

УДК 53.088+621.374.5

Є.О. ЗАЙЦЕВ

Інститут електродинаміки НАН України

В.І. ЛАТЕНКО, І.В. ЛОГВИНЕНКО, Р.Д. МИРОНОВ

Український гідрометеорологічний інститут НАН України

ПОВІРКА/КАЛІБРУВАННЯ ЗРАЗКОВОЇ ЛІНІЇ ЗАТРИМКИ ДЛЯ ВИМІРЮВАЧІВ ВИСОТИ ХМАР

Показана актуальність дослідження метрологічних властивостей зразкової лінії затримки для перевірки вимірювачів висоти хмар. Досліджуються специфічні похибки вимірювання часових параметрів лінії затримки спричинені застосуванням неспеціалізованих сигналів. Пропонується вимірвальна схема та алгоритм перевірки/калібрування зразкової лінії затримки, які дозволяють уникнути виникнення додаткових похибок. Пропонується оригінальна схема формувального каскаду для отримання вимірвального сигналу спеціальної форми.

Ключові слова: зразкова лінія затримки, вимірювач висоти хмар, перевірка, калібрування, часові параметри, тривалість фронту сигналу, похибка, невизначеність.

I.O. ZAITSEV

Institute of Electrodynamics of NAS of Ukraine

V.I. LATENKO, I.V. LOGVYNNENKO, R.D. MYRONOV

Ukrainian Hydrometeorological Institute of NAS of Ukraine

CALIBRATION/VERIFICATION THE MODEL DELAY LINE FOR THE CLOUDS HEIGHT METERS

The actuality of research the metrological properties of model delay line for the clouds height meters is shown. We study specific time parameters measurement error caused by delay line using specialized signals. The measuring circuit and algorithm of verification/calibration the model delay line is proposed to avoid additional errors. The original scheme of forming stage for a special form measuring signal is proposed.

Keywords: model delay line, meter clouds height meter, verification, time parameter, the duration of the front of signal, error, uncertainty.

Вступ

На більшості вітчизняних аеродромів та на багатьох аеродромах пострадянських держав [1] для вимірювання висоти хмар застосовуються оптичні вимірювачі на базі імпульсних ламп. На відміну від лазерних вимірювачів, які повіряють та калібрують як звичайні далекоміри, не лазерні (далі: оптичний) вимірювачі висоти хмар практично непридатні для вимірювання еталонних дистанцій. Структура оптичного вимірювача включає окремі блоки випромінювача та фотоприймача, які мають бути рознесені на відстань близько 10 метрів та просто направляються вертикально вгору для вимірювання висоти хмар. Проте, направити ті самі блоки на мішень у горизонтальній площині на відстані до 2000 м практично неможливо. Тому для перевірки оптичних вимірювачів застосовуються лінії затримки, що імітують сумарний час на проходження світловим імпульсом дистанції до хмари та відбитого імпульсу - назад.

Методика перевірки лінії затримки датується ще 1960 роком [2], відомості про новіші методики чи наукові дослідження у цій галузі відсутні. Застосування цієї методики в сучасній Україні практично неможливе, адже методика передбачає наявність унікального засобу вимірвальної техніки «Источник временных сдвигов И1-8. ГВЗ.269.011 ТУ».

Сьогодні в Україні застосовується близько 8 ліній затримки для перевірки близько 50 оптичних вимірювачів висоти хмар на 12- ти громадянських та ще невідомо скільки і на кількох військових аеродромах. Висота хмар входить до головних метеорологічних показників аеродрому [3], а похибка вимірювання безпосередньо пов'язана з безпекою польотів. Через відсутність сучасної методики перевірка зразкових ліній затримки проводиться неналежним чином, що неприпустимо. Тому, дослідження у напрямку розробки метрологічного забезпечення лінії затримки є актуальними.

Мета дослідження

Мета дослідження полягає у розробці та обґрунтуванні загальних принципів та структур реалізації засобів перевірки/калібрування зразкової лінії затримки для вимірювачів висоти хмар.

Розробка методів та засобів перевірки/калібрування зразкової лінії затримки

Вимірювання висоти хмар оптичним вимірювачем відповідно до [3] визначається як:

$$h = \frac{C}{2} \cdot t, \quad (1)$$

де $C = 300 \cdot 10^6$ м/с – швидкість світла; t - часовий інтервал, за який світловий імпульс відбивається від хмари та повертається назад, тобто проходить подвійну відстань до хмари.

