

УДК 621.313

Б.В. Сидельников, И.К. Кобяков

СПОСОБЫ СНИЖЕНИЯ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ НА ОБМОТКАХ ВОЗБУЖДЕНИЯ В НЕСТАЦИОНАРНЫХ РЕЖИМАХ АСИНХРОНИЗИРОВАННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ

B.V. Sidelnikov, I.K. Kobayakov

METHODS OF REDUCING THE VOLTAGE ON THE WINDINGS OF EXCITATION IN THE UNSTEADY CONDITIONS OF ASYNCHRONOUS GENERATORS

Рассмотрены нестационарные процессы в цепях возбуждения и статора асинхронизированных гидрогенераторов как причины, вызывающие перенапряжения на распределенных обмотках возбуждения. Перенапряжения рассчитывались в системе имитационного моделирования Matlab/Simulink. Проведен сравнительный анализ максимальных напряжений на выбранных секциях ротора при внезапном коротком замыкании, найденных аналитическим методом и с помощью моделирования. Даны рекомендации по вопросу ограничения динамических перенапряжений.

АСИНХРОНИЗИРОВАННЫЙ ГИДРОГЕНЕРАТОР. ПЕРЕХОДНЫЕ РЕЖИМЫ. ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЯ. НЕСТАЦИОНАРНЫЕ ПРОЦЕССЫ. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ. SIMULINK-МОДЕЛЬ.

Non-stationary processes in circuit of excitement or a stator of asynchronized hydrogenerator as the reasons causing an overvoltage on the distributed windings of excitement are considered. Analytical calculation of the overvoltage in system of imitating modeling of Matlab/Simulink is made. A comparative analysis of the results of the calculation of maximum voltage on the chosen sections of a rotor for the sudden short circuit, received by an analytical method and by means of modeling is carried out. Recommendations about a question of restriction of dynamic overvoltage are given.

ASYNCHRONIZED HYDROGENERATOR. TRANSITIONAL CONDITIONS. OVERVOLTAGE. NON-STATIONARY PROCESSES. MATHEMATICAL SIMULATION. SIMULINK-MODEL.

В последнее десятилетие в связи с необходимостью модернизации и технического обновления устаревшего оборудования в электроэнергетике возник вопрос о детальном исследовании и внедрении асинхронизированных генераторов. Асинхронизированные гидрогенераторы (АСГД) обладают рядом преимуществ. Одна из особенностей их конструкции — фазная распределенная обмотка возбуждения. Первый опыт использования таких машин в России был в начале 60-х годов XX века на Иовской ГЭС. Несмотря на то, что работа таких гидрогенераторов в целом оценивается положительно, наблюдались пробои изоляции обмотки возбуждения, связанные с переходными режимами. До настоящего вре-

мени вопрос перенапряжений остается актуальным. До конца не выяснены причины возникновения перенапряжений, и публикаций, посвященных методикам, которые позволяют рассчитать перенапряжения, мало.

Причины, вызывающие перенапряжения на распределенной обмотке возбуждения асинхронизированных гидрогенераторов, кроются в нестационарных процессах в цепях возбуждения или статора. Обзор возможных причин возникновения перенапряжений на обмотке возбуждения сделан в докладе [1].

Перенапряжения, обусловленные питанием обмотки возбуждения от полупроводниковых преобразователей с элементами односторонней

проводимости. В современных системах возбуждения при асинхронном вращении ротора АСГД напряжения формируются при помощи широтно-импульсной модуляции с несущей частотой в несколько сотен или тысяч Гц. Высокие градиенты потенциалов способствуют резко неравномерному их распределению по длине обмотки, а при неблагоприятных параметрах — развитию резонансных явлений. Кроме того, постоянное прохождение импульса с крутым фронтом вызывает в токовых цепях волновые процессы, которые могут привести к перенапряжениям на элементах электрооборудования, интенсивному старению и снижению сроков службы изоляции с последующими пробоями даже, казалось бы, при допустимых уровнях напряжений [2, 3]. Перенапряжения, вызванные импульсами в системе возбуждения, применительно к асинхронным двигателям рассмотрены в публикациях [4, 5]. Наибольшие успехи по освоению асинхронизированных гидрогенераторов достигнуты в Японии фирмами Hitachi и Toshiba [6, 7], которые создали АСГД мощностью до 500 мВт с возможным изменением частоты ω в пределах $\pm 10\%$. Для борьбы с перенапряжениями здесь применяют тройные фильтры, а также устанавливают в цепях возбуждения специальные ограничители. Подобные меры исключают необходимость введения каких-либо изменений в конструкцию собственно генератора.

