

**К ВОПРОСУ РАСЧЕТНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЧАСТОТЫ
СВОБОДНЫХ КОЛЕБАНИЙ И ВЕЛИЧИНЫ ИНДУКТИВНОСТИ
ДЕМПФИРУЮЩИХ ДРОССЕЛЕЙ В СИСТЕМЕ
ФЕРРОМАГНИТНЫЙ УТРОИТЕЛЬ ЧАСТОТЫ — КОНДЕНСАТОРЫ
ПРОДОЛЬНОЙ КОМПЕНСАЦИИ — АСИНХРОННЫЙ ДВИГАТЕЛЬ**

Я. В. ПЕТРОВ, А. И. ЗАЙЦЕВ

(Рекомендовано научным семинаром электромеханического факультета).

Известно несколько методов расчета граничных условий самовозбуждения асинхронных двигателей, включаемых через конденсаторы продольной компенсации. В основу части методов положен анализ установившихся режимов работы асинхронной машины с использованием законов Кирхгофа и Ома для цепей синусоидального тока, так как на границе устойчивости в системе поддерживаются незатухающие свободные колебания [1—6 и др.]. В ряде других работ [1, 7—10 и др.] использованы методы исследования устойчивости систем автоматического регулирования, описываемых линейными дифференциальными уравнениями с постоянными коэффициентами; положение системы на границе устойчивости отвечает граничным условиям самовозбуждения машины.

Свободные колебания в системе не возникают при соответствующем сочетании ее параметров. Если же система подвержена колебаниям в процессе разгона двигателя, они могут быть устранены присоединением параллельно конденсаторам продольной компенсации или двигателю балластных (демпфирующих) активных или индуктивных сопротивлений. Расчетами и экспериментами доказано, что для установок до 1—2 кгт частоты 150 гц более эффективными демпферами являются дроссели со стальным сердечником.

Хотя в указанных работах приводятся достаточно простые выражения для нижней и верхней резонансных частот, однако расхождение расчетных и опытных данных, как правило, значительное, а известная нам формула выбора величины индуктивности дросселя [8] дает слишком большой запас мощности дросселя по сравнению с необходимой.

Без рассмотрения сложного переходного электромеханического процесса асинхронной машины, подвергающейся самовозбуждению, более точно и просто значение скорости самораскачивания двигателя и соответствующая ей частота свободных колебаний могут быть установлены на основании некоторых положений теории электрических фильтров из реактивных элементов, которые предлагается здесь при-

менить. При этом и выбор величины индуктивности дросселей значительно упрощается и уточняется.

На рис. 1 и 2 показаны схемы замещения системы соответственно для двигательного и генераторного режимов асинхронной машины. Условно можно считать, что в первом случае электрическая энергия от источника питания (устроителя) с э.д.с. e_3 и внутренними параметрами r_3 и L_3 передается в цепь ротора двигателя через пассивный четырехполюсник, очерченный штрихпунктирным контуром. Во втором случае, при самовозбуждении, электроэнергия свободных колебаний, наоборот, из цепи ротора машины через тот же четырехполюсник поступает к источнику, рассеиваясь в

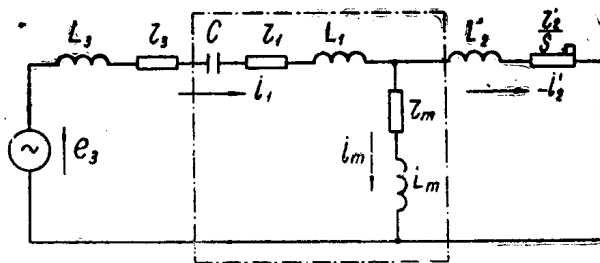


Рис. 1.

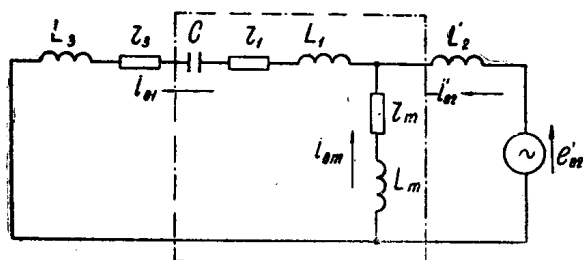


Рис. 2.