З виразу (1) випливає, що для зразкової лінії затримки співвідношення між значенням висоти та часовою затримкою визначається коефіцієнтом 0,15 м/нс (половина швидкості світла).

Необхідний діапазон значень та допустиму похибку зразкової лінії затримки можна оцінити, виходячи з вимог до вимірювачів висоти хмар з боку Всесвітньої метеорологічної організації [3]; наведемо ці та наступні дані у Табл.1. Для вимірювання висоти хмар вище 100 м допускається ще й мультиплікативна складова похибки, яка нас поки не цікавитиме.

Таблиця 1

Метрологічні параметри вимірювача висоти хмар та засобів повірки/калібрування

№	Параметр	Діапазон/значення у од. довжини	Діапазон/значення у од. часу
1	Вимірювальний діапазон вимірювача	від 15 м до 2000 м	від 100нс до 13300 нс
2	Максимальна допустима похибка вимірювача	± 10 м	± 67 нс
3	Діапазон значень затримки лінії затримки	від 15 м до 2000 м	від 100нс до 13300 нс
4	Максимальна допустима похибка значень затримки лінії затримки	± 3 м	± 20 нс
5	Максимальна сумарна похибка засобів калібрування лінії затримки	± 1 м	$\pm 6,7$ нс

Діапазон значень часової затримки зразкової лінії затримки має відповідати вимірювальному діапазону вимірювача висоти хмар з мінімальним перекриттям. Щодо допустимих похибок значень затримки, то бажано, щоб вони були принаймні у 3 рази меншими за відповідні похибки вимірювача.

Оцінюючи допустиму похибку калібрування значень часових затримок, слід зважати на наступні обставини. Вказана раніше максимальна допустима похибка вимірювача включає всі складові похибок, при цьому типове значення випадкової складової звичайно не перевищує ± 2 м, що дозволяє вважати її величиною другого порядку малості та не приймати до уваги. Проте, разом з максимально допустимою похибкою зразкової лінії затримки сумарне миттєве значення похибки сягатиме ± 5 м, тобто половини допустимої похибки вимірювача. За цих умов результуюча похибка всіх засобів калібрування зразкової лінії затримки має бути обмежена значенням близько ± 1 м або $\pm 6,7$ нс, інакше сумарна миттєва похибка повірки вимірювача перевищить ± 6 м (більше половини допустимого значення) і значно ускладнить повірку вимірювача.

Таким чином, максимальна допустима похибка калібрування/повірки зразкової лінії затримки не повинна перевищувати ± 1 м або $\pm 6,7$ нс принаймні для менших значень часової затримки по діапазону.

Часова затримка зразкових ліній затримки забезпечується за допомогою або бухти кабелю довжиною у кілометри або кількох електричних ліній затримок. Надалі розглядатимуться тільки лінії затримки другого типу, бо громіздкі та нетехнологічні кабельні лінії вже морально застаріли.

Узагальнена схема зразкової лінії затримки наведена на рис.1.

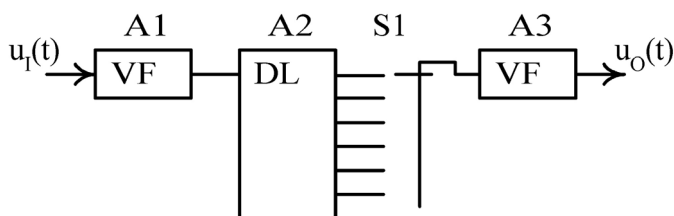


Рис. 1. Узагальнена схема зразкової лінії затримки

На вході та на виході зразкової лінії затримки містяться повторювачі напруги A1 та A3. Вони призначені для узгодження за імпедансом внутрішніх ланцюгів вимірювача висоти хмар з електричною лінією затримки A2, що необхідно для уникнення викривлень сигналу вимірювача від підключення зразкової лінії затримки. Перемикач S1

призначений для вибору одного з 6-ти значень затримки лінії затримки.

У якості внутрішньої електричної лінії затримки ЛЗ застосовуються лінії затримки на стрижневих сердечниках у вигляді радіоелементів серії ЛЗТ або аналогічних серій [4]. У Табл.2 наведено деякі типові параметри лінії затримки ЛЗТ-4,0-1200, що дозволяють скласти уявлення про порядок величин відповідних параметрів зразкової лінії затримки..