При переходных режимах в энергосистеме (внезапные короткие замыкания, обрыв фазы, грубая синхронизация и т. д.) в токе статора возникают апериодические составляющие, индуктирующие в фазах ротора электродвижущие силы (ЭДС) e_r с частотой вращения, которые в зависимости от числа витков индуктора могут превышать номинальное напряжение якоря. Хотя напряжение на кольцах ротора определяется возбудителем, распределение потенциалов по длине обмотки неравномерно, что проявляется в виде перенапряжений на отдельных группах секций. Этот фактор, по мнению ряда исследователей, может быть наиболее вероятной причиной пробоя изоляции катушек ротора. Он должен приниматься во внимание при проектировании генератора.

Впервые на необходимость изучения динамических перенапряжений обращено внимание еще в 60-х годах прошлого столетия [8, 9]. Был предложен достаточно простой способ их ра-

счета, ориентированный на построение векторных диаграмм секционных ЭДС обмотки возбуждения создаваемых апериодическими токами статора. Основные недостатки такого подхода:

1) необходимость предварительного определения ЭДС, индуктируемых апериодическим током статора в обмотке возбуждения, и допущение о постоянстве этих токов во времени;

2) отсутствие четкого представления об индуктивных параметрах машины, определяющих падение напряжения на секциях;

3) предположение о синусоидальном характере изменения во времени рассматриваемых переменных, пренебрежение насыщением и активными сопротивлениями цепи возбуждения.

Более точные данные удастся получить, используя известные, хорошо отработанные математические модели синхронных машин и дополняя их специальными подмоделями для расчета искомых напряжений в переходных процессах. Основанная на этих положениях методика и компьютерная реализация программы анализа результатов разработана на кафедре электрических машины СПбГПУ. Краткое описание модели асинхронизированного генератора, построенной в системе имитационного моделирования Matlab/Simulink, в которой учтены перечисленные выше недостатки предыдущего метода, дано в докладе [10] и более подробно в [11].

Наиболее тяжелые условия (с точки зрения перенапряжений рассматриваемого вида) связаны с режимами, когда максимально проявляются апериодические токи статорной обмотки. К ним, в частности, относятся: трехфазные короткие замыкания, максимально приближенные к выводам машины; повторные включения в сеть; грубая синхронизация и т. д. Именно для этих режимов применительно к параметрам макета асинхронизированного генератор-двигателя типа АСГО316, которые были любезно предоставлены сотрудниками ОАО «Электросила», проведены расчеты с использованием двух описанных выше методов. Все решения получены в относительных единицах при обычных для синхронных машин базисных количествах.

Математическая модель реализована в пакете с учетом основных сопутствующих явлений, в том числе насыщения, изменения частоты вращения и напряжения статорной обмотки, регулирования возбуждения. В качестве примеров

на рис. 1–4 последовательно в функции синхронного времени ($\tau = 2\pi f_1 t$) воспроизведены следующие режимы:

работа машины при номинальном напряжении сети в интервале времени $0 < \tau < 6,28$ рад ($0,02$ с);

трехфазное короткое замыкание ($6,28 < \tau < 15,7$ рад);

повторное включение на сеть с номинальным напряжением.

На этих рисунках переменные по осям координат отложены в относительных единицах.

