

pomoshchyu GIS / V.I. Kotelnikov, S.A. Chupikova
// Mezhdunarodnyy zhurnal eksperimental'nogo
obrazovaniya. – 2015. – No. 3-3. – S. 455-459.

14. Geografiya Respubliki Tyva: praktikum /
sostaviteli S. S. Kurbatskaya, S. K. Kuzhuget. –
Kyzyl: Izdatelstvo TuvGU, 2022. – 75 s.



УДК 629.4.082.3:621.3.004.12

DOI: 10.53083/1996-4277-2026-263-9-76-80

В.Б. Белый

V.B. Belyy

ВЛИЯНИЕ РЕЖИМА САМОСИНХРОНИЗАЦИИ ГЕНЕРАТОРА АВТОНОМНОЙ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ НА ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЯ В ОБМОТКАХ ВОЗБУЖДЕНИЯ

INFLUENCE OF SELF-SYNCHRONIZATION MODE OF AUTONOMOUS POWER SUPPLY SYSTEM GENERATOR ON OVERVOLTAGES IN THE EXCITATION WINDINGS

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

Современные технологии агропромышленных производств предъявляют высокие требования к системам электрификации. Особенно это касается надежности электроснабжения. Данный вопрос актуален как для крупных агропромышленных объектов, так и малых фермерских хозяйств. Наиболее логичным способом повышения надежности электроснабжения является применение нескольких параллельно включенных различных источников электропитания. Примерами такого решения могут служить широко распространяющиеся в последнее время системы гибридного электроснабжения, в которых источниками электропитания является комбинация традиционной системы электроснабжения и различных видов возобновляемых источников энергии. Данные системы могут содержать синхронные генераторы, для которых предусматривается параллельная работа. Для включения генераторов на параллельную работу используются следующие 3 способа синхронизации: точная синхронизация, самосинхронизация, грубая синхронизация. Включение на параллельную работу способом точной синхронизации производится в момент 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. Но в автономных и гибридных системах электроснабжения, где величина напряжения и частота сети не являются строго постоянными, бывает трудно, а порою невозможно выполнить условия точной синхронизации. При этом данный процесс занимает достаточно много време-

ни, что для ряда агротехнологических процессов неприемлемо. Альтернативой процессу точной синхронизации может являться включение синхронного генератора на параллельную работу методом самосинхронизации. Процесс занимает достаточно мало времени, но при этом важно знать и придерживаться границ допустимых отклонений от условий точной синхронизации, при которых не возникают перенапряжения в цепи возбуждения.

Keywords: autonomous power supply systems, synchronous generators, self-synchronization, overvoltages, excitation windings.

Modern technologies of agro-industrial production impose high demands on electrification systems. This is especially true for the reliability of power supply. This issue is relevant both for large agro-industrial facilities and small farms. The most logical way to increase the reliability of power supply is to use several parallel connected, different power sources. Examples of such a solution are the recently widespread hybrid power supply systems where the power sources are a combination of a conventional power supply system and various types of renewable energy sources. These systems may contain synchronous generators for which parallel operation is provided. To turn on the generators for parallel operation, the following three synchronization methods are used: accurate synchronization; self-synchronization; coarse synchronization. Activation for parallel operation by the method of accurate synchronization is performed at the moment of close coincidence of amplitudes, frequencies and phases of voltages of the connected generator to the network. With a strict coincidence of these values, synchronization proceeds ideally in the sense that there are absolutely no current shocks at the moment the generator is turned on. But in autonomous and hybrid power supply systems where the volt-

age and frequency of the network are not strictly constant, it may be difficult, and sometimes impossible, to fulfill the conditions for accurate synchronization. Moreover, this process takes a lot of time which is unacceptable for a number of agro-technological processes. An alternative to the process of accurate synchronization may be to turn on the synchronous generator for parallel

operation using the self-synchronization method. The process takes quite a little time, but at the same time it is important to know and adhere to the boundaries of permissible deviations from the conditions of accurate synchronization under which there are no overvoltages in the excitation circuit.

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

Развивающиеся технологии агропромышленного производства предъявляют повышенные требования к качеству электрификации и надежности электроснабжения. Например, такие объекты, как крупные птицефермы и животноводческие комплексы, тепличные комплексы, рыбоводческие хозяйства (особенно с установками замкнутого водоснабжения), лаборатории для селекции или хранения генетических материалов очень чувствительны не только к перерыву в поставки электроэнергии, но и в ограничении и ее качестве. Данные негативные явления можно минимизировать за счет ввода резервного питания, в частности, синхронного генератора.