Відомі різні методи повірки пасивних ліній затримок шляхом включення їх у якості елементів трактів з гармонічними сигналами, які дозволяють виміряти затримки з великою точністю. Нажаль, всі ці методи не можуть бути застосовані до зразкових ліній затримки через наступні причини:

- зразкові лінії затримки проєктуються для імпульсних сигналів низької частоти повторення та не пристосовані для пропускання гармонічних сигналів;
- зразкові лінії затримки активні, що не дозволяє включити їх у вимірювальні схеми для пасивних елементів.

Через ці причини калібрування/повірка зразкових ліній затримки виконується прямим методом подачі на них сигналу та вимірювання затримки сигналу. Розглянемо ці процеси детальніше.

Припустимо, що для вимірювання параметрів зразкової лінії затримки на її вхід подано сигнал у вигляді перепаду напруги $u_i(t)$, як показано на рис. 2. Для наглядності сигнали на рисунку подані у ідеалізованому вигляді без згладжування гострих кутів. Часова вісь t відображає спільний для діаграм на рисунку поточний час.

Технічні характеристики лінії затримки ЛЗТ-4,0-1200

№	Параметр	Умовне позначення	Значення
1	Час затримки	t_D	4000 нс
2	Тривалість фронту імпульсу на виході лінії	t_F	550 нс
3	Коефіцієнт передачі	K_D	0,75

За відсутності групової затримки сигналу t_D вихідний сигнал лінії затримки мав би такий вигляд, як сигнал $u_F(t)$ на середній діаграмі. Нахил переднього фронту сигналу обумовлений виключно фільтруючими властивостями лінії затримки.

Форма сигналу $u_F(t)$ на середній діаграмі відрізняється від форми вхідного сигналу $u_I(t)$. У першому наближенні можна вважати, що сигнал $u_F(t)$ представляє затриманий у часі вхідний сигнал, причому початки сигналів співпадають у момент t_1 , а кінець фронту затриманого сигналу затримується на тривалість фронту t_F . Виникає слушне запитання, по якій саме точці фронту затриманого сигналу слід відміряти величину затримки. До цього запитання необхідно буде повернутися пізніше, а поки що вважатимемо за момент відліку затримки середню точку фронту сигналу - момент t_2 .

Якщо тривалість фронту вхідного сигналу лінії затримки складає величину t_F , тоді затримка середини фронту вихідного сигналу відносно вхідного становитиме:

$$t_{FD} = t_2 - t_1 = \frac{t_F}{2}, \quad (2)$$

де t_1, t_2 і так далі - поточні значення часу відносно спільного нуля на вісі часу на рис.2.

Часове расташування реального вихідного сигналу лінії затримки $u_D(t)$ відображено на нижній діаграмі на рис.2. Як видно з діаграми, до розглянутої раніше часової затримки за рахунок нахилу фронту сигналу t_{FD} додається ще групова часова затримка лінії затримки

$$t_D = t_4 - t_2, \quad (3)$$

тоді загальну затримку вихідного сигналу відносно вхідного можна записати у вигляді:

$$t_{DL} = \frac{t_F}{2} + t_D. \quad (4)$$

З двох складових загального часу затримки сигналу нормованою є лише друга складова затримки лінії t_D , тоді як затримка через тривалість фронту вихідного сигналу (далі: фронтальна затримка) у загальному випадку є величиною невизначеною та залежною від сторонніх факторів.

Оцінка порядку величини фронтальної затримки сигналу не становить проблеми. З формули (2) безпосередньо витікає, що ця затримка приблизно відповідає половині тривалості фронту лінії затримки. У якості прикладу візьмемо тривалість фронту лінії затримки ЛЗТ-4,0-1200 з Табл. 2, тоді отримаємо, що фронтальна затримка сигналу може сягати значення

$$t_{FD} \approx 270 \text{ нс},$$

що значно перевищує максимальну допустиму похибку зразкової лінії затримки з Табл.1, яка була прийнята за величину ± 20 нс.

Одже, з одного боку, через невизначеність величини фронтальної затримки її немає сенсу ані вимірювати, ані враховувати якимось іншим чином під час перевірки/калібрування. З іншого боку, нею неможна знехтувати через надто великий порядок величини.

