УДК 621.3.027.8

РЯБЕНЬКИЙ В.М., докт.техн.наук, ДЬЯКОНОВ А.С. (Нац. ун-т кораблестроения им. адм. Макарова, Николаев)

Исследование частотных характеристик высоковольтного делителя напряжения при различном расположении низковольтного плеча

Рассмотрена схема замещения высоковольтного демпфированного делителя напряжения с различным расположением низковольтного плеча. Показано, что линейность амплитудно-частотной характеристики в области высоких частот может быть улучшена путем расположения низковольтного плеча в середине делителя. Рассмотрен электрооптический способ измерения высокого напряжения.

Розглянуто модель високовольтного демпфованого дільника напруги з різним розташуванням низьковольтного плеча. Показано, що лінійність амплітудно-частотної характеристики в області високих частот може бути поліпшена шляхом розташування низьковольтного плеча в середині дільника. Розглянуто електрооптичний спосіб вимірювання високої напруги.

В области разрядных явлений импульсный высоковольтный электрический разряд в воде занимает особое место ввиду интенсивного его использования в последнее время непосредственно в производстве при обработке материалов импульсными давлениями. Наибольшее распространение получили технологии очистки отливок от формовочной и стержневой смесей, некоторые виды обработки металлов давлением, дробление, разрушение негабаритов, виброимпульсное нагружение и т.п. [6,7].

Для эффективного управления электрогидроимпульсным процессом преобразования энергии в электрогидравлической установке (ЭГУ) необходимо производить измерение импульсного напряжения в разрядном контуре ЭГУ [3,4,5]. Математическое моделирование переходных процессов в рзрядном контуре [8] показало, что переходный процесс по напряжению является узкополосным с основной частотой $f = 10—100$ кГц. Диапазон амплитудных значений напряжения лежит в пределах 25—50 кВ, поэтому для контроля разрядного напряжения необходимо использовать измерительные преобразователи, которые подключаются к высоковольтной цепи через делитель напряжения.

Для полноценного масштабного преобразования высоковольтного импульсного напряжения к уровню измерительных преобразователей делитель должен иметь особые свойства по стабилизации масштабного преобразования напряжения в широком диапазоне частот [2]. Таким является, например, делитель напряжения с резистивно-емкостными элементами.

В литературе по исследованию высоковольтных делителей напряжения [11] была теоретически исследована форма импульса тока в различных точках омического делителя напряжения, в результате чего авторами был сделан вывод о зависимости времени передачи от положения рассматриваемой точки вдоль цепи делителя. В работе [13] была указана потенциальная возможность измерения импульсных напряжений с помощью электрооптической системы. Бурное развитие оптоэлектроники позволяет улучшить систему измерения путем исключения из измерительной части импульсной установки соединительных проводов. Также в этом случае снимается вопрос о согласовании низковольтного плеча делителя и входных цепей регистрирующей аппаратуры. Кроме того, при таком построении измерительной системы исчезает проблема помех от внешних электрических цепей.

Постановка задачи. Электрооптическая система измерения позволяет располагать низковольное плечо делителя в любом месте цепи делителя. Согласно стандарту [9] одной из полных динамических характеристик средств измерений является передаточная функция или совокупность амплитудно- и фазочастотной характеристик. В связи с этим возникает необходимость исследования частотных характеристик делителя напряжения как части измерительной системы при различном расположении низковольтного плеча в цепи делителя.

Решение задачи. Делители высокого напряжения, как правило, построены из большого числа однотипных элементов, следовательно, математическая модель делителя может быть представлена в виде цепочной схемы (рис. 1, *а*). Схема замещения состоит из N одинаковых комплексных продольных $\underline{Z}_l'$ и поперечных $\underline{Z}_q'$ сопротивлений. Поперечное сопротивление $\underline{Z}_q'$ определяется емкостью элемента C_e' относительно земли, так как утечки практически исключены. Продольное сопротивление $\underline{Z}_l'$ состоит в общем случае из активного сопро-

