

ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ АСИНХРОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ ВЕТРОЭЛЕКТРОАГРЕГАТОВ ПРИ ПОДКЛЮЧЕНИИ ИХ К СЕТИ ЧЕРЕЗ ДЕМПФИРУЮЩЕЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ С ПОСЛЕДУЮЩИМ ЕГО ШУНТИРОВАНИЕМ

Дорохов А.В.

Харьковская государственная академия городского хозяйства

Украина, 61002, Харьков, ул. Революции, 12, кафедра электротехники

тел. (0572) 98-23-51, E-mail: final@kharkov.ukrpack.net

З використанням раніш розробленої методики розрахунку перехідних ударних струмів та моментів при підключенні асинхронних генераторів до мережі проведено чисельний експеримент та освітлена залежність характеру перехідних процесів та амплітудних величин струмів та моментів від величини, введеного в ланцюг статора, демпфіруючого активного опору. Запропоновані рекомендації з формування оптимального алгоритму включення. Описані явища супроводжуючі перехідний процес.

С использованием ранее разработанной методики расчета переходных ударных токов и моментов при подключении асинхронных генераторов к сети проведен численный эксперимент и освещена зависимость характера переходных процессов и амплитудных величин токов и моментов от величины, введенного в цепь статора, демпфирующего активного сопротивления. Даны рекомендации по формированию оптимального алгоритма включения. Описаны явления сопутствующие переходному процессу.

Подключение асинхронного генератора ветроэлектроагрегата к сети осуществляется после того, как ветротурбина раскрутит его ротор до синхронной скорости. Возникающий переходной процесс с одной стороны обусловлен нарастанием тока в подключаемой к сети индуктивности, а с другой – вращением ротора как во вращающихся, так и в практически неподвижных апериодических полях. Вращающееся поле в статоре наводит ЭДС частоты сети. Составляющие поля ротора, обусловленные апериодическими токами, наводят в статоре затухающую ЭДС частоты сети, а в самом роторе - апериодические составляющие ЭДС. Аналогична ситуация и в отношении полей статора и вращающегося с синхронной скоростью ротора, обусловленных апериодическими составляющими токов статора. Взаимодействие этих составляющих полей приводит к появлению переходных ударных токов и знакопеременных моментов во много раз превосходящих номинальные.

На ветроэлектростанции в Донузлаве на лицензионных ветроэлектроагрегатах USW56-100 американской фирмы U.S. WINDPOWER, в момент включения генератора, за счет ударных токов и моментов, имели место поломки лопастей ветротурбины и несанкционированные срабатывания защиты, исключающие возможность запуска ветроэлектроагрегата.

Для исключения подобных явлений используют различные технические решения.

Устройство мягкого пуска (soft start) [6], представляющее собой включенные последовательно с каждой фазой генератора встречно параллельно соединенные тиристоры. Устройство позволяет плавно увеличивать напряжение на зажимах генератора и соответственно плавно наращивать его ток и момент. Стоимость этих устройств достаточно велика и диапазон рабочих токов не охватывает токи мощных ветроэлектроагрегатов.

Устройство для одновременного подключения фаз генератора к сети в моменты времени, ис-

ключающие возникновение апериодических составляющих тока в обмотке статора [5]. Теория и математические модели происходящих при этом процессов рассмотрены в работах [1, 2]. Такое решение следует из того, что, как известно из курса ТОЭ, при подключении индуктивности к сети в момент, когда переменное синусоидальное напряжение максимально имеет место сразу установившийся режим. При подключении же нелинейной индуктивности в момент времени, когда напряжение в сети равно нулю ток через пол периода после включения может в десятки и сотни раз превышать значение тока в установившемся режиме. Кроме того, данным устройством может быть обеспечено плавное наращивание напряжения на зажимах генератора. Стоимость такого устройства несколько меньше стоимости устройства мягкого пуска, а диапазон рабочих токов также ограничен.

Включение генератора через последовательно включенные с обмотками статора индуктивности [4] обеспечивает любое требуемое снижение тока и момента, но сама катушка индуктивности чрезмерно материалоемка и дорогостояща.

Включение генератора через последовательно включенные с обмотками статора активные сопротивления (рис. 1) [1] также обеспечивает любое требуемое снижение тока и момента, при этом стоимость резистора значительно меньше, чем стоимость катушки индуктивности.