Згадаємо, що для оцінки фронтальної затримки момент появи сигналу на виході лінії затримки фіксувався по середині фронту сигналу без якихось на це підстав. Тепер, коли відомо, що фронтальна затримка багатократно перевищує допустиму похибку лінії затримки, повернемося до питання, яку саме точку фронту сигналу слід вважати за момент приходу сигналу. Зауважимо, що сама постановка питання вказує на неоднозначність трактування поняття "часова затримка сигналу" для зразкової лінії затримки через перетворення форми вихідного сигналу відносно вхідного.

Якщо часову затримку не можна вважати однозначною характеристикою лінії затримки як такої, тоді слід звернутися до її призначення. Зразкова лінія затримки призначена для імітації часу проходження сигналу до хмар та назад під час підключення до вимірювача висоти хмар. За структурою вимірювача висоти хмар, на вхід підключеної до нього зразкової лінії затримки потрапляє сигнал, форма якого вже сформована у оптичному та електричному трактах вимірювача. На рис. 3 наведена типова форма сигналу у тракці оптичного вимірювача ПРОМІНЬ (власної розробки) при відбитті світлового імпульсу від щільної

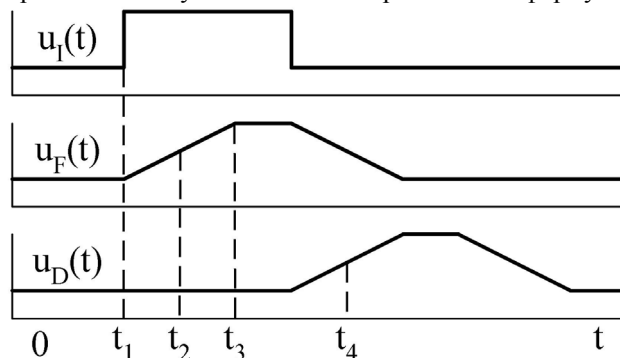


Рис. 2. Часові діаграми проходження сигналу через лінію затримки

перешкоди, яка застосовується для перевірки/калібрування самого вимірювача [5].

Користуючись експериментальними даними для вимірювача ПРОМІНЬ авторами отримано наступне значення тривалості фронту сигналу відбитого від твердої поверхні або щільної темної хмари:

$$t_{FE} \approx 700 \text{ нс}.$$

Споріднені між собою оптичні вимірювачі типу ИВО, РВО, ДВО мають ще більшу тривалість фронту сигналу, що відомо і з експериментальних даних і з настанов для метеорологічного персоналу по роботі з цими вимірювачами.

Таким чином, можна стверджувати, що на вхід зразкової лінії затримки у процесі перевірки/калібрування вимірювача висоти хмар не потрапляють сигнали з тривалістю фронту меншою за $t_F = 550 \text{ нс}$ (2 -й рядок Табл. 2).

У такому разі і схема перевірки/калібрування зразкової лінії затримки має бути змінена таким чином, щоби на вхід лінії надходив сигнал з достатньо тривалим фронтом, щоби форма фронту сигналу не змінювалася під час проходження через лінію затримки. Для цього перед зразковою лінією затримки треба встановити формуючий пристрій, який сформує сигнал з достатньо тривалим фронтом.

На рис.2 це відобразиться таким чином, що вхідним сигналом для лінії затримки стане сигнал $u_F(t)$ на середній діаграмі. У такому разі повна затримка сигналу по середині фронту становитиме величину затримки лінії t_D за формулою (3).

Формуючий пристрій знімає також проблему вибору точки фронту сигналу, по якій вимірюється затримка сигналу. Тепер, коли форма фронту сигналу на вході та виході не відрізняються, ця точка може бути довільною, аби була однаковою для обох сигналів. Через те, що коефіцієнт передачі лінії затримки є меншим за одиницю (див.Табл. 2, рядок 3), зручно нормувати характерну точку по відношенню до амплітуди сигналу, тому зазвичай вибирається половина амплітуди сигналу. До того ж для кривої форми фронту сигналу вимірювача висоти хмар половина амплітуди сигналу лежить на квазілінійній ділянці з максимальною крутизною, що зменшує похибку вимірювання.

Отже, додавання формуючого каскаду на вході зразкової лінії затримки під час перевірки/калібрування дозволяє:

- вилучити з сумарної затримки невизначену величину фронтальної затримки сигналу;
- обґрунтовано вимірювати затримку сигналу по середині фронту сигналу.

