

DOI: 10.24937/2542-2324-2021-2-S-I-60-65  
УДК: 621.313:537.311.6+621.3.064.1

Б.С. Доржиева  
АО «Силовые машины», Санкт-Петербург, Россия

## ЗАВИСИМОСТЬ ТОКОВ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ ОТ ИНДУКТИВНЫХ СОПРОТИВЛЕНИЙ ТУРБОГЕНЕРАТОРА ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ВИДАХ КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЙ

В работе рассмотрена зависимость токов короткого замыкания (КЗ) от индуктивных сопротивлений турбогенератора при трехфазном, двухфазном и однофазном коротких замыканиях. Объектом исследования является турбогенератор с воздушным охлаждением. Цель работы – исследование влияния изменения синхронных, переходных и сверхпереходных индуктивных сопротивлений турбогенератора на токи короткого замыкания при различных видах КЗ. Расчет токов короткого замыкания был произведен с помощью уравнений Парка – Горева. Получены графики изменения токов по продольной и поперечной осям. По этим результатам построены зависимости токов короткого замыкания от сверхпереходных и переходных сопротивлений турбогенератора. Из графиков зависимостей токов от индуктивных сопротивлений очевидно, что при незначительном изменении переходного и сверхпереходного индуктивных сопротивлений происходит значительное изменение значений токов короткого замыкания.

**Ключевые слова:** турбогенератор, короткое замыкание, сверхпереходное индуктивное сопротивление, переходное индуктивное сопротивление, ток короткого замыкания.

*Автор заявляет об отсутствии возможных конфликтов интересов.*

DOI: 10.24937/2542-2324-2021-2-S-I-60-65  
UDC: 621.313:537.311.6+621.3.064.1

B. Dorzhieva  
JSC Power Machines, St. Petersburg, Russia

## SHORT-CIRCUIT CURRENTS VERSUS INDUCTIVE RESISTANCES OF TURBO-GENSET FOR DIFFERENT TYPES OF SHORTS

This paper discusses how short-circuit currents of turbo-genset depend on its inductive reactances for the cases of triple-, double- and single-phase shorts. The study tackles air-cooled turbo-gensets. The purpose of this work was to investigate the effect of changes in synchronous, transient and subtransient inductive reactances of turbo-genset upon short-circuit currents for different types of shorts. Short-circuit currents were calculated as per Park-Gorev equations. The changes in currents were plotted against both longitudinal and transverse axes. The results were further used to plot short-circuit currents as functions of subtransient and transient turbo-genset reactances. These plots show that even a minor change in subtransient and transient reactance results in a significant change of short-circuit current.

**Keywords:** turbo-genset, short circuit, subtransient reactance, transient reactance, short-circuit current.

*Author declares lack of the possible conflicts of interests.*

---

*Для цитирования:* Доржиева Б.С. Зависимость токов короткого замыкания от индуктивных сопротивлений турбогенератора при различных видах коротких замыканий. Труды Крыловского государственного научного центра. 2021; Специальный выпуск 2: 60–65.

*For citations:* Dorzhieva B. Short-circuit currents versus inductive reactances of turbo-genset for different types of shorts. Transactions of the Krylov State Research Centre. 2021; Special Issue 2: 60–65 (in Russian).

## Введение

### Introduction

В работе рассматривается зависимость кратностей токов короткого замыкания от индуктивных сопротивлений в переходных (несимметричных) режимах работы. Объектом исследования является трехфазный синхронный генератор ТФ-37-2ОМ5 с воздушным охлаждением мощностью 37 МВт.

Протекание эксплуатационных и аварийных переходных процессов в синхронных машинах сопряжено с накоплением или рассеянием магнитных полей и механической энергии вращающихся конструктивных частей и, следовательно, зависит от параметров синхронной машины. В синхронных машинах существуют различные электрические и магнитные связанные контуры, имеющие изменяющиеся в зависимости от режима работы параметры. Также в зависимости от режима работы изменяется в течение переходного периода и связь этих контуров [1].

Исследование переходных режимов синхронных машин, в том числе турбогенераторов, является одним из основных направлений в изучении энергетического оборудования. Труды, посвященные переходным режимам, базируются на уравнениях Парка –

Горева для идеализированной ненасыщенной синхронной машины. Принимается, что в идеализированной ненасыщенной синхронной машине реакция якоря имеет синусоидальный характер распределения и диаметральный шаг обмоток [2].

