

Тентиев Р.Б., Молдобаева Т.Р., Омокеева А.А.

ГЕНЕРАТОРДУН КОРГООСУҮЧҮН ЭЛЕКТРОМАГНИТТИК ПАРАМЕТРДИК ЖЫШТЫКТЫ ЭКИГЕ БӨЛҮШТҮРГҮЧҮНДӨГҮ ТЕРМЕЛҮҮЛӨРДҮН ДҮҮЛҮГҮСҮНҮН ШАРТТАРЫ

Тентиев Р.Б., Молдобаева Т.Р., Омокеева А.А.

УСЛОВИЯ ВОЗБУЖДЕНИЯ КОЛЕБАНИЙ В ЭЛЕКТРОМАГНИТНОМ ПАРАМЕТРИЧЕСКОМ ДЕЛИТЕЛЕ ЧАСТОТЫ НА ДВА ДЛЯ ЗАЩИТЫ ГЕНЕРАТОРОВ

R.B. Tentiev, T.R. Moldobaeva, A.A. Omokeeva

THE CONDITIONS OF EXCITATION OF OSCILLATIONS IN ELECTROMAGNETIC PARAMETRIC FREQUENCY DIVIDER IN TWO FOR PROTECTION OF GENERATORS

УДК: 621.316

Бул эмгекте сыйымдуулук агынын жсоюштуруусу менен электр орнотмосундагы жерге туташуудан болгон коргоосунун сыноочу агындык булагы катары электромагниттик параметрдик жыштык бөлүштүргүчүнүн иштөө шарттары каралган. Сыноочу агындын булагынан алынышы мүмкүн болгон, сыноочу агындын маанисинин чектелиши жарым жыштыктагы термелүүлөрдүн дүүлүгүүсүнүн айрым шарттарынын бузулушунан келип чыгат. Ошондуктан сыноочу агындын булагы катары бөлүштүргүчтүн иштөө шарттарын термелүүлөрдүн дүүлүгүүсүнүн шарттары менен салыштыруу зарылдыгы келип чыгууда. Сыйымдуулук агынын жсоюштуруусу менен электр орнотмосундагы жерге туташуудан коргоо үчүн электромагниттик параметрдик жыштык бөлүштүргүчүнүн базасында аткарылган булактан жыштыгы 25 Гц болгон сыноочу агынды кобойтуунун мүнкүн болгон жолдору каралууда.

Негизги сөздөр: генератор, статор, чыпка, чыналуу трансформатору, жерге туташуудан коргоо, кошулуучу агын, жаа өчүрүүчү реактор, сыноочу агындын булагы, жыштык.

В данной работе рассмотрены условия работы электромагнитного параметрического делителя частоты в качестве источника контрольного тока для защиты от замыканий на землю в электроустановках с компенсацией емкостного тока. Ограничение значения контрольного тока, который может быть получен от источника контрольного тока, обусловлено нарушением тех или иных условий возбуждения колебаний половинной частоты. Поэтому есть необходимость сопоставления условий работы делителя в качестве источника контрольного тока с условиями возбуждения колебаний. Рассматриваются возможные пути увеличения контрольного тока с частотой 25 Гц от источника, выполненного на базе электромагнитного параметрического делителя частоты и используемого для защиты от замыканий на землю в электроустановках с компенсацией емкостного тока.

Ключевые слова: генератор, статор, фильтр, трансформатор напряжения, защита, замыкание, наложенный ток, дугогасящий реактор, контрольный ток, частота.

In this paper, the operating conditions of electromagnetic parametric frequency divider as a source of control current for protection against earth faults in electrical installations with compensation of capacitive current are considered. Limitation of the value of reference current, which can be obtained from the source of reference current, due to the violation of certain conditions of excitation of oscillations of half frequency. Therefore, there is a need to compare the conditions of the divider as a source of reference current with the conditions of oscillation excitation. Possible ways of increasing controlling current with 25 Hz frequency from the source made on the basis of electromagnetic parametric frequency splitter and used for ground fault protection in power units with superimposed current adjustment are considered.

