

*Введение в дисциплину. Классификация электронных схем. Делители напряжения. Метод эквивалентного генератора. Правила Кирхгофа. Наиболее распространенные виды сигналов. RC-цепи. Диаграммы Боде для наиболее распространенных пассивных RC-цепей.*

### Введение в дисциплину

Целью дисциплины является изучение принципов работы устройств и систем аналоговой электроники, приобретение знаний, умений и навыков схемотехнического проектирования электронных устройств при проектировании и оптимизации электронных средств.

Основными задачами дисциплины являются:

- формирование значимости знаний и навыков схемотехнического проектирования электронных устройств для профессиональной деятельности;
- формирование системного подхода к процессу схемотехнического проектирования электронных устройств как к элементу метода сквозного проектирования (схема-конструкция-технология) электронных средств;
- формирование умений и навыков для анализа, расчета, оптимизации и синтеза схем аналоговых электронных устройств;
- формирование представления о современных тенденциях развития схемотехники аналоговых электронных устройств.

Ведущая идея дисциплины: владение методами и инструментами схемотехнического проектирования электронных устройств является необходимым условием компетентности инженера-конструктора-технолога РЭА.

Дисциплина включает 18 часов лекций и 36 часов лабораторных работ и заканчивается дифференцированным зачетом.

Темы и содержание лекций и лабораторных работ представлены в Плане лекций.

### Классификация электронных схем

Электронные схемы могут быть классифицированы по различным признакам. В частности, они могут быть:

*Аналоговыми* – при анализе и синтезе схем напряжение и ток в них меняется по непрерывным функциям и описываются при помощи математического аппарата

дифференциального и интегрального исчисления во временной области и операционного исчисления и функции комплексной переменной в частотной области.

*Цифровыми* – при анализе и синтезе схем напряжение в них принимает ограниченный набор дискретных значений (логические ноль и единица, Z-состояние, X-состояние) и схемы описываются алгеброй логики.

Компоненты схем аналоговых электронных схем:

*Пассивные* – сопротивления, емкости, индуктивности (резисторы, конденсаторы, элементы индуктивности соответственно в физическом мире).

*Активные* – компоненты, предназначенные для усиления входного сигнала малой мощности в выходной сигнал большей мощности (биполярные и полевые транзисторы, операционные усилители, тиристоры, некоторые фотоэлектронные приборы).

*Линейные* – ток через которые пропорционален напряжению, в широких пределах соблюдается закон Ома, соблюдается принцип суперпозиции.

*Нелинейные* – в противоположность линейным (большинство полупроводниковых приборов и компонентов).

### Делители напряжения

Делитель напряжения – схема, которая создает выходное напряжение, равное частью заданного входного. Для простейшего случая

$$U_{in} = U(R_1 + R_2); I = \frac{U_{in}}{R_1 + R_2}; U_{out} = I * R_2 = U_{in} \frac{R_2}{R_1 + R_2}; K = \frac{U_{out}}{U_{in}} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} < 1 \quad (1.1),$$

где K – коэффициент передачи делителя напряжения.

### Метод эквивалентного генератора

Метод эквивалентного генератора — метод преобразования электрических цепей, в котором схемы, состоящие из нескольких ветвей с источниками ЭДС, приводятся к одной ветви с эквивалентным значением. Для определения эквивалентного сопротивления генератора применяется расчет последовательно и параллельно соединенных сопротивлений, а также, в случае более сложных схем, применяют преобразование треугольник-звезда. Метод эквивалентного генератора используется при расчете сложных схем, в которых одна ветвь выделяется в качестве сопротивления нагрузки, и требуется исследовать и получить зависимость токов в цепи от величины сопротивления нагрузки.

В соответствии с данным методом часть схемы преобразовывается к одной ветви, содержащей ЭДС и внутреннее сопротивление эквивалентного генератора. ЭДС

эквивалентного генератора равно напряжению на выходе разомкнутой схемы, а внутреннее сопротивление эквивалентного генератора равно отношению ЭДС эквивалентного генератора к току короткого замыкания эквивалентного генератора:

$$E_{eq} = \frac{\sum_{j=1}^n E_j R_j^{-1}}{\sum_{j=1}^n R_j^{-1}}; R_{eq} = \frac{1}{\sum_{j=1}^n R_j^{-1}} \quad (1.2),$$

где  $E_j$  и  $R_j$  - ЭДС и сопротивление параллельной цепи  $j$ .

