

Новый бустерный синхротрон на энергию электронов 2,5 ГэВ для Курчатовского источника синхротронного излучения

А. С. Смыгачева, В. Н. Корчуганов, Е. А. Фомин

Проект глубокой модернизации действующего ускорительно-накопительного комплекса и создания на базе его инфраструктуры источника синхротронного излучения 3-го поколения разрабатывается в НИЦ «Курчатовский институт». Модернизация включает полную замену основного накопителя электронов и инжекционного комплекса. Бустерный синхротрон как часть нового инжекционного комплекса должен обеспечить надежную и стабильную работу нового основного накопителя – источника синхротронного излучения. В работе представлена магнито-оптическая структура нового бустерного синхротрона и ее основные параметры.

Ключевые слова: ускоритель заряженных частиц, синхротрон, магнито-оптическая структура, магнитные элементы, электронный пучок, натуральный эмиттанс.

DOI: 10.51368/1996-0948-2021-5-99-105

Введение

Курчатовский источник синхротронного излучения (СИ) состоит из основного накопительного кольца на энергию 2,5 ГэВ, бустерного синхротрона на энергию 450 МэВ и линейного ускорителя на энергию 80 МэВ [1]. Действующий основной накопитель является источником 2-го поколения и имеет эмиттанс электронного пучка 98 нм×рад. Ускорительно-накопительный комплекс в нынешней конфигурации и с существующими параметрами работает уже более 20 лет. Улучшение потребительских качеств пучков синхротронного излучения связано с модернизацией всего комплекса и переводом основного накопителя в разряд источников 3-го поколения.

Необходимость увеличения яркости и интенсивности излучения требует создания новой

магнито-оптической структуры с малым эмиттансом электронного пучка ($\sim 1 \div 10$ нм×рад) для основного накопителя. Особенностью структур с малым эмиттансом является большой натуральный хроматизм и, как следствие, меньшие динамические апертуры. Расширение спектральных возможностей излучения из накопителя путем постановки в прямолинейные промежутки сверхпроводящих вигглеров и ондуляторов с малым межполюсным зазором дополнительно ограничивает апертуру. Следствием малой апертуры в новом источнике синхротронного излучения может являться существенное уменьшение эффективности инжекции электронного пучка, выпускаемого из бустерного синхротрона с большим натуральным эмиттансом.

Необходимость обеспечения долговременной пространственной и временной стабильности фотонных пучков диктует высокие требования к температурной стабилизации основного кольца – $\pm 0,1$ °С. Данные требования можно достичь при неизменных токах в магнитных элементах и ускоряющей ВЧ-структуре, т. е. при работе накопителя на одном уровне энергии. Дополнительно, при инжекции на полной энергии и периодическом «подкоплении» электронного пучка из бустерного синхротрона появляется возмож-

Смыгачева Антонина Сергеевна, зам. нач. лаб.

E-mail: sasmuga@mail.ru

Корчуганов Владимир Николаевич, зам. руководителя
ККСНИ, д.ф.-м.н.

Фомин Евгений Александрович, нач. отдела, к.ф.-м.н.
НИЦ «Курчатовский институт».

Россия, 123182, Москва, пл. Академика Курчатова, 1.

Статья поступила в редакцию 02 августа 2021 г.

© Смыгачева А. С., Корчуганов В. Н., Фомин Е. А.,
2021

ность проведения экспериментов на синхротронном излучении без перерывов на повторное накопление электронов и подъем энергии в основном накопителе.

Указанные обстоятельства не позволяют использовать ныне действующий бустерный синхротрон с эмиттансом выпускаемого электронного пучка 800 нм·рад и энергией 450 МэВ в качестве инжектора для основного накопителя с новой магнито-оптической структурой. Надежную и стабильную работу модернизированного основного накопителя обеспечит новый инжекционный комплекс, в частности, входящий в него бустерный синхротрон.

Магнито-оптическая структура бустерного синхротрона

Новый бустерный синхротрон основан на модифицированной магнито-оптической структуре Часман-Грина [2]. Кольцо бустера состоит из 12 супер-периодов. Каждый супер-период содержит по два поворотных магнита, по пять квадрупольных линз (три семейства) и по четыре секступольные линзы (два семейства) для коррекции натурального хроматизма.