Key words: generator, stator, filter, voltage transformer, protection, short circuit, superimposed current, arcing reactor, reference current, frequency.

В настоящее время в технике релейной защиты и автоматики в частности, защите от замыканий на землю в электрических сетях с компенсацией емкостного тока, а также в защите от замыканий на землю в обмотке статора гидрогенераторов довольно широко используется источник контрольного тока с частотой 25 Гц.

Электромагнитный параметрический делитель частоты на два в течение длительного времени успешно используется как основной элемент источника контрольного тока [1]. При разработке инженерной методики расчета и проектировании источников контрольного тока в [2, 3] были предложены критерии, определяющие условия возбуждения колебаний половинной частоты, основанные на использовании специфических свойств параметрических колебаний.

При использовании в качестве источника контрольного тока электромагнитного делителя частоты на два, общие требования к источнику, заключаются в следующих трех положениях [4]:

1. Должны выполняться условия мягкого возбуждения колебаний половинной частоты и условия существования стационарного режима деления частоты при изменении переходного сопротивления в месте замыкания от бесконечности до нуля.

2. Режим деления частоты должен сохраняться при протекании по выходной обмотке делителя полного тока дугогасящих реакторов.

3. Включение источника контрольного тока в цепь дугогасящих реакторов практически не должно изменять сопротивление в цепи нейтрали.

Это означает, что выходное сопротивление источника на промышленной частоте должно быть намного меньше эквивалентного сопротивления дугогасящих реакторов.

Основы инженерной методики расчета электромагнитного параметрического делителя частоты, используемого как элемента источника контрольного тока, заложены в работе [5].

Исходная классическая схема делителя частоты (схема Папалекси Н.Д.) приведена на рисунке 1.

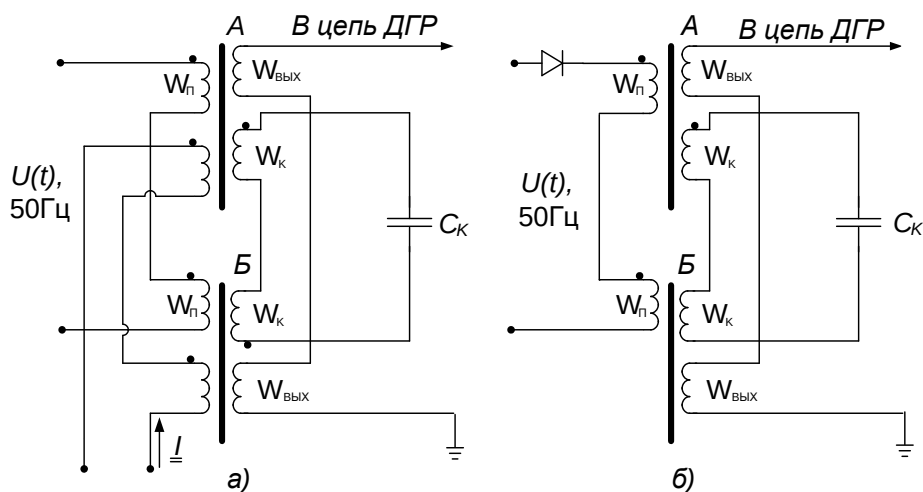


Рис. 1. Схема электромагнитного параметрического делителя частоты: а – с подмагничиванием постоянным током, б – с диодом в цепи питания.

Делитель частоты состоит из двух одинаковых замкнутых ферромагнитных сердечников, на которые нанесены обмотки колебательного контура W_K , замкнутые на конденсатор C и обмотки питания W_{Π} , называемые также обмотками возбуждения.

Существенно то, что обмотка возбуждения и обмотка колебательного контура попарно соединяются так, что между ними отсутствует электромагнитная связь.

Выходные обмотки $W_{ВЫХ}$ соединяются также, как и обмотки колебательного контура и служат для согласования с нагрузкой.