Рассмотрим пример сложной схемы:

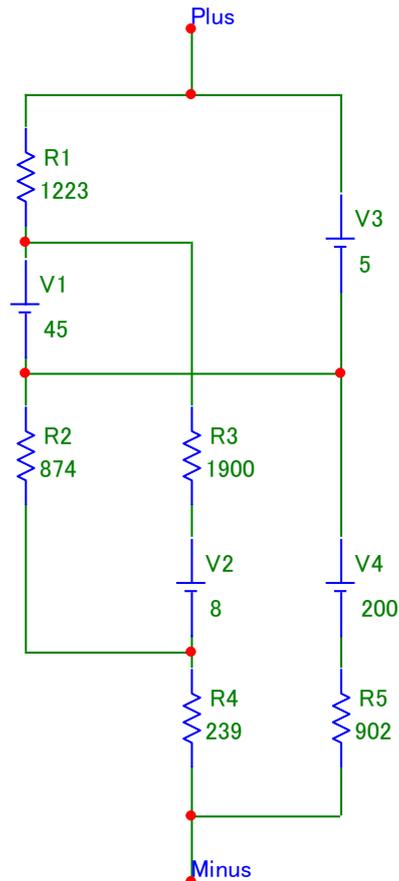


Рисунок 1.1 – Пример сложной схемы

ЭДС эквивалентного генератора 95,255 В, ток короткого замыкания 219,325 мА, а внутреннее сопротивление эквивалентного генератора при этом 434,310 Ом.

### Правила Кирхгофа

Правила (законы) Кирхгофа – соотношения, которые выполняются между токами и напряжениями на участках любой электрической цепи. Правила Кирхгофа позволяют рассчитывать любые электрические цепи постоянного, переменного и квазистационарного тока. Применение правил Кирхгофа к линейной электрической цепи позволяет получить

систему линейных уравнений относительно токов или напряжений, и соответственно, найти значение токов на всех ветвях цепи и все межузловые напряжения.

Для формулировки правил Кирхгофа вводятся понятия узел, ветвь и контур электрической цепи. Ветвью называют любой двухполюсник, входящий в цепь. Узлом называют точку соединения трех и более ветвей. Контур — замкнутый цикл из ветвей. Термин замкнутый цикл означает, что, начав с некоторого узла цепи и однократно пройдя по нескольким ветвям и узлам, можно вернуться в исходный узел. Ветви и узлы, проходимые при таком обходе, принято называть принадлежащими данному контуру. При этом нужно иметь в виду, что ветвь и узел могут принадлежать одновременно нескольким контурам.

В терминах данных определений правила Кирхгофа формулируются следующим образом.

Первое правило Кирхгофа гласит, что алгебраическая сумма токов в каждом узле любой цепи равна нулю. При этом направленный к узлу ток принято считать положительным, а направленный от узла — отрицательным: Алгебраическая сумма токов, направленных к узлу равна сумме направленных от узла.

$$\sum_{j=1}^n I_j = 0 \quad (1.3).$$

Иными словами, сколько тока втекает в узел, столько из него и вытекает. Это правило следует из фундаментального закона сохранения заряда.

Второе правило Кирхгофа (правило напряжений Кирхгофа) гласит, что алгебраическая сумма падений напряжений на всех ветвях, принадлежащих любому замкнутому контуру цепи, равна алгебраической сумме ЭДС ветвей этого контура. Если в контуре нет источников ЭДС (идеализированных генераторов напряжения), то суммарное падение напряжений равно нулю:

$$\sum_{j=1}^n E_j = \sum_{j=0}^n I_j * R_j \quad (1.4).$$

Иными словами, при полном обходе контура потенциал, изменяясь, возвращается к исходному значению. Частным случаем второго правила для цепи, состоящей из одного контура, является закон Ома для этой цепи. При составлении уравнения напряжений для контура нужно выбрать положительное направление обхода контура. При этом падение напряжения на ветви считают положительным, если направление обхода данной ветви совпадает с ранее выбранным направлением тока ветви, и отрицательным — в противном случае.

