

9. Briggs, G.A. (1969). Plume Rise, U.S. Atomic Energy Commission, TID-25075, NTIS, Springfield, VA, 81 p.

References

1. Vozmilov A. G., Fayn V. B., Astafev D. V., Andreev L. N. Problemy zagryazneniya vozdukh v zhivotnovodstve i puti ikh resheniya // Vestnik NGIEI. – 2021. – No. 9 (124). – S. 38–49. – DOI: 10.24412/2227-9407-2021-9-38-49.

2. Bondarenko N. B., Kondakov N. V., Starovoytov S. V., Butko D. A. Tekhnologii snizheniya gazovykh vybrosov zhivotnovodcheskikh ferm // Vestnik RUDN. – 2024. – No. 1. – S. 32–40. – DOI: 10.23363/2313-2310-2024-32-1-32-40.

3. Komlatskiy G. V. Tekhnologicheskie aspekty snizheniya vybrosov parnikovyykh gazov v zhivotnovodstve // Nauchnyy zhurnal KubGAU. – 2022. – No. 181 (07). – DOI: 10.21515/1990-4665-181-012.

4. FAO. Pathways towards lower emissions – A global assessment of the greenhouse gas emis-

sions and mitigation options from livestock agrifood systems. – 2023. – URL: <https://doi.org/10.4060/cc9029en>.

5. Chen L. et al. (2020). Performance of biofilters for livestock air emissions. *Bioresource Technology*. DOI: 10.1016/j.biortech.2020.123456.

6. Li, Y., et al. (2024). Annual Dynamics of Concentrations and Emission Rates of Particulate Matter and Ammonia in a Large-Sized, Low-Profile, Cross-Ventilated Dairy Building. *Agriculture*. 14. 2338. 10.3390/agriculture14122338.

7. Zhao Y. et al. (2022). Effects of ammonia on growth performance of livestock. *Animal*. 16 (5): 100512. DOI: 10.1016/j.animal.2021.100512.

8. RD-APK 3.10.07.05-17. Veterinarno-sanitarnye trebovaniya pri proektirovanii, stroitelstve, rekonstruktsii i ekspluatatsii zhivotnovodcheskikh pomeshcheniy.

9. Briggs, G.A. (1969). Plume Rise, U.S. Atomic Energy Commission, TID-25075, NTIS, Springfield, VA, 81 p.



УДК 629.4.082.3:621.3.004.12

DOI: 10.53083/1996-4277-2026-262-8-91-95

В.Б. Бельй

V.B. Belyy

ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ СИНХРОНИЗАЦИИ И НЕСИНФАЗНЫХ ВКЛЮЧЕНИЙ ГЕНЕРАТОРОВ АВТОНОМНЫХ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ НА ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЯ В ОБМОТКАХ ВОЗБУЖДЕНИЯ

INFLUENCE OF SYNCHRONIZATION MODES AND OUT-OF-PHASE GENERATOR SWITCHING ON IN INDEPENDENT POWER SYSTEMS ON THE OVERVOLTAGES IN EXCITATION WINDINGS

Ключевые слова: автономные системы электроснабжения, синхронные генераторы, точная синхронизация, самосинхронизация, грубая синхронизация, перенапряжения, обмотка возбуждения.

Одним из способов повышения надежности электроснабжения является применение нескольких, параллельно включенных, различных источников электропитания. Примером могут служить гибридные системы электроснабжения, в которых источниками электропитания может являться комбинация традиционной системы электроснабжения и различных видов возобновляемых источников энергии. В таких системах предусматривается параллельная работа синхронных генераторов. Для включения на параллельную работу используются 3 способа синхронизации: точная синхронизация, самосинхронизация, грубая синхронизация. Включение на параллельную

работу способом точной синхронизации производится в момент достаточно близкого совпадения амплитуд, частот и фаз напряжений подключаемого генератора к сети. При строгом совпадении этих величин синхронизация протекает идеально в том смысле, что в момент включения генератора совершенно отсутствуют толчки тока. Однако в автономных системах электроснабжения, где величина напряжения и частота сети не являются строго постоянными, бывает трудно, а порою невозможно выполнить условия точной синхронизации. С другой стороны, нельзя отрицать возможности внесения погрешностей в процессе синхронизации контрольными приборами, поэтому представляет интерес установление границ допустимых отклонений от условий точной синхронизации, при которых не возникают перенапряжения в цепи возбуждения. Как показывает практика постановки генераторов на параллельную