Роль обмоток возбуждения заключается в том, чтобы обеспечить периодическое изменение индуктивности обмоток колебательного контура с частотой 50 Гц. Поскольку магнитная проницаемость ферромагнитных сердечников является четной функцией намагничивающего тока, то для того чтобы при частоте 50 Гц магнитная проницаемость и соответственно индуктивности обмоток колебательного контура изменялась также с частотой 50 Гц вводится либо подмагничивание постоянным током с помощью специальных обмоток (рис. 1.а), либо в цепь обмоток возбуждения включается диод (рис. 1.б). Практическое применение в источнике контрольного тока получил второй вариант с диодом.

Далее рассматривается схема делителя частоты в виде представленном на рис. 2, которая отличается от схемы по рис 1.б только тем, что рассеиваемая энергия в колебательном контуре учтена эквивалентной проводимостью g . В некоторых задачах рассеиваемая энергия может учитываться также эквивалентным сопротивлением R , включаемым последовательно в цепь колебательного контура.

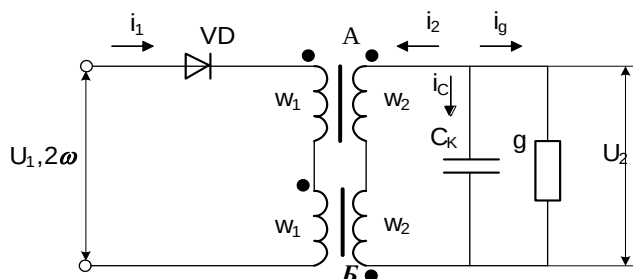


Рис. 2. Схема делителя частоты с вентелем в цепи питания.

Система уравнений, описывающих процессы в колебательном контуре

$$\begin{aligned}
 i_2 + i_C + i_g &= 0, \\
 i_1 w_1 + i_2 w_2 &= h_A l_{cp}, \\
 i_1 w_1 - i_2 w_2 &= h_B l_{cp}, \\
 i_C &= C_K \frac{dU_2}{dt}, \\
 i_g &= gU_2, \\
 U_2 &= w_2 S \frac{d(b_A - b_B)}{dt},
 \end{aligned} \tag{1}$$

где i_2 , i_C , i_g - мгновенные значения токов в ветвях колебательного контура, показанных на рис. 2.; h_A , h_B , b_A , b_B - напряженность магнитного поля и индукция в сердечниках А и Б.; U_2 - напряжение половинной частоты на колебательном контуре.; S и l_{cp} - площадь поперечного сечения и длина средней магнитной линии магнитопроводов.

Совместное решение уравнений системы (1) дает

$$\frac{d^2(b_A - b_B)}{dt^2} + \frac{g}{C_K} \frac{d(b_A - b_B)}{dt} + (h_A - h_B) \frac{l_{cp}}{2w_2^2 C_K q} = 0 \tag{2}$$

В общем случае при работе делителя частоты мгновенные значения индукции в магнитопроводах, из-за взаимно противоположного соединения обмоток возбуждения и обмоток колебательного контура, равны

$$b_A = B_0 + b_1 + b_2;$$

$$b_B = B_0 + b_1 - b_2.$$

где B_0 - постоянная составляющая индукции; $b_1 = B_1 \sin 2\omega t$ - индукция частоты питания (основной гармоники); $b_2 = B_2 \sin 2\omega t$ - индукция половинной частоты.

Для исследования условий возбуждения колебаний (начало развития колебаний половинной частоты) примем, что $b_A - b_B = \Delta b$, где Δb малая величина.

Для дальнейших исследований необходимо принять аппроксимацию характеристики намагничивания магнитопроводов делителя каким-либо выражением. Без учета гистерезиса и вихревых токов характеристика намагничивания является однозначной и достаточно точно может быть описана либо полиномом нечетной степени

$$h = \alpha + \beta b + \gamma b^3 + \sigma b^5 + \dots,$$

либо гиперболическим синусом [6]

$$h = \alpha sh \beta b.$$

Принципиально эти два способа аппроксимации полностью аналогичны, так как разложение гиперболического синуса в степенной ряд является полиномом нечетной степени. Аппроксимация в виде гиперболического синуса более компактна, как для записи, так и для анализа, поэтому в дальнейшем используем эту аппроксимацию.

