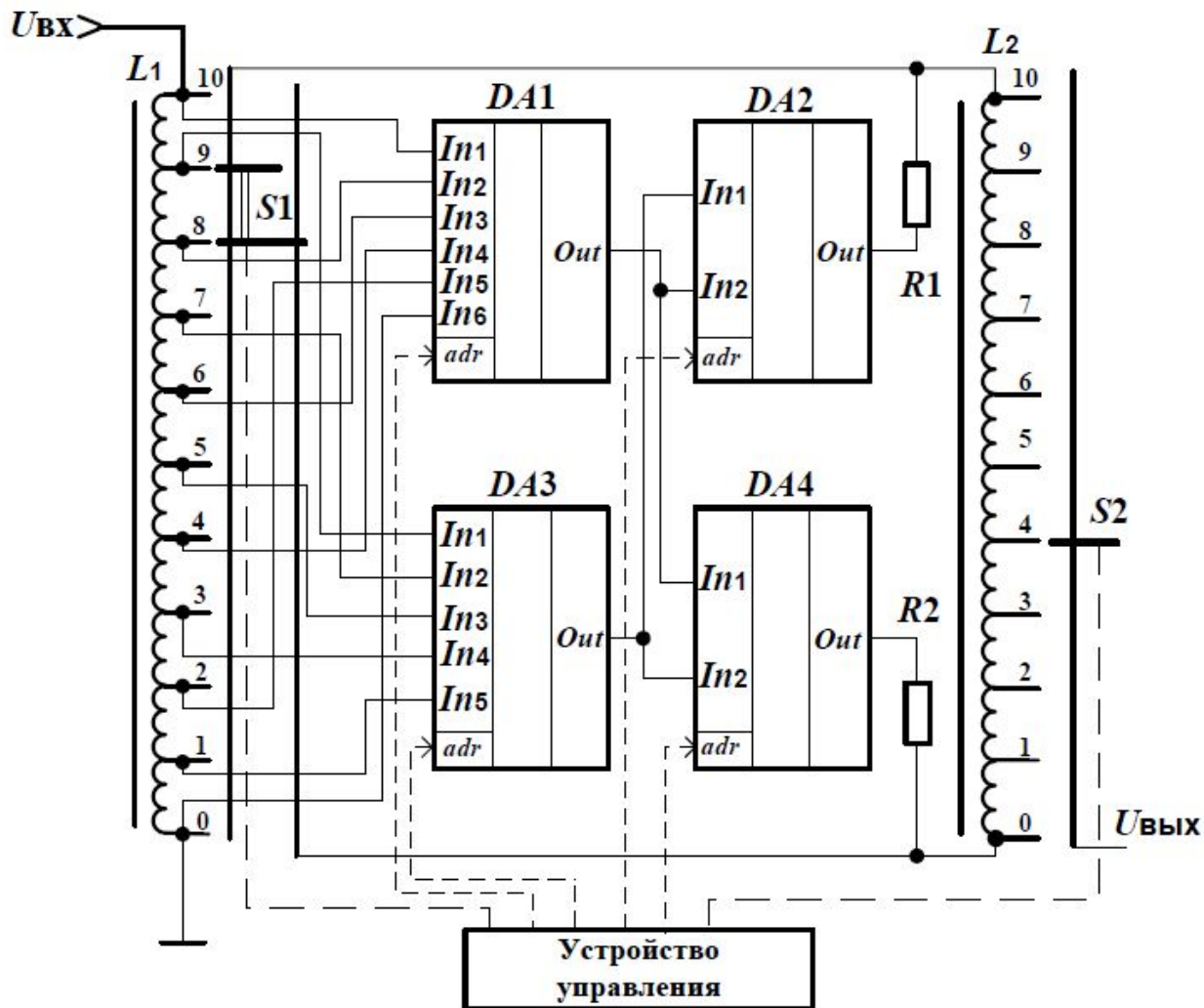


Рис. 3. ИДН с аналоговыми коммутаторами

Быстродействие устройства определяется временем переключения многопозиционного переключателя, аналоговых коммутаторов и последовательностью работы последних. Повышение быстродействия достигается за счет использования электронных аналоговых коммутаторов и их параллельной работы с многопозиционным переключателем. Так как быстродействие аналоговых коммутаторов превышает быстродействие многопозиционного переключателя более чем в тысячу раз, то время установления ИДН определяется только временем срабатывания многопозиционного переключателя $t_{п1}$.