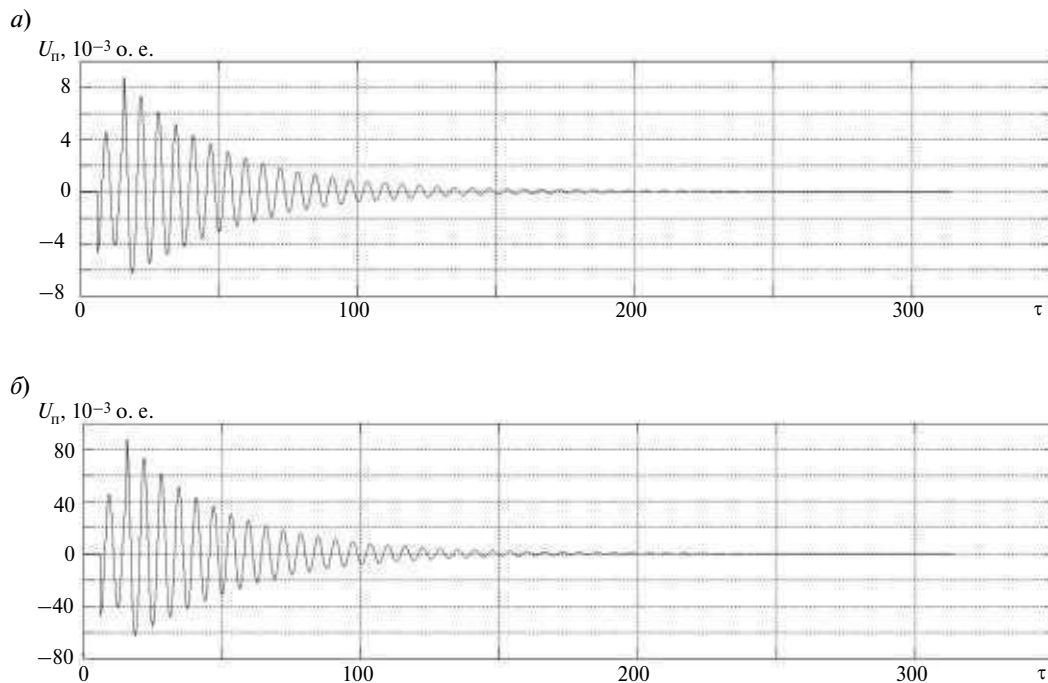


Рис. 1. Максимальные напряжения на выбранных элементах петлевой (а) и волновой (б) обмотки возбуждения при трехфазном коротком замыкании с последующим повторным включением в сеть

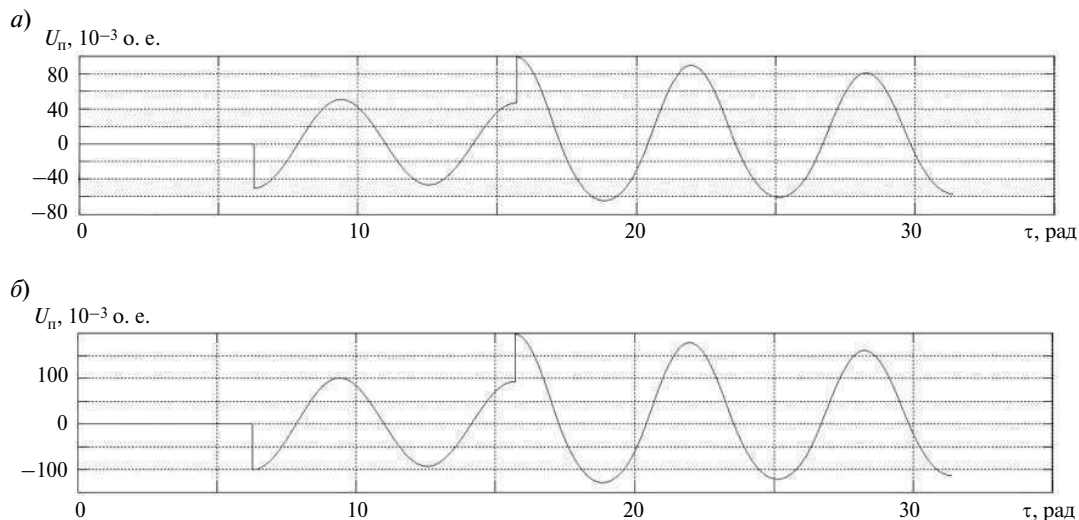


Рис. 2. Начальная часть процесса, показанного на рис. 1, при наличии на роторе петлевой (а) или волновой (б) обмоток

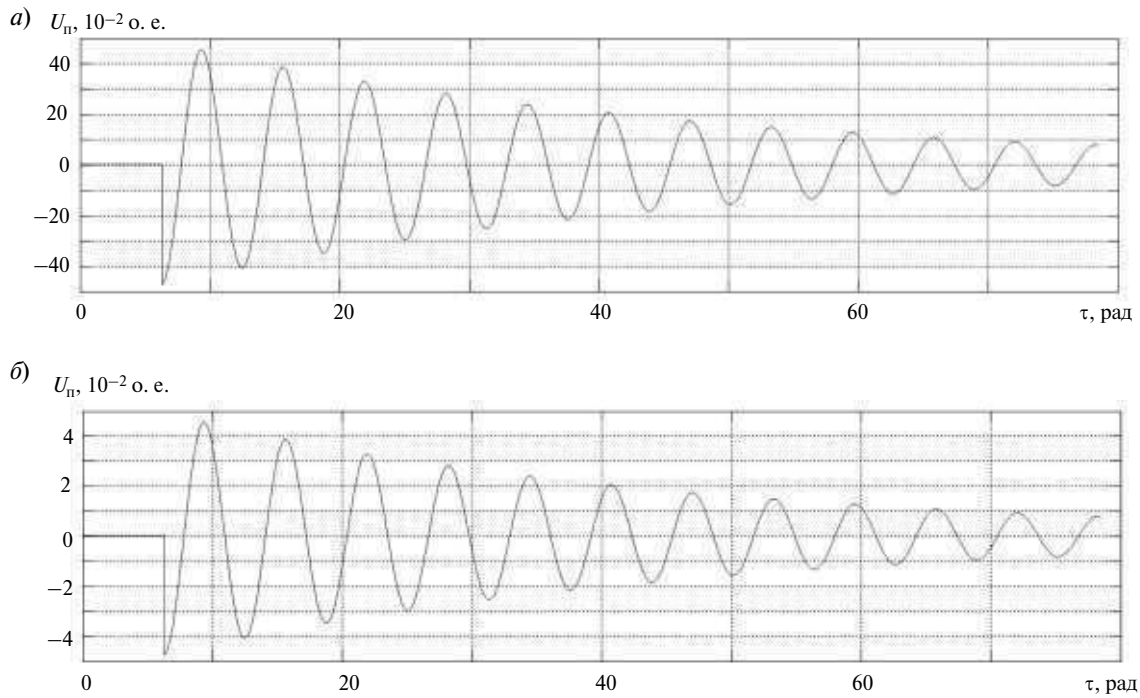


Рис. 3. Изменение во времени величин напряжений на элементах петлевой (а) или волновой (б) обмотки возбуждения при трехфазном коротком замыкании