Именно резистор применен на осваиваемом в Украине и установленном на Тарханкуте лицензионном ветроэлектроагрегате Т600-48, мощностью 600 кВт бельгийской фирмы Turbowind. Резистор включен в цепь статора когда разомкнуты контакты К и исключен из цепи, когда они замкнуты. В зависимости от величины сопротивления R и времени его пребывания во включенном состоянии, после замыкания контактов К возникают всплески тока и момента генератора.

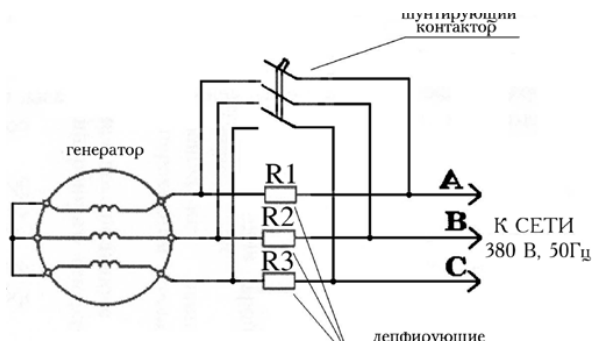


Рис. 1. Включение генератора через последовательно включенные с обмотками статора резисторы

Методика расчета токов и моментов в переходном режиме при трехфазном подключении асинхронного генератора к сети с нулевыми начальными условиями изложена в [3]. Она пригодна без изменений для расчета токов и моментов при подключении асинхронного генератора к сети с последовательно включенным в цепь статора резистором. При этом значение активного сопротивления статора должно быть увеличено на величину добавочного сопротивления. Для расчета переходного процесса после шунтирования добавочного резистора необходимо в качестве начальных условий принять значения потокосцеплений статора и ротора в момент шунтирования, а значение активного сопротивления равным активному сопротивлению обмотки статора. Это все учтено в программе, составленной на MathCAD PLUS 7.0 PRO, приведенной в приложении, и с ее использованием проведен численный эксперимент.

Кратности максимальных в переходном режиме токов при различных величинах сопротивлений резисторов, соединенных последовательно с обмоткой статора, представлены на рис. 2. При шунтировании добавочного резистора после первого периода кратность тока с увеличением сопротивления резко снижается, а затем увеличивается, доходя практически до значения, которое наблюдается при отсутствии добавочного резистора. Это обусловлено тем, что за время, равное одному периоду, аperiodические составляющие токов не успевают затухать, а при шунтировании резистора возникают новые аperiodические токи, которые суммируясь с предыдущими приводят к увеличению полного тока (штриховая линия на рис. 2). На начальном участке, где кратность добавочного сопротивления меньше или равна пяти, снижение аperiodических составляющих тока с ростом добавочного сопротивления на первом этапе включения больше увеличения аperiodических составляющих после шунтирования.

В связи с этим на начальном участке, при шунтировании добавочного резистора после первого периода, наблюдается снижение кратности максимального в переходном режиме тока. При шунтировании добавочного резистора после того как исчезли аperiodические составляющие тока на первом этапе включения, с ростом добавочного сопротивления монотонно снижается кратность максимального в переходном режиме тока. Кратность добавочного сопротивления

$$k_S = R_{доб} / R_S,$$

где $R_{доб}$ - добавочное сопротивление; R_S - активное сопротивление фазы обмотки статора.

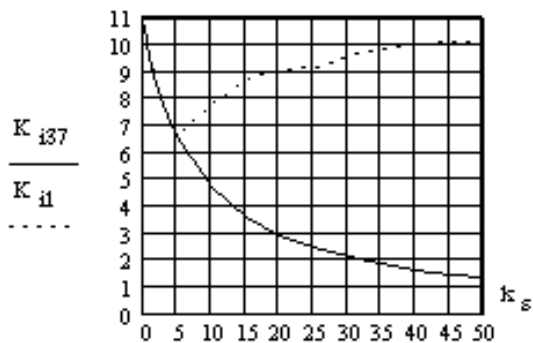


Рис. 2. Зависимость максимальной кратности тока в переходном режиме от кратности добавочного сопротивления в цепи статора при отключении после 37 периода (сплошная линия) и после 1 периода (штриховая линия)

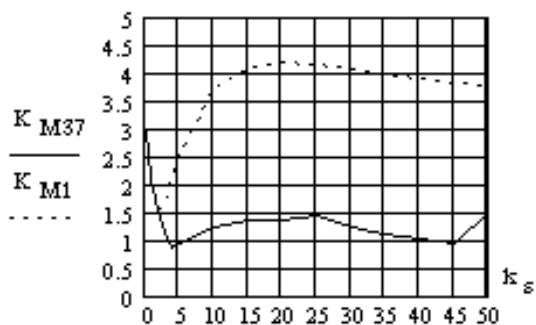


Рис. 3. Зависимости максимальной в переходном режиме кратности момента от кратности добавочного сопротивления в цепи статора при отключении после 37 периода (сплошная линия) и после 1 периода (штриховая линия)

Аналогичная ситуация имеет место по изменению кратности максимального в переходном процессе момента (рис. 3). Весьма малые осцилляции момента обусловлены непропорциональным изменением векторов тока и магнитного потока и разности их фаз при шунтировании добавочного сопротивления после затухания аperiodических составляющих на первом этапе включения.