Вимірювальна схема перевірки/калібрування зразкової лінії затримки наведена на рис.4. На схемі сигнал u_1 від генератора імпульсів А1 надходить спочатку до формувального каскаду А2, а з виходу формувального каскаду сформований сигнал u_2 потрапляє на вхід зразкової лінії затримки АМ1.

Часові діаграми сигналів показані на рис.5. Як видно з часових діаграм сигналів u_1 та u_2 , вирішуючи проблеми з невизначеною фронтальною затримкою, повірителі втратили початкову точку відліку часу затримки по крутому фронту сигналу u_1 - точку t_1 . Тепер на вхід лінії затримки приходить сигнал u_2 з великою тривалістю переднього фронту. Для однозначної прив'язки до тривалих фронтів сигналів u_2 та u_3 на вході та на виході зразкової лінії затримки АМ1 у вимірювальну схему (рис.4) введені додаткові елементи: перемикач S1, піковий детектор А3, дільник напруги навіпіл А4 та швидкодіючий компаратор А5.

Не показаний на діаграмах сигнал u_4 на вході пікового детектора А3 залежить від положення перемикача S1: у вихідному положенні через перемикач проходить сигнал u_2 , у іншому положенні - сигнал u_3 . У позначенні сигналів, що залежать від положення перемикача, відповідне положення перемикача буде вказано у дужках: "(u_2)" або "(u_3)".

На виході пікового детектора А3 формується постійна напруга, що відповідає максимальному значенню підключеного до нього сигналу. Тоді, після дільника напруги сформується постійна напруга u_6 , яка дорівнює половині максимального значення підключеної до пікового детектора напруги, як відображено на діаграмах $u_6(u_2)$ та $u_6(u_3)$. Одне з цих значень постійної напруги прикладено до інверсного входу компаратора А5, тоді як на прямий вхід компаратора надходить сам імпульсний сигнал.

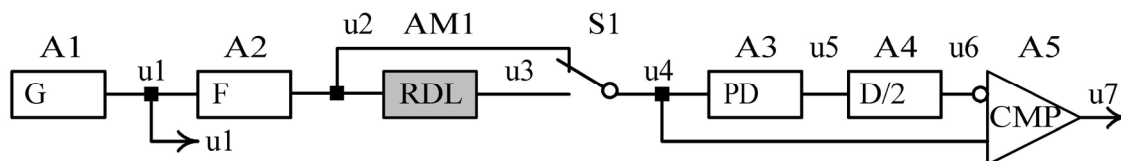


Рис. 4. Вимірювальна схема перевірки/калібрування зразкової лінії затримки

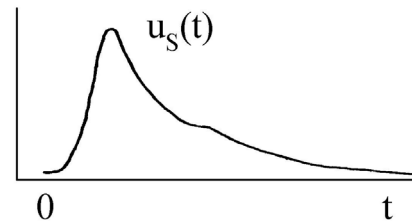


Рис. 3. Форма сигналу вимірювача висоти хмар ПРОМІНЬ

Нехай перемикач S1 знаходиться у вихідному положенні (u2), тоді на прямий вхід компаратора надходить сигнал u2, а на інверсний - постійна напруга u6(u2), що дорівнює половині максимального значення сигналу u2.

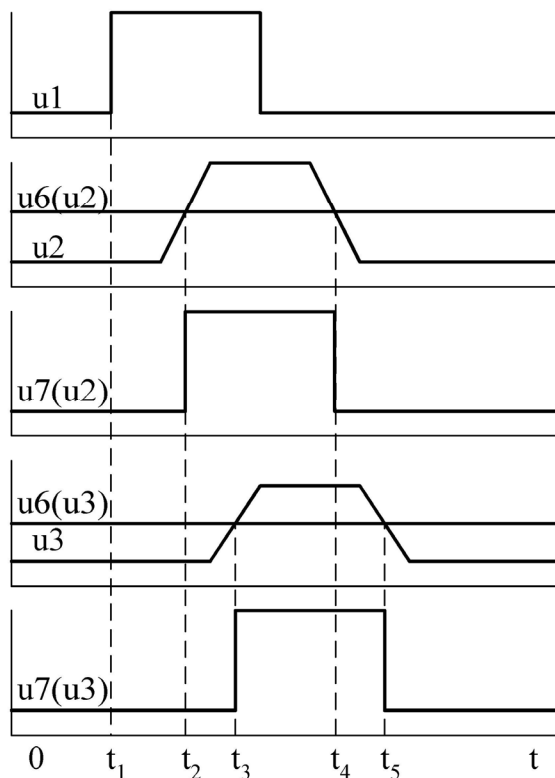


Рис. 5. Часові діаграми роботи схеми перевірки/калібрування

Компаратор спрацьовує у той момент, коли миттєве значення сигналу u4(u2) перевищує значення постійної напруги u6(u2) на інверсному вході: у момент t2 на діаграмі. У цей момент напруга u7(u2) на виході компаратора стрибком змінюється до верхнього значення.