Общее число магнитных элементов составляет 24 дипольных магнита, 60 квадрупольных магнитов, 48 секступольных магнитов. Дополнительно предполагается постройка 24 корректирующих магнитов для коррекции искажений замкнутой орбиты.

Кольцо бустера имеет 12 прямолинейных промежутков длиной порядка 2 м. Два из них предназначены для размещения элементов системы инжекции и экстракции электронного пучка соответствующих каналов перепуска из линейного ускорителя в бустерный синхротрон и из бустерного синхротрона в основной накопитель. Один промежуток предназначен для размещения ускоряющего ВЧ-резонатора. Остальные промежутки свободны для размещения оборудования диагностики пучка. Бустерный синхротрон имеет периметр, приблизительно, равный 110,9 м и будет располагаться в одном тоннеле с основным накопителем.

Основные параметры бустерного синхротрона представлены в таблице. Магнито-оптическая структура и оптические функции изображены на рис. 1. На рисунке отмечены: дипольный магнит – BM, квадрупольный магнит – Q1, Q2, Q3, секступольный магнит – SF, SD.

Таблица

Параметры бустерного синхротрона

Энергия	200 МэВ÷2,5 ГэВ	
Количество супер-периодов	12	
Периметр, м	110,873	
Частота рабочего цикла, Гц	1	
Ток пучка, мА	10÷15	
Частота обращения, МГц	2,704	
Частота ВЧ-системы, МГц	181,168	
Бетатронные частоты: гор. Q_x /верт. Q_y	7,178/4,367	
Натуральный хроматизм: гор. ξ_x /верт. ξ_y	-9,0/-8,6	
Коэффициент уплотнения орбит, α	0,01	
Горизонтальный эмиттанс ϵ_x при 2,5 ГэВ, нм·рад	43,4	
Разброс по энергии σ_E/E при 2,5 ГэВ, отн. ед.	$8,4 \times 10^{-4}$	
Потери энергии за оборот U_0 при 2,5 ГэВ, кэВ	539	
Времена радиационного затухания:	200 МэВ	2,5 ГэВ
горизонтальных колебаний τ_x	6,9 с	3,53 мс
вертикальных колебаний τ_y	6,7 с	3,43 мс
продольных колебаний τ_s	3,3 с	1,69 мс

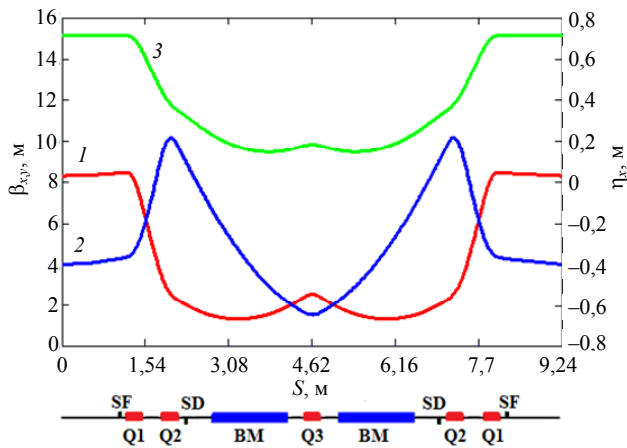


Рис. 1. Оптические функции на длине одного супер-периода (кривая 1 – горизонтальная бета-функция; 2 – вертикальная бета-функция; 3 – горизонтальная дисперсионная функция).

Оптимизация магнито-оптической структуры является задачей поиска оптимальных значений самосогласованных величин, а именно: натурального эмиттанса, динамической апертуры и рабочей точки на частотной диаграмме устойчивости. Структура бустера обеспечивает натуральный эмиттанс 43,4 нм×рад на энергии 2,5 ГэВ. Рабочая точка имеет значения $Q_x = 7,178$, $Q_y = 4,367$ и, что важно, располагается вдали от машинных резонансов $m\nu_x \pm n\nu_y = 12p$, где m, n, p – целые числа. Динамическая апертура идеальной (без ошибок) структуры бустерного синхротрона лежит в интервалах: для горизонтального направления $[-93, 129]$ мм, для вертикального направления $[-105, 105]$ мм, – и превышает внутренние размеры вакуумной камеры 20×50 мм (в×ш).