Примем для каждого магнитопровода соответственно

$$h_A = \alpha sh \beta b_A \text{ и } h_B = \alpha sh \beta b_B$$

подставим в (2) и преобразуем разность напряженностей

$$h_A - h_B = \alpha (sh \beta b_A - sh \beta b_B) = 2\alpha \left[sh \frac{\beta(b_A - b_B)}{2} * ch \frac{\beta(b_A + b_B)}{2} \right]$$

так как принято, что $b_A - b_B$ малая величина и соответственно $b_A \approx b_B = b$, то

$$sh \frac{\beta(b_A - b_B)}{2} \approx \frac{\beta(b_A - b_B)}{2} = \frac{\beta \Delta b}{2}; \quad \frac{\beta(b_A + b_B)}{2} \approx \beta b.$$

С учетом преобразований уравнение (2) примет вид

$$\frac{d^2 \Delta b}{dt^2} + \frac{g}{C} \frac{d \Delta b}{dt} + \left(\frac{\alpha \beta l_{\text{ср}}}{2W_K^2 C_K S} ch \beta b \right) \Delta b = 0$$

Так как последний член уравнения является функцией безразмерной величины βb , то есть смысл все члены уравнения (2) представить в относительных единицах, в том числе и время, приведя его к масштабу периода индукции с частотой ω . Для этого умножим все члены уравнения на β и заменим $t = \tau / \omega$

$$\frac{d^2 (\beta \Delta b)}{d\tau^2} + \frac{g}{\omega C_K} \frac{d(\beta \Delta b)}{d\tau} + \left(\frac{\alpha \beta l_{\text{ср}} ch \beta b}{2W_K^2 C_K S \omega^2} \right) \beta \Delta b = 0$$

В полученном уравнении очень важно обратить внимание на физический смысл коэффициента при $\beta\Delta b$. Он представляет из себя отношение квадрата мгновенной резонансной частоты колебательного контура к квадрату половинной частоты ω . На границе возникновения колебаний, когда $b_2 \approx 0$, $b = B_0 + B_1 \sin 2\omega t$, мгновенная резонансная частота колебательного контура является периодической функцией. Коэффициент при $\beta\Delta b$, когда $b = 0$, и следовательно $ch\beta b = 1$, определяется только параметрами элементов делителя частоты. Этот коэффициент при указанных условиях обозначим $1/K$ и K далее называем конструктивным коэффициентом делителя частоты. Так же введем обозначение $g/\omega C_K = 2\delta$. Таким образом, для дальнейшего рассмотрения принимаем уравнение колебательного контура в виде

$$\frac{d^2(\beta\Delta b)}{d\tau^2} + 2\delta \frac{d(\beta\Delta b)}{d\tau} + \left(\frac{1}{K}ch\beta b\right)\beta\Delta b = 0 \quad (3)$$

Поскольку в колебательном контуре делителя частоты отсутствует источник половинной частоты, то очевидно, что колебание половинной частоты могут возникнуть и существовать только в том случае, если собственная частота колебательного контура будет равна половине частоты источника питания. Поскольку индуктивность колебательного контура делителя частоты периодически меняется под действием тока, протекающего в цепи возбуждения, то точнее говорить о равенстве средней собственной частоты половине частоты источника питания.

Вторым обязательным условием возникновения и существования колебаний половинной частоты является равенство энергии вносимой за счет периодического изменения индуктивности и энергии рассеиваемой в колебательном контуре. Причем на стадии возникновения и нарастания амплитуды колебаний половинной частоты вносимая энергия должна быть больше рассеиваемой, а на стадии стационарных колебаний эти энергии должны быть равны друг другу.

