

С. С. Бежитский, Е. А. Головенко, В. А. Горемыкин, Е. С. Кинев, Д. В. Хохлов

ПОВЫШЕНИЕ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ИНДУКЦИОННЫХ УСТАНОВОК СКВОЗНОГО НАГРЕВА ЦВЕТНЫХ МЕТАЛЛОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ ОПТИМИЗАЦИИ*

Рассмотрены возможности повышения энергетической эффективности преобразования электрической энергии в тепловую при сквозном нагреве цветных металлов в многослойных соленоидальных индукторах.

Ключевые слова: глобальные методы оптимизации, индукционный нагрев, численное моделирование, технологическая и энергетическая эффективность.

Из теории сквозного индукционного нагрева цилиндрической загрузки в многослойных соленоидальных индукторах известно, что коэффициент полезного действия индукционного нагрева цветных металлов зависит от электрофизических свойств и соотношения параметров длинного индуктора и загрузки [1]:

$$\eta_n = \frac{1}{1 + \frac{d_1}{d_2} \cdot \sqrt{\frac{\rho_1}{\rho_2}}}, \quad (1)$$

где d_1, d_2 – диаметры индуктора и загрузки соответственно, м; ρ_1, ρ_2 – удельное электрическое сопротивление материала индуктора и загрузки соответственно, Ом/м.

Отсутствие магнитных свойств и высокая удельная электропроводность определяют предельно высокий коэффициент полезного действия при сквозном нагреве алюминия и меди в пределах 50%. Но это ограничение характерно только для однослойных соленоидальных индукторов. Потери в многослойной обмотке при выборе оптимального сочетания индуктирующего провода могут быть заметно меньше, чем

в однослойных обмотках. В [2] утверждается, что оптимальной является обмотка из плотно намотанных сплошных проводников прямоугольного сечения толщиной

$$a = \frac{1,32 \cdot \Delta_1}{\sqrt{n}}, \quad (2)$$

где Δ_1 – глубина проникновения тока в материал проводника ($\Delta_1 \approx 10$ мм), мм; n – число слоев обмотки медного индуктирующего провода.

На основе расчетов В. С. Немков делает вывод, что если не учитывать роста диаметра витков от слоя к слою, то потери в многослойной обмотке длинного индуктора будут примерно в \sqrt{n} раз меньше, чем у оптимальной однослойной обмотки при том же токе, а следовательно, той же мощности в загрузке. Введение переменной и уменьшающейся к внутренним слоям толщины провода (рис. 1, слева) позволяет снизить потери еще на 13%. В. А. Буканин и В. С. Немков [2] предлагают увеличить ширину витков в многослойной обмотке к внутренним слоям (рис. 1, справа), что также должно привести к энергетической эффективности процесса нагрева.

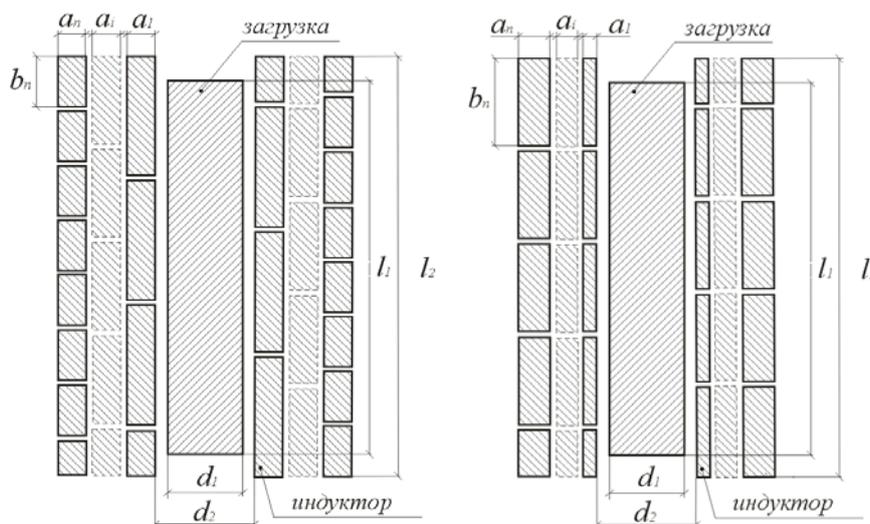


Рис. 1. Многослойная цилиндрическая обмотка с переменной шириной и толщиной проводников по слоям:

l_1, l_2 – длина индуктора и загрузки; d_1, d_2 – диаметр загрузки и внутренний диаметр индуктора; $a_1, \dots, a_p, \dots, a_n$ – высота 1-го, ..., i -го, ..., n -го проводника; $b_1, \dots, b_p, \dots, b_n$ – ширина 1-го, ..., i -го, ..., n -го проводника