## Объект исследования

### Object of study

Объект исследования – турбогенератор с воздушным охлаждением ТФ-37-2ОМ5 завода «Электросила». Данный турбогенератор предназначен для выработки электрической энергии для обеспечения питанием системы электродвижения и потребителей собственных нужд ледокола в продолжительном режиме. На ледоколе параллельно работают четыре турбогенератора, при этом по подводу смазки и кабелей два генератора имеют исполнение по левому борту, два – по правому.

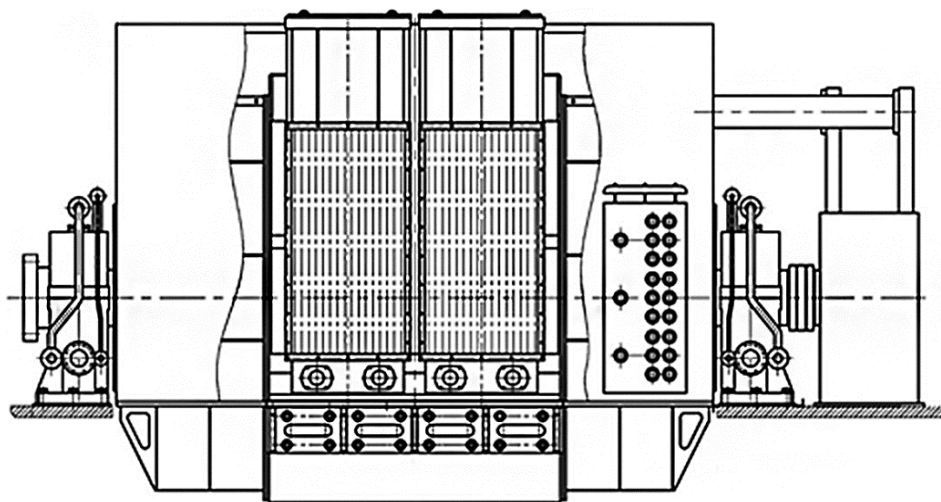
Технические данные турбогенератора приведены в табл. 1. Общий вид турбогенератора приведен на рис. 1.

В работе рассмотрено влияние изменения индуктивных сопротивлений на токи короткого замыкания. Объектом исследования является турбогенератор с воздушным охлаждением мощностью 37 МВт,

**Таблица 1.** Технические данные турбогенератора

**Table 1.** Turbo-genset data

Наименование параметра	Значение параметра
Полная мощность, кВ·А	46 250
Активная мощность, кВт	37 000
Коэффициент мощности, о.е.	0,8
Напряжение, В	10 500
Ток статора, А	2543
Коэффициент полезного действия, %	98,3
Система возбуждения	Бесщеточная диодная
Продольное сверхпереходное индуктивное сопротивление для положительного следования фаз, о.е.	0,19
Продольное переходное индуктивное сопротивление для положительного следования фаз, о.е.	0,258
Продольное синхронное индуктивное сопротивление для положительного следования фаз, о.е.	2,26
Индуктивное сопротивление обратной последовательности, о.е.	0,209
Индуктивное сопротивление нулевой последовательности, о.е.	0,087



**Рис. 1.** Общий вид турбогенератора

**Fig. 1.** General view of turbo-genset

предназначенный для выработки электрической энергии для питания систем электродвижения и потребителей собственных нужд ледокола. Исследование несимметричных режимов электрических машин является одним из основных направлений исследования энергетического оборудования.

## Материалы и методы

### Materials and methods

В работе используются программные пакеты Mathcad 14 и Matlab 2020R. При построении математической модели исходными данными служили технические характеристики турбогенератора. Рассмотрены несимметричные короткие замыкания при заданной длительности на выводах генератора. Получены графические зависимости изменения токов короткого замыкания от времени и индуктивных сопротивлений.

При коротком замыкании магнитный поток реакции якоря вытесняется в межполюсное пространство с высоким магнитным сопротивлением под действием наведенных в демпферной обмотке и обмотке возбуждения ЭДС и токов. Так характеризуется сверхпереходный режим. После затухания сверхпереходного процесса поток реакции якоря проходит через демпферную обмотку – это переходный режим. После потока реакции якоря проходит через обмотку возбуждения и начинается установившийся режим [3].