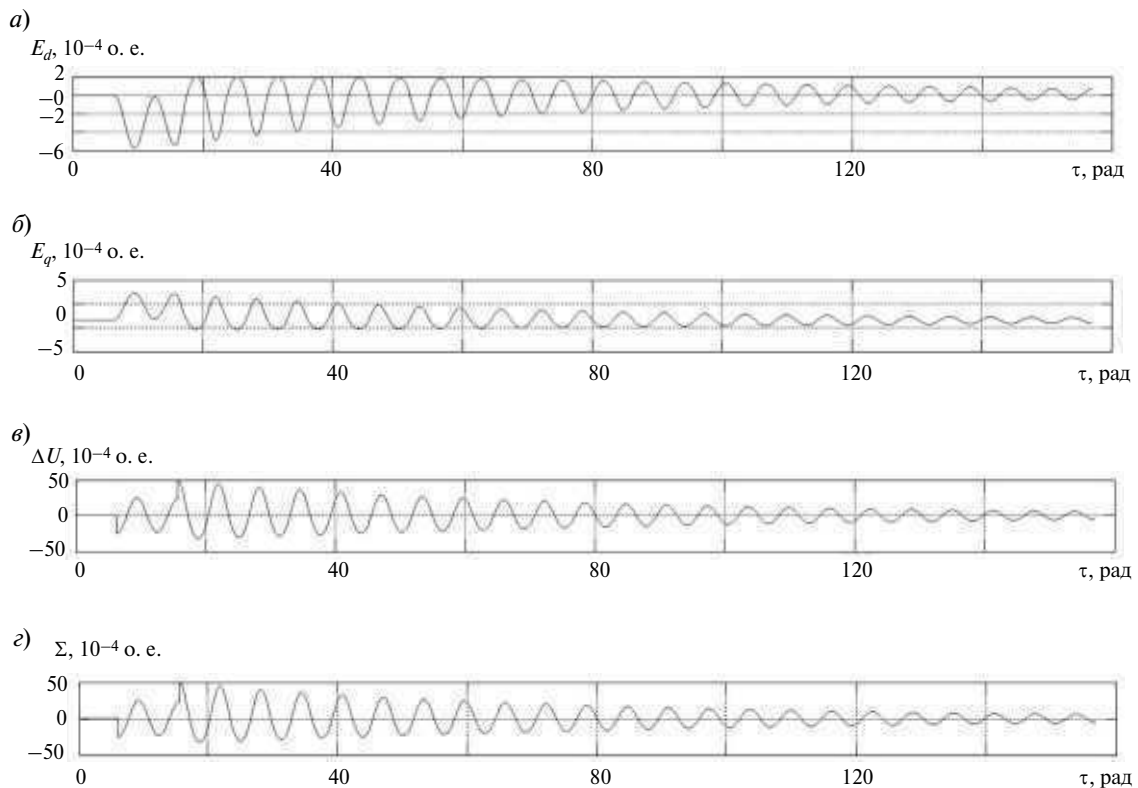


Рис. 4. ЭДС секции, наведенная продольным (а) и поперечным (б) полем, падение напряжения $\Delta U = i_f r_i / 2pq$ (в) и их сумма Σ (г)

На рис. 1 показано, каких значений могут достигать амплитуды напряжений на выбранных элементах петлевой или волновой обмотки возбуждения макета. На рис. 2 выделена начальная часть процесса, показанного на рис. 1.

Рис. 3 иллюстрирует для двух рассмотренных типов обмоток процесс затухания максимальных напряжений при трехфазном коротком замыкании. Если принять во внимание, что базисное значение напряжения возбуждения рассматриваемой машины равно $U_{f\sigma} = 2480,4 \text{ В}$, амплитуда исследуемой переменной при повторном включении может достигать в обмотке волнового типа $213,3 \text{ В}$, т. е. превышает напряжение возбуждения в номинальном синхронном режиме (U^*) более чем в 10 раз. Интересно, что для петлевой обмотки аналогичная величина составляет всего 1,06 от номинального значения.

С целью оценки точности расчетов для каждого момента времени были просуммированы ЭДС всех секций, индуктированные в рассма-

триваемом переходном режиме, и падение напряжения на активном сопротивлении ($i_f r_f$) (см. рис. 4). Результат этой процедуры (рис. 5) полностью совпадает с напряжением возбудителя, что подтверждает достоверность результатов моделирования.