Выражение для мгновенной резонансной частоты можно получить, через выражение магнитной проницаемости, которая при аппроксимации характеристики намагничивания гиперболическим синусом может быть записана в следующем виде

$$\mu = \frac{db}{dh} = \frac{1}{\frac{dh}{db}} = \frac{1}{\alpha\beta ch\beta b}$$

Суммарное значение мгновенной индуктивности обмоток колебательного контура будет равно

$$L = 2 \frac{W_K^2 S}{l_{CP}} \frac{1}{\alpha\beta ch\beta b} \quad (4)$$

Мгновенная резонансная частота

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC_K}} = \sqrt{\frac{\alpha\beta l_{CP} ch\beta b}{2W_K^2 C_K S}} = \sqrt{\frac{1}{K} ch\beta b} \quad (5)$$

Для обеспечения изменения индуктивности с частотой 2ω мгновенное значение индукции в (4) должно изменяться по закону

$$b = B_1 \sin 2\omega t + B_0, \quad (6)$$

где B_1 - амплитуда индукции двойной частоты; B_0 - постоянная составляющая индукции.

Отмеченное обстоятельство иллюстрируется на рис. 3.

Причем очевидно, что должно выполняться условие $B_1 \leq B_0$. В схеме делителя частоты с отдельной обмоткой подмагничивания постоянным током соотношение между B_1 и B_0 может устанавливаться любым, а в схеме с диодом значения B_1 и B_0 принудительно связаны между собой. Однако процесс перемагничивания происходит таким образом, что в этой схеме всегда выполняется условие $B_1 < B_0$. Объяснение этому обстоятельству дается подробно в [7].

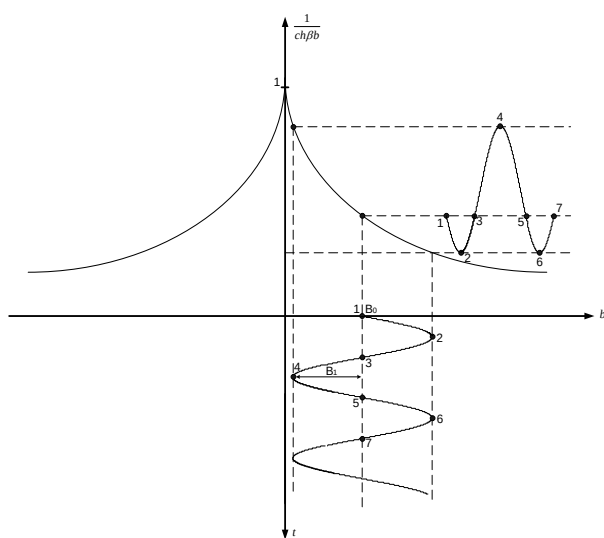


Рис. 3. Формирование закона периодического изменения индуктивности

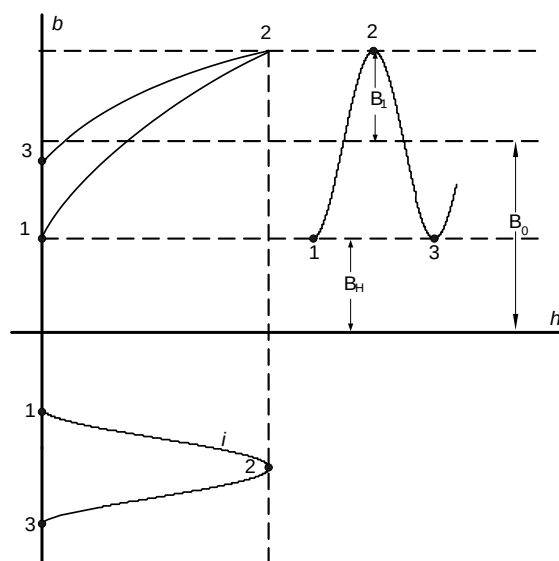


Рис. 4. К определению постоянной составляющей индукции в сердечниках делителя частоты по схеме рис. 1, 6

Установившийся процесс перемагничивания сердечников делителя частоты при наличии вентиля в цепи обмоток возбуждения отображается частным циклом, вид которого показан на рис.4.