Расчетные значения натурального хроматизма бустерного синхротрона составляют для горизонтального и вертикального направлений соответственно $-9,0$ и $-8,6$. Натуральный хроматизм возникает в синхротроне за счет квадрупольных полей фокусирующих линз (квадрупольных магнитов) [3]. Хроматизм компенсируется полями специально вводимых в структуру секступольных магнитов. Силы секступольных магнитов, необходимые для компенсации натурального хроматизма в бустерном синхротроне, равны: для горизонтального направления $-1,076$ 1/м², для вертикального направления $-2,582$ 1/м².

Основными эффектами, определяющими время жизни электронного пучка в накопителях заряженных частиц, являются явление

рассеяние на ядрах остаточного газа, квантовые флуктуации излучения [4] и эффект Тушека [5]. В случае бустерного синхротрона основной вклад во время жизни вносит упругое рассеяние на ядрах остаточного газа. При этом время жизни минимально на энергии инжекции. Согласно оценкам, время жизни составляет 45 с на энергии 200 МэВ и при давлении газа 100 нТорр. Такое время жизни является вполне достаточным для нормальной работы бустерного синхротрона, так как сразу после инжекции электронный пучок ускоряется от энергии 200 МэВ до 2,5 ГэВ за 0,5 с. Однако с целью уменьшения наведенной активности необходимо обеспечить среднее давление остаточных газов в вакуумной камере не выше 10 нТорр. Отметим, что в режиме работы бустерного синхротрона с одним сгустком со средним током 10 мА минимальное время жизни, определяемое эффектом Тушека, составляет 2 ч и соответствует энергии 1,6 ГэВ.

Влияние ошибок

Ошибки выставки магнитных элементов, неоднородность магнитных полей приводят к искажениям магнито-оптической структуры, к смещению равновесной орбиты и рабочей точки, к уменьшению динамической апертуры. Расчет структуры бустерного синхротрона с учетом и без ошибок был выполнен в программе MAD-X [6]. При моделировании закладывалось 1000 наборов случайных ошибок, имеющих гауссово распределение, ограниченное интервалом $\pm 2\sigma$. В результате были определены значения допустимых ошибок для магнитных элементов бустерного синхротрона: смещение элементов в трех плоскостях – 0,2 мм, поворот элементов относительно трех осей – 0,1 мрад, ошибка дипольного поля – 10^{-4} , относительная неоднородность дипольного поля – 2×10^{-4} , ошибка градиента квадрупольного поля – 5×10^{-4} .

Согласно результатам моделирования, средние значения отклонения равновесной орбиты для 1000 наборов произвольно заданных ошибок составили: в горизонтальном направлении – 7,5 мм, в вертикальном направлении – 6,9 мм. Наибольший вклад в искажение орбиты вносят ошибки выставки

квадрупольных магнитов в горизонтальном и вертикальном направлениях.

Корректировать орбиту в бустерном синхротроне предполагается с помощью 24 корректирующих магнитов и 24 катушек коррекции поля дипольных магнитов. Коррекция орбиты проводилась в программе MAD-X с помощью алгоритма SVD (Singular Value Decomposition) [7]. Среднее значение максимальной силы корректирующих магнитов для горизонтального направления составило 0,3 мрад, для вертикального направления – 0,48 мрад. Максимальная сила корректирующих катушек для горизонтального направления составляет 0,19 мрад. Сила соответствует углу поворота траектории частицы в магните. После коррекции остаточные отклонения орбиты составили: среднее значение по горизонтали – 0,12 мм, среднее значение по вертикали – 0,14 мм.

Согласно расчетам, смещение рабочей точки происходит в сторону разностных резонансов 3-го и 4-го порядков, которые не представляют опасности при работе бустерного синхротрона. Расположение рабочей точки на диаграмме частот изображено на рис. 2: рабочая точка идеальной структуры отмечена крестом; смещенная рабочая точка отмечена красными точками для каждого из 1000 наборов произвольно заданных ошибок. Наибольший вклад в разброс частот вносят ошибки выставки квадрупольных и секступольных магнитов в горизонтальном направлении, ошибки градиента квадрупольного поля и наличие градиента дипольного поля. При этом динамическая апертура с учетом ошибок остается больше геометрической (см. рис. 3).