В таблице представлены сравнительные данные для ЭДС конкретной секции (U_{ci}), а также для максимальных величин напряжений на группе выбранных секций (U_c) обмотки возбуждения макета АСГД в режиме внезапного трехфазного короткого замыкания, полученные моделированием или аналитическим методом и отнесенные к напряжению U_{fn} при номинальной нагрузке и синхронной скорости вала.

Завышенные результаты аналитических расчетов объясняются, главным образом, неучетом затухания во времени токов статорной цепи. Наглядной иллюстрацией данных таблицы служит рис. 6.

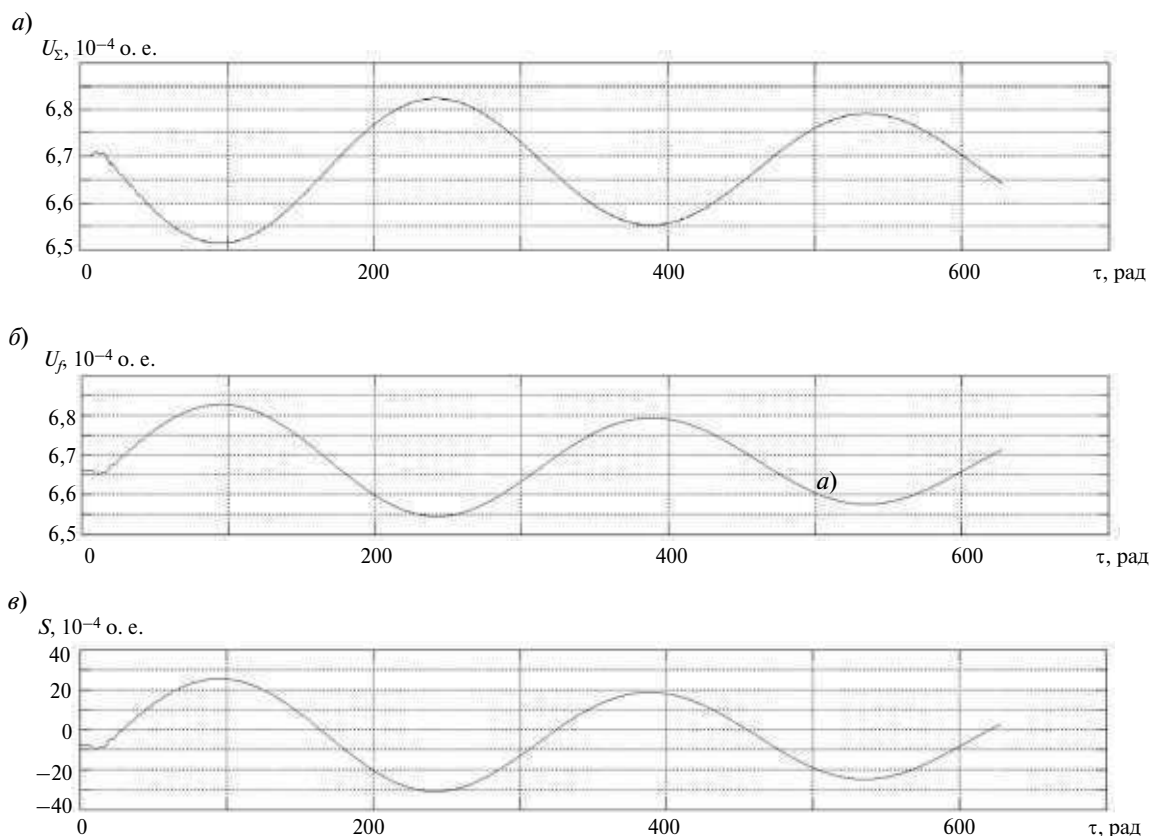


Рис. 5. Полученное по составляющим напряжение на всех секциях фазы обмотки возбуждения U_{Σ} (а), напряжение возбудителя U_f (б), скольжение s (в)

Максимальные напряжения на выбранных секциях ротора, рассчитанные для внезапного короткого замыкания аналитически и с помощью моделирования