Следует также заметить, что, как показывают расчеты, максимальная в переходном режиме кратность момента не зависит от начальной фазы напряжения в момент включения.

Сам характер изменений во времени тока и момента в значительной степени зависит от величины добавочного сопротивления в статорной цепи. На рис. 4 представлена кривая изменения во времени модуля комплекса тока без добавочного сопротивления. Эта величина осциллирующая. Аналогичная зависимость имеет место при пятикратном демпфирующем сопротивлении (рис. 5) без осцилляций до отключения добавочного сопротивления ($t \leq 0.1$ сек) и с осцилляциями после его отключения ($t > 0.1$ сек).

Такая же ситуация наблюдается в кривых изменения во времени момента генератора без демпфирующего сопротивления (рис. 6) и с демпфирующим сопротивлением (рис. 7).

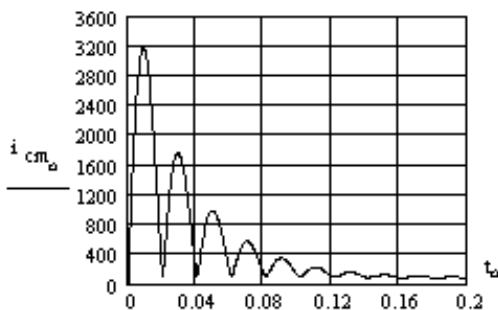


Рис.4. Изменение во времени модуля комплекса тока статора во вращающейся с синхронной скоростью комплексной системе координат при отсутствии добавочного сопротивления в статорной цепи

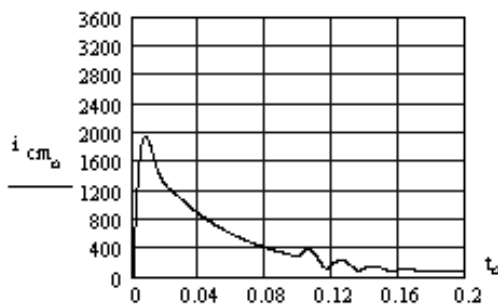


Рис.5. Изменение во времени модуля комплекса тока статора во вращающейся с синхронной скоростью комплексной системе координат при пятикратном добавочном сопротивлении в статорной цепи

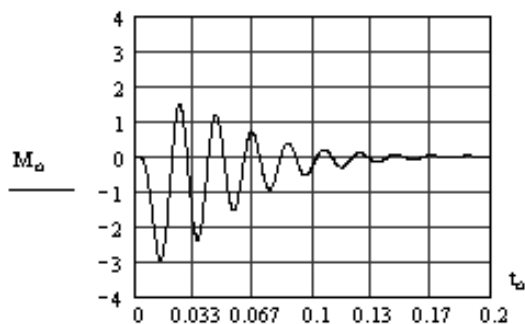


Рис.6. Изменение момента генератора в переходном режиме при отсутствии добавочного сопротивления в статорной цепи

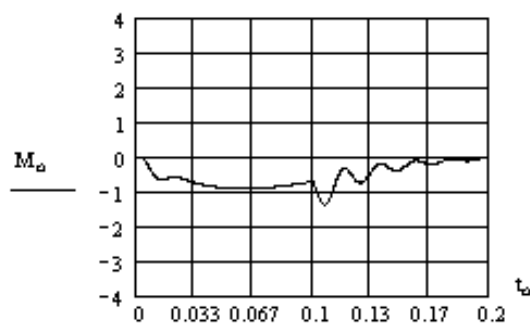


Рис.7. Изменение момента генератора в переходном режиме при пятикратном добавочном сопротивлении в статорной цепи

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Шунтирование демпфирующего сопротивления необходимо производить только после затухания апериодических составляющих токов, что исключает всплески токов и моментов, превышающие их максимальные значения при включенном демпфирующем сопротивлении. Время затухания апериодических составляющих тока для различных асинхронных гене-

раторов колеблется в пределах от 0,2 до 1,5 сек.