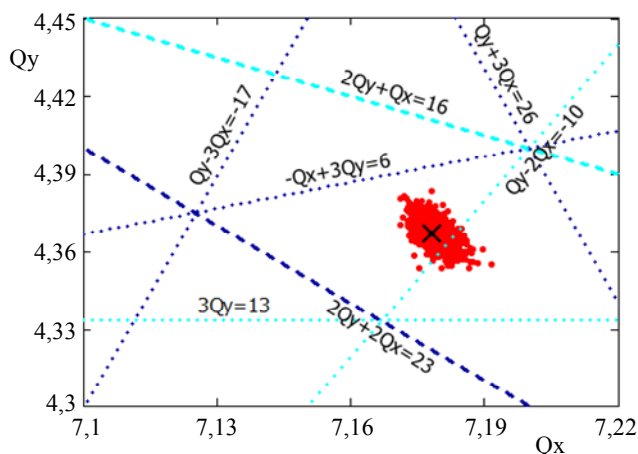


Рис. 2. Рабочая точка на диаграмме устойчивости.

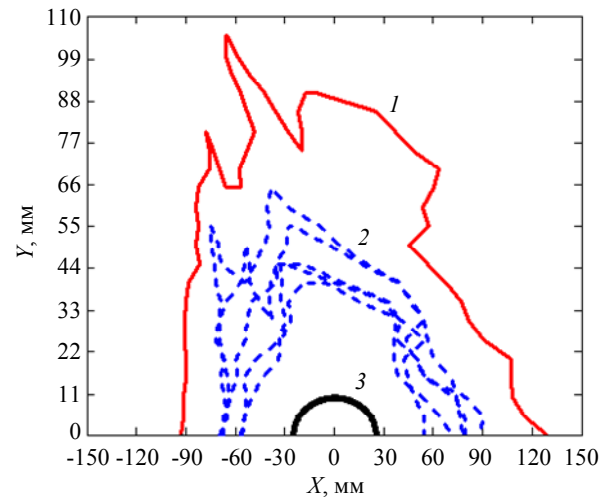


Рис. 3. Динамическая апертура бустерного синхротрона (кривая 1 – для идеальной структуры; 2 – для структуры с 5 наборами ошибок; 3 – границы вакуумной камеры).

Магнитные элементы и источники питания

Бустерный синхротрон будет работать в циклическом режиме с частотой 1 Гц в диапазоне энергий от 200 МэВ до 2,5 ГэВ. Наличие переменных магнитных полей определяет технологию изготовления магнитных элементов бустерного синхротрона. Ядро каждого магнита будет шихтованным, т. е. будет набрано из пластин магнитной стали толщиной 1 мм. Для обеспечения высокого качества магнитного поля профиль каждой пластины должен быть изготовлен с точностью $10 \div 20$ мкм. С такой же точностью должна быть выдержана вся внутренняя геометрия яра магнита при его сборке. В настоящее время отработанной технологией изготовления пластин с требуемой геометрией является штамповка.

Дипольный магнит бустерного синхротрона должен обеспечивать угол поворота траектории частицы в 15 градусов во всем диапазоне рабочих энергий. При этом магнитное поле в межполюсном зазоре меняется от 0,1 до 1,3 Тл. Межполюсный зазор составляет 24 мм. Для достижения высокого качества магнитного поля и требуемого угла поворота геометрия дипольного магнита определяется при двумерном и трехмерном моделировании магнитных полей. Длина магнита по магнитному полю (эффективная длина), необходимая для получения указанного угла поворота, составляет 1679,363 мм при радиусе изгиба 6415 мм и длине яра магнита 1674,6 мм.

Квадрупольные магниты бустерного синхротрона сгруппированы в три семейства: два семейства фокусирующих линз и одно семейство дефокусирующих линз. Магниты должны обеспечивать необходимые градиенты магнитного поля при эффективной длине, равной 320 мм. Максимальные градиенты квадрупольного поля при энергии 2,5 ГэВ составляют 21,12 Тл/м, 20,89 Тл/м и –23,55 Тл/м соответственно для каждого семейства. Радиус окружности, вписанной между полюсами квадрупольного магнита, составляет 25 мм. Длина ярма магнита равна 300 мм.