*Работа выполнена в результате реализации проекта «Создание новой технологии нагрева цветных металлов с повышенными технико-экономическими показателями», реализованного силами ООО «Резонанс» (Красноярск) и ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет» при поддержке КГАУ «Красноярский региональный фонд поддержки научной и научно-технической деятельности» (код проекта КФ-28) при активном участии ООО «Красноярский металлургический завод».

Оптимизация конструктивного исполнения многослойной соленоидальной обмотки из плоского провода с внешним охлаждением для нагрева стали была опробована научно-исследовательским центром Британского совета по электричеству (рис. 2). Несмотря на существенный эффект (рис. 3), разработка так и не получила широкого применения в промышленности. Сложность изготовления и эксплуатации такого индуктора нецелесообразна в силу и так довольно высокого КПД при нагреве стали, но эти результаты были бы более приемлемы при нагреве цветных металлов при повышении КПД на 20...40 % по сравнению с существующими установками индукционного нагрева с установленной мощностью более 100 кВт. Результаты опытно-промышленных испытаний представлены на рис. 3.

Существенного улучшения энергетической эффективности можно добиться за счет параметрической оптимизации сечения индуктирующего провода по слоям методами глобальной оптимизации, что и было предпринято авторами.



Рис. 2. Многослойная соленоидальная катушка для нагрева стали

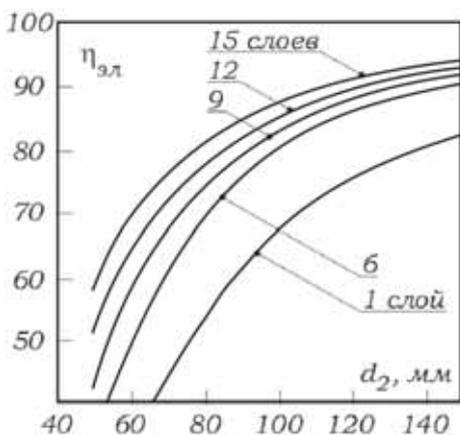


Рис. 3. Графики изменения КПД в зависимости от конструкции нагревателя

Постановка задачи. В качестве объекта исследования в данной работе была выбрана индукционная нагревательная установка периодического действия ИНМ-75. Установка предназначена для нагрева алюминиевых заготовок перед прессованием для получения алюми-

нового профиля и труб. Общий вид индуктора представлен на рис. 4. Схема включения индукционного нагревателя представляет собой вариант питания трехфазной активно-индуктивной нагрузки на ООО «Красноярский металлургический завод».

Секции индуктора ИНМ-75 (I_1, I_2, I_3) подключены через вольтдобавочные трансформаторы (ВДТ) марки ОСУ-100/0,5 в трехфазную сеть 380В по автотрансформаторной схеме. Мощность на индуктор подается включением тиристорного выключателя ВР. Для ступенчатого регулирования напряжения на индукторе первичная обмотка на ВДТ подключается в сеть, а вторичная обмотка соединяется последовательно с резонансным контуром индукционного нагревателя. Таким образом, включая ВДТ согласно или встречно с сетевым напряжением, получают широкий диапазон изменения напряжения на индукторе. Автотрансформаторная схема включения предполагает, что напряжение питающей сети прикладывается на часть витков индуктора (для трех секций индуктора на рис. 5: I_1, I_2, I_3 – обмотки трех фаз индуктора), а компенсирующую батарею конденсаторов БК (для трех секций индуктора на рис. 5: $БК_1, БК_2, БК_3$ – батареи конденсаторов трех фаз индуктора) подключают к крайним выводам индуктора, т. е. на полное число витков. За счет автотрансформаторного эффекта напряжение на индукторе и на конденсаторной батарее будет больше, чем напряжение источника питания. Использование ВДТ и автотрансформаторной схемы позволит увеличить напряжение на индукторе, что в конечном счете при согласовании индуктора с сетевым напряжением дает возможность значительно увеличить количество витков многослойной обмотки и приблизиться к оптимальному варианту исполнения обмотки.