активных сопротивлений последнего и четырехполюсника. Активное сопротивление роторной цепи в генераторном режиме машины является отрицательным, генерирующим, и на основании теоремы компенсации может быть на схеме замещения заменено эквивалентной э. д. с. e'_{02} свободных колебаний, численно равной

падению напряжения на этом сопротивлении и направленной встречно току i'_{02} [11].

Таким образом, независимо от режима машины, электрическая энергия передается через один и тот же четырехполюсник, в последовательное плечо которого включены емкость продольной компенсации, активное сопротивление и индуктивность линии и цепи статора, а параллельное плечо образовано активным сопротивлением и индуктивностью намагничивающего контура машины.

Пренебрегаем активными сопротивлениями четырехполюсника и рассматриваем последний как Г-образный полосовой фильтр типа К. Допустимость освобождения четырехполюсника от активных сопротивлений (фильтр без потерь) может быть обоснована тем, что, во-первых, при отсутствии или короткой линии эти сопротивления сравнительно малы, во-вторых, активные сопротивления, особенно в случае протяженной линии небольшого сечения, учитываются соответствующим уменьшением емкости продольной компенсации для получения заданного напряжения на двигателе, то есть влияют на параметры фильтра в благоприятном направлении. На рис. 3 фильтр имеет лишь реактивные сопротивления. Кроме того, принимаем, что характеристические сопротивления фильтра согласованы с сопротивлениями нагрузки.

Так как данный фильтр является Г-образным полузвеном Т-или П-образных симметричных фильтров типа К, то к нему применимо условие пропускания симметричных фильтров, состоящих из реактивных элементов [12]:

$$Z_1 \geq -4Z_2;$$

$$Z_1 \leq 0, \quad (1)$$

где $Z_1 = 2\left(\omega L_1 - \frac{1}{\omega C}\right)$ — удвоенное эквивалентное сопротивление последовательного плеча;

$Z_2 = \frac{1}{2} \omega L_m$ — половина сопротивления параллельного плеча фильтра (рис.3).

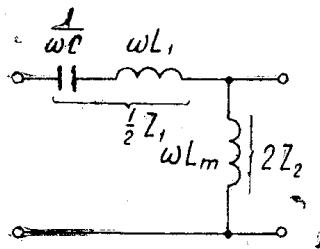


Рис. 3.

На основании (1) получаем частоту среза верхних частот

$$f_{c1} = \frac{1}{2\pi \sqrt{C(L_1 + L_m)}} \quad (2)$$

и частоту среза нижних частот

$$f_{c2} = \frac{1}{2\pi \sqrt{CL_1}}. \quad (3)$$

Диапазон $f_{c1} \div f_{c2}$ ограничивает полосу пропускания (прозрачности) частот, вне этого диапазона находится полоса непропускания (непрозрачности).

Если в системе могут генерироваться свободные колебания с частотами, лежащими в полосе прозрачности, самовозбуждение двигателя произойдет, причем, нижняя резонансная частота $f_{он}$ будет равна частоте среза f_{c1} . Если же возможные частоты свободных колебаний $f_{он} \div f_{ов}$ оказываются в полосе непропускания, самовозбуждение не возникает.

Полученное соотношение $f_{он} = f_{c1}$ совпадает с выражением для частоты самовозбуждения асинхронного генератора по [13] или, если пренебречь индуктивностью рассеяния статора L_1 — по [3], где эти зависимости установлены другим путем.