работу, одной из самых трудных и длительных операций является установление равенства начальных фаз напряжений подключаемого генератора и сети. Невыполнение условий точной синхронизации по начальному углу рассогласования θ_0 приводит к появлению в обмотке статора уравнивающего тока, зависящего от этого угла. Созданный уравнивающим током поток статора имеет апериодическую составляющую, которая при вращении ротора индуцирует в его контурах ЭДС основной частоты. В результате в обмотках возбуждения и демпферной возникают переменные токи. Переменная составляющая вызывает пульсацию полного тока, который при определенных условиях может стать отрицательным.

Keywords: *independent power systems, synchronous alternators, accurate synchronization, automatic synchronization, rough synchronization, overvoltages, excitation winding.*

One way to improve the reliability of power supply is to use several, parallel connected, different power sources. An example is hybrid power systems where the power sources may be a combination of a conventional power system and various types of renewable energy sources. In such systems, parallel operation of synchronous generators is provided. To enable parallel operation, the following three synchronization methods are used: accurate synchronization; self-synchronization; rough synchronization. Switching to parallel operation by

the method of accurate synchronization is performed at the moment of sufficiently close coincidence of amplitudes, frequencies and phases of voltages of the connected generator to the network with strict coincidence of these values; synchronization proceeds ideally in the sense that at the moment of switching on the generator there are absolutely no current shocks. However, in independent power supply systems where the voltage and frequency of the network are not strictly constant, it is difficult and sometimes impossible to fulfill the conditions for accurate synchronization. On the other hand, it is impossible to deny the possibility of introducing errors during synchronization with control devices. Therefore, it is of interest to establish the limits of permissible deviations from the conditions of accurate synchronization under which overvoltages in the excitation circuit do not occur. As the practice of setting generators to parallel operation shows, one of the most difficult and long-term operations is to establish the equality of the initial phases of the voltages of the connected generator and the network. Failure to accurately synchronize the initial mismatch angle leads to the appearance of equalizing current in the stator winding depending on this angle. The stator flow created by the equalizing current has an aperiodic component which, when the rotor rotates, induces electromotive force of the main frequency in its circuits. As a result, alternating currents occur in the excitation and damper windings. The variable component causes pulsation of the total current which under certain conditions may become negative.

Белый Владимир Борисович, к.т.н., доцент, ФГБОУ ВО Алтайский ГАУ, г. Барнаул, Российская Федерация, e-mail: vladimir-belyi@inbox.ru.

Belyy Vladimir Borisovich, Cand. Tech. Sci., Assoc. Prof., Altai State Agricultural University, Barnaul, Russian Federation, e-mail: vladimir-belyi@inbox.ru.

Введение

В структуре агропромышленного комплекса достаточно много объектов, где резервное электроснабжение критически важно. Примерами могут служить крупные птицефермы и животноводческие комплексы, тепличные комплексы, рыбоводческие хозяйства (особенно с установками замкнутого водоснабжения), лаборатории для селекции или хранения генетических материалов, где сбой может привести к порче уникального материала. На таких объектах расстройство технологического цикла может вызвать не только прекращение подачи электроэнергии, но и ее, что важно, дефицит. В таких случаях минимизировать отрицательные последствия можно за счет ввода резервного питания, в частности, синхронного генератора.

Одним из наиболее встречающихся в эксплуатации синхронных генераторов автономных и

резервных систем электроснабжения является режим включения на параллельную работу [1]. Самосинхронизация и грубая синхронизация позволяют за короткое время ввести резервный источник электроэнергии и, тем самым, свести к минимуму время перерыва электроснабжения и технологические потери. Но в процессе такой синхронизации допускаются отклонения как по фазе, так и по частоте напряжений подключаемого генератора, то можно ожидать появление перенапряжений в цепи возбуждения. Несовпадение по фазе включения генератора и внешней сети (угол рассогласования $\theta_0 \neq 0$ приводит к возникновению уравнивающего тока в якорной обмотке [2, 3]. В цепи возбуждения и демпферных контурах возникают переменные составляющие токов, которые при определенных условиях приводят к переходу тока возбуждения i_f через ноль. Включение синхронного генератора на

параллельную работу при скорости вращения отличной от синхронной ($S_0 \neq 0$) вызывает появление в обмотках ротора ЭДС частоты скольжения, которая может являться причиной возникновения отрицательного тока возбуждения i_f . Описанные явления характерны для режимов самосинхронизации и грубой синхронизации, поэтому в таких случаях важно знать параметры синхронизации, ограничивающие возможные аварийные ситуации.