Наличие синхронных генераторов в системах гибридного и автономного электроснабжения подразумевает, в определенных режимах, включение их на параллельную работу. В практике используются различные способы включения на параллельную работу синхронных генераторов: точная синхронизация, самосинхронизация, грубая синхронизация [1]. Точная синхронизация позволяет в наиболее благоприятном режиме войти на параллельную работу синхронному генератору, но при этом необходимо учитывать, что она может занять достаточно длительное время. Данный недостаток включения генераторов на параллельную работу методом точной синхронизации снимается при грубой синхронизации и самосинхронизации генераторов [2, 3]. Такие способы синхронизации позволяют за короткое время ввести резервный источник электроэнергии и, тем самым, минимизировать возможные ущербы от перерыва электроснабжения.

В случае самосинхронизации генератор подключается к сети при обмотке возбуждения, отключенной от источника и шунтированной со-

противлением. Вслед за моментом включения генератора на сеть подается напряжение на обмотку возбуждения. При этом процессы, происходящие в цепи возбуждения генератора, имеют более сложный характер, в отличие от несинфазных включений. Поскольку включение генератора на сеть происходит при произвольном угловом положении ротора, могут иметь место значительные толчки токов. Вследствие несинхронного вращения ротора изменение полного тока возбуждения зависит от дополнительной ЭДС частоты скольжения. Самосинхронизация генератора является наиболее тяжелым, с точки зрения возможных перенапряжений на обмотке возбуждения.

Целью исследования является совершенствование методов, которые позволяют оценить на практике возможные области перенапряжений при самосинхронизации генераторов автономных систем электроснабжения.

Задачи: совершенствование математической модели синхронного генератора с системой вентильного возбуждения; выполнение на базе модели анализа возможности возникновения обратных токов возбуждения и определение возможных областей перенапряжений при синхронизации генератора.

Объект и методы

Объектом 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.

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.
СБГ 800-750	800	400	25	180	2,5	2,2	0,08	0,245	0,122	0,005	750

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

На рисунке 1 показаны ток возбуждения и напряжение на обмотке возбуждения в процессе самосинхронизации неявнополюсного турбогенератора.

Перед включением генератора на сеть скорость вращения ротора составляла 0,98 от синхронной, а угол рассогласования равнялся 60° .

Как показали расчеты, максимальный отрицательный ток возбуждения наблюдается в первый момент времени, когда имеются максимальные броски токов, вызванные разностью фаз напряжений генератора и сети, а также

ЭДС, индуцированной в обмотке возбуждения. При этом на обмотке возбуждения возникают перенапряжения, достигающие 20-кратного значения от величин номинального напряжения возбуждения.

Из графика видно, что амплитуда тока возбуждения не остается постоянной. Под влиянием активных сопротивлений контуров происходит затухание активных составляющих тока возбуждения, и основное влияние на изменение i_f оказывает ЭДС скольжения. В случае неудачной синхронизации ее воздействие может привести к новым появлениям отрицательных токов в цепи возбуждения.