Угловая скорость ротора самовозбужденной машины в долях синхронной скорости определяется выражением [14].

$$\omega_{*} = \omega_{0*} \left| 1 + \frac{r_2' (r_1 + r_2)}{\left(1 + \frac{x_2'}{x_m}\right)^2 \left[x_2^2 \omega_{0*}^2 + (r_1 + r_2)^2 - 2x_2 x_c + \left(\frac{x_c}{\omega_{0*}}\right)^2 \right]} \right|, \quad (4)$$

где ω_{0*} — угловая частота свободных колебаний в долях частоты питающей сети;

$$x_2 = x_1 + x_3 + \frac{x_2' x_m}{x_2' + x_m} \text{ — (обозначения см. на рис. 1).}$$

Расчет частоты самовозбуждения согласно $f_{он} = f_{c1}$ и соответствующей ей критической скорости по (4) прост и удовлетворительно совпадает с опытом. Так, для утробителя 1,5 кВа и двигателя 0,5 кВт (I установка) опытная частота самовозбуждения* и критическая скорость равны:

$$f_{он} = 78,1 \text{ Гц; } n_{2н} = 1640 \text{ об/мин.}$$

* Частоты свободных колебаний определялись обработкой осциллограмм скорости при самораскачивании по способу, изложенному в [15].

Расчетные значения этих же величин по (2) и (4):

$$f_{c1} = f_{он} = 76 \text{ гц (погрешность — 2,7\%);}$$

$$\omega_{2н*} = 0,52 \text{ или } n_{2н} = 1560 \text{ об/мин (погрешность — 4,9\%).}$$

Пренебрежение индуктивностью L_1 повышает точность расчета:

$$f_{c1} = f_{он} = 78,5 \text{ гц;}$$

$$n_{2н} = 1635 \text{ об/мин.}$$

Несовпадение расчетных и опытных частот и скоростей для различных степеней компенсации в той же установке не превышает 8% (погрешности преимущественно отрицательные и возрастают с увеличением степени компенсации).

Обычно $L_1 \ll L_m$ даже при учете индуктивности линии утробитель-двигатель, поэтому допустимо полагать $L_1 \approx 0$; при этом получаем Г-образный фильтр верхних частот с частотой среза

$$f_{c1} \approx \frac{1}{2\pi \sqrt{CL_m}}. \quad (2')$$

По этой же причине вторая частота среза f_{c2} полосового фильтра значительно превосходит рабочую частоту $f = 150 \text{ гц}$ и частоту f_{c2} нет необходимости определять.

Исследование показывает, что для опытных установок, а также установок с продольной компенсацией и другими трехфазными асинхронными двигателями малой мощности промышленной и повышенной частот максимальной частота самовозбуждения мало зависит от степени компенсации и разнообразия параметров двигателей и источников питания и составляет $f_{ов} = (0,7 \div 0,8) f$. Ввиду невозможности полного согласования нагрузочных и характеристических сопротивлений при различных частотах полосы пропускания рекомендуется для полосового фильтра и фильтра верхних частот принимать $f_{c1} = 0,7f$ [12]. Учитывая, далее, что активные сопротивления системы оказывают дополнительное демпфирующее действие и что предельная частота свободных колебаний рассчитана для синхронной скорости, получаем простое условие отсутствия самовозбуждения.

$$f_{c1} \geq 0,7f \quad (5)$$

или

$$C(L_1 + L_m) \leq \frac{0,0518}{f^2}. \quad (5')$$

При $f = 150 \text{ гц}$ имеем

$$f_{c1} \geq 105 \text{ гц}$$

или

$$C(L_1 + L_m) \geq 2,3 \cdot 10^{-6}.$$

Например, для I установки

$$f_{c1} = 76 \text{ гц} < 105 \text{ гц}$$

или

$218 \cdot 10^{-6} (1,4 + 18,9) \cdot 10^{-3} > 2,3 \cdot 10^{-6}$, то есть самовозбуждение вполне возможно, что и наблюдается в опытах.

Для II опытной установки (утробитель $S_n = 300 \text{ ва}$, двигатель $P_n = 150 \text{ вт}$), выполненный с учетом (5,5') $f_{c1} = 114 \text{ гц} > 105 \text{ гц}$

или

$365 \cdot 10^{-6} (0,265 + 5,1) \cdot 10^{-3} < 2,3 \cdot 10^{-6}$, то есть самовозбуждение должно отсутствовать — опыт это подтверждает*.