τ, рад	U_{ci} , о. е.		U_i , В		U_i/U_{fn}		$U_{i\text{аналит}}/U_{fn}$	
	Волновая обмотка	Петлевая обмотка	Волновая обмотка	Петлевая обмотка	Волновая обмотка	Петлевая обмотка	Волновая обмотка	Петлевая обмотка
9	0,045	0,0045	111,62	11,16	5,58	0,56	7,61	0,76
16	0,038	0,0038	94,26	9,43	4,71	0,47	7,61	0,76
22	0,033	0,0033	81,85	8,19	4,09	0,41	7,61	0,76
28,5	0,028	0,0028	69,45	6,95	3,47	0,35	7,61	0,76
34,5	0,023	0,0023	57,05	5,70	2,85	0,29	7,61	0,76
41	0,02	0,002	49,61	4,96	2,48	0,25	7,61	0,76
47	0,017	0,0017	42,17	4,22	2,11	0,21	7,61	0,76
53	0,015	0,0015	37,21	3,72	1,86	0,19	7,61	0,76
59,5	0,012	0,0012	29,76	2,98	1,49	0,15	7,61	0,76
66	0,0105	0,00105	26,04	2,60	1,30	0,13	7,61	0,76
72,3	0,0095	0,00095	23,56	2,36	1,18	0,12	7,61	0,76

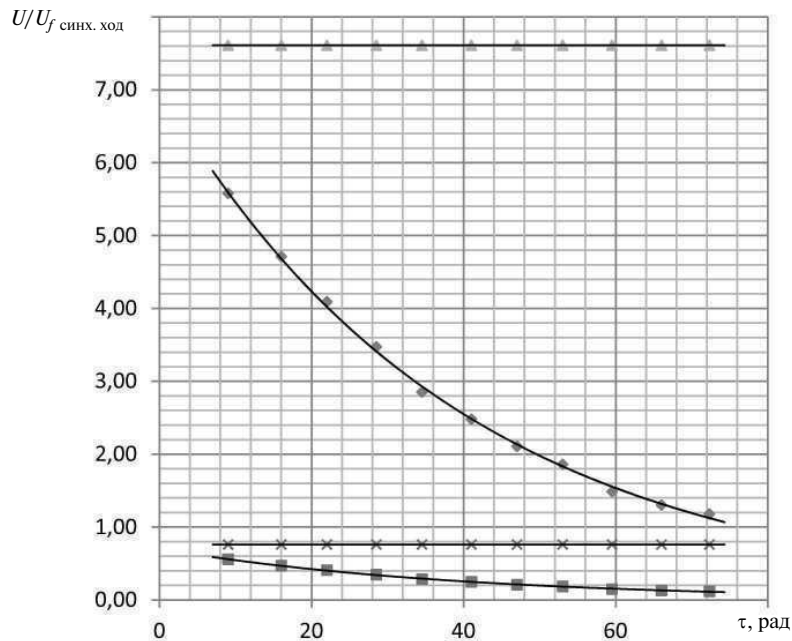


Рис. 6. Динамические перенапряжения на элементах волновой или петлевой обмотки возбуждения
 (◆ — волновая обмотка; ■ — петлевая обмотка; ▲ — аналит. метод (волн. обм.);
 × — аналит. метод (петл. обм.)

Хотя рассчитанные выше перенапряжения для макета не являются критическими, в генераторах большой мощности подобные результаты вряд ли можно получить в связи с тем, что в них напряжения на кольцах ротора в стационарных условиях выбираются более высокими. Кроме того, при скольжениях, отличных от нуля, динамические составляющие суммируются с существенно возросшим напряжением возбудителя. Можно предложить проанализировать три следующих способа снижения перенапряжений рассматриваемого вида:

- изменение параметров генератора;
- уменьшение числа витков обмотки возбуждения;
- выбор рациональной схемы обмотки.

Целенаправленным изменением параметров машины принципиально можно уменьшить ЭДС, индуктируемую в контурах ротора при переходных режимах. В частности, в процессе внезапного трехфазного короткого замыкания на зажимах асинхронизированных генераторов за счет незатухающих апериодических токов статора в обмотке возбуждения генерируется ЭДС, равная $E_r = U_s \omega \left(1 - \frac{x_s}{x'_d} \right)$ о. е., где U_s — напряжение, в относительных единицах, для режима, предшествующего короткому замыканию; x'_d, x_s — переходное сопротивление и сопротивление рассеяния статорной обмотки; ω — частота вращения вала.

К сожалению, вряд ли возможно уменьшить E_r за счет сколь-либо заметного увеличения отношения x_s/x'_d , не ухудшая эксплуатационных свойств генератора.

Уменьшение числа витков обмотки возбуждения соответствует по условиям обеспечения установившихся режимов аналогичному изменению напряжения и росту тока возбуждения при их измерении в именованных единицах, что в свою очередь ведет к увеличению суммы потерь: электрических в обмотке (p_e) и щеточном контакте ($p_{щ}$), а также механических. Становится более громоздким узел токопровода.

Суммарные электрические потери определяются формулами

$$p_f = p_e + p_{щ}; \quad p_e = i_f^2 r_f; \quad p_{щ} = \Delta U_{щ} i_f.$$

Сопротивление обмотки равно $r_f = \rho l_v j F_f / i_f^2$, где ρ — удельное сопротивление проводников,

l_v — средняя длина витка, j — плотность тока, F_f, i_f — магнитодвижущая сила (МДС) и ток возбуждения.