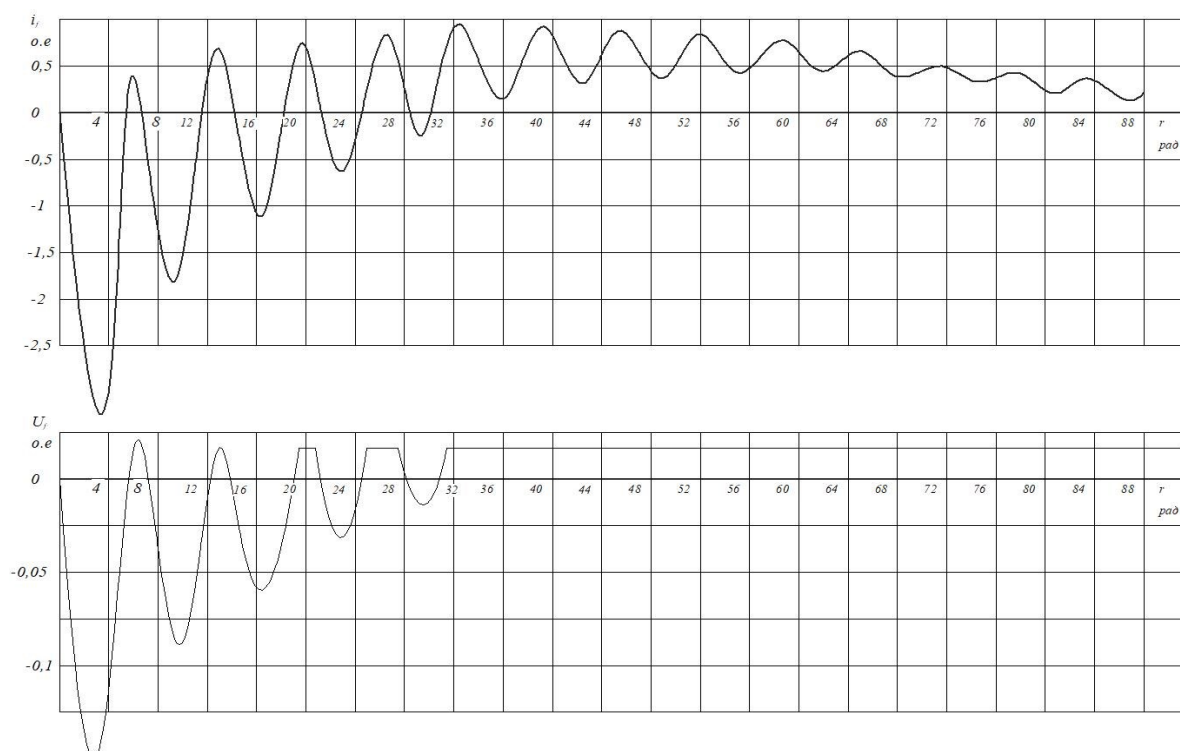


Рис. 1. Ток возбуждения и напряжение на обмотке возбуждения при самосинхронизации неявнополюсного турбогенератора

В момент включения генератора на параллельную работу методом самосинхронизации разность фаз напряжений подключаемого генератора и сети может быть произвольной. В связи с этим представляет интерес установления зависимости максимальной величины перена-

пряжений на обмотке возбуждения от угла рассогласования θ_0 . Результаты расчетов, иллюстрирующие указанную зависимость для турбогенератора СБГ 800-750 при постоянном скольжении, равном 2,5%, приведены на рисунке 2. Максимальные перенапряжения наблюдаются в

интервале углов $\theta_0 = (0 \div 25)^\circ$. При $\theta_0 = (30 \div 220)^\circ$ амплитуда периодической составляющей тока i_f уменьшается, а характер

изменения полного тока возбуждения в большей степени зависит от величин апериодических токов обмотки возбуждения и демпферной обмотки.

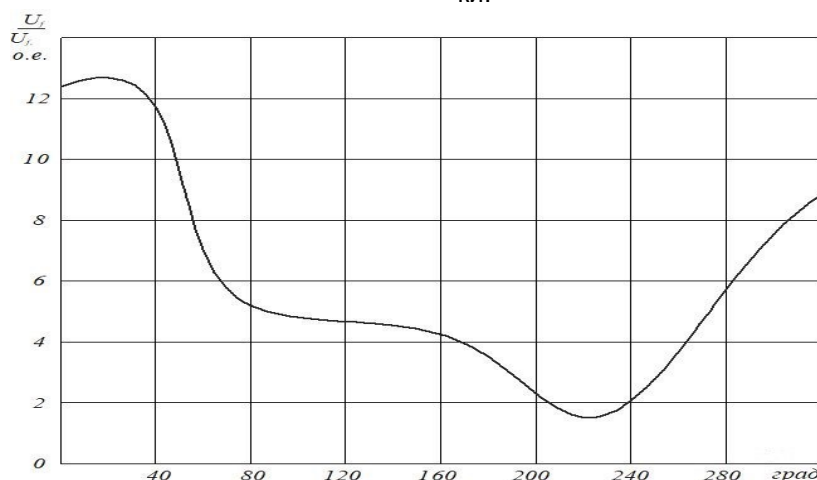


Рис. 2. Зависимость перенапряжений на обмотке возбуждения при самосинхронизации генератора от начального угла рассогласования

Заключение

1. Процесс самосинхронизации генератора вызывает значительные напряжения в цепи возбуждения.

2. Большое влияние на величину перенапряжений в обмотке возбуждения оказывает начальный угол рассогласования θ_0 .

3. Влияние скольжения на формирование величины перенапряжений проявляется незначительно.