* Метод Д-разбиения дает здесь ошибочный результат: расчетом получены $\omega_{он*} = 0,67$ и $\omega_{ов*} = 0,845$, следовательно, есть, хотя и узкая, зона самовозбуждения; однако, при многочисленных пусках двигателя не отмечено каких-либо резонансных явлений.

Выражение (5) или (5') позволяет не только быстро ответить на вопрос, будет ли в данной системе самовозбуждение двигателя, но служит одним из отправных пунктов при проектировании установок без самовозбуждения и выборе демпфирующих дросселей. Если заданы параметры двигателя, то для двигателя с наибольшей суммой $L_1 + L_m$ (в L_1 включена индуктивность линии) по (5') найти величину емкости продольной компенсации, а затем из условия создания необходимого уровня напряжения на зажимах двигателей рассчитать сопротивление X_3 утроителя, полагая $r_3 \leq 0,1 X_3$. Если, наоборот, известны параметры утроителя, аналогично намечаются параметры двигателя.

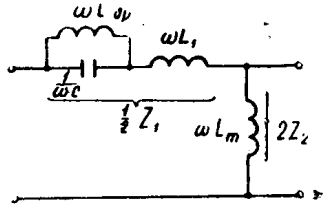


Рис. 4.

На рис. 4 дана схема замещения рассматриваемого фильтра с включенным параллельно конденсаторам дросселем для гашения самовозбуждения. Получен Г-образный заграждающий фильтр типа К или фильтр верхних частот типа m . Частоты среза фильтра и величину индуктивности дросселя $L_{др}$ при учете L_1 удобно определять, воспользовавшись условием (1).

$$Z_1 = 2 \left(\omega L_1 - \frac{\omega L_{др}}{\omega^2 C L_{др} - 1} \right); \quad Z_2 = \frac{1}{2} \omega L_m;$$

$$а) \quad 2 \left(\omega L_1 - \frac{\omega L_{др}}{\omega^2 C L_{др} - 1} \right) = -4 \cdot \frac{1}{2} \omega L_m,$$

откуда частоты среза

$$\begin{aligned} f_c &= 0; \\ f_{c1} &= \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{L_{др} + L_1 + L_m}{C L_{др} (L_1 + L_m)}}. \end{aligned} \quad (6)$$

$$б) \quad 2 \left(\omega L_1 - \frac{\omega L_{др}}{\omega^2 C L_{др} - 1} \right) = 0$$

и

$$f_{c2} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{L_{др} + L_1}{L_{др} L_1 C}}. \quad (7)$$

Здесь полоса прозрачности $f_{c1} \div f_{c2}$, полоса непрозрачности $0 \div f_{c1}$ и $f_{c2} \div \infty$, частота бесконечного затухания

$$f_{\infty} = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_{др} C}}.$$

Как показывают расчеты, частота f_{∞} приближается к диапазону частот свободных колебаний в системе или находится в нем, благодаря чему достигается повышенная эффективность гашения самовозбуждения дросселем продольного контура. Частота $f_{c2} \gg f$ и первую можно не определять.

Из (6) находим индуктивность дросселя, при которой исключается параметрический резонанс во время пуска двигателя.

$$L_{др} = \frac{L_1 + L_m}{\omega_{c1}^2 C (L_1 + L_m) - 1}, \quad (8)$$

где попрежнему $\omega_{c1} = 2\pi f_{c1} \geq 2\pi \cdot 0,7f$.

Пренебрегая относительно небольшой индуктивностью L_1 , перепишем (6) и (8)

$$f_{c1} \approx \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{L_{др} + L_m}{CL_{др}L_m}}; \quad (6')$$

$$L_{др} \approx \frac{L_m}{\omega_c^2 CL_m - 1}^*. \quad (8')$$

Преобразуем индуктивную часть фильтра с поперечным дросселем (рис. 5) к виду, удобному для применения условия пропускания фильтров. При отсутствии нагрузки индуктивная часть указанной схемы может рассматриваться как Г-образная с параллельным контуром $L_{др}$ и последовательным — $(L_1 + L_m)$. Переходя к эквивалентной Т-образ-

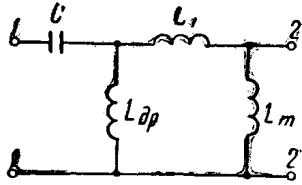


Рис. 5.