При изменении напряжения U_f и заданных значениях МДС индуктора и плотности тока в номинальном режиме на кольцах ротора электрические потери оказываются постоянными, а именно: $p_e = \rho l_v F_f^2$. Однако в этом варианте пришлось бы менять геометрию пазового слоя ротора, так как с ростом напряжения за счет дополнительной изоляции снижается коэффициент заполнения паза медью (k_3). При желании сохранить площадь паза ($S_{п}$) имеем: $p_e = \rho l_v F_f^2 / k_3 S_{п}$. Здесь при увеличении U_f и соответствующем уменьшении i_f за счет уменьшения k_3 потери в реальных условиях незначительно растут.

Если принять, что $\Delta U_{щ} = \rho_{щ} j_{щ} l_{щ} = \text{const}$, величина $\rho_{щ}$ оказывается пропорциональной току возбуждения, а при $k_3 = \text{const}$ — обратно пропорциональной U_f . В таком случае оптимальным с точки зрения суммарных потерь будет условие повышенных напряжений возбуждения и, к сожалению, перенапряжений в переходных режимах.

Выбор рациональной схемы обмотки — наиболее радикальный способ ограничения динамических перенапряжений, особенно для тихоходных машин большой мощности. Иллюстрацией к сказанному могут служить данные таблицы, согласно которым простая замена волновой обмотки возбуждения на петлевую для исследуемого макета гидрогенератора позволяет снизить практически в десять раз ожидаемые максимальные напряжения между выбранными секциями при переходных режимах. Если по определенным причинам желательно использовать именно волновую обмотку, то для снижения индуктированных напряжений в [8, 9] предлагается схему дополнить специальными перемычками.

Разработана методика определения перенапряжений при переходных режимах по уравнению динамики с учетом изменения скорости, насыщения, номинальных параметров машины. Рабочая модель реализована с помощью программного комплекса Matlab/Simulink. Проана-

лизированы способы снижения перенапряжений при переходных режимах, в том числе за счет изменения параметров машины, снижения

номинального напряжения обмотки возбуждения и изменения схемы обмотки. Наиболее радикальным является последний способ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Кобяков, И.К.** Перенапряжения на роторных обмотках электрических машин двойного питания [Текст] / И.К. Кобяков, Б.В. Сидельников // XL неделя науки СПбГПУ: матер. междунар. научно-практ. конф. Ч. II.— СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2011.— С. 79–80.
2. **Беспалов, В.Я.** Импульсные перенапряжения в обмотках асинхронных двигателей при питании от ШИМ-преобразователей [Текст] / В.Я. Беспалов, К.Н. Зверев // Электротехника.— 1999. №9.— С. 56–59.
3. **Белассел, М.Т.** Емкостные параметры и перенапряжения в обмотке асинхронного двигателя, питаемого от ШИМ-преобразователя [Текст] / М.Т. Белассел, В.Я. Беспалов, Бухемис Шетат // Электротехника.— 2005. № 1.— С. 44–47.
4. **Ватаев, А.С.** Расчет импульсных перенапряжений в обмотке статора асинхронных электродвигателей при питании от инвертора с широтно-импульсным модулятором [Текст] / А.С. Ватаев, В.В. Попов, И.И. Талья // Научно-технические ведомости СПбГПУ.— 2007. №2(50).— С. 203–207.
5. **Ватаев, А.С.** Высокочастотные электромагнитные процессы и перенапряжения в частотно-регулируемых асинхронных электродвигателях с короткозамкнутым ротором [Текст]: Дис. ... канд. техн. наук: 05.09.01: защищена 11.12.09 / Ватаев Андрей Сергеевич.— 2009.— 189 с.
6. **Мамиконянц, Л.Г.** Асинхронизированные синхронные генераторы: Состояние, проблемы, перспективы [Текст] / Л.Г. Мамиконянц, Ю.Г. Шакарян // Электричество.— 1994. №3. С. 1–9.
7. **Цгоев, Р.С.** Параллельная работа синхронной и асинхронизированной машины переменного тока [Текст] / Р.С. Цгоев // Электро. Исследования и разработки.— 2004. №6.— С. 8–13.
8. **Волкова, Е.А.** Способ снижения индуктированных напряжений между частями многослойной обмотки фазного ротора [Текст] / Е.А. Волкова, Л.А. Суханов // Электротехника.— 1974. №2.— С. 17–20.
9. **Волкова, Е.А.** Исследование индуктированных напряжений в обмотке ротора асинхронизированных машин [Текст] / Е.А. Волкова, Л.А. Суханов, О.Н. Филичев // Электричество.— 1976. № 10.— С. 29–34.
10. **Кобяков, И.К.** Разработка методики расчета динамических перенапряжений на обмотке возбуждения асинхронизированного синхронного генератора [Текст]: Дис. ... магистр. / И.К. Кобяков.— 2012.
11. **Кобяков, И.К.** Методика расчета динамических перенапряжений на обмотке возбуждения асинхронизированного синхронного генератора [Текст] / И.К. Кобяков.— 3-я конф. молодых специалистов инженерно-техн. служб ОАО «Силовые машины».— 2012.— С. 17.