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 перемен-

ной 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. – Rezhim dostupa: <https://www.litres.ru/book/allen-j-wood-26690105/power-generation-operation-and-control-34431990/> (дата обращения: 01.07.2026).

7. Mathematical models of synchronous generators at difference. – URL: <https://s.science-education.ru/pdf/2014/2/59.pdf> (дата обращения: 01.07.2026). – Текст: электронный.

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 sinkhronnykh generatorov avtonomnykh sistem elektrosnabzheniya s ispol'zovaniem vneshnikh kharakteristik preobrazovatelya // Vestnik Altayskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. – 2018. – No. 11 (169). – S. 113-116.
5. Khvatov O.S, Darenkov A.B. Edinaya elektrostantsiya transportnogo ob'ekta 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. – Rezhim dostupa: [https://www.litres.ru/book/allen-j-wood-](https://www.litres.ru/book/allen-j-wood-26690105/power-generation-operation-and-control-34431990/)

26690105/power-generation-operation-and-control-34431990/ (data obrashcheniya 01.07.2026).

7. Mathematical models of synchronous generators at difference. – Rezhim dostupa: <https://s.science-education.ru/pdf/2014/2/59.pdf> (data obrashcheniya 01.07.2026).



УДК 631.3:631.171

DOI: 10.53083/1996-4277-2026-263-9-80-88

Г.Л. Утенков, Т.И. Утенкова

G.L. Utenkov, T.I. Utenkova

МЕТОД ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ ДЛЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕХНОЛОГИЙ ВОЗДЕЛЫВАНИЯ АГРОЦЕНОЗОВ

METHOD FOR DESIGNING QUALITY INDICES OF TECHNICAL SYSTEMS FOR AGROCENOSIS CULTIVATION TECHNOLOGY EFFICIENCY

Ключевые слова: агроценозы, зерновые культуры, качество, технология, эффективность, колебательный процесс, техническая система, нестационарность.

Научное обеспечение сельхозпроизводства требует учета качества производимой продукции. Для этого важны 2 условия: 1) высокий теоретический и методологический уровни работ их целостности; 2) теснейшая интеграция с производством, обеспечиваемым разнообразием растениеводства. Достижение цели для получения прибыли обеспечивается минимизацией отклонений объекта исследования от эталонного поведения и усилением полезных воздействий. Однако отечественное производство исходит из минимума затрат и потребляемых ресурсов, но не учитывает статистические свойства почвы. Неучет статистических свойств почвы как динамической системы с пространственно-временными характеристиками является главной причиной формирования колебательных процессов. Технические системы, реализующие технологические процессы в технологиях возделывания агроценозов, относят к нестационарным процессам. В соответствии с агро-требованиями такие технологические процессы не обеспечивают требуемых показателей качества и увеличивают затраты потребляемой энергии. Неэффективное использование технических и энергетических ресурсов в технологиях возделывания агроценозов становится одним из ключевых факторов снижения конкурентоспособности сельскохозяйственной продукции. Возникает проблема повышения качества и экономической эффективности технологических процессов возделывания агроценозов. Цель – разработать метод проектирования показателей качества технических систем для эффективности тех-

нологий возделывания агроценозов. Задачи исследований входило: 1) выявить основные факторы и показатели эффективности технологических процессов для технологий возделывания агроценозов на основе управления показателями качества технических систем; 2) установить основные взаимосвязи параметров неоднородной структуры почвенного покрова с параметрами технических систем и разработать метод проектирования ресурсосберегающих технологий возделывания агроценозов. Объектом исследований являются технологические процессы взаимодействия основных параметров неоднородной структуры почвенного покрова с параметрами и режимами работы технических систем. В основу методов исследований положены системный анализ и синтез технических систем, методы теории колебаний, методы дифференциальных и интегральных исчислений, метод дискретных элементов (МЧ).

Keywords: agrocenoses, grain crops, quality, technology, efficiency, oscillatory process, technical system, non-stationarity.

Scientific support for agricultural production requires taking into account the quality of the products produced. Therefore, two conditions are essential: 1) a high theoretical and methodological level of work and its integrity; 2) the closest integration with production. The corresponding variability of soil and climatic conditions should be ensured by a variety of crop production. According to general systems theory and the laws of nonlinear synthesis, integrating structures of different ages into a complex structure provides energy and cost savings. This goal is achieved not only by minimizing deviations of the studied object from the reference behavior and filtering out unwanted disturbances, but also by enhanc-