Максимальная в переходном режиме кратность момента не зависит от начальной фазы напряжения в сети при подключении асинхронного генератора.

С ростом величины демпфирующего сопротивления снижаются осцилляции модуля вращающегося комплекса тока и момента, а начиная с определенного значения дополнительного сопротивления, включенного последовательно с обмоткой статора, полностью исчезают. Это обстоятельство имеет большое значение так как знакопеременные моменты особо опасны для механической части ветроэлектроагрегатов.

Соответствующим выбором величины демпфирующего сопротивления можно обеспечить любые заданные величины максимальных в переходном режиме кратностей тока и момента.

Расчет величины демпфирующего сопротивления при заданных максимальных в переходном режиме кратностях тока и момента может быть произведен с помощью прилагаемых методики и программы.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Программа, методика и пример расчета переходных токов и моментов при подключении трех фаз асинхронного генератора к сети через демпфирующий резистор с последующим его шунтированием

Исходные данные

$P_2 := 11$ - номинальная мощность генератора, кВт;

$U := 220\sqrt{2}$ - максимальное значение фазного напряжения, В;

$I_H := 21$ - номинальный ток генератора, А;

$f := 50$ - частота сети, Гц;

$p := 2$ - число пар полюсов генератора;

$X_\mu := 4.066$ - индуктивное сопротивление намагничивающей ветви, Ом;

$R_S := 0.015$ - активное сопротивление обмотки статора, Ом;

$R_r := 0.014$ - активное сопротивление обмотки ротора, Ом;

$X_{S\sigma} := 0.092 \cdot 0.7$ - индуктивное сопротивление обмотки статора, Ом;

$X_{r\sigma} := 0.098 \cdot 0.9$ - индуктивное сопротивление обмотки ротора, Ом;

$\omega_c := 2 \cdot \pi \cdot f$ - синхронная скорость, в электрических радианах;

$\omega_k := \omega_c$ - скорость вращения системы координат, в электрических радианах;

$\omega := \omega_c$ - скорость вращения ротора, в электрических радианах;

$j := \sqrt{-1}$;

$a := \exp\left(j \cdot 2 \cdot \frac{\pi}{3}\right)$ - оператор поворота;

$I_0 := 70$ - ток холостого хода ;

$m := 37$ - число периодов до момента шунтирования демпфирующего резистора;

$v := 0.02 \cdot \frac{0}{360}$ - часть периода, соответствующая моменту

шунтирования демпфирующего сопротивления, с;

$\psi_a := \frac{\pi \cdot 100}{180}$ - начальная фаза напряжения;

$k_{SS} := 50$ - кратность демпфирующего сопротивления
 (при расчете до шунтирования);
 $T=0.02$ - период колебаний напряжения в сети, с;
 $N := 90$ - число разбиений периода;
 $N_i := 40$ - число периодов на интервале интегрирования;

Результаты расчета

1. Индуктивность рассеяния ротора, Гн;

$$L_{r\sigma} := \frac{X_{r\sigma}}{\omega_c} \quad L_{r\sigma} = 2.807 \times 10^{-4}$$

2. Индуктивность рассеяния статора, Гн;

$$L_{s\sigma} := \frac{X_{s\sigma}}{\omega_c} \quad L_{s\sigma} = 2.05 \times 10^{-4}$$

3. Индуктивность намагничивающей ветви, Гн;

$$L_{\mu} := \frac{X_{\mu}}{\omega_c} \quad L_{\mu} = 0.013$$

4. Полная индуктивность статора, Гн;

$$L_s := L_{s\sigma} + L_{\mu} \quad L_s = 0.013$$

5. Полная индуктивность ротора, Гн;

$$L_r := L_{r\sigma} + L_{\mu} \quad L_r = 0.013$$

6. Переходная индуктивность статора, Гн;

$$L_{sh} := L_{s\sigma} + L_{\mu} \cdot \frac{L_{r\sigma}}{L_r} \quad L_r = 0.013$$

7. Переходная индуктивность ротора, Гн;

$$L_{rh} := L_{r\sigma} + L_{\mu} \cdot \frac{L_{s\sigma}}{L_s} \quad L_{rh} = 4.825 \times 10^{-4}$$