### Наиболее распространенные виды сигналов

В электротехнике и радиотехнике широко распространено относительно небольшое число видов сигналов.

#### 1. Синусоидальный сигнал.

Синусоидальный сигнал определяется функцией

$$U(t) = A * \sin(\omega t + \varphi) \quad (1.5),$$

где  $A$  – амплитуда,

$\omega$  – круговая частота,  $\omega = 2\pi f$ ,

$\varphi$  – начальная фаза.

При измерениях различают амплитудное и действующее значение сигнала. Для напряжения и тока действующее значение равно такому значению постоянного напряжения или тока, при котором выделяемая на резистивной нагрузке тепловая мощность одинакова.

Для линейных электрических цепей справедлив *принцип суперпозиции*, при котором *реакция линейной электрической цепи на сумму сигналов равна сумме реакций этой цепи на отдельные сигналы*.

#### 2. Линейно изменяющийся сигнал.

На отрезке времени линейно изменяющийся сигнал увеличивается или уменьшается с постоянной скоростью, так, что его производная по времени есть постоянная величина.

#### 3. Сигнал прямоугольной формы.

Сигнал прямоугольной формы представляет собой периодический, изменяющийся во времени ступенчато и мгновенно сигнал, характеризующийся начальным значением, амплитудой, периодом (частотой) и коэффициентом заполнения (скважностью).

#### 4. Сигналы в виде ступеньки и пика.

Ступенчатый сигнал – однократно мгновенно изменяющийся от начального к конечному значению сигнал. Пиковый сигнал – два ступенчатых сигнала, следующие друг за другом через короткий промежуток времени. Частным случаем последнего является дельта-функция, длительность которой стремится к нулю, амплитуда стремится к бесконечности, а интеграл в окрестностях дельта-функции равен единице.

### RC-цепи

Рассмотрим цепь, состоящую из соединенных вместе сопротивления  $R$  и емкости  $C$ , заряженной до напряжения  $U_0$ . Процесс разряда емкости будет определяться

дифференциальным уравнением первого порядка. Мгновенное значение напряжения на сопротивлении и емкости одинаковы, как и протекающий через них ток:

$$U_C(t) = U_R(t); U_R(t) = I(t) * R; I(t) = C \frac{dU_C(t)}{dt}; \frac{U_C(t)}{R} = C \frac{dU_C(t)}{dt} \quad (1.6).$$

Из последнего уравнения получаем вид функции

$$U_C(t) = U_0 \exp\left(\frac{-t}{RC}\right) \quad (1.7).$$

Напряжение и ток спадает по экспоненциальному закону с *постоянной времени RC-цепи, равной RC*. За время, равное постоянной времени, значение сигнала изменяется в *e* раз; в инженерной практике принято считать, что переходный процесс в RC-цепи заканчивается за время, равное трем-пяти постоянным времени.

### 1. RC-цепь при воздействии ступенчатого напряжения.

При приложении к RC-цепи в нулевой момент времени ступенчатого напряжения амплитудой  $U_0$  начинает протекать ток, причем

$$U_C(t) + U_R(t) = U_0; U_C(t) + RC \frac{dU_C(t)}{dt} = U_0 \quad (1.8).$$

Как видно, напряжение на конденсаторе нарастает по экспоненциальному закону от нуля до амплитуды входной ступеньки, а ток через цепь спадает по экспоненциальному закону от значения  $U_0/R$  до нуля.

### 2. Интегрирующая цепь.

В интегрирующей цепи выходное напряжение снимается с конденсатора. Интегрирование имеет место при  $t \ll RC$ . Пример использования интегрирующей цепи: выделение среднего значения сигнала; фильтрация импульсных ВЧ помех; формирование временной задержки между входным и выходным сигналами.

### 3. Дифференцирующая цепь.

В дифференцирующей цепи выходное напряжение снимается с резистора. Дифференцирование имеет место при  $t \gg RC$ . Пример использования дифференцирующей цепи: выделение фронта сигнала; сдвиг среднего значения переменного сигнала.

## Диаграммы Боде для наиболее распространенных пассивных RC-цепей

Диаграммы Боде представляют собой амплитудно- и фазочастотные характеристики (АЧХ и ФЧХ), при этом частота и амплитуда откладываются в логарифмическом масштабе, а фаза в линейном.