При изменении напряжения питания изменяются одновременно все величины, обозначенные на рис. 4. B_H , B_1 и B_0 . Причем их значения зависят от характеристик материала токопровода, качества изготовления магнитопровода и других факторов. Поэтому зависимость B_H от B_1 может быть получена только экспериментально для конкретного сердечника. В работе [7] такие зависимости получены для ряда конкретных магнитопроводов, в результате чего установлено, что зависимость B_H от B_1 может быть описана выражением

$$B_{H*} = B_{H\max*} \left[1 - e^{-k_b B_{1*}} \right] \quad (7)$$

В выражении (7) индукция принимается в относительных единицах, определяемая с учетом коэффициента, β , как βb . Значение величины $B_{H\max*}$ и коэффициента k_b зависят от свойств конкретного магнитопровода. В расчетах, приводимых ниже принято $k_b = 1,5$, $B_{H\max*} = 3,0$ при коэффициентах аппроксимации в выражении для характеристики намагничивания

$h = \alpha sh\beta b$ - $\alpha = 2,06$ А/м, $\beta = 5$ 1/Тл. График зависимости $B_{H\max*}$ от B_{1*} приведен на рисунке 5.

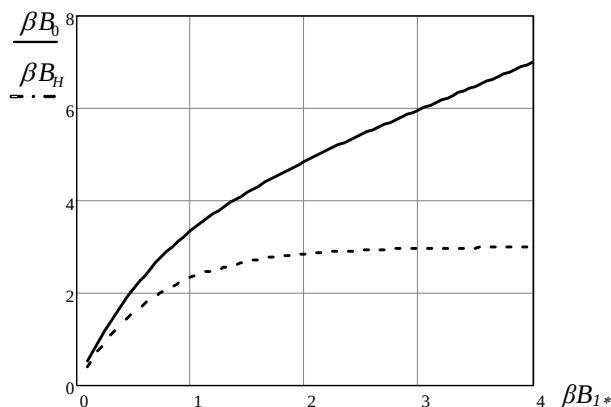


Рис. 5. Зависимость постоянной составляющей индукции от амплитуды индукции частоты 2ω .

Постоянная составляющая индукции, как видно из рисунка 4 равна

$$B_0 = B_H + B_1 \quad (8)$$

Теперь можно приступить к использованию условия по равенству средней частоты половинной частоте. При этом потери в колебательном контуре будем учитывать не параллельно включенной проводимостью g , а последовательно включенным сопротивлением R . Такая замена, как это будет видно, далее упрощает использование условия по соотношению энергий.

Выражение для резонансной частоты при этом не изменяется, а выражение для коэффициента затухания при записи уравнения через безразмерное время $\tau = \omega t$ будет иметь вид

$$\delta = \frac{R}{2\omega L}$$

Собственная мгновенная частота колебательного контура будет равна $\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{LC} - \delta^2}$

С учетом (4) и (5) относительная собственная мгновенная частота будет равна

$$\omega_{0*} = \sqrt{\frac{1}{K} ch\beta b - \left(\frac{R l_{cp} \alpha \beta}{\omega 4 S W_K^2} ch\beta b \right)^2} \quad (9)$$

Поскольку при расчетах целесообразно задавать не отдельные параметры делителя частоты, а только обобщенный конструктивный коэффициент K , то преобразуем выражение (9) следующим образом: умножим и разделим второй член подкоренного выражения на $\omega^2 C$ в результате чего получим

$$\omega_{0*} = \sqrt{\frac{1}{K} ch\beta b \left(1 - \frac{R_*^2}{4} \frac{1}{K} ch\beta b \right)^2} \quad (10)$$

где $R_* = R\omega C$.