Во время длительных переходных электромагнитных и электромеханических процессов переходное сопротивление не остается неизменным. С увеличением тока значение индуктивного сопротивле-

ния уменьшается, что обусловлено двумя причинами: насыщением магнитной цепи основным потоком и насыщением отдельных участков магнитной цепи полями рассеяния [2–4].

В первом случае насыщение от основного потока приводит к уменьшению взаимоиндукции и снижению проводимости путей рассеяния, что снижает проводимость для потока рассеяния перед коротким замыканием.

Во время короткого замыкания большая часть магнитного потока устремляется по путям рассеяния и вызывает дополнительное насыщение этих участков. При постоянных потокосцеплениях сразу после короткого замыкания соответственно увеличиваются значения токов короткого замыкания и снижаются индуктивные сопротивления генератора.

Для анализа были рассчитаны мгновенные значения токов  $i_d$  и  $i_q$  для различных видов коротких замыканий: трехфазное КЗ при холостом ходе (1, 2), двухфазное КЗ при холостом ходе и наибольшей несимметричной составляющей тока КЗ (3, 4), однофазное КЗ при холостом ходе и наибольшей асимметричной составляющей тока КЗ (5, 6) [2]. При расчете напряжение принималось равным номинальному напряжению холостого хода.

$$i_{d3}(t) = \frac{1}{x_d} + \left( \frac{x_d - x'_d}{x_d \cdot x'_d} \right) \cdot e^{-\frac{t}{T'_d}} + \left( \frac{x_d - x''_d}{x'_d \cdot x''_d} \right) \cdot e^{-\frac{t}{T''_d}} - \frac{1}{x''_d} \cdot e^{-\frac{t}{T_a}} \cdot \cos(t); \quad (1)$$

$$i_{q3}(t) = \frac{1}{x''_d} \cdot e^{-\frac{t}{T_a}} \cdot \sin(t); \quad (2)$$

$$i_{d2}(t) = \left( \frac{1}{x_d + x_2} + \frac{x_d - x'_d}{(x'_d + x_2) \cdot (x_d + x_2)} \cdot e^{-\frac{t}{T'_{d2}}} + \frac{x'_d - x''_d}{(x''_d + x_2) \cdot (x'_d + x_2)} \cdot e^{-\frac{t}{T''_{d2}}} \right) \times$$

$$\times (1 + \cos(2t)) - \frac{1}{x''_d} \cdot e^{-\frac{t}{T_a}} \cdot \cos(t);$$

$$i_{q2}(t) = \frac{1}{x''_d} \cdot e^{-\frac{t}{T_a}} \cdot \sin(t) -$$

$$\left( \frac{1}{x_d + x_2} + \frac{x_d - x'_d}{(x'_d + x_2) \cdot (x_d + x_2)} \cdot e^{-\frac{t}{T'_{d2}}} + \frac{x'_d - x''_d}{(x''_d + x_2) \cdot (x'_d + x_2)} \cdot e^{-\frac{t}{T''_{d2}}} \right) \cdot \sin(2t);$$

$$i_{d1}(t) = \left( \frac{1}{x_d + x_2 + x_0} + \frac{x_d - x'_d}{(x'_d + x_2 + x_0) \cdot (x''_d + x_2 + x_0)} \cdot e^{-\frac{t}{T'_{d1}}} + \frac{x'_d - x''_d}{(x''_d + x_2 + x_0) \cdot (x'_d + x_2 + x_0)} \cdot e^{-\frac{t}{T''_{d1}}} \right) \times$$

$$\times (1 - \cos(2t)) - \frac{1}{x''_d} \cdot \frac{1}{\left(x''_d + \frac{x_0}{2}\right)} \cdot e^{-\frac{t}{T_{a1}}} \cdot \cos(t);$$

$$i_{q1}(t) = \frac{1}{\left(x''_d + \frac{x_0}{2}\right)} \cdot e^{-\frac{t}{T_{a1}}} \cdot \sin(t) -$$

$$\left( \frac{1}{x_d + x_2 + x_0} + \frac{x_d - x'_d}{(x'_d + x_2 + x_0) \cdot (x''_d + x_2 + x_0)} \right) \times$$

$$\times e^{-\frac{t}{T'_{d1}}} + \frac{x'_d - x''_d}{(x'_d + x_2 + x_0) \cdot (x''_d + x_2 + x_0)} \cdot e^{-\frac{t}{T''_{d1}}} \times$$

$$\times \sin(2t).$$

Графики изменения токов по продольной и поперечной осям для трехфазного, двухфазного и однофазного коротких замыканий, полученные по выражениям (1–6), показаны на рис. 2 и 3.