### 1. Фильтр нижних частот.

Схема ФНЧ соответствует схеме интегрирующей RC-цепи, обеспечивает на ВЧ затухание выходного сигнала и запаздывание относительно входного. Диаграмма Боде приведена на рисунке 1.2.

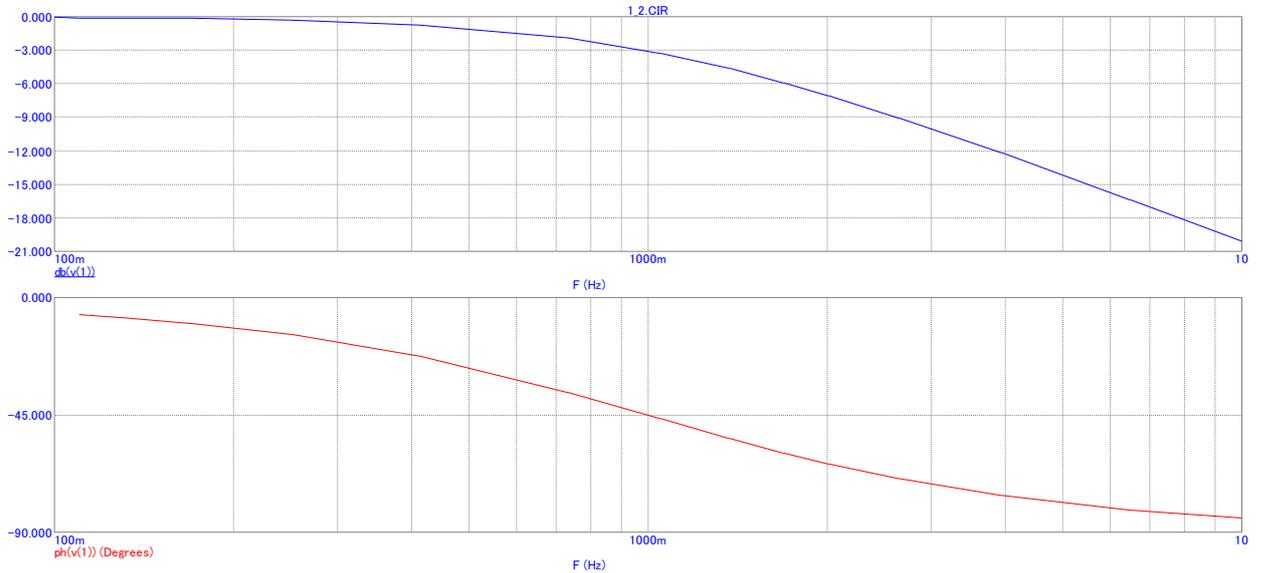


Рисунок 1.2 – Диаграмма Боде ФНЧ

### 2. Фильтр верхних частот.

Схема ФВЧ соответствует схеме дифференцирующей RC-цепи, обеспечивает на НЧ затухание выходного сигнала и опережение относительно входного. Диаграмма Боде приведена на рисунке 1.3. Частота среза ФНЧ и ФВЧ одинакова и равна