Основным недостатком индукционного нагревателя для нагрева алюминиевых заготовок является низкая энергетическая эффективность. Коэффициент полезного действия индукторов ИНМ не превышает 30 %. Поэтому авторами предложено на основании рекомендаций В. С. Немкова использовать обмотку из плотно намотанных сплошных проводников прямоугольного сечения переменного сечения по слоям. Однако проектирование такого индуктора требует использования методов параметрической оптимизации обмотки индуктора.



Рис. 4. Общий вид трехфазного индукционного нагревателя ИНМ-75

Для решения задач оптимизации индуктора ИНМ-75 в первую очередь необходимо определиться с критерием оптимальности, являющимся функцией от параметров оптимизации. В качестве параметров оптимизации принимались следующие геометрические и энергетические параметры индукционного нагревателя: количество слоев обмотки $N_{сл}$, количество витков в слое $w_{сл}$, высота h_n и ширина l_n индуктирующего провода возможно переменного по слоям, частота f питающего напряжения U . Для этих параметров необходимо записать математическое выражение, являющееся целевой функцией.

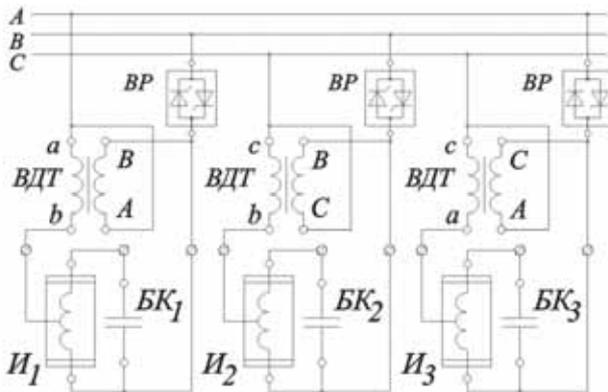


Рис. 5. Электрическая схема замещения трехфазного индукционного нагревателя ИНМ-75 с ДВТ

Эффективность процесса нагрева алюминиевой заготовки в индукционном нагревателе можно оценить по коэффициенту полезного действия установки. Но зачастую помимо высокого КПД необходимо, чтобы выполнялось условие согласования параметров нагрузки U_n с параметрами источника питания по напряжению, а также условие ограничения допустимой плотности тока в индуктирующем проводе (трубке) индуктора. Универсального подхода к решению такой мультикритериальной задачи не существует, так как ни один алгоритм оптимизации не может оптимизировать одновременно несколько целевых функций. Тем не менее высоких результатов при оптимизации можно достичь, используя многокомпонентную целевую функцию следующего вида:

$$F_n(x) = k_1 \left\{ \frac{1 - \eta_n}{1} \right\} + k_2 \left\{ \frac{|U_n - U_n|}{U_n} \right\} + k_3 \left\{ \frac{\delta - \delta_n}{\delta} \right\} \rightarrow \min, \quad (3)$$

где k_1, k_2, k_3 – весовые коэффициенты для каждого из критериев оптимизации; U_n – целевое значение напряжения, В; U_n – текущее значение напряжения, В; δ – целевое значение плотности тока в проводе индуктора, А/мм²; δ_n – текущее значение плотности тока в проводе индуктора, А/мм²; η_n – текущее значение КПД.

Значения весовых коэффициентов выбираются с учетом условий, а также степени значимости отдельной составляющей критерия оптимизации. Сумма весовых коэффициентов всегда должна быть равна 1. Если не учитывается какая-либо составляющая целевой функции, значение весового коэффициента при ней равняется нулю.

Это используется, например, для частного случая, когда пренебрегаем ограничением по плотности тока в индуктирующем проводе или напряжением питания индуктора.

Для определения численного значения целевой функции необходимо производить расчет электромагнитного поля (ЭМП) в системе «индуктор–загрузка» [3].

Решая систему уравнений Максвелла относительно векторного магнитного потенциала \vec{A} , получаем уравнение для расчета характеристик ЭМП:

$$\Delta \vec{A} - \mu_0 \mu_r \gamma \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} = 0, \quad (4)$$

где γ – удельная электрическая проводимость, См/м; μ_0 – магнитная постоянная, Гн/м; μ_r – относительная магнитная проницаемость (для алюминия $\mu_r = 1$); A – векторный магнитный потенциал.