Секступольные магниты бустерного синхротрона поделены на два семейства: линзы для коррекции горизонтального хроматизма и линзы для коррекции вертикального хроматизма. Требуемые градиенты секступольного поля при энергии 2,5 ГэВ составляют 90 Тл/м² и –215 Тл/м² соответственно. Эффективная длина и длина ярма магнита равны 100 мм. Радиус окружности, вписанной между полюсами секступольного магнита, равен 30 мм.

Корректирующий магнит совмещает в себе функции горизонтального и вертикального корректора и представляет собой рамочный дипольный магнит. Корректор должен обеспечить максимальный угол поворота траектории частиц в 0,48 мрад при длине ярма магнита 100 мм.

Для питания магнитных элементов бустерного синхротрона требуются источники постоянного тока. Эти источники должны работать с нагрузками, носящими индуктивный характер и имеющими постоянные времени около 0,5 с для дипольных магнитов, около 0,2 с для квадрупольных и для секступольных магнитов, 20÷50 мс для корректирующих магнитов. Бустерный синхротрон будет работать в циклическом режиме, поэтому ток источника на обоих уровнях и во время подъема энергии пучка должен стабилизироваться с высокой точностью. Кроме того, источники должны иметь достаточно высокое выходное напряжение для форсированного увеличения и уменьшения тока в магнитах и обеспечивать работу с периодически осциллирующим повышенным напряжением обоих полярностей.

Катушки магнитных элементов включаются в электрическую сеть последовательно по семействам. Возможно разбиение магнитов

по группам внутри одного семейства. Например, питать от одного источника не все 24 дипольных магнита, а 12 или 6 магнитов. Такой подход снижает требования на мощностные характеристики источников питания и повышает безопасность работы установки в целом. Окончательные решения о схеме подключения магнитов будут приняты на стадии инженерных проработок коммуникаций ускорительно-накопительного комплекса.

ВЧ-система бустерного синхротрона

ВЧ-система бустерного синхротрона полагается аналогичной ныне действующей на основном накопителе Курчатовского источника синхротронного излучения [8]. Она строится на одном ВЧ-генераторе и одном ускоряющем резонаторе. Рабочая частота ВЧ-системы бустера принимается равной частоте ВЧ-системы основного накопителя – 181 МГц, которая соответствует 67 гармонике частоты обращения в бустере (2,704 МГц). Такой выбор является оптимальным с точки зрения наилучшей синхронизации обоих ускорителей, перепуска электронных сгустков в заранее заданные сепаратрисы без потерь и раскочки когерентных колебаний.

Основой ВЧ-генератора является выходной каскад с ламповым модулем (тетродом). Долговременная рабочая выходная мощность ВЧ-генератора равна 200 кВт в непрерывном режиме на частоте в диапазоне от 180 до 182 МГц. Передача мощности от ВЧ-генератора к резонатору осуществляется по 75-омному коаксиальному волноводу (фидеру). Резонатор бустерного синхротрона имеет конструкцию, аналогичную конструкции резонаторов действующего основного накопителя. Рабочей модой колебаний резонатора на частоте 181 МГц является волна вида E010. Особенностью конструкции является наличие плунжеров автоматической регулировки частоты основной моды колебаний и плунжеров ручной регулировки частот высших мод колебаний. Стабильность работы ВЧ-системы под нагрузкой током пучка обеспечивается системой обратной связи, с помощью которой возможно задавать и фиксировать напряжение на резонаторе и разницу фаз между током фидера и напряжением на резонаторе.

ВЧ-система бустерного синхротрона обеспечит захват в режим ускорения электронов с током $10 \div 15$ мА и энергетическим разбросом порядка $\pm 1,5\%$ при инжекции пучка из линейного ускорителя и энергетический акцептанс в пределах $0,5\%$ на энергии 2,5 ГэВ для установления разумного времени жизни пучка, также компенсирует потери энергии электронами на синхротронное излучение. Энергия потерь за оборот составляет 22,1 эВ на 200 МэВ и 538,7 кэВ на 2,5 ГэВ.

Заключение

Магнито-оптическая структура бустерного синхротрона удовлетворяет требованию размещения синхротрона в одном тоннеле с основным накопителем – источником СИ. Она состоит из 12 супер-периодов, каждый из которых обладает зеркальной симметрией относительно центра. Такая структура заметно уменьшает силу машинных резонансов в рабочей области бетатронных частот. Магнитная структура является устойчивой к разного рода ошибкам магнитного поля в пределах допустимых значений. Структура обладает большой динамической апертурой при скомпенсиро-

ванном натуральном хроматизме и малым натуральным эмиттансом, что необходимо и достаточно для эффективного перепуска электронного пучка из бустерного синхротрона в основной накопитель при минимальных потерях частиц.