Критерием границы возбуждения колебаний половинной частоты, как указывалось, является равенство средней за период свободной частоты половинной частоте. При принятых относительных цах это условие имеет вид

$$\omega_{0*cp} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \omega_{0*} d\tau = 1 \quad (11)$$

В период выполнения работы [5] отсутствовали средства проведения непосредственных расчетов с ис-

пользованием выражения для свободной частоты по (11). Поэтому критерий по (11) заменялся приближенным критерием в виде равенства среднего квадрата свободной частоты квадрату половинной частоте

$$\omega_{0*cp}^2 = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \omega_{0*}^2 d\tau = 1 \quad (12)$$

В этом случае расчеты становились возможными, так как периодическая функция $ch\beta b$ при изменении индукции по (5) раскладывается в ряд Фурье, коэффициенты которого выражаются через табулированную функцию Бесселя от мнимого аргумента.

Далее проведены расчеты по выражениям (11) и (12). На основе опыта конструирования делителей частоты, выполненных с использованием холоднокатанной трансформаторной стали, в расчетах приняты следующие значения величин $K = 200$, $\beta = 5$, $R_* = 0,2$, $k_b = 1,5$ и $\beta B_{H*} = 3$.

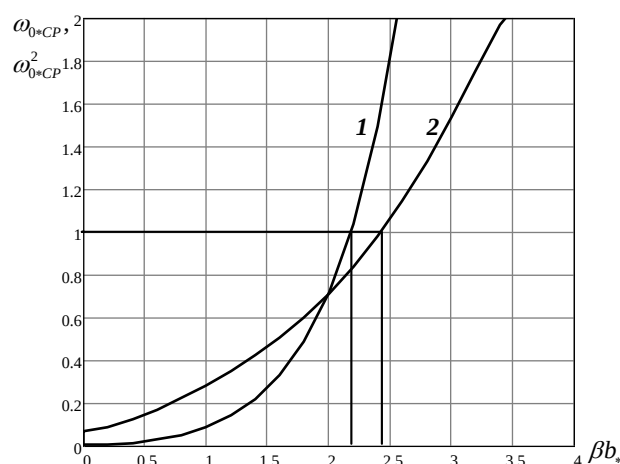


Рис. 6. Зависимость средней свободной частоты от индукции βb_* : - по среднему квадрату свободной частоты (12) (кривая 1); - по средней свободной частоте (10) (кривая 2).

Результаты представлены на рис. 6 в виде графиков зависимости ω_{0*cp} и ω_{0*cp}^2 от B_1 . Значения индукции B_1 при $\omega_{0*cp} = \omega_{0*cp}^2 = 1$ по точной и приближенной формулам отличаются примерно на 25%. Таким образом современные возможности вычислений позволяют несколько уточнить определение граничных условий возбуждения параметрических колебаний из условия равенства средней свободной частоты половинной частоте.

Литература:

1. Патент РФ №2268524, Устройство для защиты от замыканий в сетях с компенсацией емкостного тока / Р.А.Вайнштейн, В.В.Шестакова, С.М. Юдин. Опубл.20.01. 2006, Бюл №2.
2. Вайнштейн Р.А., Шмойлов А.В., Коломиец Н.В. Расчет ферромагнитных делителей частоты по средней собственной частоте. // «Электричество», №9, 1974 г.
3. Тентиев Р.Б. Защита от замыканий на землю с наложением тока с частотой 25 Гц в сетях с компенсацией емкостного тока // Известия Кыргызского государственного технического университета. г. Бишкек - 2012 - № 27. - С.78-83
4. Каневский Я.М. Применение устройства БРЭ 1301.01 для защиты от замыканий на землю статора генератора в блоке генератор -трансформатор с ответвлением // Энергетик – 2004. - №4. - С. 33 - 34.
5. Федосеев А.М. Релейная защита электрических систем. М.: 1976. - 560 с.
6. Шнеерсон Э.М. Цифровая релейная защита. М.: Издательство Энергоатомиздат. - 2007. - 549 с.
7. Тентиев Р.Б. Источник контрольного тока для защиты от замыканий на землю в электроустановках с компенсацией емкостного тока // Наука и новые технологии г. Бишкек -2013. № 4. - С.50-53