8. Коэффициент связи статора;

$$k_s := \frac{L_{\mu}}{L_s} \quad k_s = 0.984$$

9. Коэффициент связи ротора;

$$k_r := \frac{L_{\mu}}{L_r} \quad k_r = 0.979$$

10. Номинальный момент генератора, Нм;

$$M_H := \frac{P_2 \cdot p \cdot 10^3}{\omega_c} \quad M_H = 700.282$$

11. Сопротивление статорной цепи с демпфирующим резистором, Ом;

$$R_s := R_s \cdot (k_{SS} + 1)$$

12. Комплексные коэффициенты системы дифференциальных уравнений до шунтирования демпфирующего сопротивления:

$$a_{11} := \left(\frac{-R_s}{L_{sh}} \right) - j \cdot \omega_k \quad a_{11} = -1.594 \times 10^3 - 314.159i$$

$$a_{12} := k_r \cdot \frac{R_s}{L_{sh}} \quad a_{12} = 1.561 \times 10^3$$

$$a_{21} := k_s \cdot \frac{R_r}{L_{rh}} \quad a_{21} = 28.56$$

$$a_{22} := \left[j \cdot (\omega_k - \omega) + \frac{R_r}{L_{rh}} \right] \quad a_{22} = -29.013$$

13. Половинный коэффициент при неизвестном в первой степени характеристического уравнения до шунтирования демпфирующего сопротивления

$$b := \frac{a_{11} + a_{22}}{2} \quad b = -811.747 - 157.08i$$

14. Свободный член характеристического уравнения до шунтирования демпфирующего сопротивления;

$$a_c := -(a_{21} \cdot a_{12} - a_{11} \cdot a_{22})$$

$$a_c = 1.688 \times 10^3 + 9.115i \times 10^3$$

15. Комплексные корни характеристического уравнения до шунтирования демпфирующего сопротивления:

$$\alpha_1 := b + \sqrt{b^2 - a_c} \quad \alpha_1 = -2.038 - 5.233i$$

$$\alpha_2 := b - \sqrt{b^2 - a_c} \quad \alpha_2 = -1.621 \times 10^3 - 308.926i$$

16. Угол сдвига по фазе между током и напряжением на холостом ходу до шунтирования демпфирующего резистора, рад;

$$\phi_0 := \text{atan} \left(\frac{X_{\mu} + X_{s\sigma}}{R_s} \right) \quad \phi_0 = 1.388$$

17. Комплекс установившегося значения потокосцепления статора до шунтирования демпфирующего сопротивления, Вб;

$$\Psi_{su} := \frac{\sqrt{U^2 - (I_0 \cdot R_s)^2}}{\omega_k} \cdot \exp[j \cdot (\psi_a - \phi_0)]$$

$$\Psi_{su} = 0.914 + 0.342i$$

18. Комплекс установившегося значения потокосцепления ротора, Вб;

$$\Psi_{ru} := \Psi_{su} \cdot k_s \quad \Psi_{ru} = 0.9 + 0.336i$$

19. Комплекс остаточного магнитного потока статора до шунтирования демпфирующего сопротивления, Вб;

$$\Psi_{so} := 0$$

20. Комплекс остаточного магнитного потока ротора до шунтирования демпфирующего сопротивления, Вб;

$$\Psi_{ro} := 0$$

21. Комплексные коэффициенты аналитической зависимости апериодической составляющей потокосцепления статора от времени до шунтирования демпфирующего сопротивления;

$$\lambda_1 := \frac{-a_{12}}{a_{11} - \alpha_1} \quad \lambda_1 = 0.944 - 0.183i$$

$$\lambda_2 := \frac{-a_{12}}{a_{11} - \alpha_2} \quad \lambda_2 = -55.757 - 10.817i$$

22. Комплексные константы апериодических зависимостей потокосцеплений статора и ротора, определяемые из начальных условий до шунтирования демпфирующего сопротивления;

$$C_1 := \frac{(\Psi_{ro} - \Psi_{ru}) \cdot \lambda_2 - (\Psi_{so} - \Psi_{su})}{\lambda_2 - \lambda_1}$$

$$C_1 = -0.9 - 0.339i$$

$$C_2 := \frac{-(\Psi_{ro} - \Psi_{ru}) \cdot \lambda_1 + (\Psi_{so} - \Psi_{su})}{\lambda_2 - \lambda_1}$$

$$C_2 = 6.475 \times 10^{-4} + 3.209i \times 10^{-3}$$

23. Шаг по аргументу (времени), сек;

$$\beta := \frac{T}{N} \quad \beta = 2.222 \times 10^{-4}$$

24. Диапазон изменения номеров расчетных циклов;

$$n := 0..N \cdot N_i$$

25. Текущее значение времени на n-ом цикле;

$$t_n := \beta \cdot n$$

Текущие комплексные векторы потокосцеплений и токов во вращающейся с синхронной скоростью комплексной системе координат