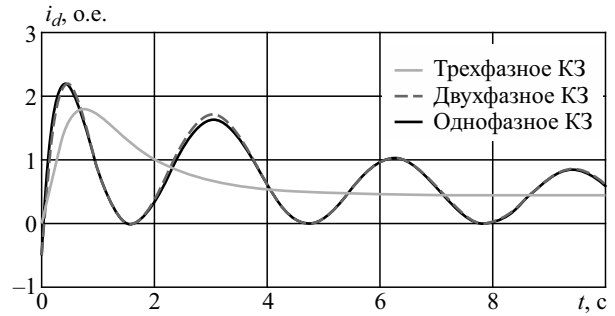


Рис. 2. График изменения тока по продольной оси  $i_d$

Fig. 2. Plot of current against longitudinal axis  $i_d$

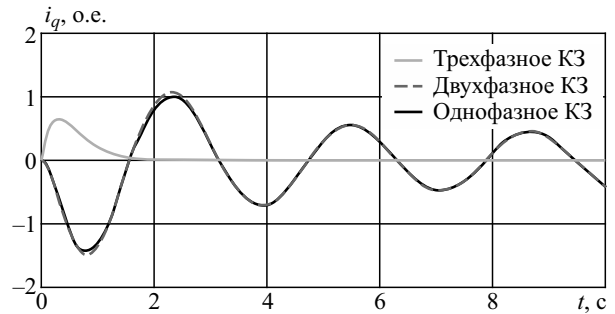


Рис. 3. График изменения тока по поперечной оси  $i_q$

Fig. 3. Plot of current against transverse axis  $i_q$

Далее приведены выражения (7–12) для токов  $I_d$  и  $I_q$  в роторе по осям  $d$  и  $q$  в долях тока возбуждения при холостом ходе и номинальном напряжении, соответствующие значениям  $i_d$  и  $i_q$ , полученным по выражениям (1–6).

Токи  $I_d$  и  $I_q$  для трехфазного КЗ:

$$I_{d3}(t) = \frac{x''_d}{x_d} + \frac{(x''_d - x'_d) \cdot x''_d}{x_d \cdot x'_d} \cdot e^{-\frac{t}{T'_d}} +$$

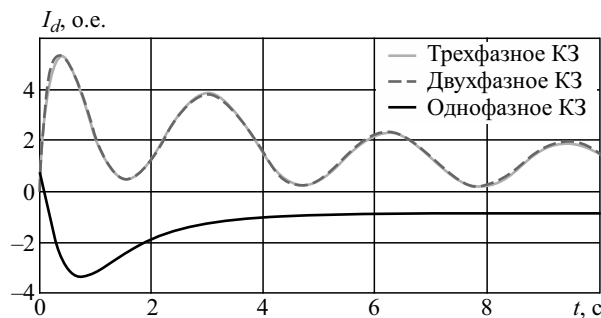
$$+ \frac{x'_d - x''_d}{x'_d} \cdot e^{-\frac{t}{T''_d}} - (x_d - x''_d) \cdot i_{d3}(t) =$$

$$= 1 + \left( \frac{x_d - x'_d}{x'_d} \right) \cdot e^{-\frac{t}{T'_d}} + \left( \frac{x_d - x''_d}{x''_d} - \frac{x_d - x'_d}{x'_d} \right) \times$$

$$\times e^{-\frac{t}{T''_d}} - \frac{x_d - x''_d}{x''_d} \cdot e^{-\frac{t}{T_a}} \cdot \cos(t);$$