При численном математическом моделировании осесимметричных индукторов достаточно полную картину физических процессов в различных зонах системы «индуктор–загрузка» может дать двумерная математическая модель. Путем двумерного анализа получают корректные и надежные данные, на основе которых в дальнейшем формируются рекомендации для оптимального проектирования устройств индукционного нагрева [4].

Расчетная область системы «индуктор–загрузка» приведена на рис. 6. В расчетную область входят: катушки индуктора (область 1), алюминиевая загрузка (область 2), магнитопровод (область 3). Вокруг них находится ограниченное воздушное пространство (область 4).

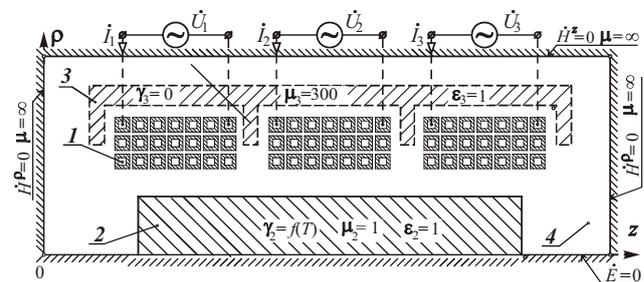


Рис. 6. Расчетная модель для анализа ЭМП в системе «индуктор–загрузка»

При построении расчетной модели приняты следующие допущения.

1. Индукционная система считается осесимметричным относительно оси z .
2. Магнитная проницаемость магнитопровода считается постоянной во всех направлениях: $\mu = 300$ (кривая намагничивания не задается).

Чтобы электромагнитное поле в расчетной области определялось однозначно, дополним уравнение (4) граничными условиями. Считаем, что расчетную область окружает среда с идеальными магнитными свойствами ($\mu = \infty$), тогда на поверхности, ограничивающей расчетную область, будут выполняться следующие условия:

– для касательной составляющей векторного магнитного потенциала

$$\frac{\partial \vec{A}_\tau}{\partial n} = 0; \quad (5)$$

– для нормальной составляющей векторного магнитного потенциала

$$\bar{A}_n = 0, \quad (6)$$

где n – нормаль поверхности расчетной области.

Данными для расчета ЭМП являются геометрические размеры индукционной системы, электрофизические свойства материалов, а также параметры питания обмоток индуктора.

Решение системы уравнений (4)–(6) в расчетной области производится методом конечных элементов в коммерческом программном пакете ANSYS Emag (академическая лицензия СФУ № 00144095). В результате численного моделирования ЭМП рассчитываются основные интегральные и дифференциальные параметры системы «индуктор–загрузка» [4], на основе которых высчитывается значение целевой функции (3).

Для нахождения глобальных минимумов целевых функций, подобных (3), уже давно хорошо зарекомендовали себя стохастические оптимизационные алгоритмы [3]. Ярким примером таких алгоритмов оптимизации является генетический алгоритм (ГА). Как показывает практика применения ГА, высокая размерность задач, нелинейность и многоэкстремальность не создает для него дополнительных трудностей.

В данной работе использовался стандартный ГА совместно с алгоритмом локального поиска. Выбранные алгоритмы и подход к оптимизации были реализованы с использованием разработанной программной системы на языке высокого уровня C++ Builder 6.0.

Задача оптимизации индуктора ИНМ-75 была разделена на две.

В первом случае подбирались оптимальные значения высоты или ширины индуктирующего провода в каждом слое обмотки, при соответственно оптимальной ширине или высоте всех витков и оптимальной частоте питания. В результате были сформированы два вектора оптимизации. Первый вектор $X_1 = (h_{n1} \dots h_{nk}, l_{n1}, f)$ – высота индуктирующего проводника в каждом k -м слое ($k = 1 \dots N_{\text{сл}}$), длина проводника во всех слоях и частота питающего напряжения. Второй вектор $X_2 = (l_{n1} \dots l_{nk}, h_{n1}, f)$ – длина индуктирующего проводника в каждом k -м слое, высота проводника во всех слоях и частота питающего напряжения.

Во втором случае проводилось исследование совместного влияния высоты и ширины индуктирующего провода на электрические потери в обмотке, при этом оптимальные значения высоты и ширины подбирались одновременно для каждого слоя. Вектора оптимизации имеют следующий вид: $X_3 = (h_{n1} \dots h_{nk}, l_{n1} \dots l_{nk}, f)$ – высота и ширина индуктирующего проводника в каждом k -м слое ($k = 1 \dots N_{\text{сл}}$), частота питающего напряжения.