26. Апериодическая составляющая комплекса потокосцепления статора до шунтирования демпфирующего резистора;

$$\Psi_{ac_n} := C_1 \cdot \lambda_1 \cdot \exp(\alpha_1 \cdot t_n) + C_2 \cdot \lambda_2 \cdot \exp(\alpha_2 \cdot t_n)$$

27. Комплекс полного потокосцепления статора до шунтирования демпфирующего резистора;

$$\Psi_{c_n} := \Psi_{su} + \Psi_{ac_n}$$

28. Апериодическая составляющая комплекса потокосцепления ротора до шунтирования демпфирующего резистора;

$$\Psi_{ar_n} := C_1 \cdot \exp(\alpha_1 \cdot t_n) + C_2 \cdot \exp(\alpha_2 \cdot t_n)$$

29. Комплекс полного потокосцепления ротора до шунтирования демпфирующего резистора;

$$\Psi_{r_n} := \Psi_{ru} + \Psi_{ar_n}$$

30. Установившаяся составляющая комплекса тока статора до шунтирования демпфирующего резистора;

$$i_{yc} := \frac{\Psi_{su} - k_r \cdot \Psi_{ru}}{L_{sh}}$$

31. Апериодическая составляющая комплекса тока статора до шунтирования демпфирующего резистора;

$$i_{ca_n} := \frac{\Psi_{ac_n} - k_r \cdot \Psi_{ar_n}}{L_{sh}}$$

32. Комплекс полного тока статора до шунтирования демпфирующего резистора;

$$i_{c_n} := i_{yc} + i_{ca_n}$$

33. Апериодическая составляющая комплекса тока ротора до шунтирования демпфирующего резистора;

$$i_{r_n} := \frac{-\Psi_{c_n} \cdot k_s + \Psi_{r_n}}{L_{rh}}$$

34. Модуль комплекса тока статора до шунтирования демпфирующего резистора;

$$i_{cm_n} := |i_{c_n}|$$

35. Модуль комплекса тока ротора до шунтирования демпфирующего резистора;

$$i_{rm_n} := |i_{r_n}|$$

36. Модуль комплекса потокосцепления статора до шунтирования демпфирующего резистора;

$$\Psi_{cm_n} := |\Psi_{c_n}|$$

37. Модуль комплекса потокосцепления ротора до шунтирования демпфирующего резистора;

$$\Psi_{rm_n} := |\Psi_{r_n}|$$

38. Момент генератора до шунтирования демпфирующего резистора;

$$M_n := 1.5 \cdot p \cdot \frac{\text{Im}(\overline{\Psi_{c_n}} \cdot i_{c_n})}{M_H}$$

39. Комплексы фазных токов статора в неподвижной комплексной системе координат до шунтирования демпфирующего резистора;

$$i_{a_n} := \text{Re}(i_{c_n} \cdot \exp(j \cdot \omega_k \cdot t_n))$$

$$i_{b_n} := \text{Re}(a^2 \cdot i_{c_n} \cdot \exp(j \cdot \omega_k \cdot t_n))$$

$$i_{c_n} := \text{Re}(a \cdot i_{c_n} \cdot \exp(j \cdot \omega_k \cdot t_n))$$

40. Активное сопротивление статорной цепи после шунтирования демпфирующего резистора;

$$R_s := \frac{R_s}{k_{ss} + 1} \quad R_s = 0.015$$

41. Комплексные коэффициенты системы дифференциальных уравнений после шунтирования демпфирующего резистора

$$a_{11} := \left(\frac{-R_s}{L_{sh}} \right) - j \cdot \omega_k \quad a_{11} = -31.264 - 314.159i$$

$$a_{12} := k_r \cdot \frac{R_s}{L_{sh}} \quad a_{12} = 30.601$$

$$a_{21} := k_s \cdot \frac{R_r}{L_{rh}} \quad a_{21} = 28.56$$

$$a_{22} := \left[j \cdot (\omega_k - \omega) + \frac{R_r}{L_{rh}} \right] \quad a_{22} = -29.013$$

42. Половинный коэффициент при неизвестном в первой степени характеристического уравнения после шунтирования демпфирующего резистора;

$$b := \frac{a_{11} + a_{22}}{2} \quad b = -30.139 - 157.08i$$

43. Свободный член характеристического уравнения после шунтирования демпфирующего резистора;

$$a_c := -(a_{21} \cdot a_{12} - a_{11} \cdot a_{22}) \quad a_c = 33.101 + 9.115i \times 10^3$$