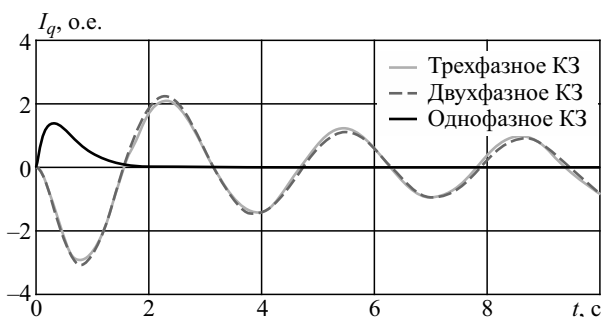
$$I_{q3}(t) = (x_d - x''_d) \cdot i_{q3}(t) = \left( \frac{x_d - x''_d}{x''_d} \right) \times$$

$$\times e^{-\frac{t}{T_a}} \cdot \sin(t);$$



**Рис. 4.** График изменения тока по продольной оси в долях тока возбуждения  $I_d$

**Fig. 4.** Plot of current against longitudinal axis as fraction of excitation current  $I_d$



**Рис. 5.** График изменения тока по поперечной оси в долях тока возбуждения  $I_q$

**Fig. 5.** Plot of current against transverse axis as fraction of excitation current  $I_q$

для двухфазного КЗ:

$$I_{d2}(t) = \frac{2 \cdot x_d''}{x_d + x_2} + \frac{2 \cdot x_d'' \cdot (x_d - x_d')}{(x_d + x_2) \cdot (x_d' + x_2)} \cdot e^{-\frac{t}{T_{d2}}} + \quad (9)$$

$$\frac{x_d' - x_d''}{x_d' + x_2} \cdot e^{-\frac{t}{T_{d2}}} + (x_d - x_d'') \cdot i_{d2}(t);$$

$$I_{q2}(t) = (x_d - x_d'') \cdot i_{q2}(t); \quad (10)$$

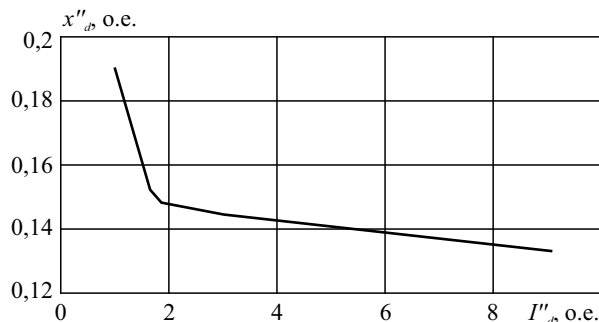
для однофазного КЗ:

$$I_{d1}(t) = \frac{2 \cdot x_d'' + x_0}{x_d + x_2 + x_0} + \frac{(2 \cdot x_d'' + x_0) \cdot (x_d - x_d')}{(x_d + x_2 + x_0) \cdot (x_d' + x_2 + x_0)} \times \quad (11)$$

$$\times e^{-\frac{t}{T_{d1}}} + \frac{x_d' - x_d''}{x_d' + x_2 + x_0} \cdot e^{-\frac{t}{T_{d1}}} + (x_d - x_d'') \cdot i_{d1}(t);$$

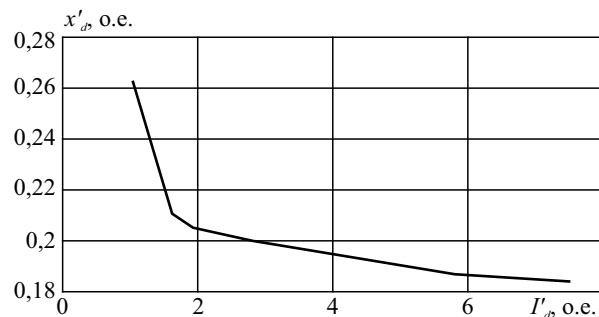
$$I_{q1}(t) = (x_d - x_d'') \cdot i_{q1}(t). \quad (12)$$

На рис. 4 и 5 приведены графики изменения токов  $I_d$  и  $I_q$  в долях тока возбуждения при холостом



**Рис. 6.** Зависимость продольного сверхпереходного индуктивного сопротивления от сверхпереходного тока

**Fig. 6.** Subtransient current as function of longitudinal subtransient inductive reactance



**Рис. 7.** Зависимость продольного переходного индуктивного сопротивления от переходного тока

**Fig. 7.** Transient current as function of longitudinal subtransient inductive reactance

ходе и номинальном напряжении, соответствующие полученным ранее значениям  $i_d$  и  $i_q$ .