Использование аналоговых коммутаторов позволяет устранить и перенапряжения в

нагрузке. На рис. 4 приведена схема коммутации отводов предыдущей обмотки $L1$ при изменении коэффициента передачи. Предыдущая декада представлена в виде последовательного соединения ЭДС секций e_i ($i = \overline{1,10}$), включенных между отводами $n, n+1$, где $n = \overline{0,9}$. С целью упрощения на рис. 4 показана схема коммутации только нижних отводов 0, 1, 2 и 3. При указанных состояниях контактов К0 – К3 многопозиционного переключателя, контактов (каналов) аналоговых коммутаторов АК0 – АК3 и подключения нагрузки Z_n к верхнему отводу последующей обмотки $L2$ выходное напряжение равно $0,3U_{вх}$. При установке другого выходного напряжения, например, $0,1U_{вх}$ переключение всех контактов происходит синхронно. Учитывая, что для любого коммутатора время срабатывания (замыкания) всегда больше времени отпускания (размыкания), то первыми размыкаются АК2 и АК3, затем замыкаются АК0 и АК1, подключая обмотку $L2$ через резисторы $R1$ и $R2$ к нижним отводам 0, 1 обмотки $L1$. Размыкание контактов К2 и К3 не приводит к существенному изменению магнитного потока в обмотке $L2$. Последними замыкаются К0, К1, и система коммутации окончательно переходит в новое состояние.

По графикам переходных процессов, представленных на рис. 2, видно, что в данном устройстве при $t = t_1$ размыкаются контакты К2 и К3, а при $t = t_2$ замыкаются контакты К0 и К1. Таким образом, время установления ИДН2 равно

$$t_{уст2} = t_2 - t_0 = t_{срп}, \quad (2)$$

где $t_{срп}$ – время срабатывания многопозиционного переключателя.

Из рис. 2 следует, что быстродействие ИДН2 повышается более чем в два раза, по сравнению с ИДН1 ($t_{уст1} = 40$ мс, $t_{уст2} = 15$ мс). Отметим также, что из рис. 2 видно другое важное достоинство ИДН2 – отсутствие перенапряжения на выходе делителя.

В переходном режиме в интервале $t_{21} = t_2 - t_1$, равном разности между временем срабатывания и временем отпускания многопозиционного переключателя, выходное напряжение не превышает нового установившегося значения. Уменьшение выходного напряжения в указанном выше интервале обусловлено падениями напряжений на резисторах. Такое уменьшение напряжения не оказывает негативного влияния на работу коммутаторов и нагрузки.