© Рябенький В.М., Дьяконов А.С., 2008

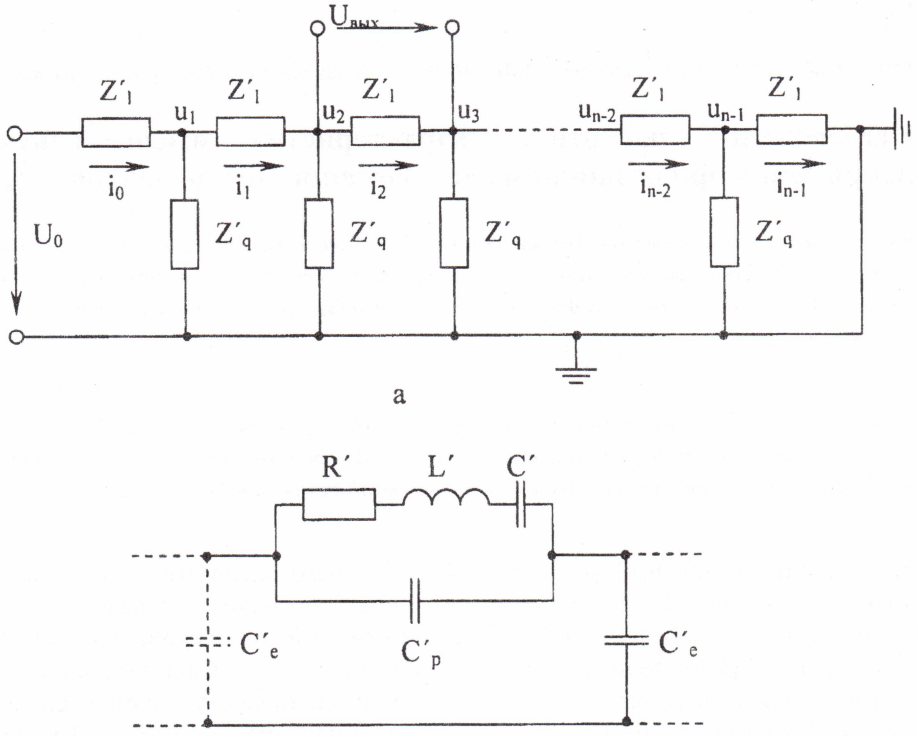

Рис. 1

тивления R', индуктивности L' и емкости C', параллельно которым включена собственная емкость элемента делителя C_p'. Соответствующие параметры всего делителя определяются так:

$$R=R'\cdot N; \qquad L=L'\cdot N; \qquad C=C'/N;$$

$$C_p=C_p'/N; \qquad C_e=C_e'\left(N-1\right).$$

Пусть ко входу высокого напряжения делителя приложено напряжение U_0. Выходное напряжение $U_{вых}$, много меньшее входного напряжения, может быть снято с любого элемента цепочки.

Из теории цепочных схем [8] можно получить выражения для изображений напряжения u_k и тока i_k ячейки

$$\bar{u}_k=\bar{u}_0\,\mathrm{sh}\left(n-k\right)\nu\,/\left(\mathrm{sh}\,n\nu\right), \qquad (1)$$

$$\bar{i}_k=\frac{2\bar{u}_0\,\mathrm{sh}\,\dfrac{\nu}{2}\,\mathrm{ch}\left(n-k-\dfrac{1}{2}\right)\nu}{\underline{Z}_1'\cdot\mathrm{sh}\,n\nu}, \qquad (2)$$

где $k=0\ldots N-1$ — номер ячейки, а ν определяется из выражения

$$\mathrm{ch}\,\nu=1+\frac{\underline{Z}_l'}{2\underline{Z}_q'}.$$

Используя выражение (2), можно получить изображение напряжения низковольтного плеча

$$\bar{u}_{вых\,k}=\underline{Z}_1'\cdot\bar{i}_k=\bar{u}_k-\bar{u}_{k+1}=\frac{2\bar{u}_0\,\mathrm{ch}\left(n-k-1/2\right)\nu}{\mathrm{sh}\,n\nu}.$$

Передаточная функция делителя тогда примет вид

$$W(p,k)=\frac{u_{вых\,k}(p,k)}{u_0(p,k)}=\frac{2\,\mathrm{sh}\,\dfrac{\nu(p)}{2}\,\mathrm{ch}\left(n-k-1/2\right)\nu(p)}{\mathrm{sh}\,n\,\nu(p)}. \qquad (3)$$

В ЭГУ чаще всего используются демпфированные емкостные делители напряжения со схемой замещения комплексных продольных $\underline{Z}_l'$ и поперечных $\underline{Z}_q'$ сопротивлений, показанной на рис. 1,*б*.