Зависимости продольного сверхпереходного индуктивного сопротивления от сверхпереходного тока и продольного переходного индуктивного сопротивления от переходного тока представлены на рис. 6 и 7.

Приведенные зависимости показывают, что незначительное изменение сверхпереходного и переходного индуктивного сопротивления приводит к значительному росту значения тока короткого замыкания.

## Заключение

### Conclusion

Разработаны новые подходы к расчетам индуктивных сопротивлений в переходных режимах, позволяющие за счет повышения точности результатов получить значения токов короткого замыкания. Это даст возможность учесть значения токов короткого замыкания, возникающих при трехфазном, двухфазном и однофазном коротких замыканиях, на стадии

проектирования и расчета турбогенератора и проектирования релейных защит. Учет изменения индуктивных сопротивлений турбогенератора при переходных режимах позволяет достаточно точно оценить эти режимы и разработать меры по обеспечению устойчивой работы турбогенераторов.

## Список использованной литературы

1. Переходные процессы в электрических машинах и аппаратах и вопросы их проектирования: учеб. пособие для вузов / О.Д. Гольдберг, О.Б. Буль, И.С. Свириденко, С.П. Хелемская; Под ред. О.Д. Гольдберга. М.: Высшая школа, 2001. 512 с.
2. Титов В.В., Хуторецкий Г.М., Загородная Г.А. [и др.]. Турбогенераторы: монография / Под ред. Н.П. Иванова и Р.А. Лютера. Л.: Энергия. Ленингр. отд-ние, 1967. 894 с.
3. Газизова О.В., Соколов А.П., Малафеев А.В. К вопросу учета насыщения в математической модели промышленного генератора для расчета переходных режимов в системе электроснабжения сложной конфигурации // Электротехнические системы и комплексы. 2018. № 1. С. 40–47. DOI: 10.18503/2311-8318-2018-1(38)-40-47.
4. Non-invasive identification of turbo-generator parameters from actual transient network data / Hutchison G., Zahawi B., Harmer K., Gadoue S., Giaouris D. // IET Generation, Transmission & Distribution. 2015. Vol. 9, № 11. P. 1129–1136. DOI: 10.1049/iet-gtd.2014.0481.

## References

1. Transient processes and their design challenges for electric machines and equipment. Student's Guide / O. Goldberg, O. Bul, I. Sviridenko, S. Khelemskaya; under ed. of O. Goldberg. Moscow: Vyshaya shkola, 2001. 512 p. (in Russian).
2. Turbo-gensets: calculation & construction / V. Titov, G. Khutoretsky, G. Zagorodnaya et al. Leningrad: Energiya, 1967. 894 p. (in Russian).
3. Gazizova O., Sokolov A., Malafeyev A. Saturation in the mathematical model of industrial generator for transient-mode calculations of complex power grids // Electrotechnical Systems and Complexes. 2018. No. 1. P. 40–47 (in Russian). DOI: 10.18503/2311-8318-2018-1(38)-40-47.
4. Non-invasive identification of turbo-generator parameters from actual transient network data / G. Hutchison, B. Zahawi, K. Harmer, S. Gadoue, D. Giaouris // IET Generation, Transmission and Distribution. 2015. Vol. 9. No. 11. P. 1129–1136. DOI: 10.1049/iet-gtd.2014.0481.

## Сведения об авторе

Доржиева Бэлигма Станиславовна, инженер-конструктор 3-й кат. СКБПТ завода «Электросила» АО «Силовые машины». Адрес: 196105, Россия, Санкт-Петербург, Московский пр., д. 158. Тел.: +7 (812) 676-42-00 (вн. тел.: 2-43-40). E-mail: Dorzhieva\_BS@power-m.ru.

## About the author

Beligma S. Dorzhieva, 3rd Category Design Engineer, Special Design Bureau for Turbo-Gensets, Elektrosila plant, Power Machines JSC. Address: 158, Moskovskiy pr., St. Petersburg, Russia, post code 196105. Tel.: +7 (812) 676-42-00. E-mail: Dorzhieva\_BS@power-m.ru.

Поступила / Received: 15.11.21  
Принята в печать / Accepted: 22.11.21  
© Доржиева Б.С., 2021