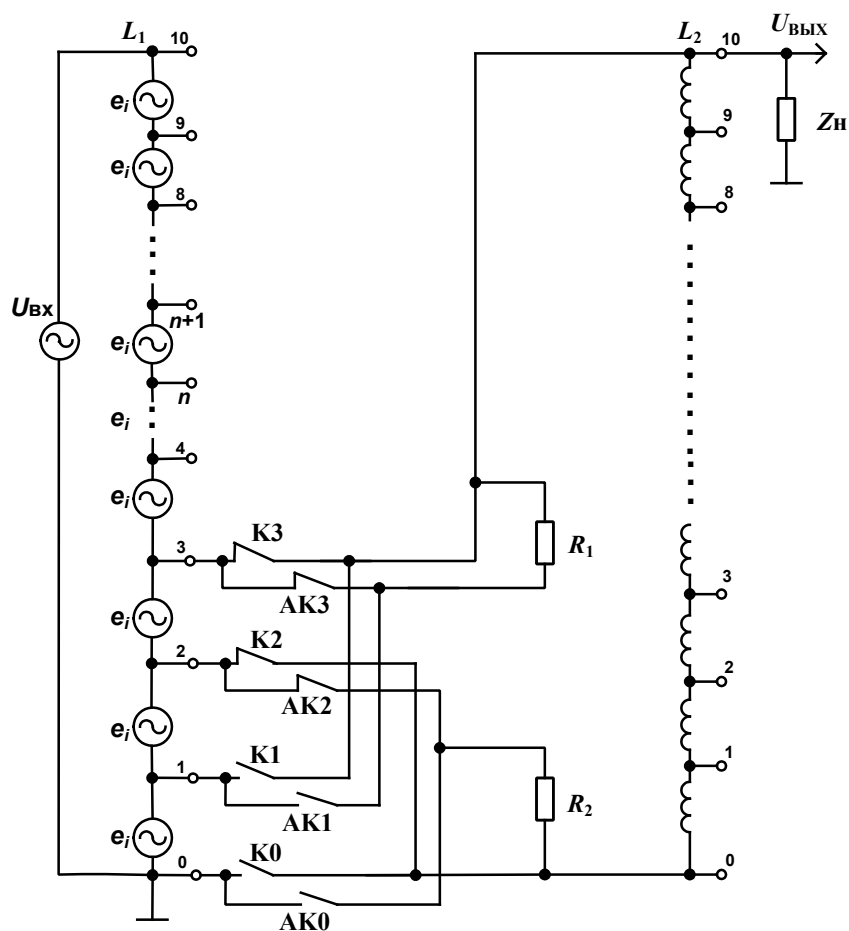


Рис. 4. Упрощенная схема коммутации двухдекадного ИДН

Параллельное переключение всех коммутаторов упрощает работу устройства управления, так как требуется всего лишь одновременная выдача управляющих сигналов в момент времени t_0 на адресные входы adr аналоговых коммутаторов и многопозиционных переключателей (на рис. 4 не показаны). Заметим, что в ИДН1 формируется три последовательных сигнала управления в моменты времени $t_0, t_2,$ и t_4 . Поэтому быстродействие ИДН2 выше. Эти выводы подтверждаются расчетными по формулам (1) и (2) и экспериментальными данными (таблица 1).

Таблица 1

Расчетные и экспериментальные значения времени установления ИДН1 и ИДН2

Тип устройства	Время установления $t_{уст}$, мс	
	Расчетное	Экспериментальное
ИДН2	15	19
ИДН1	40	47

Как видно из таблицы время установления ИДН2 в 2,5 раза меньше времени установления ИДН1.

Таким образом, введение четырех дополнительных аналоговых коммутаторов, работающих параллельно с основными коммутационными переключателями, уменьшает

время установления индуктивного делителя напряжения, т. е. увеличивает быстродействие, а также повышает его надежность.

Такое техническое решение весьма перспективно при построении широкополосных программируемых ИДН с микропроцессорным управлением, где сравнительно просто можно обеспечить управление работой ЭМР и аналоговых интегральных коммутаторов, не вносящих дополнительные частотные искажения.

Работа выполнена в рамках ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы». Государственный контракт № 14.578.21.0032.

Список литературы

1. Калиниченко Н.П., Коновалов В.Е., Ким В.Л., Сухов А.С. Индуктивный делитель напряжения // А.с. СССР № 909644, заявл. 18.07.80; опубл. 28.02.82, Бюл. № 8.
2. Ким В.Л. Методы и средства повышения точности индуктивных делителей напряжения: монография. – Томск: Изд-во Томского политехн. ун-та, 2009. – 214 с.
3. Ким В.Л., Меркулов С.В. Индуктивный делитель напряжения // Патент России № 60785, заявл. 02.05.2006; опубл. 27.01.2007, Бюл. № 1.
4. Hill J.J. Optimized Design for a Low-Frequency Inductive Voltage Divider // IEEE Trans. on Instrum. and Meas. – 1972. – Vol. IM-21, № 4. – P. 368–372.
5. Kim V.L. Calculation of the Errors of an Inductive Voltage Divider with a Balancing Winding // Measurement Techniques. – 2004. – Vol. 47, № 10. – P. 1005–1009.
6. Skubis T. Optimal Multifilar Winding Connection for Inductive Voltage Dividers // IEEE Trans. on Instrum. and Meas. – 1998. – Vol. 47, Iss. 1. – P. 204–208.

Рецензенты:

Авдеева Д.К., д.т.н., профессор, директор ООО «Медприбор», г. Томск;

Градобоев А.В., д.т.н., начальник лаборатории специпытаний ОАО «НИИПП», Госкорпорация «РОСТЕХНОЛОГИИ», ОАО «РОССИЙСКАЯ ЭЛЕКТРОНИКА», г. Томск.