Для каждого вектора оптимизации диапазон изменения длины находился в пределах от 10 до 100 мм, диапазон изменения высоты – в пределах от 2 до 10 мм, диапазон изменения частоты – в пределах от 50 до 1 000 Гц. Оптимальным решением задачи является вектор оптимизируемых параметров, обеспечивающий минимальное значение целевой функции.

Основные результаты. В результате проведения параметрической оптимизации индуктора по целевой функции получены различные данные. Например, при использовании в основе целевой функции только первого слагаемого (3) получен наибольший КПД, равный 0,71,

но при этом неприемлемо высокое значение напряжения на индукторе – около 4 000 В. Если оптимизационную процедуру проводить, учитывая все составляющие целевой функции, то можно получить конструктивные параметры обмотки, обеспечивающие согласование по напряжению с источником питания, достаточно высокий КПД, равный 0,596, и высокую эксплуатационную надежность, обусловленную ограничением плотности тока в индуктирующем проводе на уровне 8 А/мм² и возможно принудительное воздушное охлаждение. Однако оптимальным признан вариант, полученный при использовании только первых двух составляющих, по которому и проводился оптимизационный поиск для установки с водяным охлаждением при питании от серийного тиристорного преобразователя частоты, при этом диапазон изменения частоты задавался в пределах от 50 до 1 000 Гц, целевое значение напряжения принято равным 750 и 380 В.

Результаты оптимизационного поиска конструктивных параметров обмотки индукционного нагревателя по векторам $X_1 = (h_{n1} \dots h_{nk}, l_{n1}, f)$, $X_2 = (l_{n1} \dots l_{nk}, h_{n1}, f)$ и $X_3 = (h_{n1} \dots h_{nk}, l_{n1} \dots l_{nk}, f)$ с ограничением напряжения на уровне 380 В, представлены в табл. 1, 2 и 3 соответственно.

Проведенные расчеты не подтвердили теоретических предположений о том, что можно снизить электрические потери в обмотке индуктора, подобрав индуктирующий провод с оптимальной шириной, уменьшающейся к внешним слоям. Как раз наоборот, увеличение ширины проводника обмотки в каждом слое от центра катушки к периферии позволяет добиться лучших результатов в повышении энергетической эффективности индуктора. Тем не менее максимальный эффект получен при оптимальном выборе толщины индуктирующего проводника в каждом слое и ширины проводника, одинаковой для всех слоев.

С целью определения эффективности предложенной методики оптимального проектирования конструкции УИН было проведено ее сравнение с методикой проектирования многослойных обмоток, рекомендующей осуществлять выбор толщины проводника во всех слоях. В результате получены графики зависимости толщины проводника в слоях индуктора от числа слоев обмотки и частоты тока (рис. 7), после чего проведены расчеты энергетических характеристик индуктора по параметрам табл. 1, с той лишь разницей, что в каждом слое толщина проводника задавалась в соответствии с существующей методикой расчета УИН. В результате были получены различные КПД индуктора при изменении числа слоев обмотки. Рассмотрим зависимости КПД индуктора от количества слоев обмотки, полученные при использовании методики оптимального проектирования (кривая 1) и при использовании существующей методики (кривая 2) (рис. 8). Сравнение этих кривых показывает, что существующая методика позволяет получать конструкции, обеспечивающие довольно высокий КПД, но все же на 8...10 % ниже (кривая 3), чем при использовании представленных методов оптимального проектирования конструкции УИН. Так, КПД наилучшего варианта исполнения индуктора, полученного по методике оптимального проектирования, достигает значения 64,1 %, а КПД подобного индуктора, сечение проводников которого выбрано на основе выражения (2), составляет 55,1 %.

Таким образом, применение методов параметрической оптимизации позволило повысить энергетический КПД с 44,1 до 64,1 %. Сравнение эффективности оптимальной конструкции индуктора (64,1 %) с эффективностью индуктора, спроектированного в соответствии с рекомендациями по выбору высоты шины многослойных обмоток (55,1 %), доказывает преимущество методики оптимального проектирования. Определено, что увеличение ширины проводника обмотки в каждом слое от

центра катушки к периферии позволяет добиться лучших результатов в повышении энергетической эффективности индуктора.