ЛИТЕРАТУРА

1. Korchuganov V., Belkov A., Fomin Y., Kaportsev E., Krylov Yu., Moiseev V., Moseev K., Moseiko N., Odintsov D., Pesterev S., Smygacheva A., Stirin A., Ushakov V., Ushkov V., Valentinov A., Vernov A. / Proceedings of the 26th Russian Particle Accelerator Conference (Protvino, 2018). P. 81–83.
2. Chasman R., Green G. K., Rowe E. M. // IEEE Trans. Nucl. Sci. 1975. Vol. NS-22. № 3. P. 1765.
3. Wiedemann H. Particle Accelerator Physics. – New York: Springer, 2007.
4. Коломенский А. А., Лебедев А. Н. Теория циклических ускорителей. – М.: Физматгиз, 1962.
5. Брук Г. Циклические ускорители заряженных частиц. – М.: Атомиздат, 1970.
6. The MAD-X website. <http://madx.web.cern.ch/madx/>
7. Herr W. Implementation of new closed orbit correction procedures in the MAD-X program. – CERN-SL-2002-48 (AP), Geneva, 2002.
8. Sedlyarov I. K., Arbuzov V. S., Gorniker E. I., Kondakov A. A., Krutikhin S. A., Kurkin G. Ya., Kuptsov I. V., Motygin S. V., Petrov V. M., Pilan A. M., Tribendis A. G., Vinokurov N. A. / Proceedings of the 23rd Particle Accelerator Conference (Vancouver, 2009). P. 2018–2020.

PACS: 29.20.dk

2.5 GeV booster synchrotron for a new Kurchatov synchrotron radiation source

A. S. Smygacheva, V. N. Korchuganov, and E. A. Fomin

National Research Center «Kurchatov Institute»
1 Akademik Kurchatov sq., Moscow, 123182, Russia
E-mail: sasmyga@mail.ru

Received August 02, 2021

The Project of complete modernization of a current accelerator complex and the making of the 3-d generation light source is in progress in the NRC «Kurchatov Institute». A new booster synchrotron is part of the injection complex for a new synchrotron light source. It must ensure reliable and stable operation of the upgraded main storage ring. The paper presents the lattice of a new booster synchrotron and its main parameters.

Keywords: particle accelerator, synchrotron, lattice design, magnets, electron beam, natural emittance.

DOI: 10.51368/1996-0948-2021-5-99-105

REFERENCES

1. V. Korchuganov, A. Belkov, Y. Fomin, E. Kaportsev, Yu. Krylov, V. Moiseev, K. Moseev, N. Moseiko, D. Odintsov, S. Pesterev, A. Smygacheva, A. Stirin, V. Ushakov, V. Ushkov, A. Valentinov, A. Vernov, in *Proc. of the 26th RuPAC* (Protvino, 2018). pp. 81–83.
2. R. Chasman, G.K. Green, E. M. Rowe, *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **NS-22** (3), 1765 (1975).
3. H. Wiedemann, *Particle Accelerator Physics* (Springer, New York, 2007).
4. A. A. Kolomensky and A. N. Lebedev, *Theory of Cycle Accelerators* (Fizmatgiz, Moscow, 1962) [in Russian].
5. H. Bruck, *Accélérateurs circulaires de particules: introduction à la théorie* (Presses Universitaires de France, 1966; Atomizdat, Moscow, 1970).
6. The MAD-X website. <http://madx.web.cern.ch/madx/>
7. W. Herr, *Implementation of new closed orbit correction procedures in the MAD-X program* (CERN-SL-2002-48 (AP), Geneva, 2002).
8. I. K. Sedlyarov, V. S. Arbuzov, E. I. Gorniker, A. A. Kondakov, S. A. Krutikhin, G. Ya. Kurkin, I. V. Kuptsov, S. V. Motygin, V. M. Petrov, A. M. Pilan, A. G. Tribendis, and N. A. Vinokurov, in *Proc. of the 23rd PAC* (Vancouver, 2009). pp. 2018–2020.