$$f = 1/(2\pi RC) \quad (1.9).$$

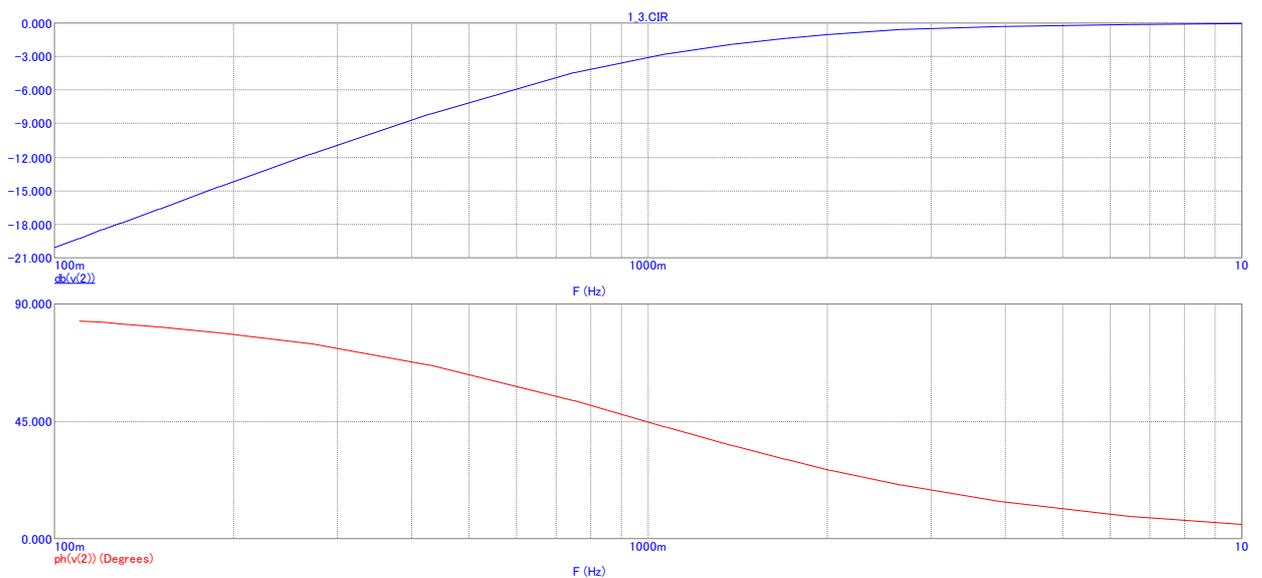


Рисунок 1.3 – Диаграмма Боде ФВЧ

### 3. Пассивный полосовой RC-фильтр.

Пассивный полосовой RC-фильтр получается путем последовательного соединения ФВЧ и ФНЧ. Выходное напряжение стремится к нулю на низких и высоких частотах и максимально на резонансной частоте. Схема фильтра приведена на рисунке 1.4, диаграмма Бode приведена на рисунке 1.5. Резонансная частота фильтра также равна  $1/(2\pi RC)$ , фазовый сдвиг на резонансной частоте равен нулю, коэффициент усиления равен  $1/3$  или  $-9.542$  дБ.