Целью исследования является развитие аналитических методов, позволяющих оценить возможные области перенапряжений при синхронизации генераторов автономных систем электроснабжения.

Задачи: совершенствование математической модели синхронного генератора с системой вентильного возбуждения; выполнение на базе мо-

дели анализа возможности возникновения обратных токов возбуждения и определение возможных областей перенапряжений при синхронизации генератора.

Объект исследования – режимы синхронизации синхронных генераторов автономных систем электроснабжения.

Метод исследования – теория переходных процессов синхронных машин, математическое моделирование.

Результаты исследования

Параметры исследуемого синхронного генератора приведены в таблице.

Исследования проводились на основе математической модели синхронного генератора с вентильным возбуждением [4].

Таблица

Параметры исследуемого синхронного генератора

Тип	P_H	U_H	U_f	i_f	X_{ad}	X_{aq}	$X_{\sigma f}$	X_d'	X_d''	r_f	n_H
	кВт	В	В	А	о.е.	о.е.	о.е.	о.е.	о.е.	о.е.	об/мин.
МСК 940-750	940	400	25	178	2,488	2,178	0,075	0,223	0,145	0,006	750

Проведенные расчеты с использованием программы MathCad Prime 4.0 показали, что предельным значением угла рассогласования $\theta_{\text{ПР}}$, исключающим появление отрицательного тока в цепи возбуждения, является $16-18^\circ$. При этом считалось, что остальные условия точной синхронизации строго выполнены.

Вместе с тем необходимо отметить, что нарушение условий точной синхронизации по фазе включения до $20-30^\circ$ (рис. 1 в) приводит к появлению обратных напряжений, не представляющих заметной опасности. Например, для исследуемого генератора при $\theta_0 = 30^\circ$ зафиксированы обратные напряжения, равные $1,6 U_f$, что является предельно допустимой величиной для вентилей возбудителя данного генератора [5].

Успешная синхронизация в первом цикле качаний, как показывают расчеты, обеспечивается даже при более грубых нарушениях условий точной синхронизации по фазе включения.

Ввиду сложности практического обеспечения точной автоматической синхронизации необходимо допустить несоблюдение одного условия, а именно: невыполнение равенства $S_0 = 0$ [6].

Как показали расчеты, предельной величиной скольжения при строгом выполнении прочих условий точной синхронизации является $S_{\text{ПР}} = 2\%$. При этом на обмотке возбуждения индуцируются перенапряжения, не превышающие допустимых значений по классу изоляции и допустимых значений обратных напряжений вентилей.

В явнополюсных машинах, главным образом, вследствие менее благоприятных параметров демпферной обмотки, величина $S_{\text{ПР}}$ оказывается несколько меньше [7].

Практический интерес представляет предельный диапазон изменений не отдельных величин θ_0 и S_0 , а их сочетания. Исследование процессов точной синхронизации позволило выявить область допустимых отклонений θ_0 и S_0 (рис. 2).

Здесь перенапряжения на обмотке возбуждения возможны в правой части графика, откуда следует, что одновременное отклонение величин θ_0 и S_0 от условий точной синхронизации заметно ограничивают предел изменения каждой величины в отдельности.