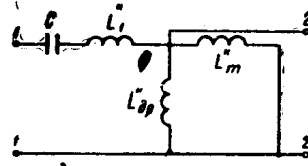


Рис. 6.

ной схеме замещения (рис. 6) и используя методику преобразования схем замещения асинхронной машины [16], получим:

$$\begin{aligned} L_1'' &= \frac{L_1 \cdot L_{др}}{L_1 + L_{др}}; \\ L_{др}'' &= \frac{L_{др}^2}{L_1 + L_{др}}; \\ L_{др}'' &= \frac{L_m}{\left(1 + \frac{L_1}{L_{др}}\right)^2}. \end{aligned} \quad (9)$$

Условие пропускания фильтров для схемы рис. 6 дает:

$$\begin{aligned} f_{c2} &= \frac{1}{2\pi \sqrt{CL_1''}}; \\ f_{c1} &= \frac{1}{2\pi \sqrt{C(L_1'' + L_3'')}}. \end{aligned} \quad (10)$$

где

$$L_3'' = \frac{L_{др}'' \cdot L_m''}{L_{др}'' + L_m''} = \frac{L_m \cdot L_{др}^2}{(L_1 + L_{др})(L_1 + L_{др} + L_m)}. \quad (11)$$

* Такие же значения частоты среза и индуктивности дросселя получим, рассматривая четырехполюсник рис. 4 (без L_1) как фильтр верхних частот типа m . Параметр m рассчитывается по формуле

$$m = \frac{1}{\omega_{c1} \sqrt{2CL_m}};$$

индуктивность дросселя

$$L_{др} = \frac{2m}{1 - m^2} L_m;$$

частота среза верхних частот

$$f_{c1} = \frac{1}{2\pi m \sqrt{2CL_m}}.$$

Заменив в (10) L_1 и L_2 по (9) и (11), после несложных преобразований находим

$$f_{c1} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{L_{др} + L_1 + L_m}{CL_{др}(L_1 + L_m)}} \quad (12)$$

или

$$L_{др} = \frac{L_1 + L_m}{\omega_{c1}^2 \cdot C (L_1 + L_m) - 1} \quad (13)$$

Но выражения (12) и (13) совершенно совпадают с выражениями соответственно (6) и (8), то есть, независимо от схемы включения данного дросселя (параллельно конденсаторам или двигателю — имеется в виду в последнем случае соединение обмоток дросселей λ), частоты среза одни и те же или, наоборот, при заданной частоте среза f_{c1} необходима одинаковая величина индуктивности дросселя, при которой самовозбуждение не наблюдается.

Достоверность формулы (13) подтверждена экспериментом. Для I опытной установки, двигатель которой подвергается самовозбуждению, были изготовлены на сердечниках трансформаторов тока 0—49у-100/5 три однофазных дросселя с соединением обмоток Y. Подбором числа витков обмоток дросселей получена такая наибольшая индуктивность последних $L_{др} = 24,7 \cdot 10^{-3}$ гн, при которой не происходило самовозбуждения в процессе пуска двигателя с нулевой и отличной от нуля начальной скоростью. Согласно же (13) расчетная индуктивность

$$L_{др} = \frac{(1,4 + 18,9) \cdot 10^{-3}}{(2\pi \cdot 105)^2 \cdot 218 (1,4 + 18,9) \cdot 10^{-9} - 1} = 21,9 \cdot 10^{-3} \text{ гн,}$$

то есть погрешность в определении величины индуктивности дросселей составила — 11,3% (последняя снижается, если пренебречь индуктивностью L_1).

Можно утверждать, что выражения (8), (8') пригодны для определения величины индуктивности демпфирующих дросселей, включаемых параллельно конденсаторам или двигателю. С помощью этих же выражений удастся оценить влияние на режим самовозбуждения данного двигателя других параллельно включенных двигателей, питающихся совместно от одного источника.