REFERENCES

1. **Kobiakov I.K.** Perenapriazheniia na rotornykh obmotkakh elektricheskikh mashin dvoynogo pitaniia [Tekst] / Kobiakov I.K., Sidel'nikov B.V. // XL nedelia nauki SPbGPU: materialy mezhdunar. nauchno-prakticheskoi konf. Ch. II— SPb.: Izd-vo Politekhn. un-ta, 2011.— S. 79–80. (rus.)
2. **Bespalov V.Ia., Zverev K.N.** Impul'snye perenapriazheniia v obmotkakh asinkhronnykh dvigatelei pri pitanii ot ShIM-preobrazovatelei [Tekst] // Elektrotekhnikha.— 1999. №9.— S. 56–59. (rus.)
3. **Belassel M.-T., Bepalov V.Ia., Shetat Bukhemis.** Emkostnye parametry i perenapriazheniia v obmotke asinkhronnogo dvigatelia, pitaemogo ot ShIM-preobrazovatel'ia [Tekst] // Elektrotekhnikha.— 2005. №1.— S.44–47. (rus.)
4. **Vataev A.S., Popov V.V., Tal'ia I.I.** Raschet impul'snykh perenapriazhenii v obmotke statora asinkhronnykh elektrodvigatelei pri pitanii ot invertora s shirotno-impul'snym modul'iatorom [Tekst] // Nauchno-tekhnicheskie vedomosti SPbGPU.— 2007. №2(50).— S. 203–207. (rus.)
5. **Vataev A.S.** Vysokochastotnye elektromagnitnye protsessy i perenapriazheniia v chastotno-reguliruemykh asinkhronnykh elektrodvigateleiakh s korotkozamknutyim rotorom [Tekst]: dis. ... kand. tekhn. nauk: 05.09.01: zashchishchena 11.12.09 / Vataev Andrei Sergeevich.— 2009.— 189 s. (rus.)
6. **Mamikonians L.G., Shakarian Yu.G.** Asinkhronizirovannye sinkhronnye generatory: Sostoianie, problemy, perspektivy [Tekst] // Elektrichestvo.— 1994.— №3. S. 1–9. (rus.)
7. **Tsgoev R.S.** Parallelnaia rabota sinkhronnoi i asinkhronizirovannoi mashiny peremennogo toka [Tekst] // Elektro.Issledovaniia i razrabotki.— 2004. №6.— S. 8–13. (rus.)
8. **Volkova E.A., Sukhanov L.A.** Sposob snizheniia induktirovannykh napriazhenii mezhdru chastiami mnogoslainoi obmotki faznogo rotora [Tekst] // Elektrotekhnikha.— 1974. №2.— S. 17–20. (rus.)

9. Volkova E.A., Sukhanov L.A., Filichev O.N. Issledovanie induktirovannykh napriazhenii v obmotke rotora asinkhronizirovannykh mashin [Tekst] // Elektrichestvo.— 1976. № 10.— S. 29–34. (rus.)

10. Kobiakov I.K. Metodika rascheta dinamicheskikh perenapriazhenii na obmotke возбуждениа asinkhronizirovannogo sinkhronnogo generatora [Tekst] // 3-ia

konferentsiia molodykh spetsialistov inzhenerno-tekhnicheskikh sluzhb OAO «Silovye mashiny».— 2012.— S. 17. (rus.)

11. Kobiakov I.K. Razrabotka metodiki rascheta dinamicheskikh perenapriazhenii na obmotke возбуждениа asinkhronizirovannogo sinkhronnogo generatora [Tekst].— Dis. ... magistr.— 2012.— 100 s. (rus.)

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

СИДЕЛЬНИКОВ Борис Викторович — доктор технических наук профессор кафедры электрических машин Института энергетики и транспортных систем Санкт-Петербургского государственного политехнического университета; 195251, ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, Россия; e-mail: Sidelnik@mebil.stu.neva.ru

КОБЯКОВ Илья Кириллович — аспирант кафедры электрических машин Института энергетики и транспортных систем Санкт-Петербургского государственного политехнического университета; 195251, ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, Россия; e-mail: ilya.kobyakov@gmail.com

AUTHORS

SIDELNIKOV Boris V. — St. Petersburg State Polytechnical University; 195251, Politekhnikeskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia; e-mail: Sidelnik@mebil.stu.neva.ru

КОБЯКОВ Илья К. — St. Petersburg State Polytechnical University; 195251, Politekhnikeskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia; e-mail: ilya.kobyakov@gmail.com