44. Комплексные корни характеристического уравнения после шунтирования демпфирующего резистора;

$$\alpha_1 := b + \sqrt{b^2 - a_c} \quad \alpha_1 = -28.992 - 2.807i$$

$$\alpha_2 := b - \sqrt{b^2 - a_c} \quad \alpha_2 = -31.285 - 311.352i$$

45. Угол сдвига по фазе между током и напряжением на холостом ходу после шунтирования демпфирующего резистора, рад;

$$\phi_0 := \text{atan} \left(\frac{X_{\mu} + X_{s\sigma}}{R_s} \right) \quad \phi_0 = 1.567$$

46. Комплекс установившегося значения потокосцепления статора после шунтирования демпфирующего резистора, Вб;

$$\Psi_{su} := \frac{\sqrt{U^2 - (I_0 \cdot R_s)^2}}{\omega_k} \cdot \exp[j \cdot (\psi_a - \phi_0)]$$

$$\Psi_{su} = 0.975 + 0.176i$$

47. Комплекс установившегося значения потокосцепления ротора после шунтирования демпфирующего резистора, Вб;

$$\Psi_{ru} := \Psi_{su} \cdot k_s \quad \Psi_{ru} = 0.959 + 0.173i$$

48. Комплекс остаточного магнитного потока статора после шунтирования демпфирующего резистора, Вб;

$$n_1 := \text{floor} \left(\frac{m \cdot T + v}{\beta} \right)$$

$$\Psi_{so} := \Psi_{c_{n_1}} \quad \Psi_{so} = 1.087 + 0.232i$$

49. Комплекс остаточного магнитного потока ротора после шунтирования демпфирующего резистора, Вб;

$$\Psi_{ro} := \Psi_{r_{n_1}} \quad \Psi_{ro} = 1.098 + 0.259i$$

50. Комплексные коэффициенты аналитической зависимости апериодической составляющей потокосцепления статоров от времени после шунтирования демпфирующего резистора;

$$\lambda_1 := \frac{-a_{12}}{a_{11} - \alpha_1} \quad \lambda_1 = 7.171 \times 10^{-4} - 0.098i$$

$$\lambda_2 := \frac{-a_{12}}{a_{11} - \alpha_2} \quad \lambda_2 = -0.08 - 10.902i$$

51. Комплексные константы апериодических зависимостей потокосцеплений статора и ротора, определяемые из начальных условий:

$$C_1 := \frac{(\Psi_{ro} - \Psi_{ru}) \cdot \lambda_2 - (\Psi_{so} - \Psi_{su})}{\lambda_2 - \lambda_1}$$

$$C_1 = 0.145 + 0.077i$$

$$C_2 := \frac{-(\Psi_{ro} - \Psi_{ru}) \cdot \lambda_1 + (\Psi_{so} - \Psi_{su})}{\lambda_2 - \lambda_1}$$

$$C_2 = -6.593 \times 10^{-3} + 9.571i \times 10^{-3}$$

52. Аperiодическая составляющая комплекса потокосцепления статора после шунтирования демпфирующего резистора:

$$\Psi_{ac1_n} := C_1 \cdot \lambda_1 \cdot \exp[\alpha_1 \cdot (t_n - n_1 \cdot \beta)] + C_2 \cdot \lambda_2 \cdot \exp[\alpha_2 \cdot (t_n - n_1 \cdot \beta)]$$

53. Комплекс полного потокосцепления статора после шунтирования демпфирующего сопротивления;

$$\Psi_{c1_n} := \Psi_{su} + \Psi_{ac1_n}$$

54. Аperiодическая составляющая комплекса потокосцепления ротора после шунтирования демпфирующего сопротивления;

$$\Psi_{ar1_n} := C_1 \cdot \exp[\alpha_1 \cdot (t_n - n_1 \cdot \beta)] + C_2 \cdot \exp[\alpha_2 \cdot (t_n - n_1 \cdot \beta)]$$