Деление напряжения в таких делителях осуществляется по сопротивлениям на высоких частотах и по емкостям при низких частотах. Если делитель выполнен малоиндуктивным, что обеспечивается использованием малоиндуктивных резисторов и конденсаторов, то требуемое для демпфирования сопротивление R может быть небольшим (300—800 Ом), при этом время реакции, равное $RC_e/6$ [1], остается малым даже при очень большой геометрической высоте делителя (следовательно, и при

очень высоком напряжении). Поэтому делители такого рода используются для измерений экстремально высоких импульсных напряжений. В них, несмотря на малое сопротивление, выделение энергии ограничено. Такими же делителями можно измерять коммутационные импульсные и переменные напряжения с учетом длительного рабочего напряжения примененных конденсаторов. Возможно использование таких делителей и для измерения постоянных напряжений посредством введения дополнительных параллельных резисторов с высоким сопротивлением, таких же, как и в омическом делителе [14]. Связанные с этим дополнительные затраты остаются небольшими, и поэтому демпфированные делители применяются и при сравнительно невысоких напряжениях.

На рис. 2, 3 показаны рассчитанные по формуле (3) амплитудно- и фазочастотные характеристики демпфированного емкостного делителя с параметрами $R=2000$ Ом, $C=150$ пФ, $L=2{,}5$ мкГн, $C_e=40$ пФ, $C_p=1$ пФ, $N=10$ при различном расположении низковольтного плеча.

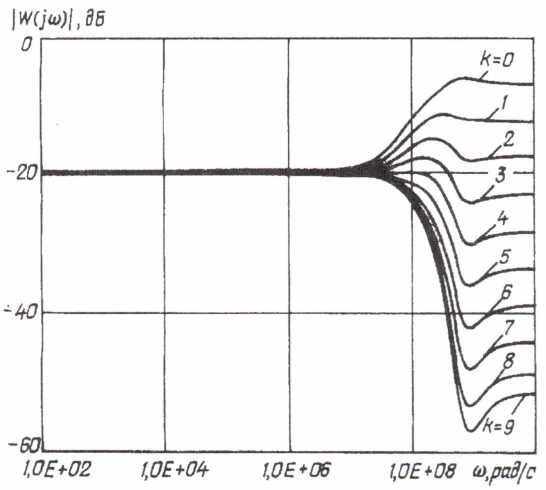

Рис. 2

Как видно из рис. 2, 3, расположение низковольтного плеча в середине делителя ($k=4$ при $N=10$) значительно улучшает линейность амплитудно-частотной характеристики на высоких частотах, тем самым, уменьшая время реакции при приложении к делителю скачкообразного напряжения.

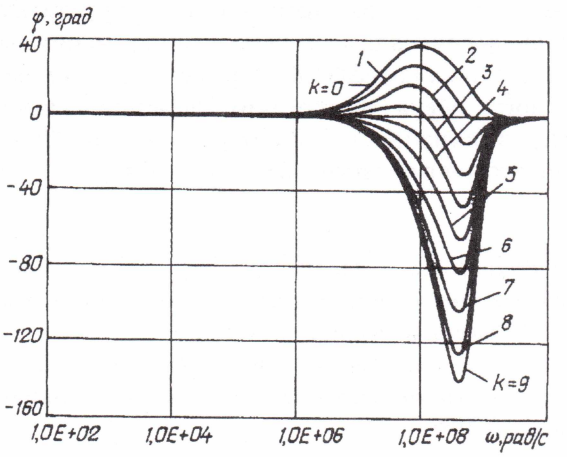

Рис. 3

На рис. 4 показан способ измерения напряжения на низковольтном плече делителя напряжения. Схема содержит два светодиода *VD*1, *VD*2, которые генерируют световой поток, пропорциональный току, проходящему через светодиоды. Этот световой поток с помощью световодов подводится к фотодиодам *VD*3, *VD*4, которые соединены с усилителями. Сопротивление R рассчитывается, исходя из максимального прямого тока через светодиод $I_{VD\max}$ и максимального выходного напряжения на низковольтном плече делителя $u_{k\text{выхmax}}$:

$$R1=u_{k\text{выхmax}}/I_{VD\,\max}.$$

Вся оптическая система должна иметь линейную передаточную характеристику, стабильность и достаточную электрическую прочность в отношении импульсного напряжения [13].