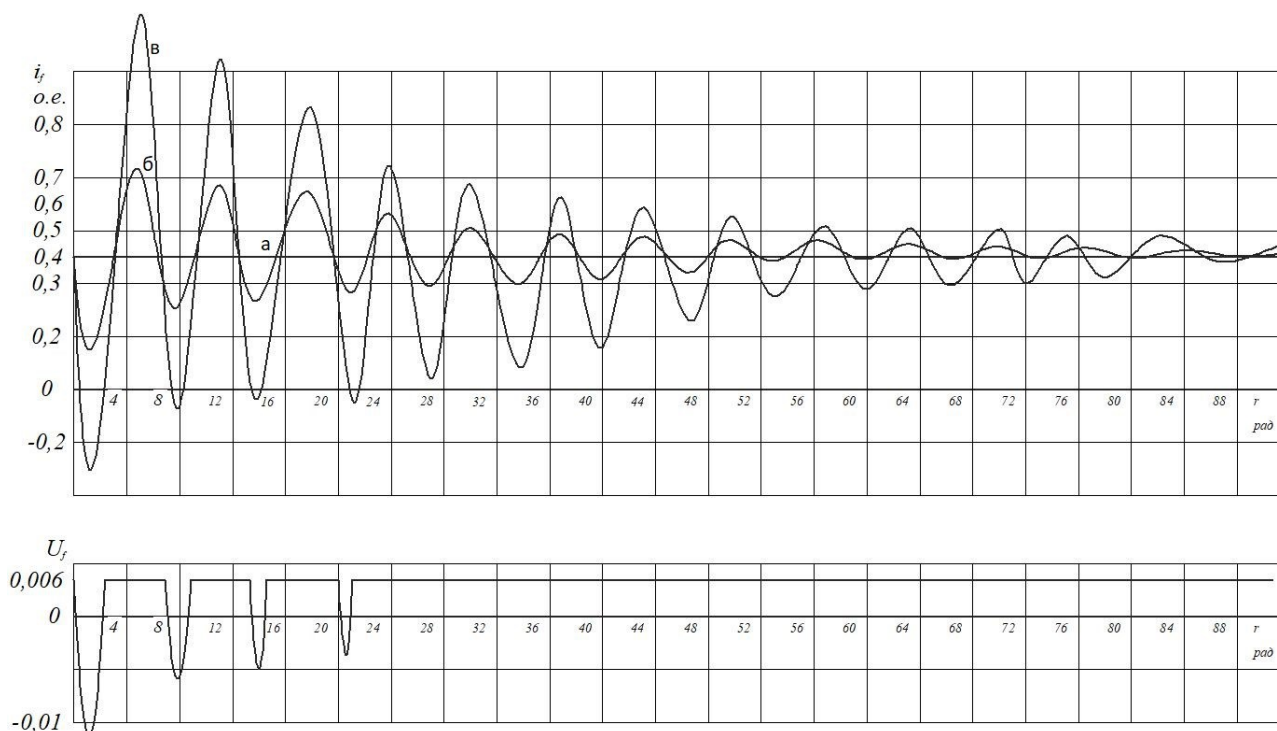


Рис. 1. Ток возбуждения и напряжение на обмотке возбуждения при точной синхронизации (а) и несинфазных включениях (б, в); $\theta_0 = 10^\circ$; $\theta_0 = 30^\circ$

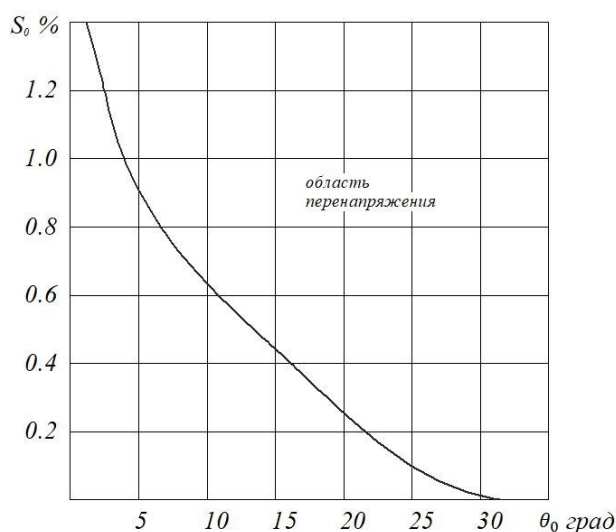


Рис. 2. Зона допустимых отклонений θ_0 и S_0 при точной синхронизации

Закключение

1. В процессе синхронизации генератора допускаются отклонения как по фазе, так и по частоте напряжений подключаемого генератора и сети. Это позволяет ожидать возникновения перенапряжений в цепи вентильного возбуждения.