55. Комплекс полного потокосцепления ротора после шунтирования демпфирующего сопротивления;

$$\Psi_{r1_n} := \Psi_{ru} + \Psi_{ar1_n}$$

56. Установившаяся составляющая комплекса тока статора после шунтирования демпфирующего сопротивления;

$$i_{yc1} := \frac{\Psi_{su} - k_r \cdot \Psi_{ru}}{L_{sh}}$$

57. Аperiодическая составляющая комплекса тока статора после шунтирования демпфирующего сопротивления;

$$i_{ca1_n} := \frac{\Psi_{ac1_n} - k_r \cdot \Psi_{ar1_n}}{L_{sh}}$$

58. Комплекс полного тока статора после шунтирования демпфирующего сопротивления;

$$i_{c1_n} := i_{yc1} + i_{ca1_n}$$

59. Аperiодическая составляющая комплекса тока ротора после шунтирования демпфирующего сопротивления;

$$i_{r1_n} := \frac{-\Psi_{c1_n} \cdot k_s + \Psi_{r1_n}}{L_{rh}}$$

60. Модуль комплекса тока статора после шунтирования демпфирующего сопротивления;

$$i_{cm1_n} := |i_{c1_n}|$$

61. Модуль комплекса тока ротора после шунтирования демпфирующего сопротивления;

$$i_{rm1_n} := |i_{r1_n}|$$

62. Модуль комплекса потокосцепления статора после шунтирования демпфирующего сопротивления;

$$\Psi_{cm1_n} := |\Psi_{c1_n}|$$

63. Модуль комплекса потокосцепления ротора после шунтирования демпфирующего сопротивления;

$$\Psi_{rm1_n} := |\Psi_{r1_n}|$$

64. Момент генератора после шунтирования демпфирующего сопротивления;

$$M_{1_n} := 1.5 \cdot p \cdot \frac{\text{Im}(\overline{\Psi_{c1_n}} \cdot i_{c1_n})}{M_H}$$

65. Комплексы фазных токов статора в неподвижной комплексной системе координат;

$$i_{a1_n} := \text{Re} \left[i_{c1_n} \cdot \exp[j \cdot \omega_k \cdot (t_n - n_1 \cdot \beta)] \right]$$

$$i_{b1_n} := \text{Re} \left[a^2 \cdot i_{c1_n} \cdot \exp[j \cdot \omega_k \cdot (t_n - n_1 \cdot \beta)] \right]$$

$$i_{c1_n} := \text{Re} \left[a \cdot i_{c1_n} \cdot \exp[j \cdot \omega_k \cdot (t_n - n_1 \cdot \beta)] \right]$$

66. Приведение обозначений величин потокосцеплений, токов и моментов после шунтирования демпфирующего сопротивления к обозначениям до шунтирования демпфирующего сопротивления

$$\Psi_{cm_n} := \text{if}(n > n_1, \Psi_{cm1_n}, \Psi_{cm_n})$$

$$\Psi_{rm_n} := \text{if}(n > n_1, \Psi_{rm1_n}, \Psi_{rm_n})$$

$$i_{cm_n} := \text{if}(n > n_1, i_{cm1_n}, i_{cm_n})$$

$$i_{rm_n} := \text{if}(n > n_1, i_{rm1_n}, i_{rm_n})$$

$$M_n := \text{if}(n > n_1, M_{1_n}, M_n)$$

$$i_{a_n} := \text{if}(n > n_1, i_{a1_n}, i_{a_n})$$

$$i_{b_n} := \text{if}(n > n_1, i_{b1_n}, i_{b_n})$$

$$i_{c_n} := \text{if}(n > n_1, i_{c1_n}, i_{c_n})$$

Расчетные кривые токов и моментов приведены в тексте.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Дорохов А.В., Финкельштейн В.Б., Демпфирование ударных токов и моментов при подключении к сети асинхронных генераторов ветроэлектроагрегатов //Электротехника і Електромеханіка. – 2002. - №2. – С. 39-42.
- [2] Дорохов А.В., Финкельштейн В.Б., Смягчение электродинамических перегрузок при подключении к сети асинхронных генераторов ветроэлектроагрегатов //Электротехника і Електромеханіка. – 2003. - №2. – С. 24-27.
- [3] Дорохов А.В., Финкельштейн В.Б. Токи и моменты асинхронных генераторов ветроэлектроагрегатов в переходном режиме при подключении их к сети //Техн. електродинаміка. – 2003. - №2. - С. 52-54.
- [4] Копчак Б.Л., Шуфлат А.Р. Дослідження і вибір раціонального режиму підмикання асинхронного генератора вітроенергетичної установки до мережі // Вісник Національного університету “Львівська політехніка”. – Львів: -2000. №400. – С. 66 -70.
- [5] Устройство для ограничения ударных моментов при пуске двигателей переменного тока. А. с. 221117 СССР / В.А. Ладензон, М.П. Обуховский, Л.П. Петров (СССР). - Бюл. №21, 1968.
- [6] GE Power Control / Control and Automation Products. – General Catalogue. 1999. – Серия ASTAT Softstarter.

Поступила 27.08.2003