Библиографические ссылки

1. Установки индукционного нагрева / А. Е. Слухоцкий, В. С. Немков, Н. А. Павлов, А. В. Бамунер. Л. : Энергоиздат, 1981.

Таблица 1

Результаты оптимизационного поиска по вектору X_1

Количество слоев, $N_{сл}$	Оптимизируемые параметры														$\eta_{эл}, \%$	$U_{н}, В$	
	$f, Гц$	$l_n, мм$	$h_{n1}, мм$	$h_{n2}, мм$	$h_{n3}, мм$	$h_{n4}, мм$	$h_{n5}, мм$	$h_{n6}, мм$	$h_{n7}, мм$	$h_{n8}, мм$	$h_{n9}, мм$	$h_{n10}, мм$	$h_{n11}, мм$	$h_{n12}, мм$			
Диапазон	2...12	50...500	10...100	2...10													
2	303	19	3,1	7,7	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	53,9	380	
3	263	28,5	2,5	3	8,3	–	–	–	–	–	–	–	–	–	56,8	380	
4	200	38	3,21	3,72	4,39	5,43	–	–	–	–	–	–	–	–	57,5	380	
5	360	72,6	2,2	2,56	3,04	5,15	5,82	–	–	–	–	–	–	–	58,8	380	
6	235	72	2,2	2,45	2,65	4,4	5,4	7,3	–	–	–	–	–	–	60,4	380	
7	171	67,6	2,05	2,06	2,1	2,95	3,5	4,15	5,86	–	–	–	–	–	62,3	380	
8	149	88,5	2,2	2,3	2,46	2,5	2,62	3,33	4,66	9,84	–	–	–	–	64,1	380	
9	106	84	2,22	2,28	2,6	2,81	2,81	4,11	4,78	4,98	5,97	–	–	–	58,5	380	
10	81	89,2	2,4	2,55	2,82	2,9	3,23	3,27	3,3	4,13	6,54	7,37	–	–	49,5	380	
11	71	96,8	2,1	2,1	2,35	2,51	2,8	3,03	3,1	3,33	3,8	4,1	5,16	–	48,6	380	
12	57	99	2,27	2,89	2,93	3,04	3,21	3,31	3,8	3,94	4,06	4,08	4,34	6,96	42,5	462	

Таблица 2

Результаты оптимизационного поиска по вектору X_2

$N_{сл}$	Оптимизируемые параметры														$\eta_{эл}, \%$	$U_{н}, В$	
	$f, Гц$	$h_n, мм$	$l_{n1}, мм$	$l_{n2}, мм$	$l_{n3}, мм$	$l_{n4}, мм$	$l_{n5}, мм$	$l_{n6}, мм$	$l_{n7}, мм$	$l_{n8}, мм$	$l_{n9}, мм$	$l_{n10}, мм$	$l_{n11}, мм$	$l_{n12}, мм$			
Диапазон	2...12	50...500	2...10	10...100													
2	376	3,5	17	31,6	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	56	380	
3	338	3,48	20,4	61,6	36,4	–	–	–	–	–	–	–	–	–	56,8	380	
4	340	2,51	61,4	36,9	41,9	64,9	–	–	–	–	–	–	–	–	58,8	380	
5	232	2,86	29,5	61,4	53,1	58,1	60,8	–	–	–	–	–	–	–	61,8	380	
6	245	2,34	59	47	94,3	65,4	88	55,4	–	–	–	–	–	–	60,8	380	
7	154	2,53	34,6	59,4	67,8	59,8	55,1	63,4	93,5	–	–	–	–	–	60,6	380	
8	167	2,26	46,9	72,3	66,9	72,6	93,3	83,2	74,7	97,1	–	–	–	–	62,4	380	
9	111	2,24	89	47	70,6	87,2	83,7	97,5	72,4	74,7	80,9	–	–	–	57,1	380	
10	95	2,27	61,1	61,5	60,8	74,2	89,6	93,3	93,3	89,9	96,4	73,1	–	–	53,6	380	
11	90	2,25	88,5	88,8	60,6	72,7	94,3	87,3	95,6	73	77,7	72,9	98,5	–	52,5	450	
12	76	2,62	61,2	88,8	85,5	85,9	69,9	91	75,2	90,1	90,7	97,8	90	89,8	49,8	473	