Выводы. Частотные характеристики делителя напряжения зависят от расположения его низковольтного плеча. Наихудшая амплитудно-частотная характеристика наблюдается при расположении низковольтного плеча на стороне высокого на-

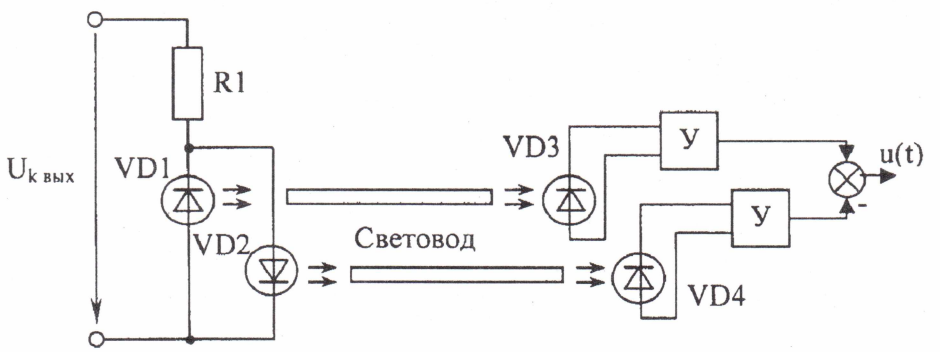

Рис. 4

пряжения ($k=0$). При такой конструкции делителя в выходном сигнале возможно возникновение высокочастотных колебаний. Перемещением низковольтного плеча в середину делителя можно улучшить линейность амплитудно-частотной характеристики в области высоких частот.

1. *Бейер М., Бек В., Меллер К., Цаенгль В.* Техника высоких напряжений: теоретические и практические основы применения. — М.: Энергоатомиздат, 1989. — 555 с.

2. *Болотин И.Б., Эйдель Л.З.* Измерения при испытании аппаратов в режиме короткого замыкания. — Л.: Энергоатомиздат. — 1988. — 200 с.

3. *Вовк И.Т., Друмирецкий В.Б., Кривицкий Е.В., Овчинникова Л.Е.* Управление электрогидроимпульсными процессами. — К.: Наук. думка, 1984. — 188 с.

4. *Вовк И.Т., Овчинникова Л.Е.* Синтез оптимальной системы автоматического регулирования ЭГУ / В кн.: Новое в разрядноимпульсной технологии. — К. : Наук. думка, 1979. — С. 46—51.

5. *Вовк И.Т., Соболева М.Б.* Методика разработки устройства контроля и управления электрогидроимпульсными установками. Методическое пособие. — Николаев: ИИПТ АН Украины, 1993. — 49 с.

6. *Гулый Г.А.* Научные основы разрядноимпульсных технологий. — К.: Наук. думка, 1990. — 208 с.

7. *Гулый Г.А.* Оборудование и технологические процессы с использованием электрогидравлического эффекта. — М.: Машиностроение, 1977. — 320 с.

8. *Левинштейн М.Л.* Операционное исчисление и его приложения к задачам электротехники. — М.: Энергия, 1964. — 466 с.

9. *Нормирование и определение* динамических характеристик аналоговых средств измерений. Основные положения: ГОСТ 8.257-77 (действителен от 1977—10—27). — М., 1977. — 10 с.

10. *Подольцев А.Д., Супруновская Н.И.* Моделирование и анализ электроразрядных процессов в нелинейной *RLC*-цепи // Техн. електродинаміка. Тем. вип. "Проблеми сучасної електротехніки". — 2006. — Ч. 4. — С. 3—8.

11. *Рябов Б.М.* Измерение высоких импульсных напряжений. — Л.: Энергоатомиздат, 1983. — 124 с.

12. *Шваб А.* Измерения на высоком напряжении: Измерительные приборы и способы измерения. — Л.: Энергоатомиздат, 1983. — 264 с.

13. *Harada T., Kawamura T., Kishi K.* A high quality voltage divider using optoelectronics for impulse voltage measurements // IEEE Trans. Power Appar. and Syst. — 1972. — Vol. PAS-91. — № 2. — P. 494—500.

14. *Harada T., Aosima Y., Okamura T., Hiwa K.* Development of a high voltage universal divider // IEEE Trans. — 1976. — Vol. PAS-95. — P . 595—602.

Надійшла 15.11.2007