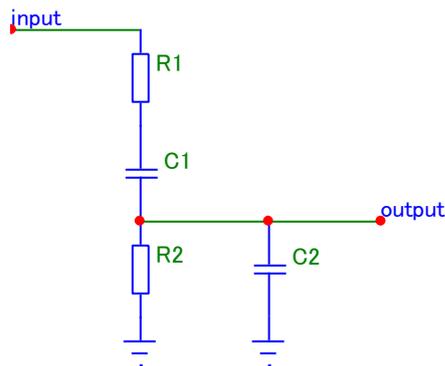


Рисунок 1.4 – Схема пассивного полосового RC-фильтра

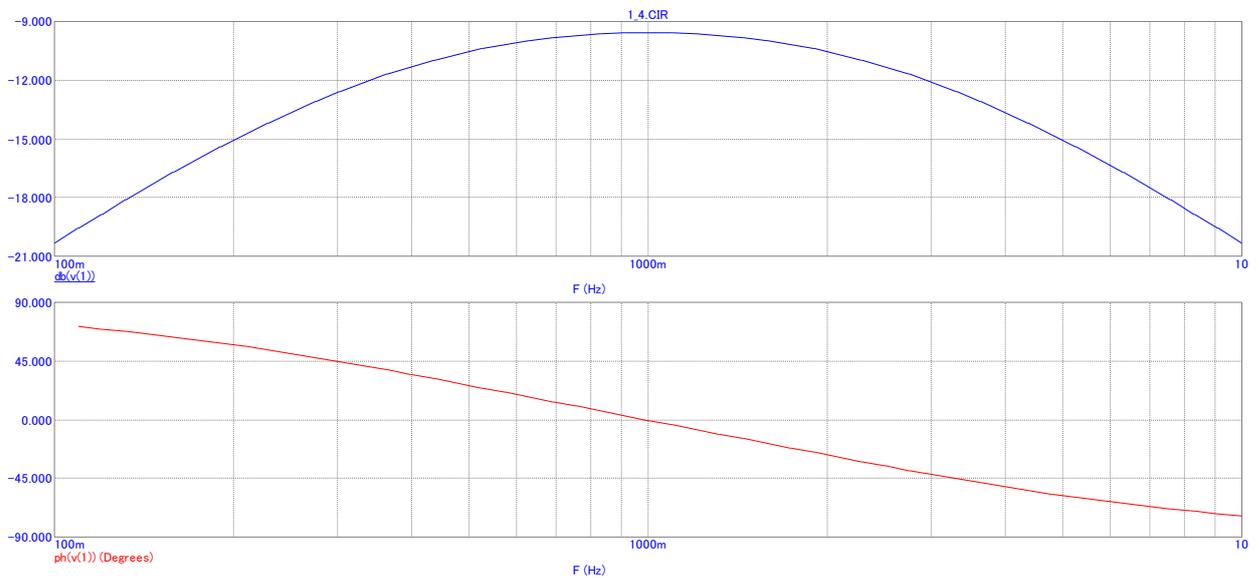


Рисунок 1.5 – Диаграмма Бode пассивного полосового RC-фильтра

### 4. Мост Вина-Робинсона.

Если пассивный полосовой RC-фильтр дополнить резистивным делителем напряжения с коэффициентом  $1/3$ , получим мост Вина-Робинсона. Выходное напряжение максимально на низких и высоких частотах и равно  $1/3$ ; равно нулю на резонансной

частоте. Схема моста приведена на рисунке 1.6, диаграмма Боде приведена на рисунке 1.7. Резонансная частота равна  $1/(2\pi RC)$ , фазовый сдвиг на резонансной частоте равен  $\pm\pi$ .