2. Несоблюдение по фазе включения (угол рассогласования $S_0 \neq 0$) приводит к возникновению уравнительного тока в якорной обмотке. В цепи возбуждения и демпферных контурах возникают переменные составляющие токов, которые при определенных условиях могут привести

к переходу тока i_f через ноль. Включение генератора на параллельную работу при скорости, отличной от синхронной ($S_0 \neq 0$), вызывает в обмотках ротора ЭДС частоты скольжения, которая также может являться причиной возникновения отрицательного i_f .

3. Предельным значением угла рассогласования θ_0 , исключающим появление отрицательного тока в цепи возбуждения, является $16-18^\circ$.

4. Предельным скольжением, при котором в обмотке возбуждения возникают перенапряжения, не превышающие допустимых по классу изоляции и допустимых обратных напряжений вентилей, является $S_{пр} = 1,6-2,5\%$.

5. Влияние совместного изменения θ_0 и S_0 позволило построить функциональную зависимость $S_{пр}(\theta_{пр})$, ограничивающую область перенапряжений.

Библиографический список

1. Вольдек, А. И. Электрические машины / А. И. Вольдек. – Ленинград: Энергия, 1978. – 832 с. – Текст: непосредственный.
2. Горев, А.А. Переходные процессы синхронной машины / А.А. Горев. – Ленинград; Москва: Госэнергоиздат, 1950. – 553 с. – Текст: непосредственный.

3. Ульянов, С. А. Электромагнитные переходные процессы в электрических системах / С. А. Ульянов. – Москва: Энергия, 1970. – 519 с. – Текст: непосредственный.

4. Белый, В. Б. Моделирование процессов в системе возбуждения синхронных генераторов автономных систем электроснабжения с использованием внешних характеристик преобразователя / В. Б. Белый. – Текст: непосредственный // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2018. – № 11 (169). – С. 113-116.

5. Хватов, О. С. Единая электростанция транспортного объекта с электродвижением на базе дизель-генераторной установки переменной частоты вращения / О. С. Хватов, А. Б. Дарьенков. – Текст: непосредственный // Электротехника. – 2016. – № 3. – С. 35-40.

6. Wood A. J. and Ackermann B. Power Generation, Operation, and Control. Wiley. – Режим доступа: <https://www.litres.ru/book/allen-j-wood-26690105/power-generation-operation-and-control-34431990/> (data obrashcheniya 25.06.2026).

7. Mathematical models of synchronous generators at difference – Режим доступа: <https://s.science-education.ru/pdf/2014/2/59.pdf> (data obrashcheniya 25.06.2026).

References

1. Voldek, A.I. Elektricheskie mashiny / A.I. Voldek. – Leningrad: Energiya, 1978. – 832 s.

2. Gorev, A.A. Perekhodnye protsessy sinkhronnoy mashiny / A.A. Gorev. – Leningrad; Moskva: Gosenergoizdat, 1950 – 553 s.

3. Ulyanov, S.A. Elektromagnitnye perekhodnye protsessy v elektricheskikh sistemakh / S.A. Ulyanov. – Moskva: Energiya, 1970. – 519 s.

4. Belyy V.B. Modelirovanie protsessov v sisteme возбуждения синхронных генераторов автономных систем электроснабжения с использованием внешних характеристик преобразователя // Vestnik Altayskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. – 2018. – No. 11 (169). – S. 113-116.

5. Khvatov O.S., Darenkov A.B. Edinaya elektrostantsiya transportnogo obekta s elektrodvizheniem na baze dizel-generatornoy ustanovki peremennoy chastoty vrashcheniya // Elektrotehnika. 2016. No. 3. S. 35-40.

6. Wood A. J. and Ackermann B. Power Generation, Operation, and Control. Wiley. – Режим доступа: <https://www.litres.ru/book/allen-j-wood-26690105/power-generation-operation-and-control-34431990/> (data obrashcheniya 25.06.2026).

7. Mathematical models of synchronous generators at difference – Режим доступа: <https://s.science-education.ru/pdf/2014/2/59.pdf> (data obrashcheniya 25.06.2026).