Например, если величина индуктивности некоторого работающего в установившемся режиме двигателя L_d удовлетворяет (8) или (8'), то есть $L_d \leq L_{др}$, то следует ожидать, что пуск другого двигателя, имеющего параметры L_1 и L_m , будет происходить без самовозбуждения. В противном случае, потребуется применить демпфирующие дроссели с индуктивностью

$$L'_{др} \leq \frac{L_d \cdot L_{др}}{L_d - L_{др}},$$

так как без дросселей пускаемый двигатель самовозбуждается, токи свободных колебаний поступают в работающий двигатель, на валу последнего быстро развивается тормозной момент, двигатель опрокидывается и застревает на определенной промежуточной скорости, то есть также самовозбуждается.

Естественно, чем большее число предварительно включенных двигателей или других трехфазных нагрузок, имеющих реактивную составляющую, иными словами, чем меньше эквивалентная индуктивность параллельно включенной прочей нагрузки, тем менее вероятно, согласно (8), самовозбуждение данного двигателя при пуске.

Параллельное присоединение активной трехфазной нагрузки не столь эффективно: так, для двигателя 500 вт I установки потребовалось включить активные сопротивления по 6,1 ом на фазу (потеря мощности 1830 вт), чтобы при пуске двигателя от ненулевой начальной скорости не наблюдалось самовозбуждения.

Выводы

1. Предлагается применить некоторые положения теории электрических фильтров из реактивных элементов для расчета основных величин в цепи с самовозбуждением асинхронного двигателя.

2. Получены простые формулы, с помощью которых можно найти частоту и скорость двигателя, отвечающие режиму самораскачивания, а также выбрать величину индуктивности демпфирующего дросселя. Расхождение расчетных и опытных данных находится в допустимых пределах.

ЛИТЕРАТУРА

1. А. И. Долгин. Резонанс в электрических цепях и системах. Госэнергоиздат, 1957.
2. C. F. Wagner. Self-Excitation of Induction Motors with Series Capacitors. Trans. AIEE, 1941, v. 60.
3. А. Т. Голован, И. П. Барбараш. Работа асинхронного генератора в режиме с самовозбуждением. «Электричество», 1944, № 3.
4. И. Э. Ибрагимов. Самовозбуждение асинхронных двигателей при продольной емкостной компенсации потери напряжения. Труды ЭНИН АН Азербайджанской ССР, т. XI, 1953.
5. В. Г. Бауман, О. В. Иванов, В. И. Комаров. Самовозбуждение асинхронных двигателей с последовательными конденсаторами. «Электричество», 1961, № 5.
6. О. В. Кекот, Р. В. Фильц. Расчет характеристик трехфазной асинхронной машины с конденсаторным возбуждением. Сборник научных работ аспирантов Львовского политехнического института. Львов, 1961, № 1.
7. И. Э. Ибрагимов. К вопросу самовозбуждения асинхронных двигателей при работе их через последовательные конденсаторы. Известия АН Азербайджанской ССР, 1958, № 2.
8. В. Т. Загорский. Исследование пуска асинхронных короткозамкнутых двигателей от генераторов соизмеримой мощности. Львов, 1958.
9. Чжан Чан-Шэн. Работа асинхронных машин, питаемых через общие конденсаторы. Автореферат диссертации, 1961.
10. Е. Я. Казовский. Переходные процессы в электрических машинах переменного тока. Изд. АН СССР, 1962.
11. Л. А. Бессонов. Теоретические основы электротехники. Изд. «Высшая школа», 1961.
12. Н. Д. Босый. Электрические фильтры. Гос. изд-во. технич. литературы УССР, 1960.
13. Г. Н. Петров. Электрические машины. Часть II. Госэнергоиздат, 1963.
14. Я. В. Петров, А. И. Зайцев. Самовозбуждение асинхронных двигателей, питающихся от статического устроителя частоты. Известия Томского политехнического института т. 117, 1963.
15. А. Т. Голован, Чжан Чан-Шэн. Механическое качание асинхронной машины при ее работе с последовательно включенными конденсаторами. «Электричество», 1962, № 10.
16. М. П. Костенко, Л. М. Пиотровский. Электрические машины. Часть II. Госэнергоиздат, 1958.