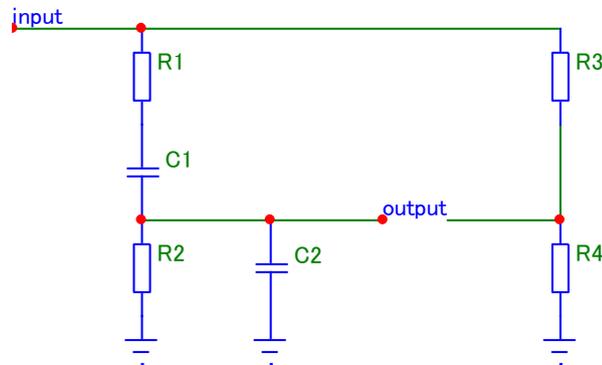


Рисунок 1.6 – Схема моста Вина-Робинсона

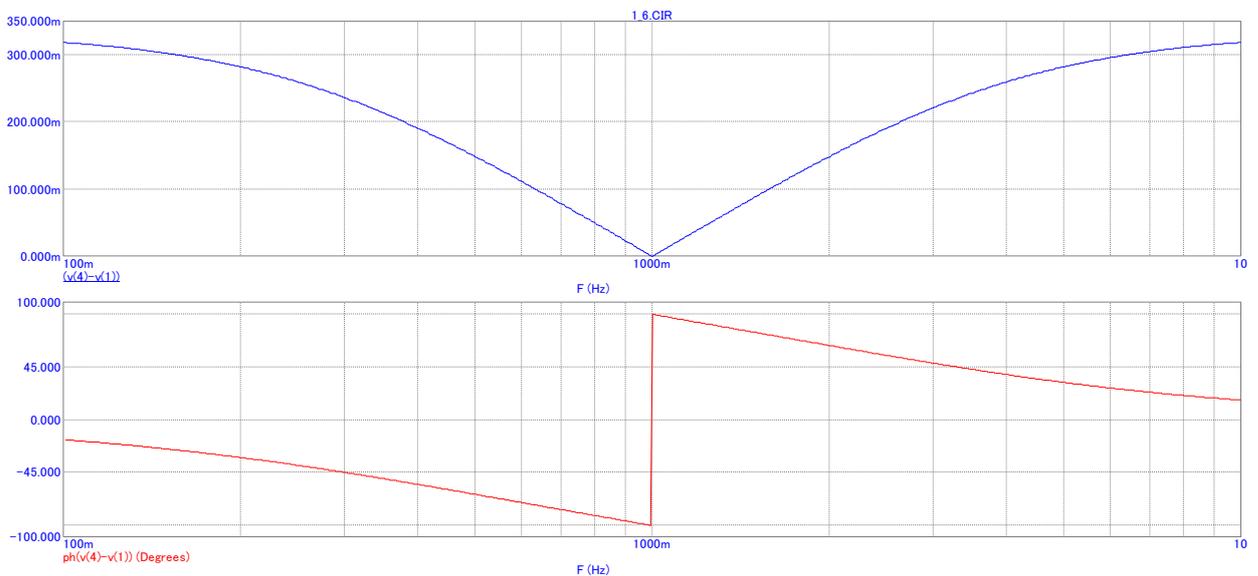


Рисунок 1.7 – Диаграмма Боде моста Вина-Робинсона

##### 5. Двойной Т-образный мост.

Частотная характеристика двойного Т-образного моста идентична характеристике моста Вина-Робинсона, однако выходное напряжение снимается относительно общей точки. Схема моста приведена на рисунке 1.8, диаграмма Боде приведена на рисунке 1.9. Резонансная частота равна  $1/(2\pi RC)$ , фазовый сдвиг на резонансной частоте равен  $\pm\pi$ .

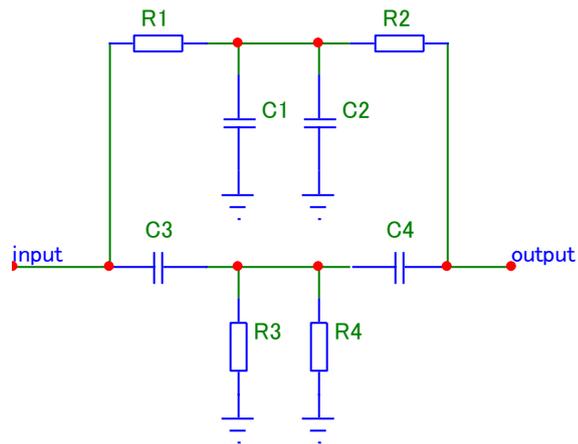


Рисунок 1.8 – Схема двойного Т-образного моста

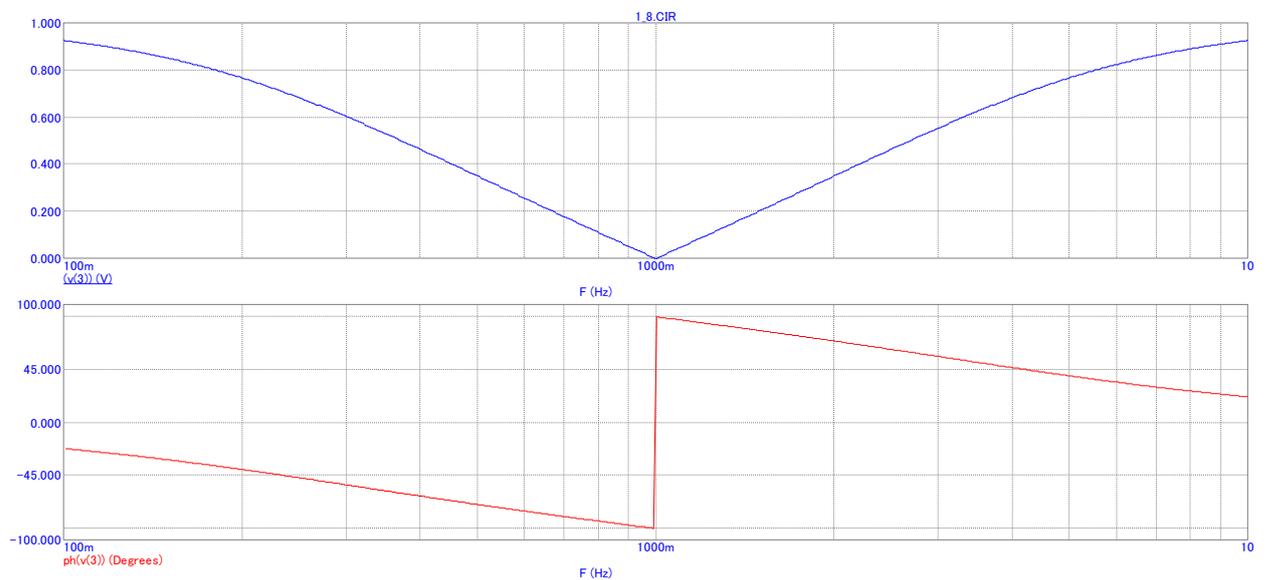


Рисунок 1.9 – Диаграмма Бode двойного Т-образного моста