У момент t4 напруга імпульсу u6(u2) спадає до половини максимального значення, тоді вихідний сигнал компаратора u7(u2) стрибком повертається до низького значення.

На виході компаратора сформувався імпульс u7(u2), крутий передній фронт якого співпадає або є синхронним з серединою фронту вхідного сигналу лінії затримки u2.

Цілком аналогічно на виході компаратора формується імпульс u7(u3), коли перемикач S1 підключає сигнал u3 з виходу лінії затримки. Передній фронт імпульсу u7(u3) співпадає або є синхронним з вихідним сигналом лінії затримки.

Зауважимо, що запропонована схема забезпечує формування імпульсів синхронних з серединою фронтів сигналів незалежно від максимальних значень сигналів. Це є важливою особливістю через менший за одиницю коефіцієнт передачі зразкової лінії затримки. Різниця максимальних значень сигналів відображена на діаграмах.

Далі пропонується алгоритм вимірювальних операцій для визначення величини затримки зразкової лінії затримки за допомогою запропонованої схеми.

1. Спочатку перемикач S1 встановлюється у положення (u2). За допомогою частотоміру або цифрового осцилографу вимірюється часовий інтервал між фронтами імпульсу генератора u2 та імпульсу u7(u2) компаратора. Виміряний інтервал можна записати у вигляді:

$$t_{M1} = t_2 - t_1 + \Delta t_C, \quad (5)$$

де Δt_C - власна часова затримка компаратора.

2. Встановлюючи перемикач у положення (u3) знову вимірюється часовий інтервал між фронтами імпульсу генератора u2 та імпульсу компаратора, тільки тепер імпульс компаратора u7(u3) займає інше часове положення. Виміряний інтервал запишемо у аналогічному вигляді:

$$t_{M2} = t_3 - t_1 + \Delta t_C. \quad (6)$$

3. Результат вимірювання отримаємо розрахунковим шляхом. Віднімаючи значення (6) від значення (5), отримуємо:

$$t_{DL} = t_{M2} - t_{M1} = t_3 - t_1. \quad (7)$$

Таким чином, завдяки застосуванню одного компаратора до двох сигналів, похибки компаратора компенсуються. Так само компенсується й похибка дільника: немає необхідності встановлювати коефіцієнт ділення на 2 з великою точністю, адже точка фронту відносно максимального значення сигналу буде однаковою за будь-якого значення коефіцієнта ділення.

Запропонований алгоритм вимірювання можна віднести до категорії різночасового порівняння. Це обумовлює таку загальну вимогу до елементів схеми, як довгострокова стабільність впродовж десятка хвилин на вимірювання. Не викликає ніяких складностей забезпечити довгострокову стабільність генератора A1, повторювача напруги A3, дільника A4 (можна застосувати резистивний дільник), компаратора A5. Залишається розглянути варіанти схемної реалізації формуючого каскаду A2.

Звичайно, можна було б спроектувати фільтр нижніх частот, який забезпечить необхідну тривалість фронту сигналу, але довгострокова стабільність сукупності пасивних елементів не було б елементарним завданням. Проте, можна отримати форму сигналу, що максимально наближена до сигналу оптичного вимірювача, за допомогою звичайного оптрону із навмисно вибраною низькою швидкістю. Відповідна схема формуючого каскаду наведена на рис.6.

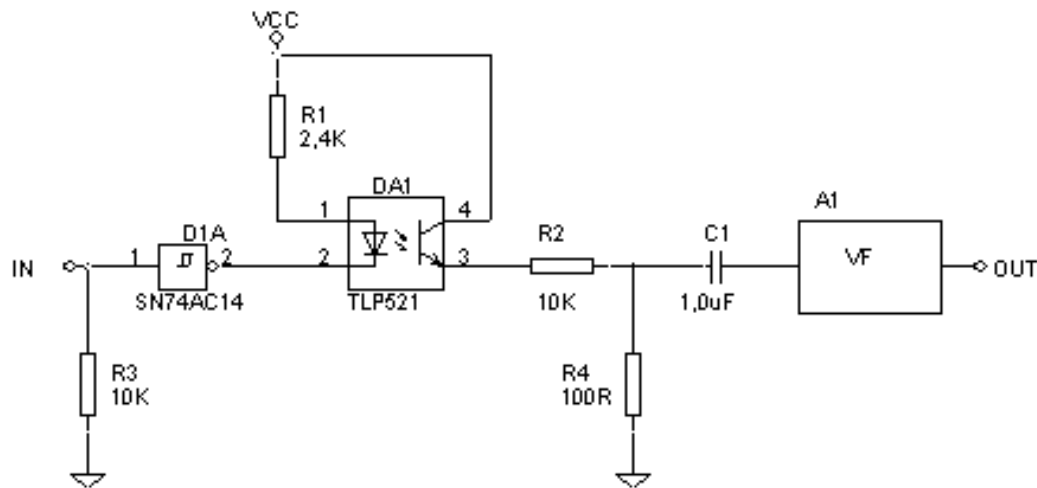


Рис. 6. Схема формуючого каскаду

На схемі повторювач напруги зображений у вигляді модуля A1 через тривіальність варіантів його реалізації. У якості оптрону DA1 був вибраний оптрон типу TLP521, тривалість фронту якого визначається наступними параметрами:

- типова швидкість наростання вихідної напруги - 0,2 мкс/В;
- номінальна напруга живлення оптрону у схемі - 5 В.

Звідси витікає, що типова тривалість фронту сигналу становить 1 мкс. Це значення цілком задовольняє вимогам до тривалості фронту сигналу на вході лінії затримки.

Для узгодження вхідного сигналу з оптроном за полярністю та рівнями напруги застосовується швидкодіючий тригер Шмітта на базі логічного елементу типу SN74AC14.

Висновки

Запропонована схема та відповідний алгоритм вимірювання дозволяють вирішити усі розглянуті проблеми перевірки/калібрування зразкової лінії затримки для вимірювачів висоти хмар.

Література

1. Марінцева К.В. Наукові основи та методи забезпечення ефективного функціонування авіатранспортних систем : дис... доктора технічних наук:05.22.01 / Крістіна Валеріївна Марінцева– К., 2015 — 561 с.
2. Метрологическая аттестация образцовой линии задержки. Методика аттестации // Методические указания. - М., Главгидромет. - 1993.- С.1 - 9.
3. World Meteorological Organization. Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation. Chapter 15. Observation of clouds // WMO-№8, 2008, p. 1.15-1 - 1.15-8.
4. Миниатюрные электрические линии задержки / Баев Е.Ф., Бурьлин Е.И. // М., «Сов.Радио», 1977. 248 с.
5. Структура и метрологические особенности недорогого измерителя высоты облачности / Е.А. Зайцев, В.И. Латенко, И.А. Орнатский // Вестник Инженерной академии Украины. – 2014. - №1. – С.232 – 239.

References

1. Marinceva K.V. Naukovi osnovi ta metodi zabezpechennja efektyvnogo funkcionuvannja aviatransportnih sistem : dis... doktora tehnicnih nauk:05.22.01 / Kristina Valeriivna Marinceva– K., 2015 — 561 s.Metrologicheskaja attestacija obrazcovoj linii zaderzhki.
2. Metodika attestacii // Metodicheskie ukazaniya. - M., Glavgidromet. - 1993.- S.1 - 9.
3. World Meteorological Organization. Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation. Chapter 15. Observation of clouds // WMO-№8, 2008, p. 1.15 1 1.15-8.
4. Miniatjurnye jelektricheskie linii zaderzhki / Baev E.F., Burylin E.I. // M., «Sov.Radio», 1977. 248 s.
5. Struktura i metrologicheskie osobennosti nedorogogo izmeritelja vysoty oblachnosti / E.A. Zaitsev, V.I. Latenko, I.A. Ornatskij // Vestnik Inzhenernoj akademii Ukrainy. – 2014. - №1. – S.232 – 239.

Рецензія/Peer review : 28.1.2017 р.

Надрукована/Printed :27.2.2017 р.

Стаття рецензована редакційною колегією